

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**BETONARME ÇERÇEVELERİN GÜÇLENDİRİLMESİNDE KENDİNİ
MERKEZLEYEN ENERJİ DAĞITICI ÇAPRAZLARIN OPTİMİZASYONU**

Uğur ÖZMEN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2021

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**BETONARME ÇERÇEVELERİN GÜÇLENDİRİLMESİNDE KENDİNİ
MERKEZLEYEN ENERJİ DAĞITICI ÇAPRAZLARIN OPTİMİZASYONU**

Uğur ÖZMEN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2021

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETONARME ÇERÇEVELERİN GÜÇLENDİRİLMESİNDE KENDİNİ
MERKEZLEYEN ENERJİ DAĞITICI ÇAPRAZLARIN OPTİMİZASYONU

Uğur ÖZMEN
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 02/07/2021 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Okan ÖZCAN

Doç. Dr. Emre AKIN

Doç. Dr. İbrahim AYDOĞDU

ÖZET

BETONARME ÇERÇEVELERİN GÜÇLENDİRİLMESİNDE KENDİNİ MERKEZLEYEN ENERJİ DAĞITICI ÇAPRAZLARIN OPTİMİZASYONU

Uğur ÖZMEN

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Okan ÖZCAN

Temmuz 2021; 64 sayfa

Bu çalışmada betonarme çerçevelerin kendini merkezleyen enerji dağıtıcı çaprazlarla (KMEDÇ) güçlendirilmesi için optimizasyon tabanlı bir tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Bayrak tipi çevrimsel davranışa sahip KMEDÇ, yapıların rijitlik, dayanım, süneklik ve enerji sönümleme kapasitesini artırırken geri merkezleme mekanizmasıyla da kalıcı hasarları önleyebilme özelliğine sahiptir. KMEDÇ'nin, en düşük maliyet ve en yüksek enerji dağıtma kapasitesini sağlayacak tasarımının elde edilebilmesi için yapay arı kolonisi yöntemini kullanan bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu çalışma, Türk Bina Deprem Yönetmeliği'ne (TBDY) göre sismik performansı yetersiz, çok katlı yapıların zemin katını temsil edecek şekilde eksenel olarak yüklenen tek katlı, güçlü kolon zayıf kiriş koşulunu sağlayan ve sağlamayan 1.5, 3, 6 metre açıklıklara, 3 metre yüksekliğe sahip altı farklı çerçeve için gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışması ile tasarımı yapılan KMEDÇ'nin incelenen tüm betonarme çerçevelerin sismik performansını artırdığı ve TBDY sınırlı hasar performans seviyesini sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Sonuç olarak sismik performansı yetersiz betonarme çerçeve tipi yapıların KMEDÇ ile optimum olarak güçlendirilebileceği gösterilmiştir.

ANAHTAR KELİMELE: Betonarme çerçeve sistem, Deprem performansı, Doğrusal olmayan analiz, Kendini merkezleyen enerji dağıtıcı çapraz, Optimizasyon, Sismik güçlendirme

JÜRİ: Doç. Dr. Okan ÖZCAN

Doç. Dr. Emre AKIN

Doç. Dr. İbrahim AYDOĞDU

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF THE SELF-CENTERING ENERGY DISSIPATIVE BRACES FOR RETROFITTING REINFORCED CONCRETE FRAMES

Uğur ÖZMEN

Master Thesis, Civil Engineering Department

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Okan ÖZCAN

July 2021; 64 pages

In this study, an optimization-based design method for retrofitting reinforced concrete frames with self-centering energy dissipative (SCED) braces has been developed. SCED, which has a flag-shape hysteresis, increases the rigidity, strength, ductility, energy absorption capacity of the structures also has ability to prevent permanent damage with self-centering mechanism. An optimization study using the artificial bee colony method was carried out in order to design SCED with lowest cost and highest energy distribution capacity. This study was carried out for six different frames with 1.5, 3, 6 meters spans and 3 meters height, which are loaded axially to represent the ground floor of multi-story structures. The reinforced concrete frames which have insufficient seismic performance according to Turkish Building Earthquake Code-2018 (TBEC) are selected as providing and not providing strong-column weak-beam conditions. It was concluded that the SCED, which was designed with the optimization study, increased the seismic performance of all the reinforced concrete frames examined and provided the limited damage performance level of TBEC. As a result, it has been shown that reinforced concrete frame-type structures with insufficient seismic performance can be optimally retrofitted with SCED.

KEYWORDS: Nonlinear analysis, Optimization, Reinforced concrete frame structure, Seismic performance, Seismic retrofit, Self-centering energy dissipation brace,

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Okan ÖZCAN

Assoc. Prof. Dr. Emre AKIN

Assoc. Prof. Dr. İbrahim AYDOĞDU

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca ve bu tezin hazırlanmasında bilgi ve deneyimlerini esirgemeyerek her konuda destek olan değerli tez danışmanı hocam Doç. Dr. Okan ÖZCAN'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Optimizasyon konusunda bilgi ve birikimlerini paylaşarak bu çalışmayı tamamlamamda yardımcı olan Doç. Dr. İbrahim AYDOĞDU ile yüksek lisans eğitimimde katkısı olan Akdeniz Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ndeki tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Son olarak, her zaman sabır ve anlayışla benim yanımda olarak beni daima destekleyen aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	3
2.1. KMEDÇ Tasarımı ile İlgili Çalışmalar	3
2.2. Betonarme Yapılarda KMEDÇ'nin İncelenmesi	4
2.3. Çelik Yapılarda KMEDÇ'nin İncelenmesi	5
2.4. Köprülerde KMEDÇ'nin İncelenmesi	6
2.5. Optimizasyon	6
3. MATERYAL VE METOT	8
3.1. Performans Kavramı	8
3.1.1. Yapı elemanlarında hasar sınırları ve hasar bölgeleri	8
3.2. İncelenen Sistemler	12
3.3. KMEDÇ	13
3.4. Modelleme	18
3.4.1. Malzeme modelleri	18
3.4.1.1. Sargılı ve sargısız beton modelleri	18
3.4.1.2. Donatı çeliği modeli	20
3.4.1.3. Kendini merkezleyen malzeme modeli	22
3.4.2. Yapısal elemanların doğrusal olmayan modellemesi	22
3.5. Optimizasyon	24
3.5.1. Optimizasyon probleminin tanımlanması	25
3.5.2. Yapay arı kolonisi algoritması	28
3.5.2.1. Yöntem adımları	29
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	32

4.1. Sistem Mevcut Performansları	32
4.2. Optimizasyon Sonuçları	37
4.2. Güçlendirilmiş Sistem Davranışı.....	41
5. SONUÇLAR.....	46
6. KAYNAKLAR.....	47
7. EKLER	52
ÖZGEÇMİŞ	



AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Betonarme Çerçevelerin Güçlendirilmesinde Kendini Merkezleyen Enerji Dağıtıcı Çaprazların Optimizasyonu” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

02/07/2021

Uğur ÖZMEN



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_c	: Brüt beton alanı
$A_{dış}$	: Dış eleman kesit alanı
$A_{iç}$	: İç eleman kesit alanı
A_s	: Donatı alanı
A_t	: Tendon kesit alanı
A_{top}	: İç ve dış eleman kesit alanları toplamı
br_1	: Tendon kg fiyatı
br_2	: Çelik kg fiyatı
d_b	: Boyuna donatı çapı (çekmede ortalama)
E_d	: Dağıtılan enerji miktarı
E_s	: Çelik elastisite modülü
E_t	: Tendon elastisite modülü
F_f	: Sürtünme sönümleyici aktivasyon kuvveti
F_{max}	: Çaprazda oluşan maksimum eksenel kuvvet
F_t	: Tendonlar tarafından sağlanan kuvvet
F_y	: Çapraz aktivasyon kuvveti
f_{ck}	: Betonun karakteristik basınç dayanımı
f_{pi}	: Öngerme miktarı
f_{pmax}	: Maksimum tendon gerilmesi
f_{yk}	: Çeliğin karakteristik akma dayanımı
$g(\vec{x})_n$	: Sınırlayıcı fonksiyon
I_{min}	: Minimum atalet momenti

K	: Burkulma boyu katsayısı
K_1	: KMEDÇ başlangıç rijitliği
K_2	: KMEDÇ ikincil rijitlik
$K_{iç}$	: İç eleman eksenel rijitliği
$K_{dış}$	: Dış eleman eksenel rijitliği
K_t	: Tendon eksenel rijitliği
L_b	: Çapraz uzunluğu
L_p	: Plastik mafsalsal boyu
L_s	: Kesme açıklığı
M_{k1}	: 1. kolonda meydana gelen maksimum moment
M_{k2}	: 2. kolonda meydana gelen maksimum moment
$M_{r,kol}$	: Kolon eğilme momenti taşıma gücü
$M_{r,kir}$	: Kiriş eğilme momenti taşıma gücü
M_{ki}	: Kirişte meydana gelen maksimum moment
N_r	: Kolon eksenel kuvvet taşıma gücü
n_t	: Tendon sayısı
T_{ceza}	: Toplam ceza değeri
V_{k1}	: 1. kolonda meydana gelen maksimum kesme kuvveti
V_{k2}	: 2. kolonda meydana gelen maksimum kesme kuvveti
V_{ki}	: Kirişte meydana gelen maksimum kesme kuvveti
w	: Ağırlık katsayısı
β	: Enerji sönümlenme katsayısı
γ_s	: Çelik birim hacim ağırlığı
Δ_u	: Çerçeve kalıcı yer değiştirme miktarı
$\delta_{b,max}$	: Maksimum çapraz şekil değiştirmesi

$\Delta_{f,max}$: Maksimum çerçeve yer değiştirmesi

$\epsilon_c^{(GÖ)}$: Göçmenin Önlenmesi performans düzeyi için izin verilen sargılı beton birim kısalması sınırı

$\epsilon_s^{(GÖ)}$: Göçmenin Önlenmesi performans düzeyi için izin verilen donatı çeliği birim şekil değiştirme sınırı

$\epsilon_c^{(KH)}$: Kontrollü Hasar performans düzeyi için izin verilen sargılı beton birim kısalması sınırı

$\epsilon_s^{(KH)}$: Kontrollü Hasar performans düzeyi için izin verilen donatı çeliği birim şekil değiştirme sınırı

$\epsilon_c^{(SH)}$: Sınırlı Hasar performans düzeyi için izin verilen sargılı beton birim kısalma sınırı

$\epsilon_s^{(SH)}$: Sınırlı Hasar performans düzeyi için izin verilen donatı çeliği birim şekil değiştirme sınırı

ω_{we} : Etkin sargı donatısının mekanik donatı oranı

ϕ_u : Göçme öncesi eğrilik

ϕ_y : Akma eğrilięi

$\theta_p^{(GÖ)}$: Göçmenin Önlenmesi performans düzeyi için izin verilen plastik dönme sınırı

$\theta_p^{(KH)}$: Kontrollü Hasar performans düzeyi için izin verilen plastik dönme sınırı

$\theta_p^{(SH)}$: Sınırlı Hasar performans düzeyi için izin verilen plastik dönme sınırı

μ : Sürtünme katsayısı

ϵ : Ceza katsayısı

Ondalık ayracı olarak nokta kullanılmıştır.

Kısaltmalar

BEÇÇ	: Burkulması Engellenmiş Çelik Çapraz
BA	: Betonarme
ÇYTHYEY	: Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Yönetmeliği
KMEDÇ	: Kendini Merkezleyen Enerji Dağıtıcı Çapraz
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TDS	: Tasarım Değişkeni Sayısı
YAKA	: Yapay Arı Kolonisi Algoritması
YKS	: Yiyecek Kaynağı Sayısı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. TBDY (2018)'de kesit hasar sınırları ve hasar bölgeleri.....	8
Şekil 3.2. İncelenen çerçeve sistemler ve kesitler.....	12
Şekil 3.3. KMEDÇ (Christopoulos vd. 2008).....	14
Şekil 3.4. Kanallı plaka bulon bağlantısı; a) Üç boyutlu görünüm (Erochko, 2013); b) Kesit (Gregorian ve Popov, 1994).....	15
Şekil 3.5. Bayrak tipi çevrimsel davranışın oluşumu	15
Şekil 3.6. KMEDÇ Mekanizması	16
Şekil 3.7. KMEDÇ Efektif başlangıç rijitliği; a) Eleman uzunluğu farkının efektif başlangıç rijitliğine etkisi; b) Başlangıç rijitliği değişimi (Erochko vd. 2014b)	18
Şekil 3.8. Sargılı ve sargısız beton gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri.....	20
Şekil 3.9. Donatı çeliği burkulmalı ve burkulmasız gerilme-şekil değiştirme eğrileri...	21
Şekil 3.10. Bayrak tipi çevrimsel davranış ve bu davranışı tanımlayan değişkenler.....	22
Şekil 3.11. Çubuk fiber eleman (Ergül, 2018).....	23
Şekil 3.12. Algoritma akış şeması	28
Şekil 4.1. Sistem 1-2 OpenSees ve SAP2000 statik itme eğrileri.....	32
Şekil 4.2. Sistem 3-4 OpenSees ve SAP2000 statik itme eğrileri.....	32
Şekil 4.3. Sistem 5-6 OpenSees ve SAP2000 statik itme eğrileri.....	33
Şekil 4.4. Sistem 1 itme eğrisi ve deformasyonlar.....	34
Şekil 4.5. Sistem 2 itme eğrisi ve deformasyonlar.....	34
Şekil 4.6. Sistem 3 itme eğrisi ve deformasyonlar.....	35
Şekil 4.7. Sistem 4 itme eğrisi ve deformasyonlar.....	35
Şekil 4.8. Sistem 5 itme eğrisi ve deformasyonlar.....	36
Şekil 4.9. Sistem 6 itme eğrisi ve deformasyonlar.....	36
Şekil 4.10. Güçlendirilmemiş sistemlerin çatı yanal yer değiştirme zaman davranışları	37
Şekil 4.11. Maliyet ve enerji dağıtımı değerlerinin ağırlık katsayısına göre değişimi ...	40
Şekil 4.12. Seçilen sistemler arama geçmişleri.....	40
Şekil 4.13. Sistem 1 yer değiştirme-taban kesme kuvveti grafiği.....	42
Şekil 4.14. Sistem 2 yer değiştirme-taban kesme kuvveti grafiği.....	42
Şekil 4.15. Sistem 3 yer değiştirme-taban kesme kuvveti grafiği.....	43
Şekil 4.16. Sistem 4 yer değiştirme-taban kesme kuvveti grafiği.....	43
Şekil 4.17. Sistem 5 yer değiştirme-taban kesme kuvveti grafiği.....	44
Şekil 4.18. Sistem 6 yer değiştirme-taban kesme kuvveti grafiği.....	44
Şekil 7.1. Kocaeli Depremi Ambarlı Kaydı (PEER, 2021)	52
Şekil 7.2. Tüm sistemlere ait arama geçmişleri	63
Şekil 7.3. Tüm sistemler için KMEDÇ eksenel kuvvet-şekil değiştirme grafikleri.....	64

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Seçilen sistemler ve özellikleri	12
Çizelge 3.2. Yük ve Kütleler	13
Çizelge 3.3. Sargılı ve sargısız beton bilgileri	19
Çizelge 3.4. Donatı çeliği bilgileri	21
Çizelge 4.1. Sistemlerin 1. doğal titreşim periyotları	33
Çizelge 4.2. Optimizasyon sonucu elde edilen değerler	38
Çizelge 4.3. Güçlendirilmiş sistem, eleman ve kesit değerleri	41
Çizelge 7.1. Tendon kesit alanları	52
Çizelge 7.2. İç ve dış eleman çelik profil listesi	53
Çizelge 7.3. Sistem 1 optimizasyon sonuçları	57
Çizelge 7.4. Sistem 2 optimizasyon sonuçları	58
Çizelge 7.5. Sistem 3 optimizasyon sonuçları	59
Çizelge 7.6. Sistem 4 optimizasyon sonuçları	60
Çizelge 7.7. Sistem 5 optimizasyon sonuçları	61
Çizelge 7.8. Sistem 6 optimizasyon sonuçları	62

1. GİRİŞ

Yapıları ve dolaylı olarak canlıları tehdit eden önemli doğal felaketlerden olan depremlerin yol açabileceği zararları minimize etmek inşaat mühendisliğinin temel problemlerindendir. Deprem riski yüksek alanlarda yoğun yapı stokuna sahip ülkemizde depreme dayanıklı yapı üretimi ve mevcut yapıların güçlendirilmesi konusu can güvenliği ve ekonomi açısından büyük önem arz etmektedir. Güncel tasarım yönetmeliklerine uygun olmayan ve deprem riskine karşı yeterli dayanıma sahip olmayan yapıların yıkılıp yeniden yapılması yerine ekonomik ve pratik bir şekilde güçlendirilmesi, zaman ve kaynak tasarrufu açısından daha uygun kabul edilmektedir. Ayrıca sünek tasarım ilkesi gereği büyük depremlerde yapılarda yüksek seviyede kalıcı hasarlar meydana gelebilmekte ve hasar alan bu yapıların onarım maliyetleri ciddi boyutlara ulaşabilmektedir.

Bu problemlere çözüm olarak yapıların sismik performanslarının iyileştirilmesinde farklı çelik çapraz tasarımları geliştirilmiştir. Geleneksel çelik çaprazların çekme altında akarken basınç altında burkularak ani kapasite kaybına uğraması, bu elemanların yatay yükler altında arzu edilmeyen asimetrik davranışına sebep olmaktadır. Bu probleme getirilen bir çözüm olarak, eksenel basınç etkisi altında burkulmayan ve simetrik tersinir çevrimsel davranışa sahip burkulması engellenmiş çelik çaprazlar (BEÇÇ) geliştirilmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda, bu elemanların yapı yüksekliğine bağlı olarak kalıcı yanal yer değiştirmeler ve hasar yığılmaları meydana getirdiği belirtilmiştir. Bu kapsamda, yapıların rijitlik, dayanım, süneklik ve enerji sönümleme kapasitesini artırırken geri merkezleme mekanizmasıyla da kalıcı hasarları önleme özelliklerine bir arada sahip olan kendini merkezleyen enerji dağıtıcı çaprazlar (KMEDÇ) son yıllarda ilgi çeken bir araştırma konusu olmuştur.

Christopoulos vd. (2008) tarafından geliştirilen, öngerme tendonları ve iç içe yerleştirilmiş iki çelik elemanın kullanıldığı KMEDÇ sisteminde, çelik elemanlar uç plakalar arasında tendonların sağladığı çekme kuvvetleri ile sıkıştırılmaktadır. Bu tasarımda, çapraza etkiyen kuvvetin basınç ya da çekme kuvveti olmasından bağımsız olarak tendonlar her zaman çekme kuvveti etkisi altındadır. Burada, enerji dağıtma mekanizması olarak iç ve dış çelik elemana bağlı kanallı plaka bulon bağlantısı kullanılmıştır. Çapraza aktivasyon kuvvetini aşan bir yük etkiğinde, iç ve dış elemanlar birbirlerine göre hareket etmektedir. Bu sırada kanallı plaka bulon bağlantısı, Coloumb sönümü ile depem kaynaklı enerjinin bir bölümünü sönümlemektedir.

Bu çalışmada öncelikle, KMEDÇ'nin çevrimsel tersinir yüklemeler altındaki davranışı ve bu davranışı belirleyen değişkenler incelenmiştir. Daha sonra, TBDY (2018) Bölüm 7.3.5.'te belirtilen, kolonların girişlerden daha güçlü olması koşulunu sağlayan ve sağlamayan farklı açıklıklara sahip betonarme çerçeve sistemler durum çalışması olarak tasarlanmış ve bu sistemlerin TBDY uyarınca yeterli deprem performansına sahip olmadığı gösterilmiştir. Belirlenen bu çerçevelerin KMEDÇ ile güçlendirilmesi için KMEDÇ'nin çevrimsel davranışını belirleyen değişkenlerin belirlenmesi gerekmektedir. Ancak, uygulandığı yapının davranışını değiştiren KMEDÇ davranışının uygulandığı yapı davranışına bağlı olarak tanımlanması gerekliliği eleman tasarımını güçleştirmektedir. Ayrıca, KMEDÇ tasarımını belirleyen değişken sayısının fazla olduğu da göz önüne alındığında, belirlenen amacın ancak meta sezgisel optimizasyon yöntemleri ile elde edilebileceği anlaşılmaktadır.

Bu tasarım problemlerinin aşılabilmesi amacıyla, en düşük maliyet ile en fazla enerji tüketen KMEDÇ tasarımını elde eden ve metasezgisel bir optimizasyon yöntemi olan Yapay Arı Kolonisi Algoritması (YAKA) kullanılmıştır.

YAKA, optimizasyon problemlerini çözmek için bal arısı kolonilerinin kendilerine özgü besin arama ve buldukları besini kovanlarına taşıma yöntemlerini örnek alan bir algoritmadır.

Güçlendirme tasarımı, betonarme (BA) yapıda amaçlanan hasar düzeyine karşı gelen ve TBDY (2018) tarafından önerilen beton ve çelik için birim şekil değiştirme sınırlarının aşılmamasını ve iç içe yerleştirilmiş çelik elemanların burkularak kararlılığını kaybetmemesini gerektirmektedir.

Optimizasyon çalışmasında tekrarlı analizler için gereken uzun sürenin kısaltılması amacıyla, iki boyutlu ve çok katlı çerçevenin zemin katını temsil eden tek katlı tek açıklıklı çerçeveler incelenmiştir. Üst katların etkisini ifade etmesi için çerçeve kolonlarının eksenel kuvvet kapasitelerinin %30'u kadar yük altında olması sağlanmıştır. Çalışmada 1.5, 3.0, 6.0 m açıklıklara, 3.0 m kat yüksekliğine sahip, güçlü kolon zayıf kiriş koşulunu sağlayan ve sağlamayan olmak üzere toplam altı farklı BA çerçeve incelenmiştir. Kolon ve kirişler yayılı plastik davranışa sahip kesit hücreleri (lifler) ile modellenerek, kesitlerde TBDY (2018) sınırlı hasar koşuluna ait şekil değiştirme koşullarının sağlanması amaçlanmıştır.

OpenSees ve MATLAB programlarının etkileşimli bir şekilde kullanımı ile gerçekleştirilen analizler sonucunda, önerilen yöntem ile KMEDÇ'nin tasarlanabileceği ve bu tasarımın yapıların depreme karşı güçlendirilmesinde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

2. KAYNAK TARAMASI

Bu çalışmada kaynak taraması; KMEDÇ tasarımı, KMEDÇ'nin BA yapılara, çelik yapılara ve köprülere uygulanması ile yapılarda güçlendirme optimizasyonu başlıkları altında sınıflandırılmıştır.

2.1. KMEDÇ Tasarımı ile İlgili Çalışmalar

Erochko vd. (2014a), KMEDÇ'lerin tasarımından önce dikkate değer üç farklı kendini merkezleyen çapraz tasarımı gerçekleştirilmesine rağmen bu çaprazların hiçbirinin gerçek boyutlarda yapılarda uygulanmaya elverişli olmadığını belirtmiştir. Bu çalışmaların ilkinde Nims vd. (1993) basınç çubuğu, yay ve durduruculardan oluşan bir enerji dağıtıcı çapraz tasarımı yaparak yapı frekansı, çapraz çevrimsel davranışı ve rijitliği, sürtünme kuvveti, sönüm oranı ve yapıda meydana gelen ivme değerlerini incelemiştir. Bir diğer çalışmada Filiatrault vd. (2000) halka yaylarla tasarlanan 200 kN kapasiteli sönümleyici çaprazı sarsma tablasında $\frac{1}{2}$ ölçekli moment aktaran çelik çerçevede test etmiştir. Araştırmacılar, çaprazın basınç ve çekme altında simetrik bir çevrimsel davranış gösterdiğini, enerji dağıtma özelliği sayesinde yapıda büyük bir elastik ötesi davranış meydana gelmediğini belirtmiştir. Bahsi geçen diğer çalışmada ise Zhu ve Zhang (2008), şekil hafızalı nikel-titanyum alaşımı ve sürtünme sönümleyici levhalarla çelik gövdeli kendini merkezleyen bir çapraz tasarlamıştır. Moment aktaran üç ve altı katlı iki farklı çelik çerçeve için itme ve zaman tanım alanında gerçekleştirdikleri analizler sonucunda bu çaprazın, burkulması önlenmiş çaprazlara yakın performans gösterdiğini ancak kalıcı yanıl yer değiştirmelerin azaldığını belirtmişlerdir.

Christopoulos vd. (2008) önceki çalışmalarda kullanılan yay ve şekil hafızalı alaşımlar yerine, öngerme tendonu ve kabloları kullanarak daha büyük bir geri merkezleme kapasitesi ve rijitlik elde etmişlerdir. Sürtünme sönümleyici olarak kanallı plaka bulon bağlantısı, öngerme elemanı olarak aramid tendon kullanılan çalışmada yapılan deneylerle KMEDÇ'nin çevrimsel davranışını belirleyen denklemler ortaya konulmuştur. Daha sonra, tam ölçekli fakat boyu kısaltılmış olarak üretilen KMEDÇ ile yarı statik ve dinamik olarak gerçekleştirilen deneylerle, ortaya konulan davranış doğrulanmıştır.

Erochko vd. (2014a), iç içe geçen iki profilden meydana gelen Christopoulos vd. (2008)'in tasarımına bir profil daha ekleyerek çerçevenin kalıcı yer değiştirme bırakmadan yer değiştirme kapasitesini %1.5-2.0'dan %4'e kadar artırmıştır. Erochko vd. (2014b) yaptıkları diğer bir çalışmada ise, KMEDÇ'yi iç içe iki elemanlı olarak tasarlamış, fakat iç çelik eleman olarak kutu profil yerine kaynaklı geniş başlık kullanarak çaprazın eksenel yük kapasitesini artırmıştır. Ayrıca, çapraz üretiminde profillerde oluşan boyut farklılıklarını göz önüne alan ve elastik rijitlik ile düşük şekil değiştirmeleri daha iyi temsil ettiği belirtilen analitik bir yaklaşım geliştirilmiştir.

Chou ve Chung (2014) ve Erochko vd. (2014b), bir dış ve iki iç profil kullanarak KMEDÇ'nin eksenel yer değiştirme kapasitesini iki katına çıkarmıştır. ASTM A416 Grade 270 tendon kullanılan bu tasarımda, %2.5 yer değiştirme oranı ve 1700 kN eksenel kuvvet değerlerine kadar tam geri merkezleme sağlanmıştır. Ayrıca, deney sonuçları ile KMEDÇ'nin sonlu elemanlar modeli karşılaştırılmış, profil ve uç plakalar arasındaki açılmalar deney ile yakın bulunurken, deneyde sürtünme sönümleyicinin sağladığı

kuvvetin çevrimsel davranışta düşmesi sebebiyle bu kuvvetin bir miktar farklılık gösterdiği belirtilmiştir.

Chou vd. (2016) önceki çalışmada tasarladıkları çift iç çelik elemanlı KMEDÇ'yi tek açıklıklı üç katlı çelik çerçevede analiz etmiş ve bu çerçevenin tek kat ve tek açıklık bölümünün deneyini gerçekleştirmiştir. Çerçevede %2 kat öteleme oranında kolon tabanında akma ve kırışte yerel burkulma meydana geldiği, bu değer öncesinde ise herhangi bir hasar gözlenmediği belirtilmiştir.

Zhang (2015), KMEDÇ'lerin bayrak tipi çevrimsel davranış değişkenlerinin tek serbestlikli sistem davranışına etkilerini zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler ile incelemiştir. Bu çalışmada, enerji dağıtma katsayısının artmasıyla sistem en büyük yer değiştirmesinin azaldığı, çapraz elastik ötesi rijitliğinin pozitif ya da sıfır olduğu sürece sisteme etkisinin düşük olduğu, ancak negatif değerlerin göçmeye neden olabileceği belirtilmiştir. Ayrıca, gerçekleştirilen regresyon analizi ile tek serbestlik dereceli KMEDÇ'li sistemin elastik ötesi medyan yer değiştime oranını yaklaşık olarak veren ampirik bir formül önerilmiştir.

Westenenk vd. (2019) boyuna ve enine yaylar ile konik sürtünme yüzeylerine sahip kendini merkezleyen bir çapraz tasarımı yapmıştır. Yapılan çalışmada, çaprazın analitik ve deneysel davranışlarında kuvvet bazında %3, enerji dağıtımında %10 hata elde edildiği ve bu değerler ile diğer çapraz tasarımlarına oranla avantaj sağladığı belirtilmiştir.

Yousef-beik vd. (2020) basınç altında burkularak sıfır elastik ötesi rijitlik sağlayan bir çapraz tasarımı yapmıştır. Çaprazın sıfır elastik ötesi rijitliğe sahip olmasının çerçeve taban kesme kuvvetinin sınırlandırılması gereken sistemler için avantaj olduğu belirtilmiş, ancak simetrik çevrimsel davranışın sağlanması için iki çaprazın aynı anda kullanılması gerektiği belirlenmiştir. BEÇÇ için analitik olarak yapılan karşılaştırmada, yakın kat ötelenme oranları elde edilirken çalışmaya konu olan çaprazın kalıcı yer değiştirme bırakmadığı ve sistemin maksimum taban kesme kuvvetini düşürdüğü belirtilmiştir.

Wang vd. (2020) yüksek elastik ötesi rijitliği ile elastik ötesi yer değiştirmeyi ve yüksek mod etkilerini sınırlandıran, değişken kesitli sürtünme sönümleyicili bir çapraz geliştirmiştir. Bazalt tendonların kullanıldığı tasarımda, değişken kesitli sürtünme sönümleyici sayesinde büyük deprem kuvvetleri altında tendonların kopması halinde dahi çaprazın enerji tüketmeye devam edeceği ve yapının göçmesinin önüne geçilebileceği belirtilmiştir.

2.2. Betonarme Yapılarda KMEDÇ'nin İncelenmesi

Zhang ve Hu (2010) 0.6 s doğal periyotlu tek serbestlik dereceli BA sistemin güçlendirilmesinde KMEDÇ ve iki doğrulu davranışa sahip BEÇÇ elemanların kullanıldığı, farklı dayanım ve elastik rijitlik oranlarının değerlendirildiği bir çalışma gerçekleştirmiştir. Güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş sistemlerin en büyük yer değiştirme, ivme, enerji dağıtma istemi ve kalıcı yer değiştirme oranlarının karşılaştırıldığı bu çalışmada, KMEDÇ'nin davranışlarını belirleyen değişkenler dikkatli seçildiğinde iki sistemde de benzer en büyük yer değiştirme ve enerji dağıtma değerleri

elde edilebilirken KMEDÇ'nin ihmal edilebilecek düzeyde düşük kalıcı yer değiştirme bıraktığı belirtilmiştir.

Xiao vd. (2019) geliştirdikleri öngermeli diskli KMEDÇ'nin tüp çekirdekli BA binada sismik performansını incelemiştir. BEÇÇ ve KMEDÇ'nin karşılaştırıldığı çalışmada, KMEDÇ'nin başlangıç rijitliği ve akma noktası BEÇÇ'nin değerlerine eşit olarak seçilmiştir. Zaman tanım alanında lineer olmayan analizler sonucunda 50 yılda aşılma olasılığı %63 olan deprem için BEÇÇ ve KMEDÇ'li sistemlerde yakın görel kat öteleme oranları ve en büyük çatı ivmesi değerleri elde edilirken, 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan deprem kaydı için KMEDÇ'nin daha düşük görel kat öteleme oranı oluşturduğu ve kalıcı yer değiştirmeleri önlediği belirtilmiştir.

Guo vd. (2020) kendini merkezleyen çapraz kablo tasarımı yaparak sismik performansı yetersiz 9 katlı BA yapıda bu çaprazın etkinliğini BEÇÇ ile karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Gövdesi kablodan oluşan çaprazın simetrik davranış göstermesi için X çapraz olarak uygulandığı çalışmada, kendini merkezleyen çapraz kablonun BEÇÇ'ye göre daha düşük en büyük kat öteleme ve kalıcı yer değiştirme sağladığı belirtilmiştir.

2.3. Çelik Yapılarda KMEDÇ'nin İncelenmesi

Tremblay vd. (2008) 2, 4, 8, 12, 16 katlı çelik çerçevelerde KMEDÇ'nin sismik performansını BEÇÇ ile karşılıklı olarak incelemiştir. KMEDÇ'nin daha düşük kat ötelenme oranı, hasar yığılması ve kalıcı yer değiştirme sağladığı belirtilen çalışmada bayrak tipi çevrimsel davranışın elastik ve elastik ötesi rijitlik arasındaki geçişin keskinliği nedeniyle daha büyük kat ivmesi olduğu belirtilmiştir.

Dezfuli vd. (2017) daha önce çalışılan KEMDÇ tasarımlarının karmaşık ve yüksek maliyetli olduğunu belirterek iç çelik elemansız bir kendini merkezleyen çapraz tasarımı önermiştir. Enerji dağıtımının yapı tarafından sağlandığı belirtilen tasarımda ek enerji dağıtıcı kullanılmamıştır. 9 katlı çelik yapının güçlendirilmesinde iteratif analizlerle kalıcı yer değiştirme ve en büyük kat ötelenme oranları ile maliyet odaklı optimum güçlendirme gerçekleştirilebileceği belirtilmiştir.

Xu vd. (2020) öngermeli disklerle oluşturulan KMEDÇ'nin 4 ve 6 katlı çelik yapılarda performansını geleneksel çelik çaprazlarla karşılaştırmış, KMEDÇ'nin daha düşük görel kat ötelenmesi, kalıcı yer değiştirme ve daha düşük en büyük kat ivmesi sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca, sürtünme sönmüleyici aktivasyon kuveetinin disk öngerme kuvvetine oranının görel kat öteleme ve kalıcı deformasyon değerleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğu belirtilmiştir.

Qiu ve Zhu (2020) şevron tip KMEDÇ'li çerçeve ile moment aktaran çerçeve, şevron tip KMEDÇ'li çerçeve ile BEÇÇ'li çerçevelerin paralel olarak modellenmiş ve yalnızca şevron tip KMEDÇ'li çerçevenin sismik performanslarını karşılaştırmıştır. Yalnızca şevron tip KMEDÇ'li çerçevelerin, diğer çerçevelere benzer en büyük yer değiştirme istemleri oluşturduğu, diğer çerçevelerde moment aktaran birleşimlerin deformasyonları ya da kalıcı deformasyonlar vb. risklerin KMEDÇ'ye göre dezavantaj oluşturduğu belirtilmiştir.

2.4. Köprülerde KMEDÇ'nin İncelenmesi

Cheng (2017) 4 farklı köprünün KMEDÇ ile güçlendirilmesi amacıyla Erochko vd. (2014b)'de önerilen tasarım yöntemini uygulamıştır. Çapraz aktivasyon kuvveti ve enerji dağıtma katsayısının parametrik çalışma ile elde edildiği araştırmada, farklı açıklık uzunluğu ve sayısına sahip köprülerde yakın ve uzak fay etkisinde meydana gelen en büyük yanal ötelenmelerin azaldığı ve kalıcı yer değiştirmelerin önlendiği belirtilmiştir.

Upadhyay vd. (2019) kesit donatı düzenleri bilinmeyen 3 ayaklı köprünün güçlendirilmesinde BEÇÇ ve KMEDÇ'nin performanslarını karşılaştırmıştır. Daha önce gerçekleştirilen tam ölçekli BEÇÇ ve KMEDÇ deney verilerinin kullanıldığı çalışmada, iki çapraz tipinin de kesit şekil değiştirmeleri ile yanal yer değiştirmelerini sınırlandırarak deprem güvenliğini artırdığı, ancak KMEDÇ'nin kalıcı yer değiştirmeleri BEÇÇ'ye göre azaltması nedeniyle olası büyük depremlerden sonra kesintisiz kullanılabilirliğinin sağlanabileceği belirtilmiştir.

2.5. Optimizasyon

Apostolakis ve Dargush (2010) moment aktaran 3 katlı 4 açıklıklı ve 6 katlı 3 açıklıklı çelik çerçevelerin BEÇÇ ve sürtünme sönümleyicilerle tasarımında genetik algoritma kullanmıştır. Tasarım değişkenleri olarak çapraz yerleşimi, çarpaz kesit alanı ve akma kuvvetinin belirlendiği çalışmada, en büyük yanal ötelenme, kalıcı yer değiştirme ve en büyük kat ivmelerinin minimize edildiği belirtilmiştir.

Hejazi vd. (2013) 5 katlı tek açıklıklı BA çerçeve sistemin sismik performansının artırılması amacıyla viskoz sönümleyici kullanılan bir optimizasyon çalışması gerçekleştirmiştir. Sönümleyici sönüm katsayısının tasarım değişkeni olarak kullanıldığı çalışmada, çerçevenin 3 yönde yaptığı en büyük yer değiştirmeler toplamının minimizasyonu amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Genetik algoritma ile gerçekleştirilen optimizasyon işlemi sonucunda sistem en büyük yanal yer değiştirmesinin yaklaşık 80.2 % azaltıldığı belirtilmiştir.

Xu vd. (2018) disk yaylı KMEDÇ'nin bayrak tipi çevrimsel davranışını altı farklı parametre ile tanımlamış ve bu davranışı deney sonuçlarıyla eşleştirmek için genetik algoritma kullanmıştır.

Panzeri vd. (2020) silo tipi yapıların ayaklarında iki farklı tasarıma sahip KMEDÇ uygulayarak uzak ve yakın fay etkilerini dikkate aldıkları bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, KMEDÇ tasarım değişkenleri, maksimum enerji dağıtımı ile uzak ve yakın kaynaklı depremlerde oluşan enerji dağıtım değişiminin minimize edildiği çok amaçlı bir optimizasyon çalışmasıyla elde edilmiştir.

Çerçevik ve Avşar (2020) karga arama algoritması ile sismik izolasyonlu dört katlı kayma çerçevesinde izolasyon parametrelerinin optimizasyonunu yapmıştır. İzolatör yanal yer değiştirme sınırları aşılmadan en düşük tepe ivmesini sağlayan izolatör periyodu ve sönüm oranı değerleri aranan çalışmada yüksek sönüm oranının kat ivmelerinde artışa neden olduğu, dolayısıyla yüksek sönüm oranı değerlerinin optimum sonuç sağlamadığı belirtilmiştir.

Zhang vd. (2020) geliştirilmiş bayrak tipi çevrimsel davranış değişkenlerini eşdeğer doğrusallaştırma yöntemi ile belirleyerek süreklilik istemini minimize eden bir çalışma gerçekleştirmiştir.



3. MATERYAL VE METOT

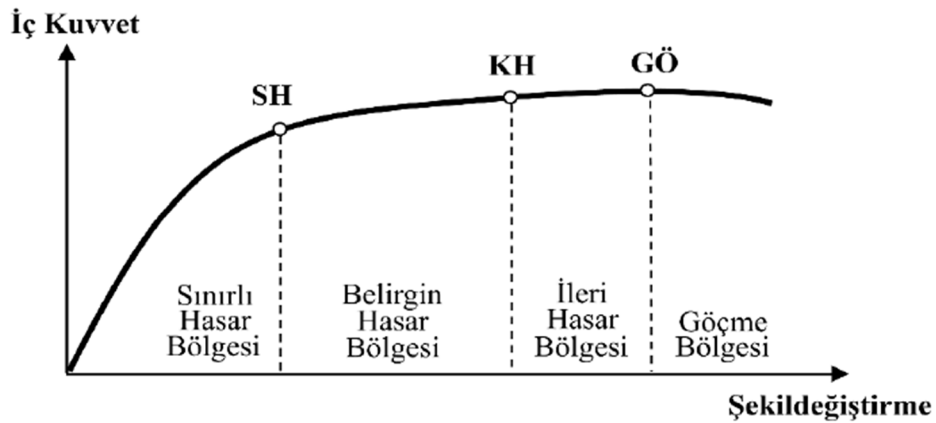
3.1. Performans Kavramı

Şiddetli bir deprem etkisinde, yapılarda elastik ötesi yer değiştirmelerin meydana gelmesi beklenmektedir. BA yapılar için betonda ve/veya çelikte meydana gelen elastik ötesi şekil değiştirmeler, kesitlerde dolayısıyla da yapıda hasar oluşturmaktadır. Kesit düzeyinde oluşan şekil değiştirmelerin yapıda dağılımı ile yapıların performans düzeyi belirlenmektedir. Dolayısıyla yapı performansı, belirli bir deprem etkisi altında yapıda meydana gelmesi öngörülen hasarın boyutu olarak ifade edilebilir. Mevcut bir yapının deprem güvenliğinin belirlenmesi işlemi üç adımda ifade edilebilir:

1. Kapasitenin belirlenmesi: İncelenecek binaya ait taşıyıcı sistem elemanlarının geometrik ve mekanik özelliklerinin belirlenerek, deprem etkisinde zorlanması beklenen eleman kesit kapasiteleri elde edilir.
2. İstemin belirlenmesi: Gözönüne alınan deprem etkisi seçilerek ve bu deprem etkisinde binada oluşacak kesit etkileri, şekil değiştirme ve yer değiştirmeler hesaplanır.
3. Karşılaştırma ve sonuç: Eleman ve kesitler için elde edilen kapasite ve talepler karşılaştırılarak beklenen hasar durumu (taşıyıcı sistem performansı) belirlenir. Elde edilen performans düzeyinin kabul edilebilir ya da edilemez olmasına karar verilir. (Celep, 2017)

3.1.1. Yapı elemanlarında hasar sınırları ve hasar bölgeleri

Mevcut ve güçlendirilecek tüm bina ve bina türü yapıların deprem etkisi altındaki performanslarının değerlendirilmesinde uygulanacak hesap kuralları, güçlendirme kararlarında esas alınacak ilkeler ve güçlendirilmesine karar verilen binaların güçlendirme tasarımı ilkeleri TBDY (2018) Bölüm 15'te belirtilmektedir. TBDY (2018) 15.3.'te sünek elemanlar için Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçmenin Öncesi Hasar (GÖ) olmak üzere üç farklı hasar durumu, Sınırlı Hasar Bölgesi, Belirgin Hasar Bölgesi, İleri Hasar Bölgesi ve Göçme Bölgesi olmak üzere dört farklı hasar bölgesi tanımlanmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. TBDY (2018)'de kesit hasar sınırları ve hasar bölgeleri

Sınırlı hasar ilgili kesitte sınırlı miktarda elastik ötesi davranışı, kontrollü hasar kesit dayanımının güvenli olarak sağlanabileceği elastik ötesi davranışı, göçme öncesi hasar durumu ise kesitte ileri düzeyde elastik ötesi davranışı tanımlamaktadır. Gevrek olarak hasar gören elemanlarda yukarıda belirtilen sınıflandırmalar geçerli değildir.

Doğrusal veya doğrusal olmayan hesap yöntemleriyle elde edilen şekildeğiştirme değerlerinin, kesit hasar sınırlarında tanımlanan sayısal değerler ile karşılaştırılması neticesinde ilgili kesitlerin hangi hasar bölgelerinde bulunduğu belirlenir. Eleman hasarı, ele alınan elemanın en fazla hasar gören kesitine göre elde edilmektedir.

TBDY (2018)'e göre plastik şekil değiştirmelerin meydana geldiği BA sünek kiriş, perde ve kolonlarda çeşitli kesit hasar sınırlarına göre izin verilen birim şekil değiştirme ve plastik dönme üst sınırları (kapasiteleri) aşağıda tanımlanmıştır.

Göçmenin önlenmesi performans düzeyi için yayılı plastik davranış modelinde:

- Beton birim kısalması:
 - Dikdörtgen kesitlerde:

$$\varepsilon_c^{(GÖ)} = 0.0035 + 0.04\sqrt{\omega_{we}} \leq 0.018 \quad (3.1)$$

- Dairesel kesitlerde:

$$\varepsilon_c^{(GÖ)} = 0.0035 + 0.07\sqrt{\omega_{we}} \leq 0.018 \quad (3.2)$$

- Donatı çeliği birim şekil değiştirmesi:

$$\varepsilon_s^{(GÖ)} = 0.04\varepsilon_{su} \quad (3.3)$$

Denklem 3.1'de ω_{we} etkin sargı donatısının mekanik donatı oranını, Denklem 3.3'te ε_{su} maksimum dayanıma karşı gelen donatı birim uzamasını ifade etmektedir.

Göçmenin önlenmesi performans düzeyi için yığılı plastik davranış modelinde:

- Plastik dönmeler:

$$\theta_p^{(GÖ)} = \frac{2}{3} \left[(\phi_u - \phi_y) L_p \left(1 - 0.5 \frac{L_p}{L_s} \right) + 4.5 \phi_u d_b \right] \quad (3.4)$$

Denklem 3.4'te $\theta_p^{(GÖ)}$ göçmenin önlenmesi performans düzeyi için izin verilen plastik dönme sınırını, ϕ_u göçme öncesi eğriliğini, ϕ_y akma eğriliğini, L_p plastik mafsal boyunu, L_s kesme açıklığını, d_b ise boyuna donatı çapını ifade etmektedir.

Kontrollü hasar performans düzeyi için yayılı plastik davranış modelinde:

- Beton birim kısalması:

$$\varepsilon_c^{(KH)} = 0.75\varepsilon_c^{(GÖ)} \quad (3.5)$$

- Donatı çeliği birim şekil değiştirmesi:

$$\varepsilon_s^{(KH)} = 0.75\varepsilon_s^{(GÖ)} \quad (3.6)$$

Kontrollü hasar performans düzeyi için yığılı plastik davranış modelinde:

- Plastik dönmeler:

$$\theta_p^{(KH)} = 0.75\theta_p^{(GÖ)} \quad (3.7)$$

Sınırlı hasar performans düzeyi için yayılı plastik davranış modelinde:

- Beton birim kısalması:

$$\varepsilon_c^{(SH)} = 0.0025 \quad (3.8)$$

- Donatı çeliği birim şekil değiştirmesi:

$$\varepsilon_s^{(SH)} = 0.0075 \quad (3.9)$$

Sınırlı hasar performans düzeyi için yığılı plastik davranış modelinde

- Plastik dönmeler:

$$\theta_p^{(SH)} = 0 \quad (3.10)$$

Sınırlı Hasar Performans Düzeyi

Sınırlı hasar performans düzeyinde, BA binaların herhangi bir katında, uygulanan her bir deprem doğrultusu için gerçekleştirilen hesap ile kirişlerin en fazla %20'si Belirgin Hasar Bölgesine geçebilirken diğer taşıyıcı elemanlarının tamamı Sınırlı Hasar Bölgesinde kalacaktır. Gevrek olarak hasar gören elemanlar varsa, bu elemanların güçlendirilmeleri şartı ile, bu binaların Sınırlı Hasar Performans Düzeyinde olduğu kabul edilir.

Kontrollü Hasar Performans Düzeyi

Gevrek olarak hasar alan elemanlar varsa güçlendirilmeleri şartı ile, aşağıda sıralanan koşulları sağlayan binaların Kontrollü Hasar Performans Düzeyinde olduğu kabul edilir:

- a) BA binaların herhangi bir katında, uygulanan her bir deprem doğrultusu için yapılan hesap sonucunda, ikincil (yatay yük taşıyıcı sisteminde yer almayan) kirişler hariç olmak üzere, kirişlerin en fazla %35'i ve düşey elemanların (kolonlar, perdeler ve güçlendirilmiş bölme duvarlar) aşağıdaki (b) paragrafında tanımlanan kadarı İleri Hasar Bölgesi'ne geçebilir.
- b) İleri Hasar Bölgesindeki düşey elemanların, her bir katta düşey elemanlar tarafından taşınan kesme kuvvetine toplam katkısı %20'nin altında olmalıdır. En üst katta İleri Hasar Bölgesindeki düşey elemanların kesme kuvvetleri toplamının, o kattaki tüm düşey elemanların kesme kuvvetlerinin toplamına oranı en fazla %40 olabilir.
- c) Diğer taşıyıcı elemanların tümü Sınırlı Hasar Bölgesi veya Belirgin Hasar Bölgesi'ndedir. Ancak, herhangi bir katta alt ve üst kesitlerinin ikisinde birden Belirgin Hasar Sınırı aşılmış olan düşey elemanlar tarafından taşınan kesme kuvvetlerinin, o kattaki tüm düşey elemanlar tarafından taşınan kesme kuvvetine oranının %30'u aşmaması gerekir.

Göçmenin Önlenmesi Performans Düzeyi

Gevrek olarak hasar gören tüm elemanların Göçme Bölgesinde olduğunun gözönüne alınması kaydı ile, aşağıdaki koşulları sağlayan binaların Göçmenin Önlenmesi Performans Düzeyinde olduğu kabul edilir:

- a) BA binaların herhangi bir katında, uygulanan her bir deprem doğrultusu için yapılan hesap sonucunda, ikincil (yatay yük taşıyıcı sisteminde yer almayan) kirişler hariç olmak üzere, kirişlerin en fazla %20'si Göçme Bölgesi'ne geçebilir.
- b) Diğer taşıyıcı elemanların tümü Sınırlı Hasar Bölgesi, Belirgin Hasar Bölgesi veya İleri Hasar Bölgesi'ndedir. Ancak, herhangi bir katta alt ve üst kesitlerinin ikisinde birden Belirgin Hasar Sınırı aşılmış olan düşey elemanlar tarafından taşınan kesme kuvvetlerinin, o kattaki tüm düşey elemanlar tarafından taşınan kesme kuvvetine oranının %30'u aşmaması gerekir

Göçme Durumu: Bina Göçmenin Önlenmesi Performans Düzeyini sağlayamıyorsa Göçme Durumundadır.

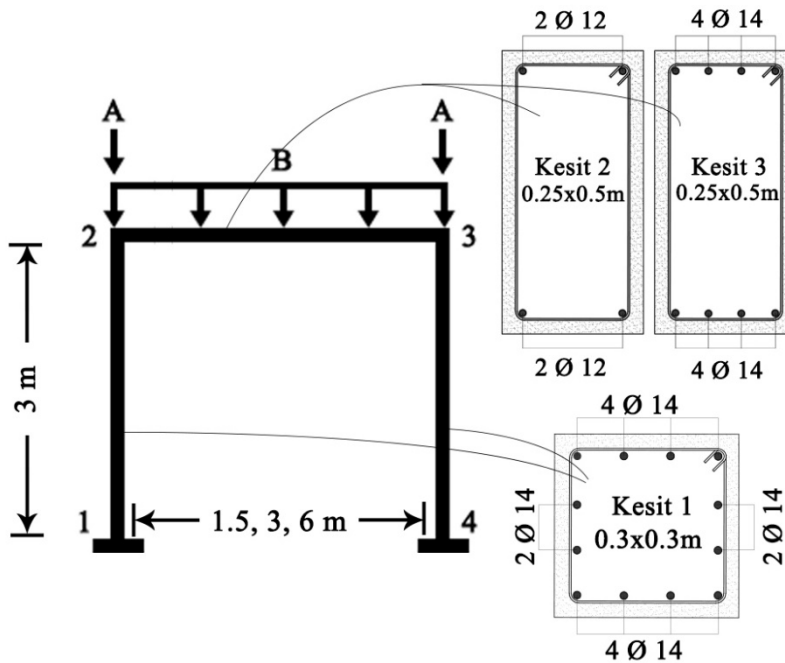
3.2. İncelenen Sistemler

Bu çalışmada üç farklı açıklık için TBDY (2018) 7.3.5.'te belirtilen kolonların kirişlerden daha güçlü olması koşulunu sağlayan ve sağlamayan sistemler olmak üzere toplam altı farklı sistem incelenmiştir. Bu sistemler Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Seçilen sistemler ve özellikleri

Sistem	Açıklık (m)	Yükseklik (m)	Kolon Boyutları (m)	Kiriş Boyutları (m)	Kolon Kesiti	Kiriş Kesiti	$\frac{M_{r,kol}}{M_{r,kir}}$
1	1.5	3	0.3 x 0.3	0.25 x 0.50	1	2	1.97
2						3	0.72
3	3					2	1.97
4						3	0.72
5	6					2	1.97
6						3	0.72

Çizelge 3.1'de, $M_{r,kol}$ kolon moment taşıma kapasitesi, $M_{r,kir}$ ise kiriş moment taşıma kapasitesi olup $\frac{M_{r,kol}}{M_{r,kir}}$ değeri güçlü kolon zayıf kiriş durumunu ifade eden katsayıdır. Kolon ve kiriş moment kapasiteleri SAP2000 (2009) programından elde edilmiştir. İncelenen çerçeve sistemleri ve bu sistemde kullanılan kesitler Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. İncelenen çerçeve sistemler ve kesitler

Sistemlerin BA çok katlı yapıların zemin katını temsil etmesi açısından kolonların

eksenel yük taşıma kapasitelerinin %30'u kadar yük altında olmaları sağlanmıştır. Kolonların eksenel kuvvet taşıma kapasiteleri (N_r) Denklem 3.11 ile hesaplanmıştır.

$$0.3N_r = 0.3(0.85 f_{ck}(A_c - A_s) + f_{yk}A_s) \quad (3.11)$$

Denklem 3.11'de f_{ck} betonun karakteristik basınç dayanımını (20 MPa), f_{yk} çeliğin karakteristik akma dayanımını (420 MPa), A_c brüt beton alanını, A_s ise toplam donatı alanını ifade etmektedir.

$$0.3N_r = 0.3(0.85 \times 20(90000 - 1847.25) + 420 \times 1847.3) = 682.3 \text{ kN}$$

Kolonlar için 682.3 kN eksenel yük, iki kolon üst ucuna tekil yükler (A) ile kiriş üzerine yayılı yük (B) şeklinde sağlanmıştır (Şekil 3.2). Küteler ise düğüm noktalarına (2 ve 3) noktasal olarak tanımlanmıştır. (Çizelge 3.2)

Çizelge 3.2. Yük ve Küteler

	A Yüğü	B Yüğü	2 ve 3 No. Noktasal Kütle
Sistem	G+ nQ (kN)	G+nQ (kN/m)	(kNs ² /m)
1	679.3	4	69.5
2			
3	676.3		
4			
5	670.3		
6			

TBDY (2018) 7.3.5 maddesi uyarınca kolon taşıma gücü momentinin kiriş taşıma gücü momentinden %20 daha büyük olması durumunda kolonların kirişlerden daha güçlü olması koşulu sağlanmaktadır. 1, 3 ve 5 sistemlerinin kolonların kirişlerden daha güçlü olması koşulunu sağlayan, 2, 4 ve 6 sistemlerinin ise ilgili koşulu sağlamayan sistemler olduğu Denklem 3.14 ve 3.15 ile gösterilmiştir.

1, 3 ve 5 sistemleri için:

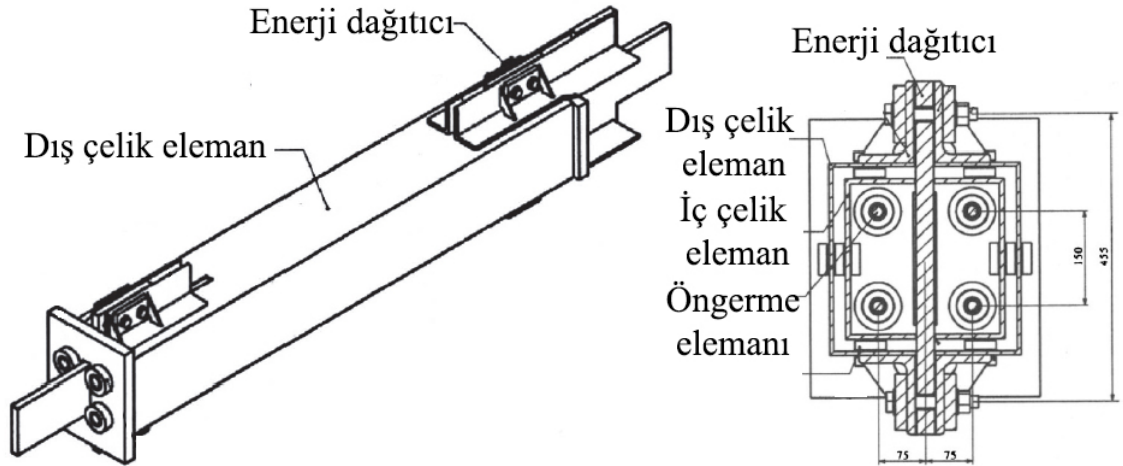
$$\frac{M_{r,kol}}{M_{r,kir}} = \frac{89.2}{45.1} = 1.97 > 1.2 \quad (3.14)$$

2, 4 ve 6 sistemleri için:

$$\frac{M_{r,kol}}{M_{r,kir}} = \frac{89.2}{122.8} = 0.72 < 1.2 \quad (3.15)$$

3.3. KMEDÇ

Christopoulos vd. (2008) tarafından geliştirilen ve bu çalışma kapsamında kullanılan KMEDÇ dört ana elemandan meydana gelmektedir. Bu elemanlar; iç çelik eleman, dış çelik eleman, öngerme elemanı ve enerji dağıtıcıdır. (Şekil 3.3)



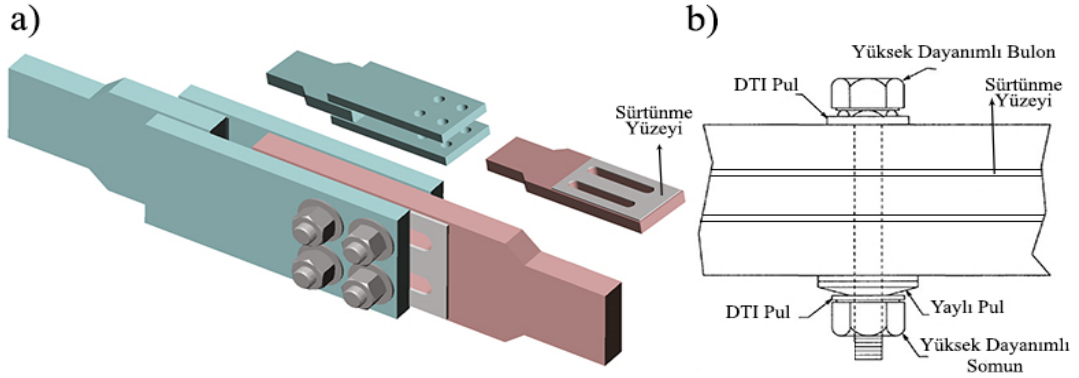
Şekil 3.3. KMEDÇ (Christopoulos vd. 2008)

Dış çelik eleman kare, dikdörtgen ya da dairesel kesitli çelik profillerden meydana gelirken iç çelik eleman kare, dikdörtgen, dairesel kesitli ya da I profil gibi çeşitli çelik profillerle oluşturulabilmektedir. Öngerme elemanı olarak çelik, aramid, karbon fiber gibi çeşitli öngerme tendonları kullanılmaktadır. Çaprazlarda enerji dağıtıcı olarak sürtünme sönümleyici, viskoz sönümleyici, şekil hafızalı alaşımlar ya da malzemenin akma davranışının kullanıldığı çeşitli histeretik malzemeler kullanılabilmektedir. Bu çalışmada iç ve dış çelik eleman olarak kare ve dairesel kesitli çelik profiller, öngerme elemanı olarak ASTM A416 Grade 270 sınıfı çelik tendon ve enerji dağıtıcı olarak kanallı plaka bulon bağlantıları ile oluşturulan KMEDÇ kombinasyonları incelenmiştir.

Kanallı plaka bulon bağlantısı, bulonlu kesme birleşimlerinin geliştirilmiş halidir. Bulon deliklerinin plaka doğrultusunda uzatılmalarıyla, plakaların birbirleri üzerinden kaymasına izin verilmekte ve yüzeyler arasında gerçekleşen sürtünme ile Coulomb sönümü oluşmaktadır (Grigorian ve Popov, 1994). Sürtünme kuvveti F_f , Denklem 3.16 ile ifade edilmektedir.

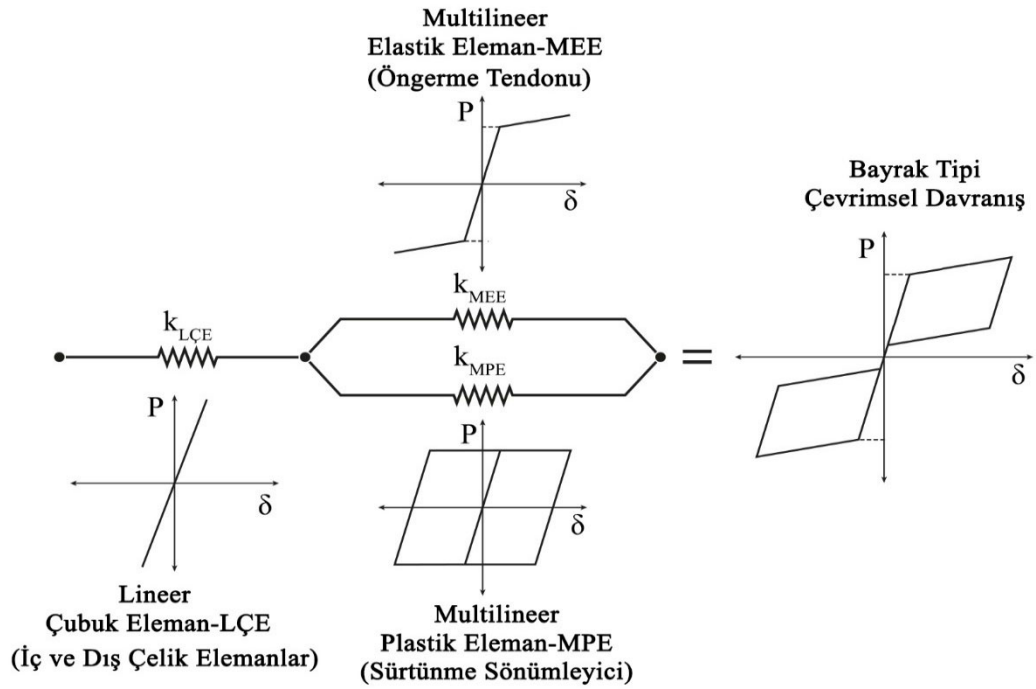
$$F_f = \mu F_N \quad (3.16)$$

Denklem 3.16’da μ , statik ve dinamik sürtünmede sabit kabul edilen sürtünme katsayısı, F_N ise kayan yüzeyler arasındaki dikey kuvvettir. Kanallı plaka bulon bağlantısındaki yüzeyler arasındaki dikey kuvvet yüksek dayanımlı bulonlarla sağlanmakta ve hareket sırasında sürtünme kuvvetinin azalmasını önlemek için bulonlarla plakalar arasında yaylı pullar kullanılmaktadır (Şekil 3.3). Ayrıca, sürtünme yüzeyi olarak pirinç ya da paslanmaz çelik plakaların kullanılmasıyla, hareket sırasında sürtünme kuvvetinin dalgalanmasının önüne geçilmektedir (Grigorian ve Popov 1994).



Şekil 3.4. Kanallı plaka bulon bağlantısı; **a)** Üç boyutlu görünüm (Erochko, 2013); **b)** Kesit (Gregorian ve Popov, 1994)

Bayrak tipi olarak isimlendirilen KMEDÇ'nin çevrimsel davranışı, iç ve dış çelik elemanlar, merkezleme amacıyla kullanılan öngerme elemanları ile enerji dağırıcı olarak kullanılan elemanların çevrimsel davranışlarının birleşiminden meydana gelmektedir (Şekil 3.4).



Şekil 3.5. Bayrak tipi çevrimsel davranışın oluşumu

KMEDÇ'nin iki ucundan biri iç çelik profile, diğeri ise dış çelik profile bağlı olarak yapıya uygulanmaktadır. Uygulanan dış kuvvet sonucunda bu profiller birbirlerine göre hareket ederken sürtünme sönümleyici de aktif hale gelmekte ve KMEDÇ'nin bayrak tipi çevrimsel davranışı meydana gelmektedir. Sabit durumda, basınç ya da çekme altındaki tüm durumlarda tendonlar çekme kuvveti etkisindedir. KMEDÇ'ye herhangi bir dış yük etkilemediğinde iç ve dış çelik elemanlar, son plakalar arasında öngerme tendonları

ile basınç kuvveti altındadır. Bu konumda sürtünme sönümleyici de sabit durumdadır (Şekil 3.5a).

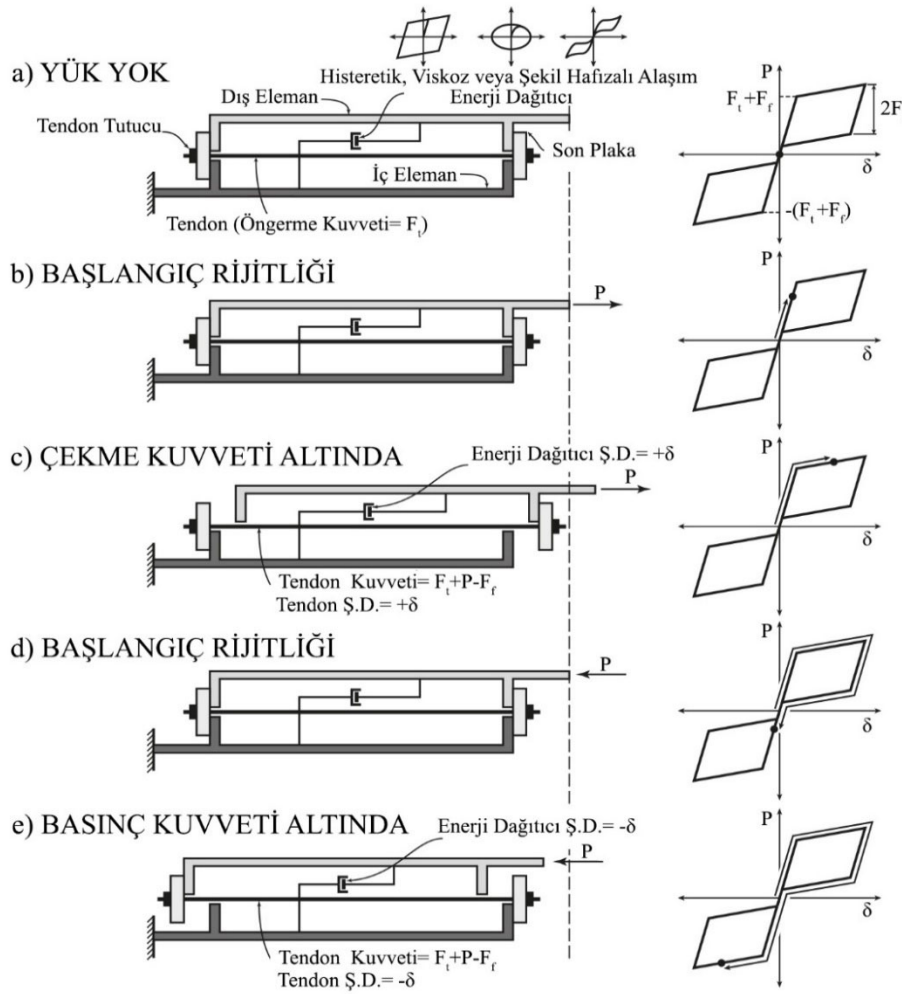
Dışarıdan KMEDÇ'ye bir P çekme kuvveti etkitildiğinde iç ve dış çelik elemanlara tendonlar tarafından etkiyen öngerme kuvveti azalacaktır. Bu durumda KMEDÇ yüksek bir rijitliğe sahip olup (K_1) bu rijitlik iç çelik eleman ($K_{iç}$), dış çelik eleman ($K_{dış}$) ve toplam tendon rijitliğinin (K_t) toplamına eşittir. (Şekil 3.5b)

$$K_1 = K_{iç} + K_{dış} + K_t \quad (3.17)$$

$$K_{iç} = \frac{E_s A_{iç}}{L_b} \quad (3.18)$$

$$K_{dış} = \frac{E_s A_{dış}}{L_b} \quad (3.19)$$

$$K_t = n_t \frac{E_t A_t}{L_b}, \quad (3.20)$$



Şekil 3.6. KMEDÇ Mekanizması

Burada E_s ve E_t sırasıyla çelik ve tendon elastisite modülleri, $A_{iç}$, $A_{dış}$ ve A_t sırasıyla iç çelik eleman, dış çelik eleman ve tendon kesit alanları, n_t ise kullanılan tendon sayısıdır. Dış P kuvveti artmaya devam ettiğinde ve bu kuvvet F_t öngerme kuvveti ile F_f sürtünme sönümleyici aktivasyon kuvvetinin toplamına ulaştığı andan itibaren tendonlar uzamaya ve çelik elemanlar birbirinden uzaklaşmaya başlamaktadır. (Şekil 3.5c)

$$F_y = F_t + F_f \quad (3.21)$$

Bu andan itibaren KMEDÇ'nin rijitliği (K_2^+) tendonların toplam rijitliğine eşittir.

$$K_2^+ = K_t \quad (3.22)$$

KMEDÇ en büyük kuvvet kapasitesi tendonların kopma noktasına bağlı olarak ifade edilmektedir. Ancak, sürtünme sönümleyicide bulonların içerisinde hareket ettikleri kanal uzunluğunun sınırlandırılması ile çaprazın eksenel yer değiştirme kapasitesi sınırlandırılabilir. Tendonların kopmasının engellenmesi için uygulanan bir diğer yöntem de çapraz, tendon kopma dayanımına karşı gelen eksenel kuvvet değerinden daha düşük bir değerde aktif hale gelen ve çapraz ile uygulanacak yapı birleşimine eklenen kanallı plaka bulon bağlantısı uygulamasıdır. Bu çalışmada, kanallı plaka bulon bağlantısında yeterli kanal uzunluğu bulunduğu ve çapraz yük kapasitesinin toplam tendon yük taşıma kapasitesine eşit olduğu kabul edilmiştir.

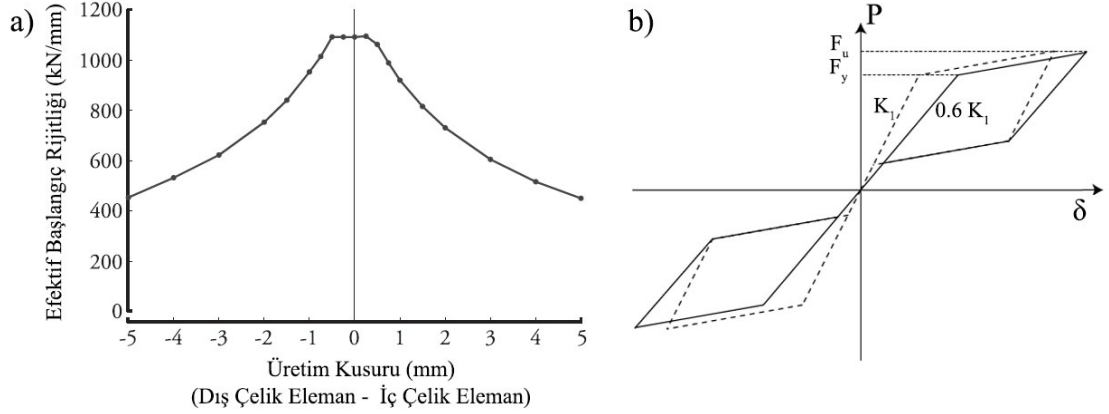
Uygulanan P çekme kuvveti azalmaya başladığı andan itibaren tendonlar iç ve dış çelik elemanları ilk pozisyonlarına doğru merkezlenme eğilimi gösterecektir. Ters yönde hareket başlamadan önce ve sürtünme sönümleyicinin sabitlendiği andaki rijitlik çapraz başlangıç rijitliğine eşittir. P kuvveti $2F_f$ kadar düştüğü andan itibaren iç ve dış çelik elemanlar başlangıç konumlarına doğru hareket etmeye başlamaktadır. Burada $2F_f$ kuvveti, hareketin durdurulması için gereken sürtünme kuvveti ve ters yönde hareketin başlayabilmesi için gereken sürtünme kuvvetinin toplamı olup bayrak tip çevrimsel hareketinin bir bölgedeki yüksekliğine eşittir. Bu değer KMEDÇ aktivasyon kuvveti F_y ve β enerji sönümleme katsayısı cinsinden Denklem 3.23 ile ifade edilebilmektedir.

$$2F_f = \beta F_y \quad (3.23)$$

Sürtünme sönümleyicinin ters yönde hareketi başladığı andan itibaren çapraz rijitliği toplam tendon rijitliğine eşittir. İç ve dış çelik elemanlar son plakalara temas edip bu plakalar tarafından sıkıştırılmaya başladığı anda ise rijitlik tekrar çapraz başlangıç rijitliğine eşit olmaktadır. KMEDÇ'ye P basınç kuvveti uygulanmaya başladığı ve henüz sürtünme sönümleyici hareket etmeye başlamadan rijitlik çekme altındaki davranışta olduğu gibi başlangıç rijitliğine eşittir (Şekil 3.5d). Çekme altındaki davranıştan farklı olarak basınç etkisiyle çapraz aktivasyon kuvveti aşıldığı anda rijitlik iç ve dış çelik eleman ile toplam tendon rijitliklerinin toplamına eşittir (Şekil 3.5e). Ancak, toplam tendon rijitliği iç ve dış çelik elemanların rijitliklerinden çok küçük olduğundan bu rijitlik toplam tendon rijitliğine eşit olarak kabul edilmektedir.

$$K_2^- = \frac{1}{\frac{1}{K_{iç}} + \frac{1}{K_{dış}} + \frac{1}{K_t}} \approx K_2^+ \quad (3.24)$$

Erochko vd. (2014b) üretim kusurları sebebiyle çapraz rijitlik değerlerinin farklılık gösterebileceğini belirtmiştir. Çapraz başlangıç rijitliğinin iç ve dış çelik elemanların uç plakalar tarafından sıkıştırıldığı andaki rijitliğe eşit olması, rijitliğin bu elemanların üretim boyutlarında meydana gelebilecek farklılıklardan etkilenebileceği anlamına gelmektedir. Erochko vd. (2014b) bu farklılığın başlangıç rijitliğine etkisini Şekil 3.6a ve 3.6b ile açıklamıştır.



Şekil 3.7. KMEDÇ Efektif başlangıç rijitliği; **a)** Eleman uzunluğu farkının efektif başlangıç rijitliğine etkisi; **b)** Başlangıç rijitliği değişimi (Erochko vd. 2014b)

Çalışmada, örneğin 5 mm’lik bir eleman uzunluk farkının başlangıç rijitliğinde %60’lık bir düşüşe sebep olabileceği belirtilmiştir. Bu çalışmada, herhangi bir üretim kusuru meydana gelmediği kabul edilmiş ve teorik değerler kullanılmıştır.

3.4. Modelleme

Yapılan çalışmada, iki boyutlu analizler açık kaynak kodlu sonlu elemanlar programı olan OpenSees (McKenna vd., 2000) programı aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Seçilen çerçeve sistemlerin performanslarının belirlenmesinde, modellemenin doğrulanması amacıyla OpenSees ile gerçekleştirilen analiz sonuçları, SAP2000 (2009) programı ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Optimizasyon aşamasında tekrarlı analizler ise MATLAB (The MathWorks Inc., 2019) ve OpenSees programları aracılığıyla etkileşimli bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

3.4.1. Malzeme modelleri

3.4.1.1. Sargılı ve sargısız beton modelleri

TBDY (2018)’de doğrusal olmayan analizler için Mander vd. (1988) tarafından belirtilen sargılı ve sargısız beton modelleri önerilmektedir. OpenSees programında bu beton modeline uygun olarak sargılı beton modeli için Concrete04, sargısız beton modeli için Concrete01 beton modelleri kullanılmıştır. Betonun çekme gerilmesi altında davranışı ihmal edilmiştir.

Concrete01 beton modeli beş değişkene bağlı olarak:

uniaxialMaterial Concrete01 \$matTag \$fpc \$sepsc0 \$fpcu \$sepsU

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada:

\$matTag: Malzeme etiketi,

\$fpc: Beton maksimum basınç dayanımı,

\$sepsc0: Maksimum dayanımdaki beton birim şekil değiştirmesi,

\$fpcu: Beton nihai basınç dayanımı,

\$sepsU: Maksimum beton birim şekil değiştirmesidir.

Concrete04 beton modeli beş değişkene bağlı olarak:

uniaxialMaterial Concrete04 \$matTag \$fc \$ec \$ecu \$Ec

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada:

\$matTag: Malzeme etiketi,

\$fc: Beton maksimum basınç dayanımı,

\$ec: Maksimum dayanımdaki beton birim şekil değiştirmesi,

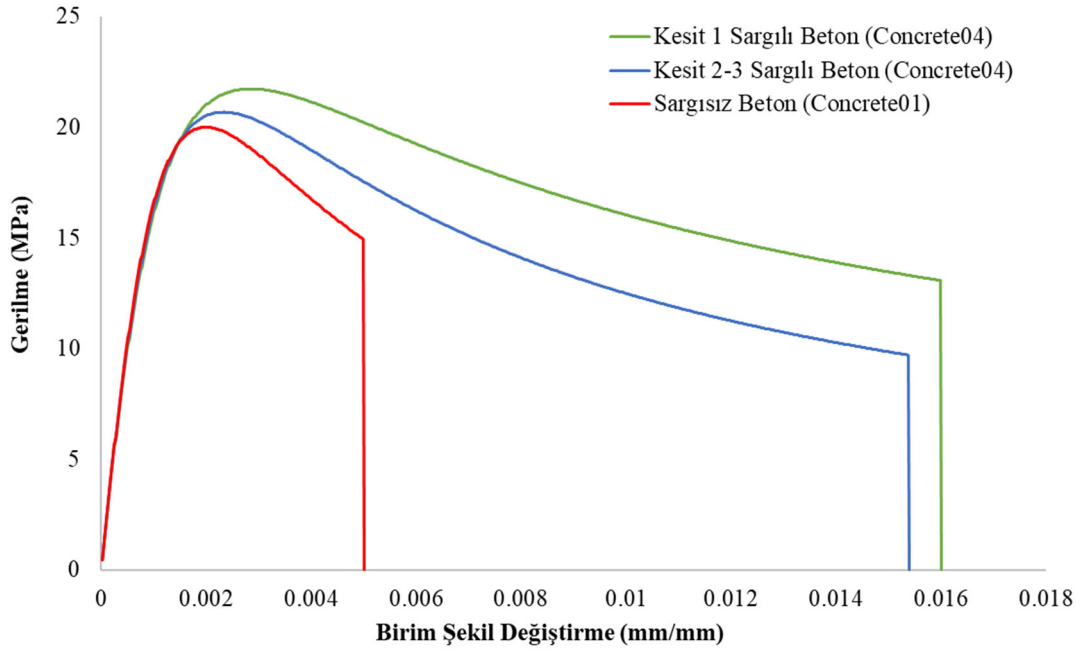
\$ecu: Maksimum beton birim şekil değiştirmesi,

\$Ec: Betonun elastisite modülüdür.

Gerekli değerler, malzeme modelini tanımlayan denklemler ile hesaplanıp ilgili modele tanımlanmıştır. Bu çalışma kapsamında kullanılan kesitler için bu değerler Çizelge 3.3'te verilmiştir. Kullanılan kesitler için sargılı ve sargısız beton modellerinin gerilme şekil değiştirme grafiği Şekil 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Sargılı ve sargısız beton bilgileri

Sargısız Beton Modeli		Sargılı Beton Modeli		
Concrete01	Kesit 1-2-3	Concrete04	Kesit 1	Kesit 2-3
\$fpc (Mpa)	-20	\$fc (Mpa)	-21.73	-20.68
\$sepsc0	-0.002	\$ec	-0.00286	-0.00234
\$fpcu (Mpa)	0	\$ecu	-0.01599	-0.01539
\$sepsU	-0.005	\$Ec (Mpa)	22360	22360



Şekil 3.8. Sargılı ve sargısız beton gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

3.4.1.2. Donatı çeliği modeli

TBDY (2018)'de doğrusal olmayan analizler için Mander donatı çeliği modeli önerilmektedir. OpenSees programında bu donatı çeliği modeli ReinforcingSteel malzeme modeliyle temsil edilmiştir. Ancak ReinforcingSteel malzeme modelinde maksimum gerilme değerinden sonra gerilme değeri bu değerde sabit kalmaktadır. TBDY (2018)'e uygun olarak kopma birim şekil değiştirme değerinden sonra gerilme değerlerinin sıfırlanması için bu model MinMax malzeme modeliyle birleştirilmiştir. Ayrıca malzeme çevrimsel davranışında donatı burkulması davranışı göz önüne alınmıştır (Dhakal ve Maekawa, 2002).

ReinforcingSteel donatı çeliği modeli:

```
uniaxialMaterial ReinforcingSteel $matTag $fy $fu $Es $Esh $esh $eult < -DMBuck
$lsr >
```

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada:

\$matTag: Malzeme etiketi,

\$fy: Donatı çeliği akma dayanımı,

\$fu: Donatı çeliği kopma dayanımı,

\$Es: Çelik elastisite modülü,

\$Esh: Donatı pekleşme bölgesindeki elastisite modülü,

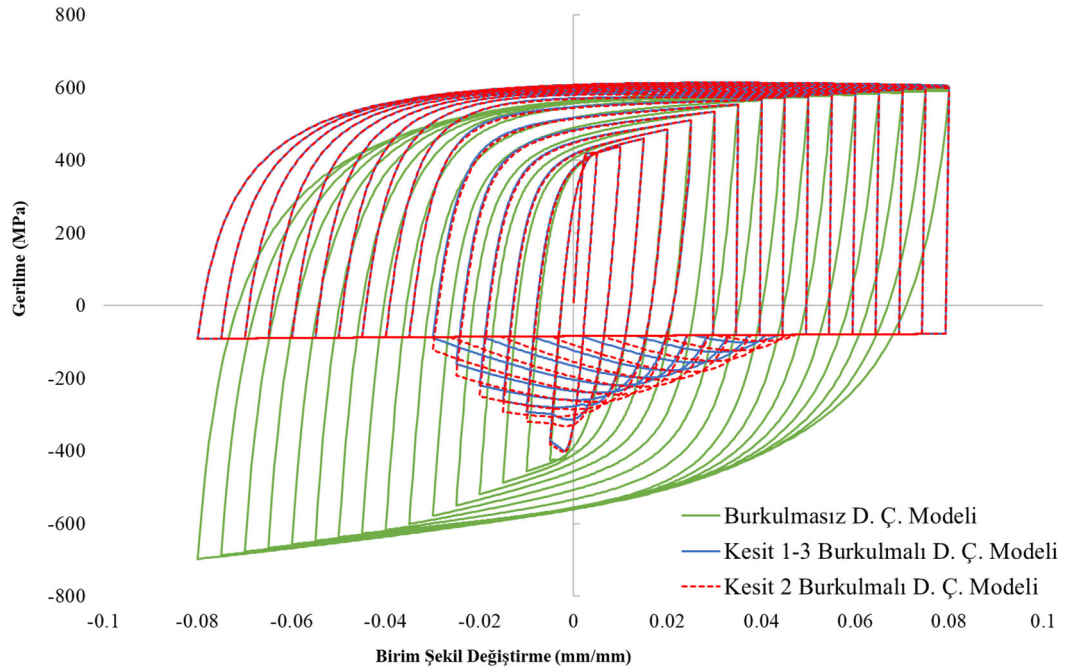
\$esh: Donatının pekleşmeye başladığı andaki birim şekil değiştirmesi,

\$eult: Donatı çeliğinin kopma birim şekil değiştirmesi,

\$lsr: İki etriye arası mesafenin donatı çapına bölünmesiyle elde edilen donatı narinlik oranıdır (Dhakal ve Maekawa, 2002). Bu çalışma kapsamında kullanılan kesitler için bu değerler Çizelge 3.4'te verilmiştir. Burkulmalı ve burkulmasız donatı çeliği modellerinin gerilme şekil değiştirme grafiği ise Şekil 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Donatı çeliği bilgileri

ReinforcingSteel	Kesit 1-3	Kesit 2
\$fy (Mpa)	420	420
\$fu	550	550
\$Es (Mpa)	220000	220000
\$Esh (Mpa)	3611	3611
\$esh	0.008	0.008
\$eult	0.08	0.08
\$lsr	10.714	12.5



Şekil 3.9. Donatı çeliği burkulmalı ve burkulmasız gerilme-şekil değiştirme eğrileri

3.4.1.3. Kendini merkezleyen malzeme modeli

OpenSees programında kendini merkezleyen malzeme SelfCentering malzemesi ile;

uniaxialMaterial SelfCentering \$matTag \$k1 \$k2 \$sigAct \$beta

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada:

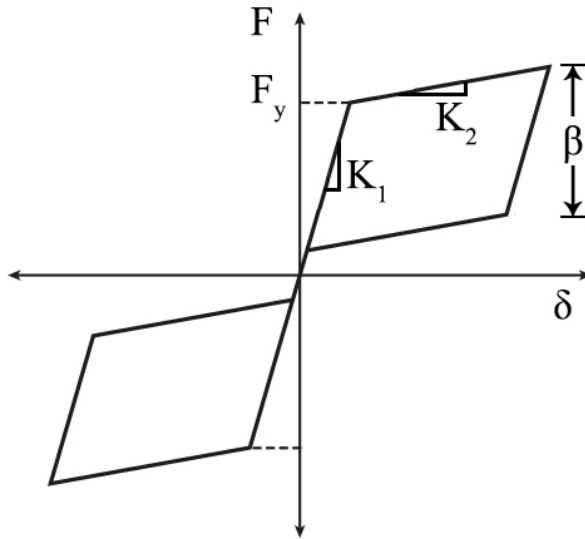
\$matTag: malzeme etiketi,

\$k1: başlangıç rijitliği (K_1),

\$k2: aktivasyon sonrası rijitlik (K_2),

\$sigAct: aktivasyon kuvveti (F_y),

\$beta: enerji sönümlenme katsayısıdır (β). (Şekil 3.9)



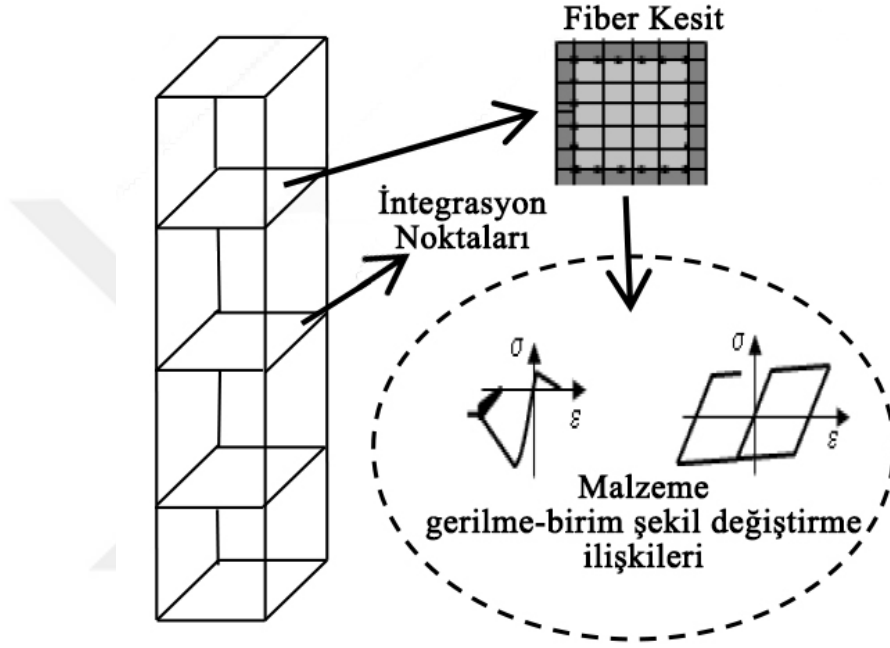
Şekil 3.10. Bayrak tipi çevrimsel davranış ve bu davranışı tanımlayan değişkenler

3.4.2. Yapısal elemanların doğrusal olmayan modellemesi

Doğrusal olmayan sistem analizlerinde doğrusal olmayan elemanlar yayılı ve yığılı plastik olarak modellenebilmektedir. Yığılı plastik modellerde doğrusal olmayan davranışın elemanın belirli bir bölümünde meydana geldiği, diğer bölümlerinin ise doğrusal davrandığı kabul edilmektedir. Doğrusal olmayan şekilde davranan sonlu eleman bölgesi, rijit plastik mafsallık, eksenel yay ya da moment dönme yayı şeklinde modellenebilmektedir.

Yayılı plastik modellerde doğrusal dışı davranış genel olarak malzeme gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileriyle tanımlanmaktadır. Eleman ya da yapının tamamının lif elemanlarla tanımlanarak doğrusal dışı davranışın belirlenmesi yüksek bilgisayar gücü ve zaman gerektirmektedir. Bu problemin aşılması amacıyla inşaat mühendisliği

problemlerinde Scott ve Fenves (2006) tarafından geliştirilen çubuk lif eleman modeli kullanılmaktadır. Çubuk lif eleman modelinde eleman uzunluğu boyunca belirli sayıda integrasyon noktaları tanımlanır (Şekil 3.10). Her integrasyon noktasında fiber kesitler tanımlanarak doğrusal olmayan davranış, liflerde tanımlı olan malzeme davranışlarıyla elde edilir. Bu modelde, düzlem kesitlerin şekil değiştirdikten sonra yine düzlem kalacağı ve eğilme momenti hesabında birim şekil değiştirme dağılımının doğrusal gerçekleştiği kabulü yapılmaktadır. Artımsal olarak ilerleyen doğrusal olmayan analizin her adımında eleman uç kuvvet ve yer değiştirmeleri sonlu elemanlar yaklaşımı ile tekrarlı olarak elde edilir. Her adımda yeni rijitlik yine sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilir.



Şekil 3.11. Çubuk fiber eleman (Ergül, 2018)

OpenSees programında çubuk lif elemanlar, “fiber section” ve “nonlinear beamcolumn” elemanlar ile tanımlanmaktadır. Bu elemanların tanımlanmasında yer değiştirme-rijitlik ve kuvvet esaslı elemanlar kullanılmaktadır. Literatürde kuvvet esaslı elemanlarda dört ve üzeri integrasyon noktası ile en az 6x6 life sahip kesitlerin kullanılması önerilmektedir (Zendaoui vd., 2016; Du vd., 2012). Bu çalışmada, kolon ve kirişler, beş integrasyon noktasına sahip kuvvet esaslı elemanlar ile 25x25 life sahip kesitler şeklinde modellenmiştir. Kolonlarda P-Delta etkileri dikkate alınmıştır. KMEDÇ ise yalnızca eksenel yer değiştirme yapabilen “twoNodeLink” elemanı ile modellenmiştir.

SAP2000 programında ise kolon ve kirişlerin doğrusal dışı davranışı Fiber P-M2-M3 plastik mafsali ile sağlanmış ve mafsali boyu kesit yüksekliğinin yarısı olarak alınmıştır (TBDY, 2018). Yer değiştirme tabanlı elemanlarda, eksenel ve enine şekil değiştirmeler, şekil fonksiyonlarının interpolasyonu ile elde edilir. Yer değiştirme esaslı yöntemde, her integrasyon noktası için birim şekil değiştirme vektörleri elde edilmektedir. Kesitlerdeki her bir lif için malzeme davranışından gerilme ve elastisite modülü değerleri hesaplanmaktadır. Daha sonra kesit rijitlik matrisleri elde edilerek kesit

reaksiyon kuvvetlerine ulaşılır. Ardından da eleman rijitlik matrisleri, iç kuvvetleri ve yer değiştirmeleri elde edilir (Ergül, 2018).

Kuvvet tabanlı yöntemde, iç kuvvetler interpolasyon formülleri ile elde edilmektedir (Neuenhofer ve Filippou, 1997). Bu yöntemde, önce düğüm noktalarındaki kuvvet değişimleri ardından iç kuvvet artımları hesaplanmaktadır. Daha sonra kesit esneklik matrisleri kullanılarak kesit birim şekil değiştirme artımları elde edilir. Bu artımlar önceki birim şekil değiştirmelere eklenir ve ardından kesit kuvvetleri bulunur. Yeni adımın kesit rijitliği elde edilip bu rijitlik matrisinin tersi alınarak kesit esneklik matrisine geçilir. Ardından şekil fonksiyonları ile eleman esneklik ve rijitlik matrisleri elde edilir. Daha sonra kesit kuvvetleri yardımıyla kesit artık şekil değiştirmeleri elde edilmektedir. İç kuvvetler, artık şekil değiştirmeler ve rijitlik matrisi ile elde edilip sonuç olarak dengelenmemiş kesit kuvvetleri elde edilmektedir. (Ergül 2018).

3.5. Optimizasyon

Optimizasyon, belirli amaç ya da amaçlar doğrultusunda tanımlanan problemin belirli koşul ya da koşullara bağlı olarak mevcut çözümleri içerisinde en uygun çözümün bulunması işlemidir. Matematiksel olarak ise bir fonksiyonun belirli sınırlar içerisinde bağlı olduğu değişkenlere göre minimizasyonu ya da maksimizasyonudur. Optimizasyon işlemi, uygulama açısından boyutlandırma, şekillendirme ve topoloji optimizasyonu olmak üzere üç farklı şekilde sınıflandırılabilir.

Optimizasyon işleminin ilk adımı olan modelleme aşamasında, tanımlanan amacın maksimize ya da minimize edilecek şekilde bir matematiksel fonksiyona dönüştürülmüş hali amaç fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Amaç sayısına göre tek ya da çok amaçlı amaç fonksiyonları belirlenebilmektedir. Çok amaçlı amaç fonksiyonlarında, amaçlar tek bir fonksiyon şeklinde ifade edilmektedir. Örneğin iki amaçlı bir amaç fonksiyonu:

$$\begin{aligned} H(\vec{x}) &= \min F(\vec{x}) \ \& \ \max G(\vec{x}) = \min(F(\vec{x}) + \frac{1}{G(\vec{x})}) \\ &= \min(f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x})) \end{aligned} \quad (3.25)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Optimizasyon probleminde amaç fonksiyonunun değerini değiştiren değişkenler tasarım değişkeni olarak adlandırılmaktadır. Tasarım değişkenleri optimum değeri belirleyen esas değişkenlerdir. Bu değişkenler ayrık ve sürekli olmak üzere iki farklı şekilde tanımlanabilmektedir. Sürekli tasarım değişkeni, belirli alt üst limitler arasında sınırsız sayıda herhangi bir değer olabilirken ayrık tasarım değişkenleri belirli bir sayıdaki değişkenler olarak tanımlanmaktadır.

Optimizasyon probleminde amaç fonksiyonunun çözüm kümesi sınırlayıcılar ile sınırlandırılabilir. Eşitlik ya da eşitsizlik olarak tanımlanan sınırlayıcılara uymayan çözümler tasarım olarak değer kazanmamaktadır.

3.5.1. Optimizasyon probleminin tanımlanması

Bu çalışmada TBDY (2018)'e göre yeterli deprem güvenliği sağlanmayan betonarme çerçevelerin KMEDÇ ile güçlendirilmesinde minimum KMEDÇ maliyeti ve maksimum enerji dağıtımı sağlayan KMEDÇ tasarımının elde edilmesi amaçlanmıştır.

KMEDÇ'nin tasarımının belirlenmesinde dikkate alınan koşullar aşağıdaki şekilde sıralanmıştır:

- i) Çerçevenin tüm kesitlerinde TBDY (2018) sınırlı hasar performans düzeyi için belirlenen beton ve donatı çeliği birim şekil değiştirme sınırları sağlanacaktır.
- ii) Zaman tanım alanında analiz sırasında öngerme tendonlarında oluşan gerilme değerleri tendon kopma gerilmesinin 90%'ını geçmeyecektir (ACI, 2019).
- iii) İç ve dış elemanlar, bu elemanlarda oluşan en büyük eksenel basınç kuvveti altında burkulmayacaktır.
- iv) KMEDÇ tasarımı en düşük maliyetle en büyük enerji dağıtacak şekilde, Yapay Arı Kolonisi Algoritması'nın kullanıldığı optimizasyon yöntemiyle belirlenecektir.
- v) KMEDÇ tasarımını belirleyen tasarım değişkenleri, iç ve dış eleman kesit alanları, tendon sayısı ve kesiti, tendon öngerme miktarı ve enerji sönmeme katsayısıdır.
- vi) Maliyet, iç ve dış eleman kesit alanları toplamı, tendon sayısı ve kesit alanı ile temsil edilecektir.
- vii) İç ve dış eleman kombinasyonları ile tendon kesitleri, oluşturulan kesit tablosundan seçilecektir. İç ve dış elemanlar kare ve dairesel kesitli olarak seçilmiş ve bu eleman kombinasyonları iç içe geçerek aralarında en az 1 cm mesafe kalacak şekilde oluşturulmuştur.
- viii) Optimizasyon amaç fonksiyonunda maliyet ve enerji dağıtım ağırlık katsayıları 0 ve 1 arasında 0.1 aralıklarla seçilecek ve her bir kombinasyon için optimizasyon işlemi gerçekleştirilecektir.
- ix) En uygun tasarım, farklı ağırlık katsayıları ile gerçekleştirilen analiz sonuçları içerisinde amaç fonksiyonu değerini minimum yapan tasarım olarak kabul edilecektir.

Bu problemde çok amaçlı amaç fonksiyonu öncelikle;

$$f(\vec{x}_1, \vec{x}_2) = w \times \text{maliyet} + \frac{(1 - w)}{E_d} \quad (3.26)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada w , maliyet ağırlık katsayısı, E_d ise KMEDÇ'nin deprem etkisi altında dağıttığı toplam enerji miktarıdır. Yalnızca maliyeti göz önüne alan ve yalnızca enerji dağıtım miktarını göz önüne alan amaç fonksiyonları, maliyet ağırlık katsayısı 1 ve 0 alınarak tanımlanmıştır. Buradan elde edilen amaç fonksiyon değerleri $\min(\text{maliyet})$ ve $\max(E_d)$ olarak kabul edilmiş ve amaç fonksiyonu Denklem 3.27 şekline dönüştürülmüştür. Daha sonra 0 ile 1 arasında, 0.1 aralıklarla her bir w değeri için analizler gerçekleştirilmiştir.

$$f(\vec{x}_1, \vec{x}_2) = \frac{w \times \text{maliyet}}{\min(\text{maliyet})} + \frac{(1 - w) \times \max(E_d)}{E_d} \quad (3.27)$$

Optimizasyon probleminde tanımlanan tasarım değişkenleri, n_t tendon sayısı, A_t tendon kesit alanı, A_{top} iç ve dış eleman kesit alanları toplamı, f_{pi} öngerme miktarı ve β enerji sönümlleme katsayısıdır. Önceden oluşturulan profil tablolarından seçilen A_t ve A_{top} ile n_t ayrık, f_{pi} ve β ise sürekli tasarım değişkenleri olarak tanımlanmıştır. Tendon kesit alanları ve iç dış eleman profil tabloları Ek Çizelge 7.1 ve 7.2’de verilmiştir.

Maliyet, iç ve dış eleman kesit alanları ile tendon sayısı ve kesit alanlarına bağlı olarak Denklem 3.28 ile elde edilmiştir. Burada L_b , KMEDÇ uzunluğu (tendon ve elemanlar için eşit kabul edilmiştir), γ_s , çelik birim hacim ağırlığı (7.87×10^{-6} kg/mm³), br_1 ve br_2 sırasıyla tendon ve çeliğin kilogram fiyatı olup 1 ve 0.45 \$ olarak alınmıştır (Alqedra vd. 2011).

$$\text{maliyet} = L_b \times \gamma_s (br_1 \times n_t \times A_t + br_2 \times A_{top}) \quad (3.28)$$

KMEDÇ’nin deprem altında dağıttığı toplam enerji miktarı E_d , KMEDÇ kuvvet yer değiştirme grafiğinin alanı olarak Denklem 3.29 ile hesaplanmıştır. Burada F_i ve F_{i-1} , i. ve (i-1). adımlarda KMEDÇ’de oluşan eksenel kuvvet, Δ_i ve Δ_{i-1} ise bu adımlarda oluşan deformasyon değerleri, n ise yer hareketi adım sayısıdır.

$$E_d = \sum_{i=1}^n \frac{F_i + F_{i-1}}{2} (\Delta_i - \Delta_{i-1}) \quad (3.29)$$

Amaç fonksiyonun çözüm kümesi geometrik ve davranış sınırlayıcılar ile sınırlandırılmıştır. Tasarım değişkenlerini sınırlandıran geometrik sınırlayıcılar tendon öngerme miktarı, enerji dağıtım katsayısı ve tendon sayısıdır. ASTM A416 Grade 270 tendonda, tendonun kopma gerilmesi değeri olan $f_{pu}=1860$ MPa’nın %90’ı (1674 MPa), analiz esnasında tendonda oluşabilecek en büyük gerilme değeri olarak belirlenmiştir. f_{pi} öngerme miktarının üst sınırı $0.8f_{pu}=1488$ MPa olarak belirlenmiştir (ACI, 2019). Ayrıca geometrik kısıtlamalar dikkate alınıp tendon sayısı 10 ile sınırlandırılmıştır. β enerji sönümlleme katsayısı ise 0 ile 1 arasında tanımlanmaktadır. (Denklem 3.30)

$$\begin{aligned} 0 < f_{pi} &< 1488 \\ 0 < \beta &< 1 \\ 1 < n_t &< 10 \end{aligned} \quad (3.30)$$

Davranış sınırlayıcılar, TBDY (2018) sınırlı hasar performansı düzeyi şekil değiştirme sınırları ile eleman elastik burkulma kuvveti olarak belirlenmiştir. Eleman elastik burkulma kuvveti için belirlenen sınırlayıcı fonksiyon deprem etkisinde KMEDÇ’de oluşan maksimum eksenel kuvvete (F_u) bağlı olarak,

$$I_{\min} \geq \frac{F_u(KL_b)^2}{\pi^2 E_s} \quad (3.31)$$

şeklinde ifade edilmiştir (ÇYTHY, 2017). Burada $I_{\min}$, elemanın burkulmaması için gereken minimum atalet momenti, K ise burkulma boyu katsayısı olup mesnet şartları göz önüne alınarak 1 alınmıştır. Sınırlayıcı fonksiyonlar Denklem 3.32-3.34 ile verilmiştir. Burada I , ilgili işlem adımında seçilen iç ve dış elemanların atalet momentlerinin küçük olanıdır.

$$g(\vec{x})_1 = \frac{\epsilon_c}{0.0025} - 1 \leq 0 \quad (3.32)$$

$$g(\vec{x})_2 = \frac{\epsilon_s}{0.0075} - 1 \leq 0 \quad (3.33)$$

$$g(\vec{x})_3 = \frac{I_{\min}}{I} - 1 \leq 0 \quad (3.34)$$

Yapılan çalışmada 3.32, 3.33, 3.34 sınır fonksiyonlarını sağlamayan amaç fonksiyonu değerleri ceza değeri ile çarpılarak artırılmıştır.

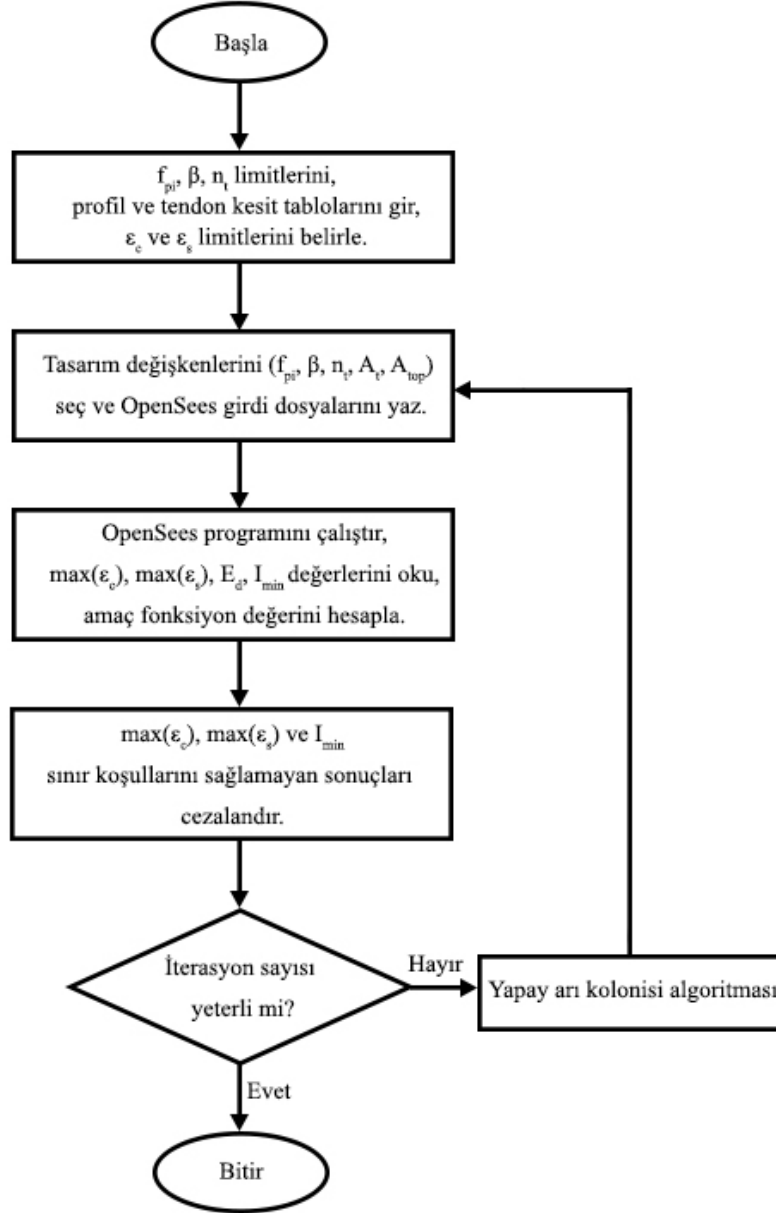
$$f_{\text{ceza}} = f \times (1 + T_{\text{ceza}})^\epsilon \quad (3.35)$$

Denklem 3.35'te T_{ceza} toplam ceza değerini, ϵ ise ceza katsayısı olup bu çalışmada 2 olarak alınmıştır. Toplam ceza değeri,

$$T_{\text{ceza}} = g(\vec{x})_1 + g(\vec{x})_2 + g(\vec{x})_3 \quad (3.36)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Ayrıca analiz sırasında sistemin göçmesi veya tendon gerilmelerinin f_{pu} değerinden büyük oluşması durumunda T_{ceza} değerinin sonsuz olarak alınması sağlanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan akış şeması Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.12. Algoritma akış şeması

3.5.2. Yapay arı kolonisi algoritması

Karaboğa ve Baştürk (2007) tarafından geliştirilen bir meta-sezgisel optimizasyon yöntemi olan yapay arı kolonisi optimizasyon yöntemi (YAKA), arı kolonilerinin çiçeklerdeki yiyecek kaynaklarını toplama sırasında yaptıkları topluluk halindeki davranıştan esinlenerek geliştirilmiştir. Bu yöntemde besin kaynağı, görevli işçi arılar ve görevsiz işçi arılar olmak üzere üç temel bileşen bulunmaktadır. İşçi arılar, besin kaynağını yuvaya getirmek ve bu kaynak hakkındaki konum, miktar, yoğunluk gibi bilgileri koloniye aktarmakla görevlidir. Yük ve bilgi aktarma görevi biten işçi arılar görevsiz arıya dönüşerek kâşif ve gözcü arılar haline gelmektedir. Kâşif arılar kovan çevresindeki besin kaynakları hakkında herhangi bir bilgiye sahip olmadan gezinmektedir. Bu durumda kâşif arının iki seçeneği vardır:

- i. Kâşif arı olarak devam eder ve herhangi bir ön bilgiye sahip olmadan besin kaynağı aramaya devam eder,
- ii. Gözcü arı olarak kuyruk danslarını izleyip en karlı besin kaynağına yönelir.

Besin kaynağına ulaşip kaynağı tüketmeye başlayan arı aynı zamanda bu kaynağın konumunu hafızasında tutar. Bu aşamadan itibaren görevli arı haline gelir ve besini koloniye taşıyarak, besin deposuna boşaltır. Daha sonra dört farklı seçenektan birisi ile yoluna devam eder. Bu seçenekler:

- i. Kaynaktaki besin miktarının azalması nedeniyle bu kaynağı terk eder ve görevsiz arıya dönüşür.
- ii. Kovanda dans ederek diğer arılara bu kaynak hakkında bilgi verir.
- iii. Herhangi bir bilgi paylaşmadan besin kaynağına yönelir.
- iv. İlgilendiği besin kaynağını terk edip başka arıların dansından bilgi edinir.

Doğadaki arıların bu karmaşık davranışının sadeleştirilmesi amacıyla YAKA'da bazı varsayımlarda bulunmaktadır. Bunlar:

- i. Bir besin kaynağının yalnızca bir arı besin almaktadır. Dolayısıyla besin kaynağı sayısı ile görevli arı sayısı eşittir.
- ii. Gözcü ve görevli arı sayıları eşittir.
- iii. Bir kaynakta besin bittiği zaman o kaynakla ilgili arı kâşif arıya dönüşmektedir.

Besin kaynaklarının konumları, optimizasyon problemindeki olası çözümleri ifade ederken, kaynaktaki besin zenginliği, çözümlerin kalitesini ifade etmektedir. YAKA'da koloninin yarısı görevli arılardan diğer yarısı ise gözcü arılardan oluşmaktadır.

3.5.2.1. Yöntem adımları

Aşama 1: Bu aşamada besin kaynak sayısı, besin kaynağının bırakılmasında kullanılacak olan limit değer ve maksimum döngü sayısı belirlenir. Kaynak sayısı kadar görevli ile gözcü arı tanımlanır ve rastgele olarak besin kaynakları oluşturulur. Besin kaynaklarının yerleri Denklem 3.37 ile belirlenir.

$$x_{p,i} = \text{round}(x_{li} + \text{rand}(0,1)(x_{ui} - x_{li})); p = 1,2, \dots, \text{YKS}; \quad (3.37)$$

$$i = 1,2, \dots, \text{TDS}$$

Burada p yiyecek kaynağını belirten indis, i tasarım değişkenini belirten indis, $x_{p,i}$, p numaralı yiyecek kaynağının i numaralı tasarım değişken değerini, x_{li} , i numaralı tasarım değişkenin alt limit değerini, x_{ui} , i numaralı tasarım değişkenin üst limit değerini, $\text{rand}(0,1)$ normal dağılıma göre [0 1] aralığında üretilen rasgele sayıyı, round reel sayıdan tamsayıya dönüştürme fonksiyonunu, YKS yöntemde tanımlanan toplam yiyecek sayısını ve TDS optimizasyon probleminde tanımlanan toplam tasarım değişkeni sayısını ifade etmektedir.

Yiyecek kaynaklarının yerleri belirlendikten sonra, bu yiyecek kaynağındaki besin miktarını temsil eden performanslar ($f_{p,i}$) belirlenir. Bu çalışmada kaynak sayısı olarak 20, besin kaynağının bırakılmasında kullanılacak olan limit 50, maksimum iterasyon sayısı olarak 2000 değerleri kullanılmıştır.

Aşama 2: İşçi arılar mevcut besin kaynakları çevresinde yeni besin kaynakları belirler ve bu kaynakların çözüm değerleri belirlenir. Yeni kaynağın belirlenmesi

$$x_{pi}^{new} = \text{round}(x_{pi} + \text{rand}(-1,1)(x_{pi} - x_{ki})) \quad (3.38)$$

$$p = 1, 2, \dots, YKS$$

ifadesi ile gerçekleştirilir. Burada $\text{rand}(-1,1)$, $[-1, 1]$ aralığında üretilen rasgele sayıyı, p mevcut tasarım indisini, k komşu tasarım indisini ifade etmektedir.

Yeni oluşturulan kaynakların performans değerleri belirlenerek mevcut performanslar ile karşılaştırılır. Yeni performans değeri mevcut performanstan daha iyiye eski kaynak yeni kaynak ile yer değiştirir. Bu yer değiştirme işlemi açgözlü seçim olarak adlandırılmaktadır. Eğer yeni performans değeri eskisinin yerine geçemezse besin kaynağı kullanma sayısı bir artırılır.

Aşama 3: Bu aşamada gözcü arılar, işçi arıların topladıkları bilgiler doğrultusunda hangi besin kaynağına uçacağını belirler. Gözcü arıların karar verme aşaması,

$$\text{Eğer } P_i > \text{rand}(0,1) \text{ ise kaynağı seç; } i = 1, 2, \dots, YKS$$

şeklinde gerçekleşir. Burada P_i , i numaralı yiyecek kaynağın (tasarımın) seçilme olasılığı olup Denklem 3.39 ile hesaplanmaktadır.

$$P_i = \frac{f_{ceza,i}}{\sum_{j=1}^{YKS} f_{ceza,j}} \quad i = 1, 2, \dots, YKS \quad (3.39)$$

Bu işlemden sonra gözcü arılar yeni tasarımlar oluşturur ve bu tasarımlara açgözlü seçim uygulanır.

Aşama 4: Bu aşamada besin kaynağının tükenip tükenmediği kontrol edilir. Besin kaynağı kullanım sayısı belirlenen limit sayısını aşarsa besinin tükendiği kabul edilir. Ardından kâşif arı görevlendirilerek yeni besin kaynağı bulunur ve tükenen kaynak yerine atanır. Bu işlemden sonra 2. aşamaya dönlür ve aşama 2-3 arasında gerçekleştirilen işlemler maksimum iterasyon sayısına ulaşıncaya kadar tekrar eder.

YAKA basitleştirilmiş kod olarak aşağıda verilmiştir.

Optimizasyon ve problem parametrelerini tanımla

Dön $i=1, YKS$

Başlangıç tasarımlarını (x_i) rasgele oluştur ve bunların performanslarını belirle

Yiyecek kullanma sayısı(i)=0

Döngü Sonu $\%i=1, YKS\%$

Elde edilen verilerle tasarım havuzunu oluştur.

Tekrar sayısı=0

Dön Tekrar sayısı < maksimum tekrar sayısı şartı sağlanırsa

Dön i=1, YKS

Yeni tasarım(x^{new}) oluştur

Tekrar sayısı=Tekrar sayısı+1

Oluşan tasarıma açgözlü seçim uygula

Eğer yeni tasarım eski tasarımın yerine geçerse

Yiyecek kullanma sayısı(i)=0

Değilse

Yiyecek kullanma sayısı(i)= Yiyecek kullanma sayısı(i)+1

Eğer sonu

Döngü Sonu %i=1, YKS%

Yiyecek kaynakların seçilme olasılıklarını hesapla

i=1; t:=0

Dön t< YKS olduğu sürece

Eğer Denklem (3) 'teki şart sağlanırsa

t=t+1

Yeni tasarım(x^{new}) oluştur

Tekrar sayısı=Tekrar sayısı+1

Oluşan tasarıma açgözlü seçim uygula

Eğer yeni tasarım eski tasarımın yerine geçerse

Yiyecek kullanma sayısı(i)=0

Değilse

Yiyecek kullanma sayısı(i)= Yiyecek kullanma sayısı(i)+1

Eğer sonu

Eğer sonu

i=i+1; i<=YKS

Döngü Sonu %i t< YKS %

Dön i=1, YKS

Eğer Yiyecek kullanma sayısı(i)> yiyecek limit sayısı

Yeni tasarımı (x) rasgele oluştur ve bunların performanslarını belirle, bu tasarımı i numaralı yiyecek kaynağın ata

Tekrar sayısı=Tekrar sayısı+1

Eğer sonu

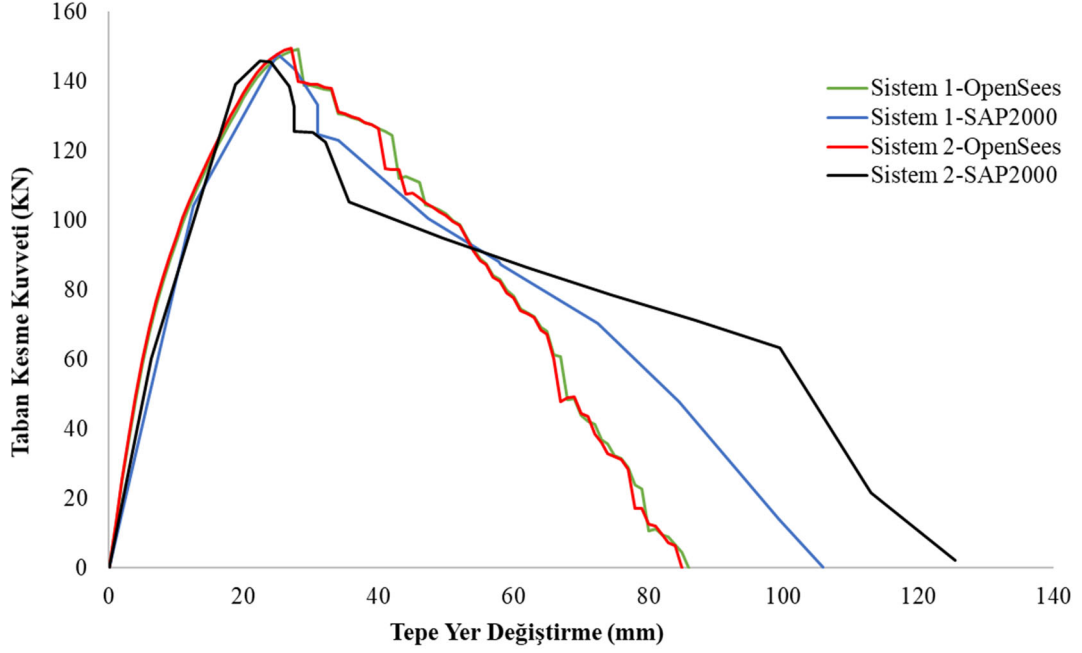
Döngü Sonu %i=1, YKS%

Döngü Sonu % Tekrar sayısı < maksimum tekrar sayısı %

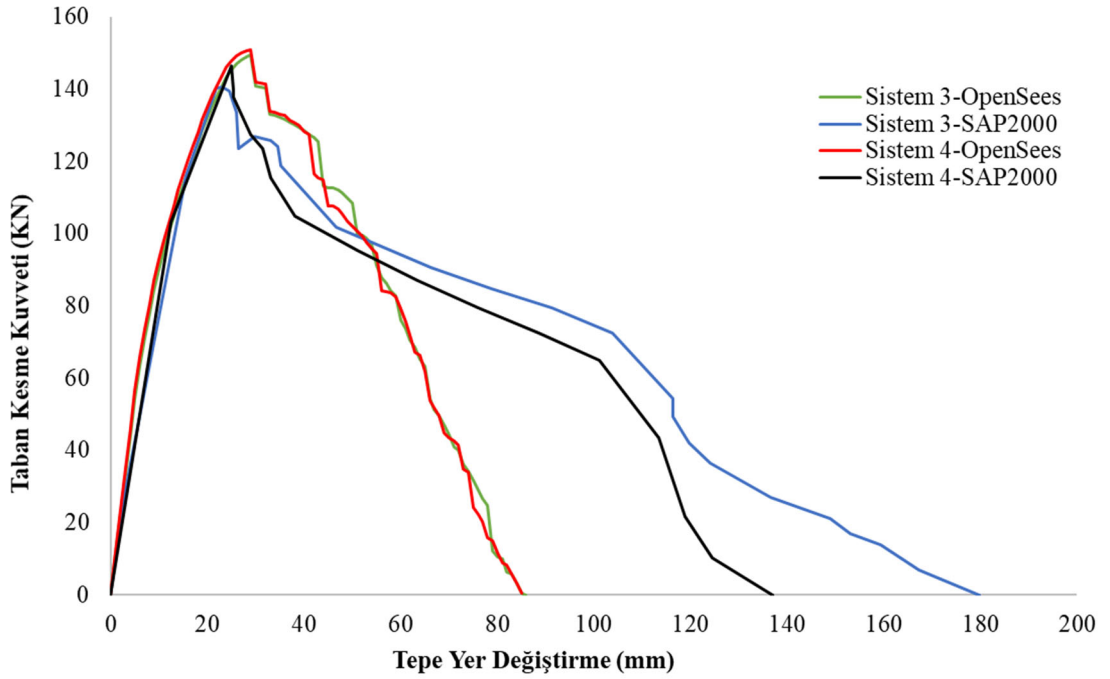
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Sistem Mevcut Performansları

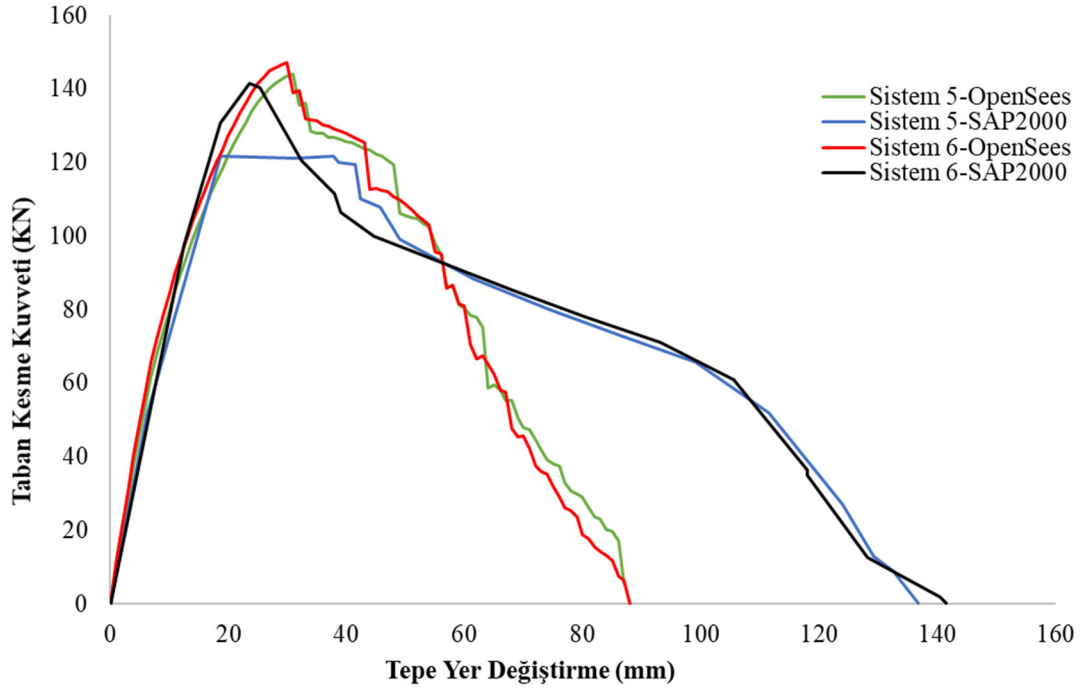
İncelenen sistemlerin, OpenSees ve SAP2000 programlarında statik itme analizleri gerçekleştirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şekil 4.1-4.3).



Şekil 4.1. Sistem 1-2 OpenSees ve SAP2000 statik itme eğrileri



Şekil 4.2. Sistem 3-4 OpenSees ve SAP2000 statik itme eğrileri

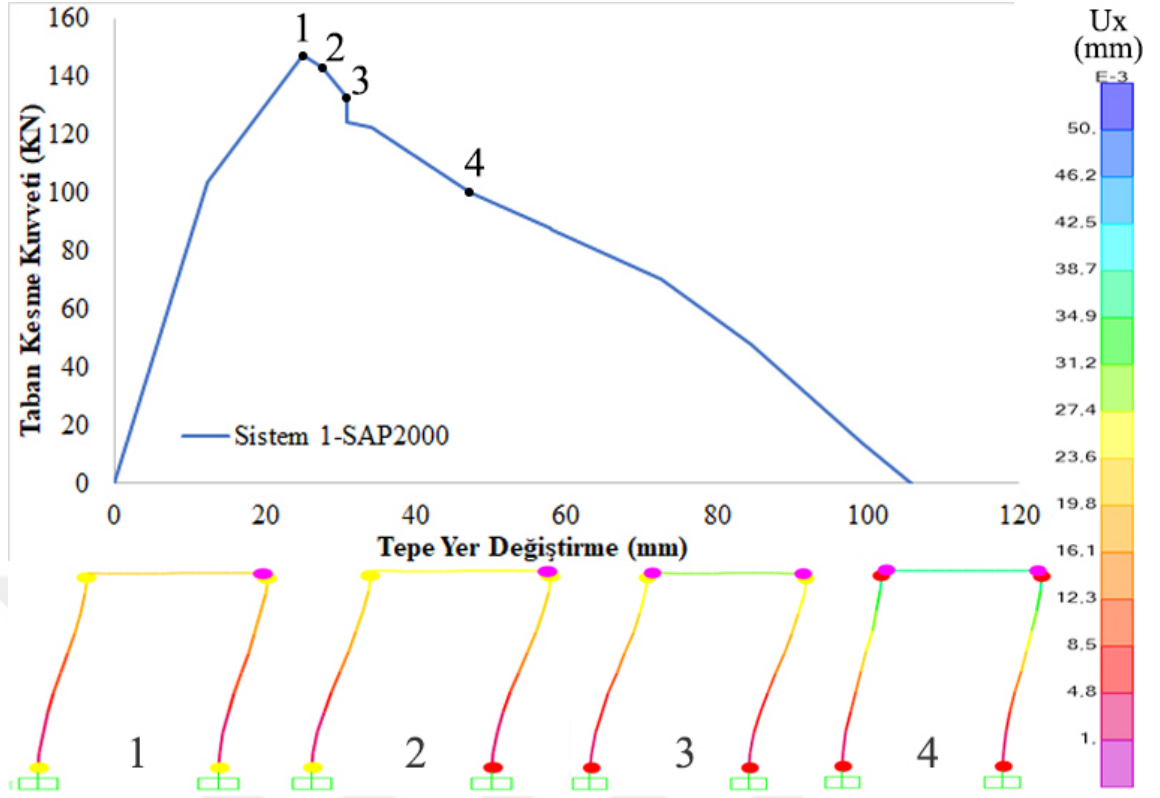


Şekil 4.3. Sistem 5-6 OpenSees ve SAP2000 statik itme eğrileri

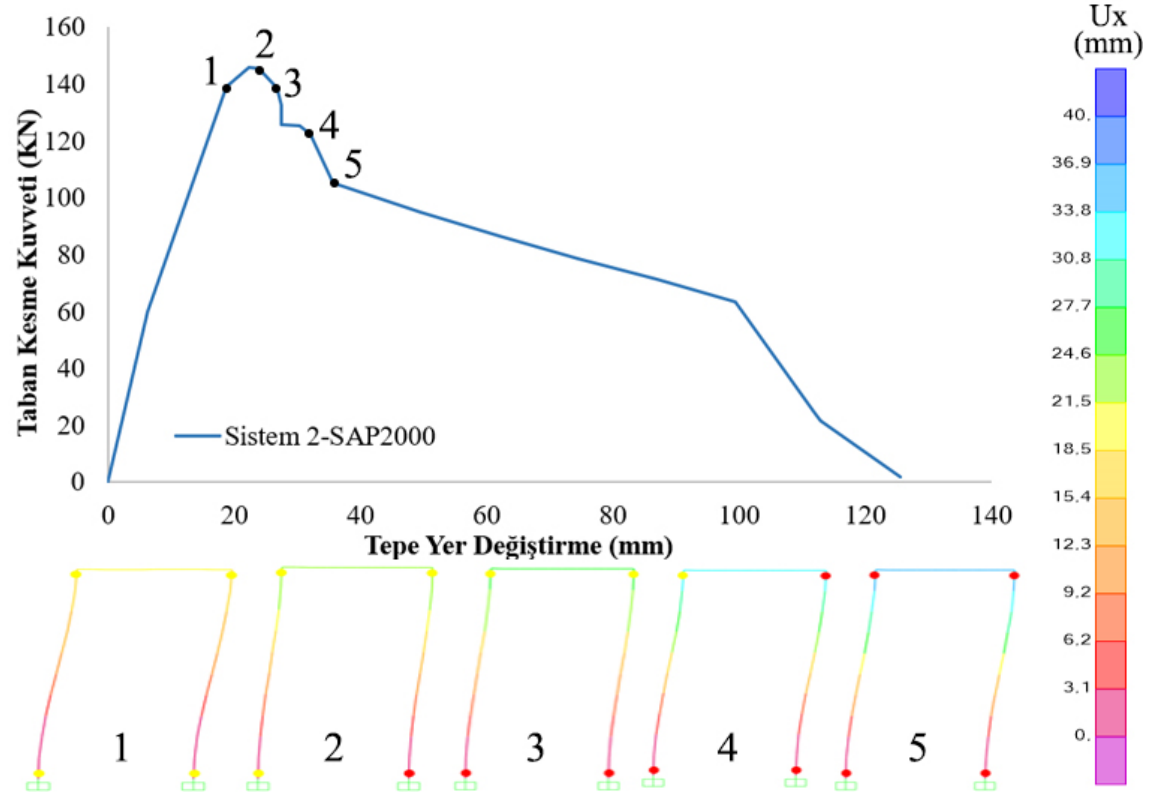
Statik itme analizleri sonucunda, güçlü kolon zayıf kiriş koşulunu sağlayan ve sağlamayan sistemlerin itme eğrilerinin birbirlerine yakın şekilde meydana geldiği görülmektedir. Bu benzerliğin, kirişlerde ve kolonlarda mafsallaşmanın aynı anda meydana gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. SAP2000 (2009) programı ile gerçekleştirilen itme analizlerine ait itme eğrilerinin detayları Şekil 4.4-4.9’da verilmiştir. Ayrıca bu sistemlerin 1. doğal titreşim periyotları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Sistemlerin 1. doğal titreşim periyotları

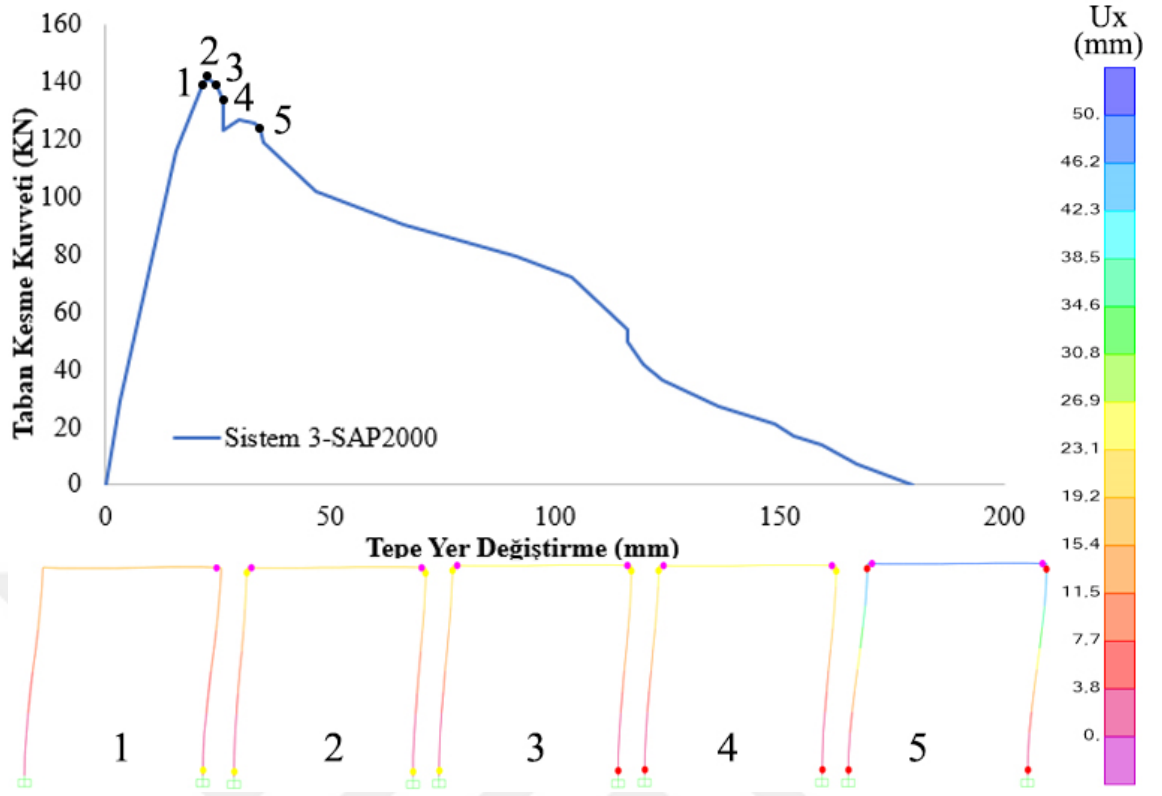
Sistem	1. Doğal Titreşim Periyodu (s)	
	SAP2000	OpenSees
1	0.82	0.77
2	0.71	0.70
3	0.71	0.76
4	0.77	0.74
5	0.86	0.85
6	0.80	0.81



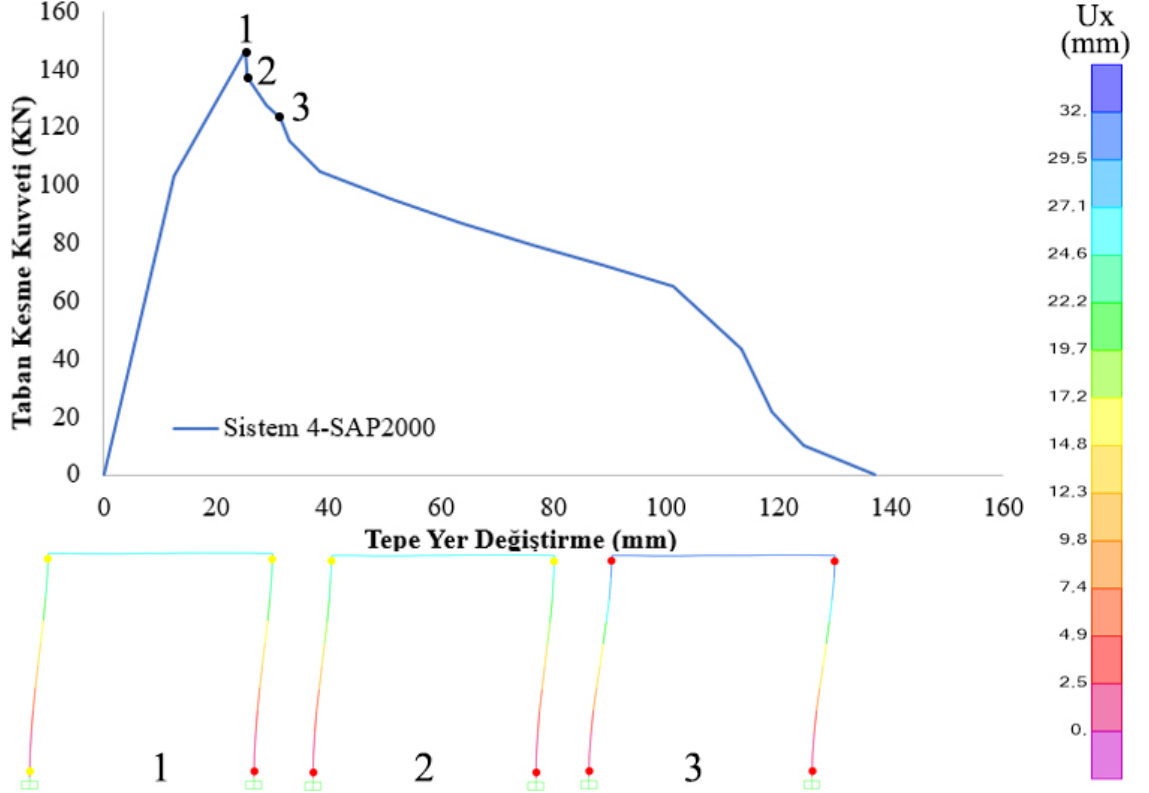
Şekil 4.4. Sistem 1 itme eğrisi ve deformasyonlar



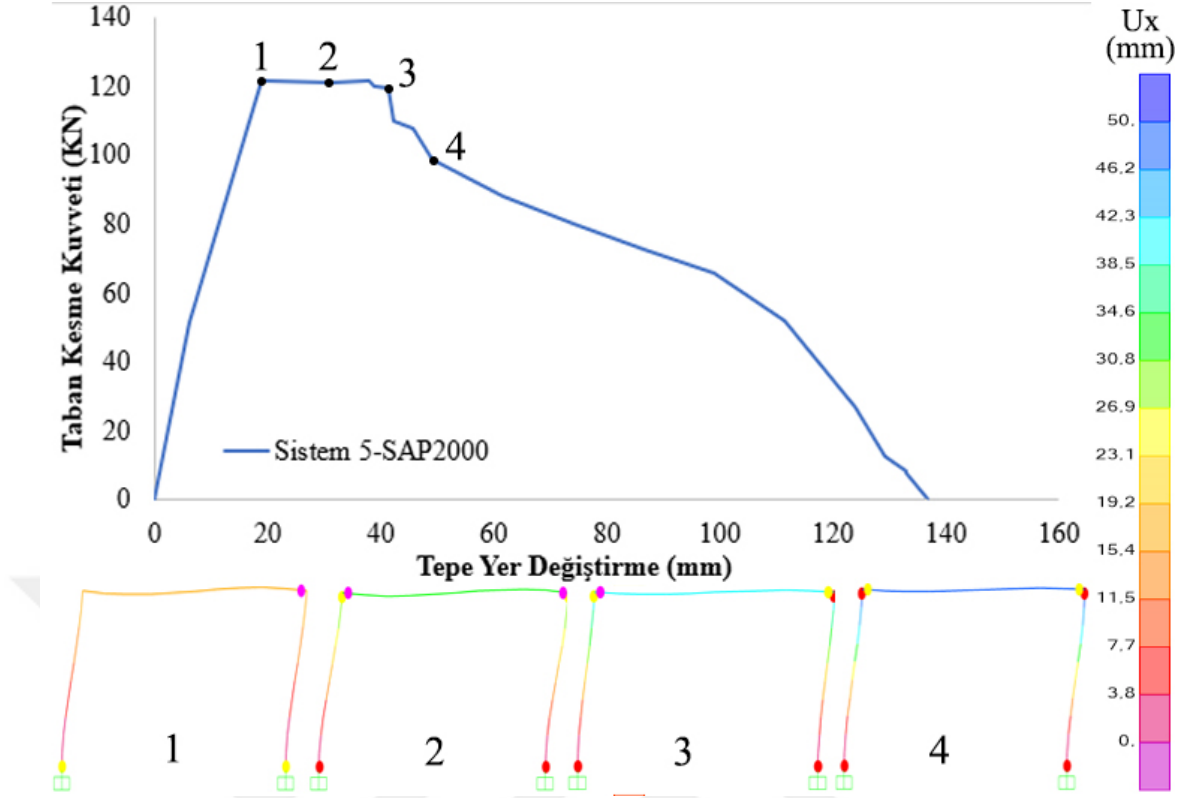
Şekil 4.5. Sistem 2 itme eğrisi ve deformasyonlar



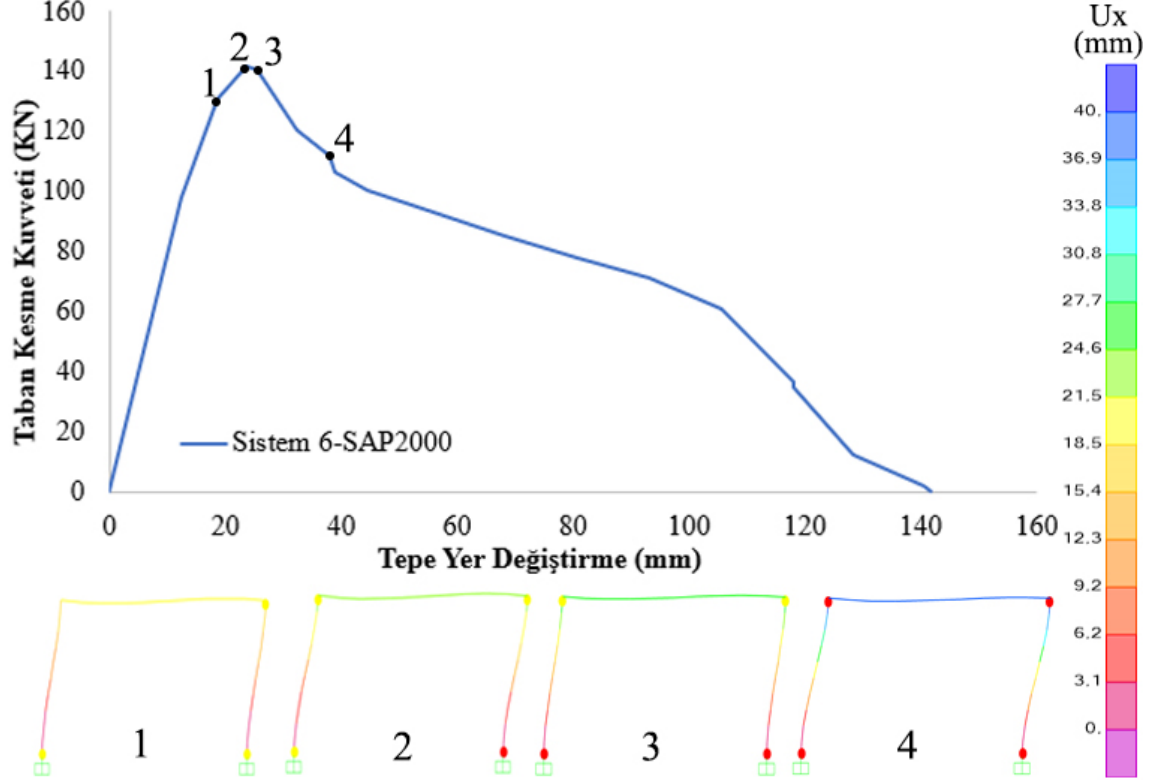
Şekil 4.6. Sistem 3 itme eğrisi ve deformasyonlar



Şekil 4.7. Sistem 4 itme eğrisi ve deformasyonlar

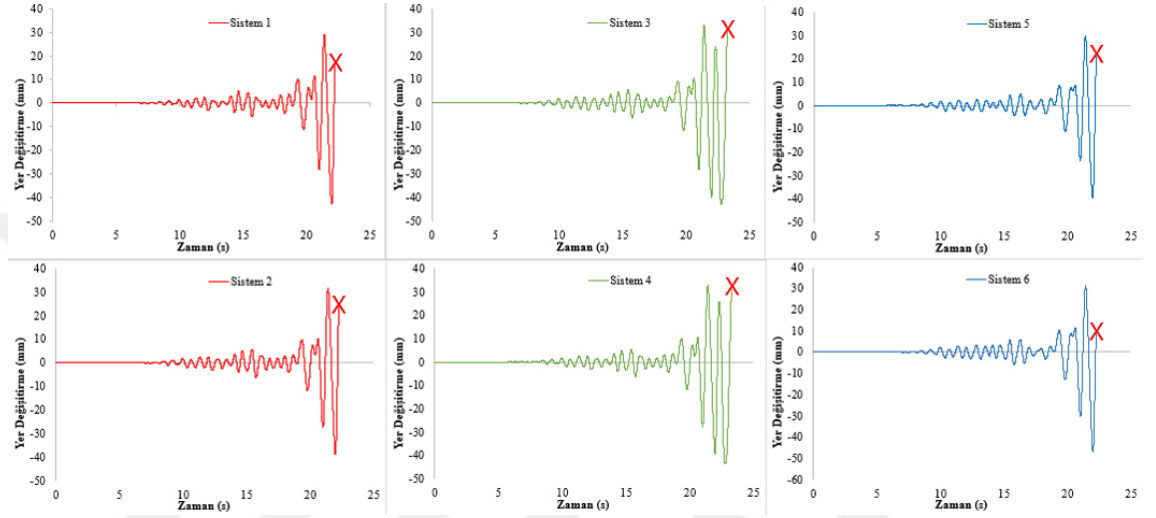


Şekil 4.8. Sistem 5 itme eğrisi ve deformasyonlar



Şekil 4.9. Sistem 6 itme eğrisi ve deformasyonlar

TBDY (2018) 5B.3.6 (b)'ye göre modal kapasite diyagramının akma sonrasındaki eğimlerinin negatif olması durumunda zaman tanım alanında hesap yapılacaktır. Seçilen sistemlerin Kocaeli depremi Ambarlı kaydı (Ek Şekil 7.1) altında zaman tanım alanında analizleri gerçekleştirilmiştir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerde, deprem kaydının 20. ile 25. saniyeleri arasında tüm sistemlerin moment etkisinde göçtüğü belirlenmiştir (Şekil 4.10). Bu anda kesit liflerinde elde edilen en büyük birim şekil değiştirme değerleri, KMEDÇ ile güçlendirilmiş sistemde elde edilen değerlerle birlikte Çizelge 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.10. Güçlendirilmemiş sistemlerin çatı yanal yer değiştirme zaman davranışları

4.2. Optimizasyon Sonuçları

İncelenen altı sistem için Bölüm 3.5'te tanımlanan amaç fonksiyonu değerleri, ilgili sınırlayıcılara ve ağırlık katsayılarına bağlı olarak YAKA ile hesaplanmış ve sonuçlar Ek Çizelge 7.2'de verilmiştir. Her bir sistem için minimum amaç fonksiyon değerlerini veren tasarımlar ise esas tasarımlar olarak kabul edilmiştir. Bu tasarımlara ait sonuçlar Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2'de w ağırlık katsayısı, f amaç fonksiyon değeri, n_t tendon sayısı, A_t tendon kesit alanı, iç ve dış elemanlar seçilen eleman boyutları, A_{top} iç ve dış eleman kesit alanları toplamıdır. Farklı maliyet ve enerji dağıtım katsayıları ile farklı tasarımlar oluşturulmuş ve bu tasarımlar ile farklı amaç fonksiyon değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. Optimizasyon sonucu elde edilen değerler

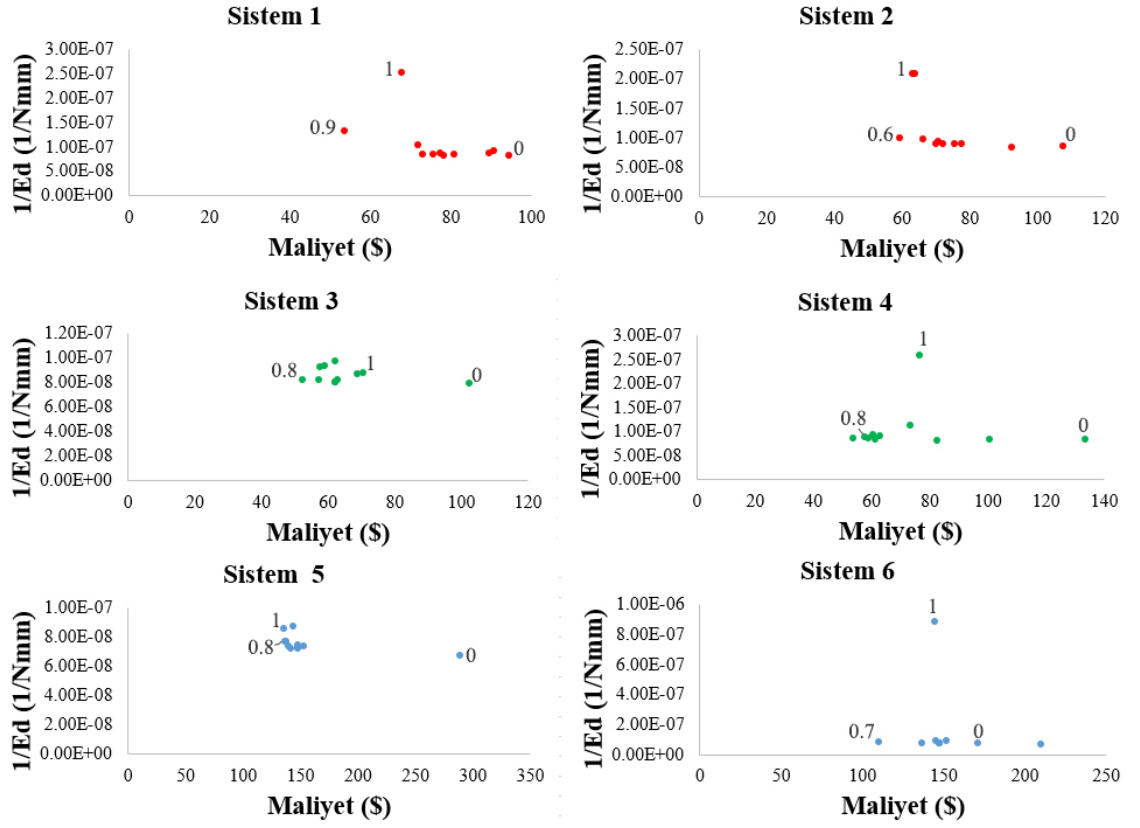
Sistem	1	2	3	4	5	6
w	0.9	0.6	0.8	0.8	0.8	0.7
f	0.87	1.034	0.842	0.866	1.041	0.866
n_t (adet)	4	6	3	3	3	3
A_t (mm²)	74.2	54.8	54.8	74.2	54.8	54.8
İç Eleman (mm)	159x3	168.3x3	139.7x3	120x120x3	159x6.3	168.3x3
Dış Eleman (mm)	193.7x4	219.1x4	168.3x4	150x150x4	193.7x4	219.1x4
A_{top} (mm²)	3854	4261	3353	3676	5406	4261
Maliyet (\$)	53.6	59.3	52.2	57.7	137.1	109.9
E_d (Nmm)	7569177	9927251	12071011	11322893	13007341	12495579
β	0.98	1.00	1.00	0.92	0.98	1.00
ε_{c,max}/ε_c^(SH)	0.98	0.99	0.98	0.99	0.97	1.00
ε_{s,max}/ε_s^(SH)	0.33	0.32	0.30	0.30	0.28	0.26
f_{pi} (MPa)	1080.8	821.2	667.5	526.8	411.6	444.6
f_{pmax}/0.9f_{pu}	0.91	0.76	0.79	0.70	0.57	0.59
F_y (N)	628648.2	539692.4	219603.9	216869.9	123923.7	146278.6
F_t (N)	320767.1	270209.2	109801.9	117259.2	67719.9	73139.3
F_f (N)	307881.2	269483.3	109801.9	99610.7	56203.8	73139.3
Δ_u (mm)	2.3	2.2	1.1	1.1	0.5	0.5
K₁ (N/mm)	258552.3	285910.0	173526.5	192182.9	174016.9	138172.7
K₂ (N/mm)	17253.8	19129.2	7561.5	10230.2	4782.3	4782.3
δ_{b,max} (mm)	7.7	7.8	14.3	14.1	18.9	18.9
Δ_{f,max} (mm)	19.9	19.5	20.1	19.9	20.9	20.9
F_{max} (N)	719713	653015	318311	349429	219835	231741
I_{min}/I	1.15	1.50	1.09	1.03	1.85	1.06

Ele alınan sistemlerde, amaç fonksiyon değerini minimize eden ve Çizelge 4.1’de verilen sonuçlara göre:

- Tüm sistemlerde en küçük iki kesit alanına sahip tendonlardan seçim yapılmıştır. Toplam tendon kesit alanı ($n_t \times A_t$) açıklığın artmasıyla azalmaktadır. Aynı şekilde gerekli tendon öngerme miktarları (f_{pi}) ve analiz sırasında tendonlarda oluşan maksimum gerilme miktarları da (f_{pmax}) açıklığın artmasıyla azalmaktadır.
- İç ve dış elemanlar Sistem 5 dışında dairesel kesitli profillerden seçilmiştir.

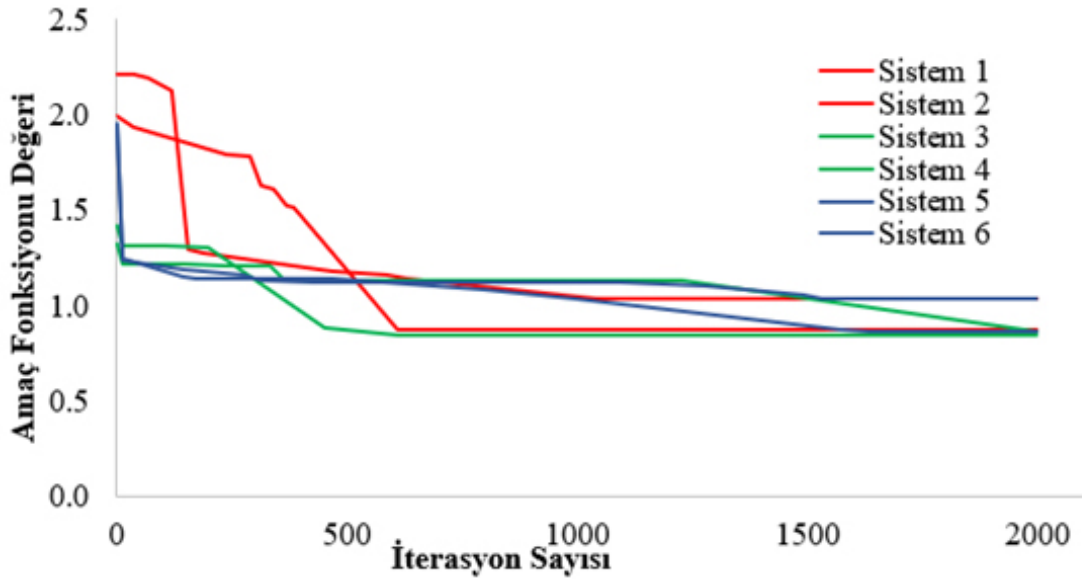
- iii) 1.5 m ve 3 m açıklığa sahip sistemlerde KMEDÇ maliyetleri birbirlerine yakın ve 52.2\$ – 59.3\$ aralığında oluşurken, 6 m açıklığa sahip sistemlerde bu maliyet 109.9 \$-137.7\$'dir.
- iv) KMEDÇ'nin eksenel yer değiştirme miktarı $\delta_{b,max}$, sistem açıklığı, dolayısıyla çapraz uzunluğu arttıkça artmaktadır. Bunun sonucu olarak KMEDÇ'nin dağıttığı toplam enerji miktarı da artmaktadır.
- v) Çalışmada en büyük enerji dağıtımı amaçlandığından, optimum tasarımlarda enerji dağıtım katsayısı, bu değişkenin üst sınırı olan 1 değeri ya da bu değere yakın şekilde edilmiştir. Bu sonuç, aynı zamanda tendonlar tarafından sağlanan toplam kuvvet ile sürtünme sönümleyici tarafından sağlanan kuvvetin birbirine çok yakın ya da eşit değerler seçilmesi anlamına gelmektedir (Denklem 3.32).
- vi) KMEDÇ'nin aktivasyon kuvveti (F_y) açıklık arttıkça azalmaktadır. Enerji dağıtım katsayısının 1 ve bu değere yakın şekilde elde edilmesinden dolayı, bu artış toplam öngerme kuvveti ile kanallı plaka bulon bağlantısı aktivasyon kuvvetinde eşit ya da yakın değerlerde artış meydana getirmiştir.
- vii) Enerji dağıtımı için BA çerçevenin ve çaprazın elastik ötesi davranış göstermesi gerekmektedir. Fakat, kolon ve kiriş kesit lif şekil değiştirme sınır değerleri bu davranışı sınırlandırıldığından, verilen birim şekil değiştirme sınırlarına yakın birim şekil değiştirme değerleri sağlayan tasarımlar optimum tasarımları oluşturmuştur. Bu şekil değiştirme sınırlarında beton birim şekil değiştirme miktarı belirleyici olmuştur.
- viii) Tüm sistemlerde kalıcı yanal yer değiştirme miktarı ihmal edilebilir büyüklükte meydana gelmiştir ($\Delta_{u,max} = 2.3$ mm).
- ix) İç ve dış elemanlar, bu elemanların burkulmaması için gerekli atalet momentinin 1.03 ile 1.85 katı büyüklükte atalet momentlerine sahiptir.

Şekil 4.11'de maliyet ve enerji dağıtımına ait ağırlık katsayılarına bağlı olarak bu değerlerin değişim grafikleri verilmiştir. Tüm maliyet ve enerji dağıtımı ağırlık katsayıları için verilen sonuçlara göre maliyet ve enerji dağıtım katsayılarının doğrusal olarak değiştirildiği halde amaç fonksiyon değerleri arasında doğrusal bir ilişki ortaya çıkmadığı anlaşılmaktadır. Bunun sebebi, maliyeti azaltan parametrelerin enerji dağıtımını da artırıyor olmasıdır.



Şekil 4.11. Maliyet ve enerji dağıtımı değerlerinin ağırlık katsayısına göre değişimi

Bu tasarımlara ait arama geçmişleri Şekil 4.5'te verilmiştir. Arama geçmiş sonuçlarına göre 2000 iterasyon sayısının yeterli olduğu görülmüştür. Tüm tasarımlara ait arama geçmişi grafikleri Ek Şekil 7.2'de verilmiştir.



Şekil 4.12. Seçilen sistemler arama geçmişleri

4.2. Güçlendirilmiş Sistem Davranışı

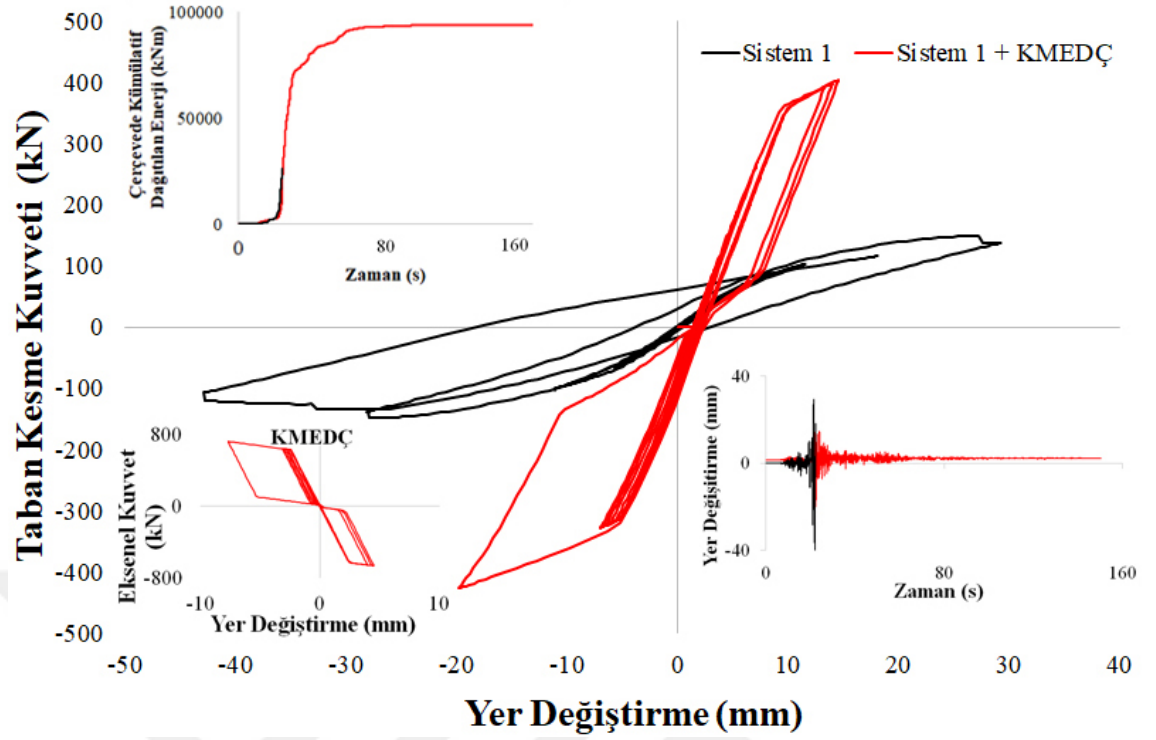
Güçlendirilmemiş ve optimizasyon işlemi sonucu elde edilen tasarımlar ile güçlendirilmiş sistemlerde meydana gelen ivme, maksimum fiber şekil değiştirmesi, kolon ve kirişlerde meydana gelen maksimum moment ve kesme kuvveti değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. Çizelge 4.3'te (+) ile gösterilen sistemler, aynı sistemin güçlendirilmiş halini ifade etmektedir.

Çizelge 4.3. Güçlendirilmiş sistem, eleman ve kesit değerleri

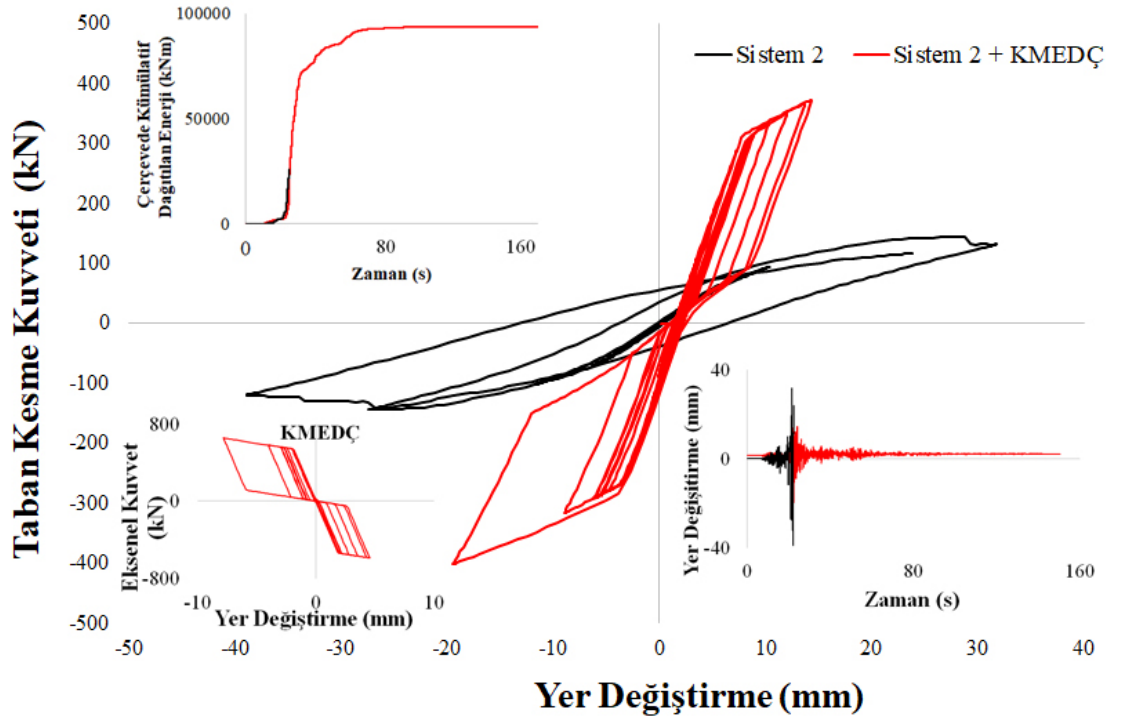
Sistem	$a_{\max}$ (g)	$\epsilon_{c,\max}$	$\epsilon_{s,\max}$	M_{k1} (kNm)	M_{k2} (kNm)	M_{ki} (kNm)	V_{k1} (kN)	V_{k2} (kN)	V_{ki} (kN)
1	0.30	0.0143	0.0088	125.8	124.9	124.8	75.1	74.7	167.0
1+	0.31	0.0025	0.0024	111.0	95.2	96.3	63.9	52.6	107.0
2	0.30	0.0136	0.0089	125.8	124.8	124.7	75.6	75.2	167.0
2+	0.30	0.0025	0.0024	111.7	97.1	100.2	65.5	54.9	112.4
3	0.31	0.0146	0.0070	125.4	124.6	124.8	74.6	74.4	88.5
3+	0.34	0.0025	0.0022	112.5	106.6	101.0	66.1	61.9	69.8
4	0.31	0.0152	0.0069	125.4	124.6	124.6	75.7	75.3	88.5
4+	0.33	0.0025	0.0022	112.9	105.6	104.0	67.3	62.1	70.9
5	0.26	0.0098	0.0069	124.3	125.0	121.1	72.7	73.1	51.2
5+	0.25	0.0024	0.0022	92.0	88.3	78.2	53.3	50.7	35.9
6	0.31	0.0131	0.0079	125.0	124.1	124.8	74.8	74.2	53.1
6+	0.34	0.0025	0.0020	113.8	108.4	102.4	67.1	63.5	44.1

Çizelge 4.2'de $a_{\max}$ sistemde oluşan maksimum ivmenin yer çekimi ivmesi cinsinden değeri, M_{k1} , M_{k2} , M_{ki} , kolon 1, kolon 2 ve kirişte oluşan maksimum moment değerleri, V_{k1} , V_{k2} , V_{ki} ise bu elemanlarda oluşan maksimum kesme kuvveti değerleridir. Bu sonuçlara göre KMEDÇ ile güçlendirilen sistemlerden 1, 3, 4 ve 6 numaralı sistemlerde oluşan maksimum ivme değerlerinin arttığı, 5 numaralı sistemde azaldığı, 2 numaralı sistemde ise önemli bir değişiklik meydana gelmediği anlaşılmaktadır. Ayrıca tüm sistemlerde maksimum moment ve kesme kuvveti değerlerinin azaldığı görülmektedir. KMEDÇ ile güçlendirilen bu sistemlerde oluşan maksimum kesme kuvveti azaldığından, kesme güvenliğinin sağlanması için ayrıca bir önlem alınmasına gerek duyulmayacaktır.

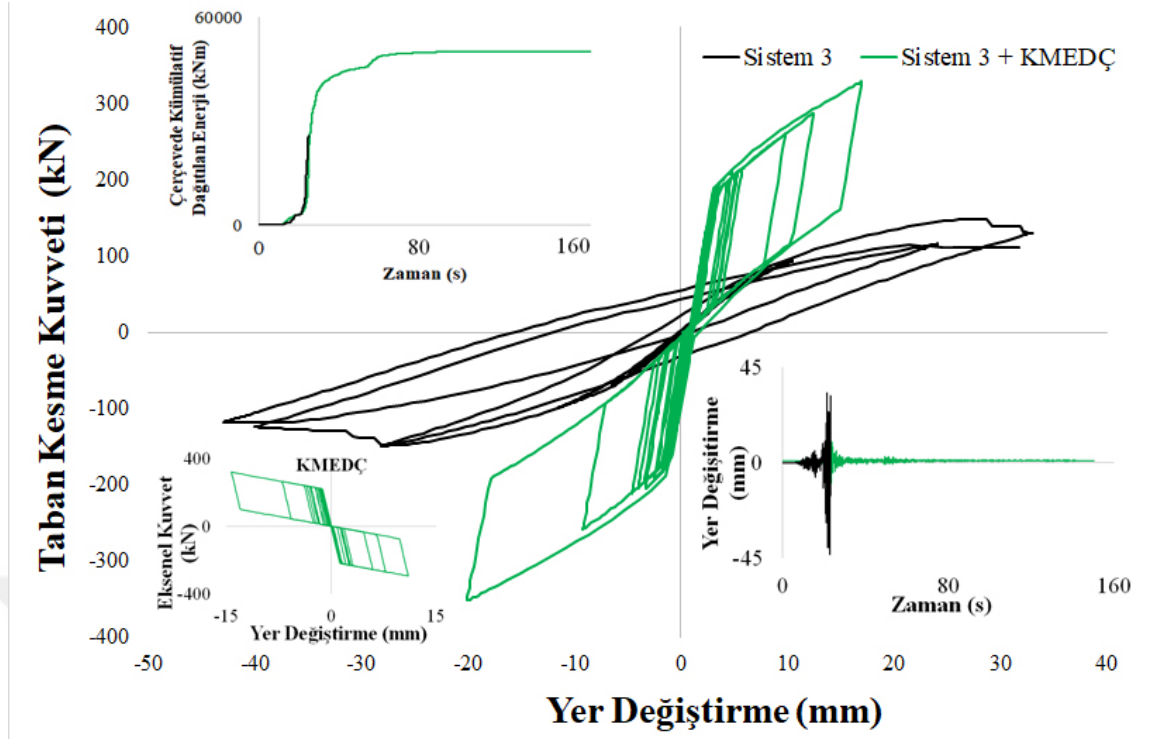
Güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş sistemlerin toplam taban kesme kuvveti – yer değiştirme grafikleri, çerçevenin dağıttığı enerjinin zamanla değişimi, KMEDÇ'nin çevrimsel davranışı ve sistem çatı deplasman zaman grafikleri Şekil 4.6-4.11'de verilmiştir.



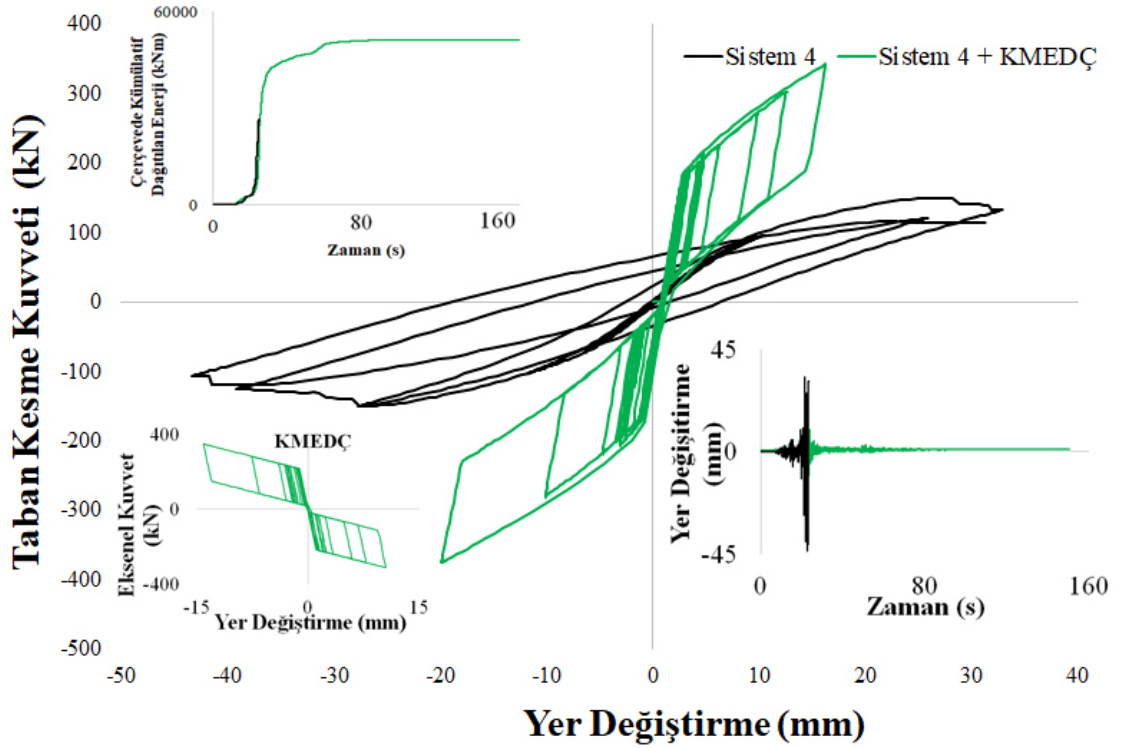
Şekil 4.13. Sistem 1 yer değiştirme-taban kesme kuvveti grafiği



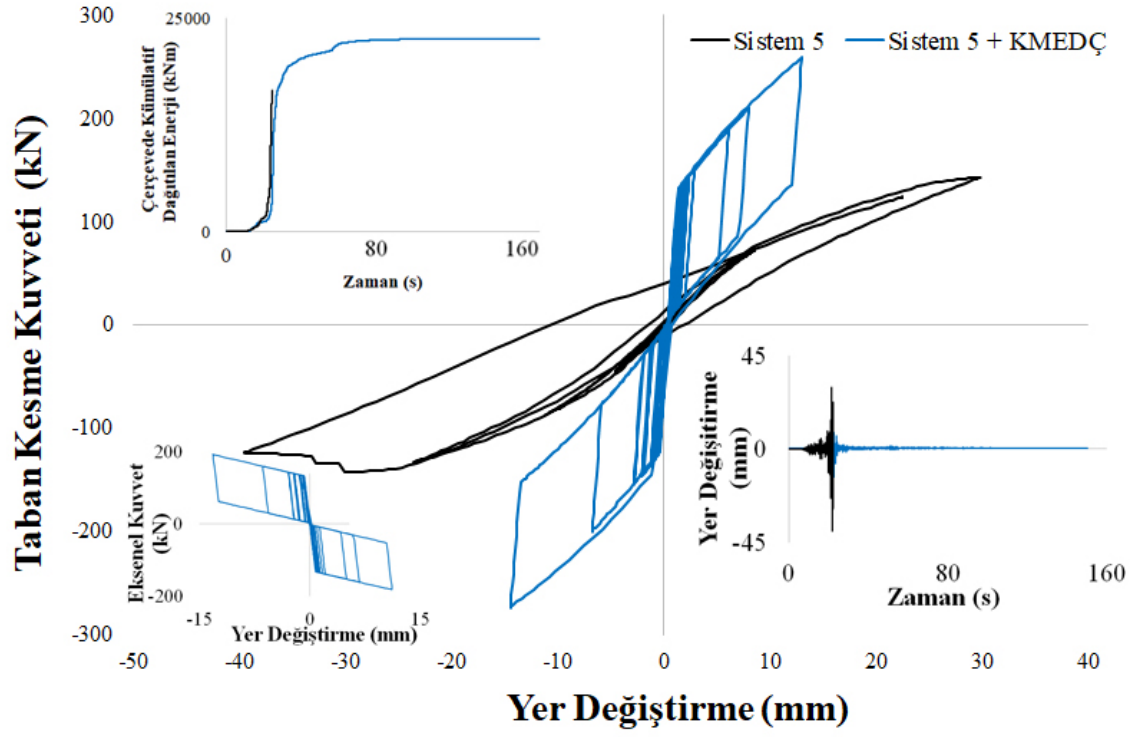
Şekil 4.14. Sistem 2 yer değiştirme-taban kesme kuvveti grafiği



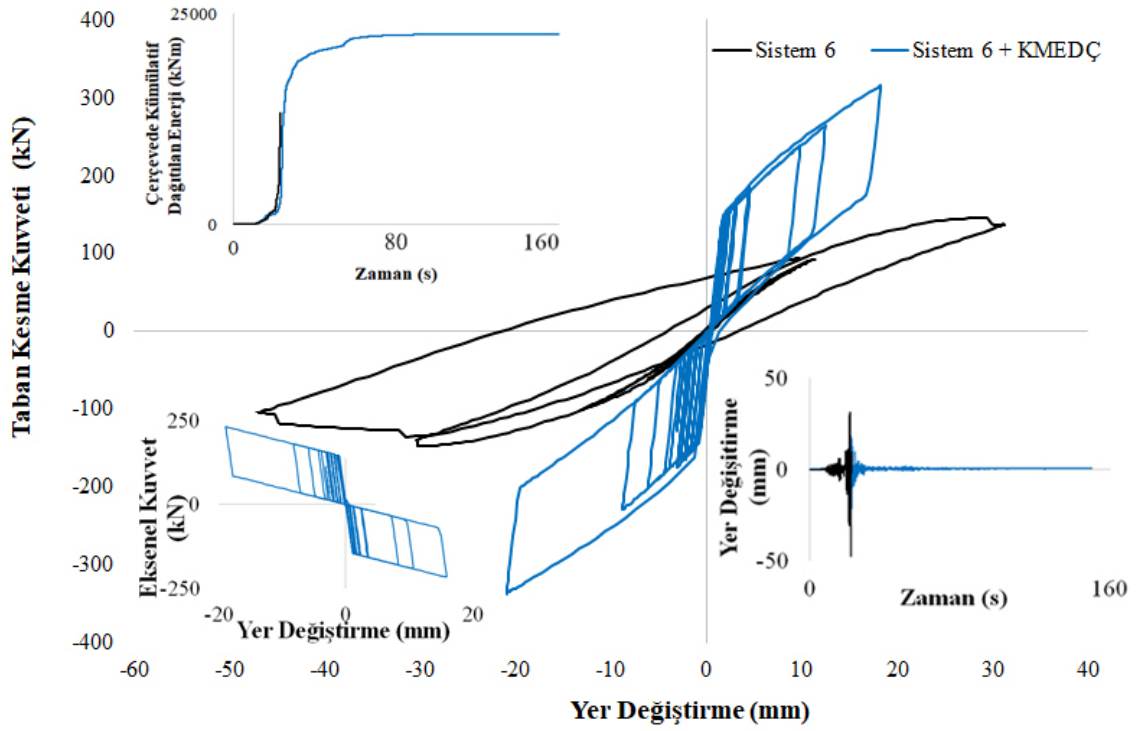
Şekil 4.15. Sistem 3 yer değiştirme-taban kesme kuvveti grafiği



Şekil 4.16. Sistem 4 yer değiştirme-taban kesme kuvveti grafiği



Şekil 4.17. Sistem 5 yer değiştirme-taban kesme kuvveti grafiği



Şekil 4.18. Sistem 6 yer değiştirme-taban kesme kuvveti grafiği

Şekil 4.13-4.18 arasında, KMEDÇ’li tüm sistemlerde kararlı bir çevrimsel davranış ortaya çıktığı ve daha büyük taban kesme kuvvetlerinde dahi güçlendirilmemiş sisteme göre daha düşük yer değiştirmeler meydana geldiği görülmektedir. KMEDÇ’nin eksenel kuvvet – şekil değiştirme grafikleri EK’te Şekil 7.2-7.5 arasında verilmiştir.

Elde edilen verilere göre:

- i. İncelenen tüm sistemlerde, kesit fiberlerinde elde edilen maksimum birim şekil değiştirme değerleri, beton fiberler için verilen sınır değer olan 0.0025’e yakın olarak elde edilmiştir. Buradan, optimizasyon çalışmasında beton fiber birim şekil değiştirme sınırlayıcısının daha belirleyici olduğu anlaşılmaktadır.
- ii. Çerçevelerde kalıcı yanal yer değiştirme değerleri ihmal edilebilir düzeyde meydana gelmiş olup bu değer 0.5 ve 2.3 mm arasında değişmektedir. Çerçeve genişliği arttıkça kalıcı yer değiştirme miktarının azaldığı görülmektedir.
- iii. Tüm sistemlerin yanal rijitliği artmıştır.
- iv. Zaman tanım alanında analiz sırasında çerçevede meydana gelen en büyük yer değiştirmeler tüm sistemler için benzer olup yaklaşık 20 mm’dir.
- v. Çerçeve genişliği arttıkça öngerme tendon miktarı ve öngerme gerilme düzeyi azalmaktadır. En düşük gerilme 6 m açıklığa sahip sistemlerde olup 411.6 ve 444.6 MPa’dır. Optimizasyon sırasında tendonlarda meydana gelebilecek en büyük gerilme miktarı sınırlayıcı fonksiyon olarak verildiğinden optimum sonuçlarla gerçekleştirilen analiz sırasında tendonlarda kopma meydana gelmemiştir.
- vi. Güçlendirilmiş sistem elemanlarında oluşan en büyük moment ve kesme kuvveti değerleri güçlendirilmemiş sistemlere göre azalmıştır. Çerçevede oluşan maksimum ivme değerleri ise 2 ve 5 numaralı sistemler dışında artmıştır.
- vii. Tüm sistemlerde en büyük taban kesme kuvveti artmış ve analiz sırasında meydana gelen en büyük yer değiştirme miktarları azalmıştır.
- viii. İç ve dış elemanlar, zaman tanım alanında analiz sırasında oluşan maksimum eksenel yük değerleri altında burkulmamaktadır.
- ix. Güçlü kolon zayıf kiriş durumunun önemli bir fark yaratmadığı görülmüştür. Bu durumun, incelenen sistemlerin, tek kat ve açıklığa sahip sistemler olmasından ve kirişler ve kolonlarda mafsallaşmanın aynı anda meydana gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu sonuçlara göre BA çerçeve tipi sistemlerin KMEDÇ ile güçlendirilebileceği ve bu elemanın boyutlandırılmasında, önerilen optimizasyon tabanlı tasarım yönteminin uygulanabileceği gösterilmiştir. Bu yöntemde, minimum maliyetle maksimum sismik enerji dağıtımı sağlanabileceğinden, güçlendirme çalışmalarının verimliliği artırılabilir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada BA çerçeve tipi yapıların TBDY (2018) performans koşullarını sağlayacak şekilde güçlendirilmesinde KMEDÇ'nin kullanımı için bir tasarım yöntemi önerilmiştir. Çok katlı yapıların zemin katını temsil eden ve bu doğrultuda yüklenen tek katlı, 1.5, 3, 6 metre açıklığa, 3 metre yüksekliğe sahip, TBDY (2018) güçlü kolon zayıf kiriş koşulunu sağlayan ve sağlamayan altı farklı çerçeve incelenmiştir. En düşük maliyetle en büyük enerji dağıtımını sağlayan KMEDÇ tasarımı, bir meta sezgisel optimizasyon yöntemi olan YAKA ile elde edilmiştir.

Optimizasyon işleminde tanımlanan amaç fonksiyonunda, maliyet ve enerji dağıtımı için 0 ile 1 arasında 0.1 aralıklarla farklı ağırlık katsayıları kullanılmış, bu tasarımlar içerisinde en düşük amaç fonksiyon değerini veren tasarım ise kabul edilmiştir. Güçlendirilmeden önce zaman tanım alanında analiz sırasında büyük yer değiştirmeler yaparak eğilme etkisinde göçen BA çerçeve sistemler, önerilen yöntem ile tasarlanan KMEDÇ ile güçlendirilerek TBDY (2018)'de tanımlanan en düşük hasar seviyesi olan sınırlı hasar seviyesini sağlayacak dayanıma ulaştırılabilmektedir.

Elde edilen sonuçlara göre:

- i. İncelenen tüm sistemlerin yanal rijitlikleri artmıştır.
- ii. Tüm sistemlerin toplam taban kesme dayanımları artarken, sistemlerde meydana gelen en büyük yer değiştirmeler sınırlandırılmıştır.
- iii. KMEDÇ'nin, kararlı çevrimsel davranışı ile sistemin enerji dağıtma kapasitesini artırdığı ve yapısal kararlılığın korunduğu anlaşılmaktadır.
- iv. Analiz sonunda oluşan kalıcı yanal yer değiştirmeler tüm sistemlerde ihmal edilebilecek düzeyde kalmıştır.
- v. Çerçeve genişliğinin artmasıyla, gerekli toplam tendon alanı ve öngerme düzeyleri azalmaktadır.
- vi. Kolon ve kirişlerde meydana gelen en büyük moment ve kesme kuvveti değerleri güçlendirme sonucunda azalmıştır. Dolayısıyla, taşıyıcı elemanlarında ek bir güçlendirme çalışmasına gerek duyulmamıştır.
- vii. Güçlü kolon zayıf kiriş durumunun incelenen sistemlerin KMEDÇ ile güçlendirilmesinde önemli bir fark yaratmadığı görülmüştür.

Elde edilen veriler sonucunda, güçlendirme çalışmalarından beklenen önemli özelliklerden olan maksimum sismik enerji dağıtımı, minimum kalıcı deformasyon ve maliyetin, KMEDÇ ve önerilen yöntemle sağlanabileceği gösterilmiştir.

6. KAYNAKLAR

- ACI. (2019). Building code requirements for reinforced concrete and commentary. ACI 318-08/ACI 318R-08, *American Concrete Institute*.
- Alqedra, M., Arafa, M. and Ismail, M. (2011). Optimum Cost of Prestressed and Reinforced Concrete Beams using Genetic Algorithms. *Journal of Artificial Intelligence*, 4:76-88.
- Apostolakis, G. and Dargush, G. (2010). Optimal seismic design of moment-resisting steel frames with hysteretic passive devices. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39:355-376.
- Celep, Z. (2017). Betonarme Taşıyıcı Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış ve Çözümleme. Beta Yayınları, İstanbul, 235 s.
- Cheng, X. (2017). Improving the Seismic Performance of Existing Bridge Structures Using Self-centering Dampers. Msc Thesis, Carleton University. Ottawa, Ontario, 151 p.
- Chou, C. C. and Chung, P. T. (2014). Development of cross-anchored dual-core self-centering braces for. *Journal of Constructional Steel Research*, 101:19-32.
- Chou, C.-C., Chung, P.-T., Wu, T.-H. and Beato, A. (2016). Validation of a steel dual-core self-centering brace (DC-SCB) for seismic resistance: from brace member to one-story one-bay braced frame tests. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 10:303–311.
- Christopoulos, C., Tremblay, R., Kim, H. and Lacerte, M. (2008). Self-Centering Energy Dissipative Bracing System for the Seismic Resistance of Structures: Development and Validation. *Journal of Structural Engineering*, 134:96-107.
- Computers and Structures Inc. (2009). [Computer Software]. Berkeley, CA.
- Croci, G. (1998). The basilica of St. Francis of Assisi after the September 1997 earthquake. *Structural engineering international*, 8 (1): 56-58.
- Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Yönetmeliği 2017. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (tarih yok).
- Çerçevik, A. ve Avşar, Ö. (2020). Doğrusal sismik izolasyon parametrelerinin karga arama algoritması ile optimizasyonu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(3):440-447.

- Dezfuli, M. A., Dolatshahi, K. M., Mofid, M. and Eshkevari, S. S. (2017). Coreless self-centering braces as retrofitting devices in steel structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 133:485-498.
- Dhakal, R. and Maekawa, K. (2002). Modeling for Postyield Buckled of Reinforcement. *Journal of Structural Engineering*, 128(9):1139-1147.
- Dolce , M., Cardone, D. and Marnetto, R. (2000). Implementation and testing of passive control devices based. *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, 29: 945-968.
- Dong, H., Han, Q., Du, X. and Jingbo, L. (2020). Constant-ductility inelastic displacement ratios for displacement-based seismic design of self-centering structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (133);106143.
- Ergül, Ş. (2018). OpenSees ve Seismostruct Programlarının Doğrusal Olmayan Deprem Analizleri için Karşılaştırılması. *Y. Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul*, 195 s.
- Erochko, J. (2013). Improvements to the design and use of post-tensioned self-centering energy-dissipative (SCED) braces. Ph.D. Thesis. University of Toronto, Toronto, 470 p.
- Erochko, J., Christopoulos, C. and Tremblay, R. (2014a). Design and Testing of an Enhanced-Elongation Telescoping Self-Centering Energy-Dissipative Brace. *Journal of Structural Engineering*, vol. 141(6):1-11.
- Erochko, J., Christopoulos, C. and Tremblay, R. (2014b). Design, Testing, and Detailed Component Modeling of a High-Capacity Self-Centering Energy-Dissipative Brace. *Journal of Structural Engineering*, vol. 141, no.8, p. 04014193 .
- Filiatrault, A., Tremblay, R. and Kar, R. (2000). Performance Evaluation of Friction Spring Seismic Damper. *Journal of Structural Engineering*, 26:491-499.
- Gregorian, C. and Popov, E. (1994). *Energy Dissipation with Slotted Bolted Connections*. California Univ., Richmond. Earthquake Engineering Research Center.
- Guo, T., Wang, J., Song, Y., Xuan, W. and Chen, Y. (2020). Self-centering cable brace with friction devices for enhancing seismic performance of RC frame structures. *Engineering Structures*, 207:110187.
- Hejazi, F., Toloue, I. and Jaafar, M. (2013). Optimization of Earthquake Energy Dissipation System by Genetic Algorithm. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 28:796–810.

- Karaboğa, D. and Baştürk, B. (2007). A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimization*, 39: 459-471.
- Mander, J., Priestley, M. and Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8): 1804-1826.
- McKenna, F., Fenves, G., Scott, M. and Jeremic, B. (2000). Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees)[Computer Software]. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California: Berkeley, CA.
- Neuenhofer, A and Filippou, F. (1997). Evaluation of Nonlinear Frame Finite-Element Models. *Journal of Structural Engineering*, 34(12):1489–1511.
- Nims, D. K., Richter, P. J. and Bachman, R. E. (1993). The Use of the Energy Dissipating Restraint for Seismic Hazard Mitigation. *Earthquake Spectra*, vol. 9, No. 3, 467-489.
- Ocel, J., Asce, M., Desroches, R., Leon, R., Hess, W., Krumme, R. and Sweeney, S. (2004). Steel Beam-Column Connections Using Shape Memory Alloys. *Journal of Structural Engineering*, 130 (5): 732–740.
- Panzer, I., Morelli, F. and Salvatore, W. (2020). Seismic multi level optimization of dissipative re centering systems. *Earthquakes and Structures*, 18(1):129-145.
- Qiu, C. and Zhu, S. (2020). Enhance seismic performance of self-centering concentrically braced frames by using hybrid systems. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18:3995–4015.
- Scott, M. and Fenves, G. (2006). Plastic Hinge Integration Methods for Force-Based Beam–Column Elements. *Journal of Structural Engineering*, 132(2): 244–252.
- Shokrullah, S. (2020). Boşluklu Perde ve Çekirdek Salınım Yapan Duvar Sistemlerinin Yatay Yük Altındaki Davranışı. Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- TBDY. (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği.
- The MathWorks Inc. (2019). MATLAB .
- Tremblay, R., Lacerte, M. and Christopoulos, C. (2008). Seismic Response of Multistory Buildings with Self-Centering Energy Dissipative Steel Braces. *Journal of Structural Engineering*, 134:108-120.
- University of California, B. C. (2021). PEER Ground Motion Database

- Upadhyay, A., Pantelides, C. and Ibarra, L. (2019). Residual drift mitigation for bridges retrofitted with buckling restrained braces or self centering energy dissipation devices. *Engineering Structures*, 199:109663.
- Wang, Y., Zhou, Z., Xie, Q. and Huang, L. (2020). Theoretical analysis and experimental investigation of hysteretic performance of self-centering variable friction damper braces. *Engineering Structures*, 217:110779.
- Westenenk, B., Edwards, J., Llera, J. and Jünemann, R. (2019). Self-Centering Frictional Damper (SCFD). *Engineering Structures*, vol. 197:109425.
- Wilde, K., Gardoni, P. and Fujino, Y. (2000). Base isolation system with shape memory. *Engineering Structures*, 22 (3): 222-229.
- Xiao, S., Xu, L. and Li, Z. (2019). Seismic performance and damage analysis of RC frame-core tube building with self-centering braces. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 120:146-157.
- Xu, L., Fan, X. and Li, Z. (2018). Hysteretic Analysis Model for Pre-pressed Spring Self-Centering Energy Dissipation Braces. *Journal of Structural Engineering*, 144(7):04018073.
- Xu, L., Fan, X. and Li, Z. (2020). Seismic Assessment of Buildings with Prepressed Spring Self-Centering Energy Dissipation Braces. *Journal of Structural Engineering*, 146(2):2-14.
- Yousef-beik, S., Veismoradi, S., Zarnani, P. and Quenneville, P. (2020). A new self-centering brace with zero secondary stiffness using. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 169:106035.
- Zendaoui, A., Kadid, A. and Yahiaoui, D. (2016). Comparison of Different Numerical Models of RC Elements for Predicting the Seismic Performance of Structures. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(4):461-478.
- Zhang, C. (2015). Seismic Displacement Demands on Self-Centering Single Degree of Freedom Systems. *M.A.Sc. Thesis*. Canada: McMaster University.
- Zhang, H., Quan, L., Lu, X. and Xu, j. (2020). Modified flag-shaped model for self-centering system and its equivalent linearization and structural optimization for stochastic excitation. *Engineering Structures*, 215:110420.
- Zhang, Y. and Hu, X. (2010). Self-centering seismic retrofit scheme for reinforced concrete frame structures: SDOF system study. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 9(2):271-283.

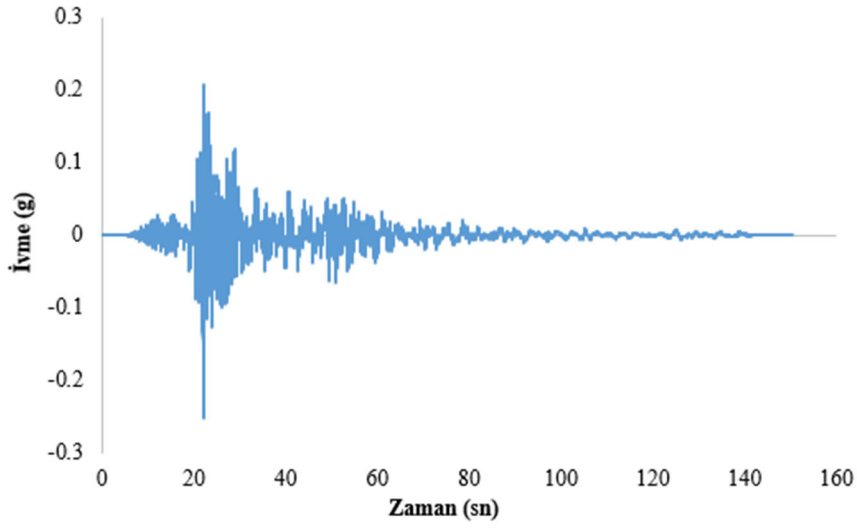
Zhu, S. and Zhang, Y. (2008). Seismic Analysis of Concentrically Braced Frame Systems with Self-Centering Friction Damping Braces. *Journal of Structural Engineering*, vol. 134:121-131.



7. EKLER

Çizelge 7.1. Tendon kesit alanları

Tendon Kesit Alanları (mm²)
54.8
74.2
98.7
107.7
123.9
140.0



Şekil 7.1. Kocaeli Depremi Ambarlı Kaydı (PEER, 2021)

Çizelge 7.2. İç ve dış eleman çelik profil listesi

İç Eleman						Dış Eleman						
	b=h mm	T mm	M kg/m	A mm ²	I mm ⁴		D mm	T mm	M kg/m	A mm ²	I mm ⁴	A _{top}
70x70x2.5	70	2.5	5.17	659	494100	100x100x2.5	100	2.5	7.53	959	1506300	1618
70x70x5	70	5	9.7	1236	846300	100x100x4	100	4	11.7	1495	2263500	2731
80x80x2.5	80	2.5	5.96	759	751500	110x110x2.5	110	2.5	8.31	1059	2023800	1818
80x80x4	80	4	9.22	1175	1110400	110x110x4	110	4	13	1655	3059400	2830
80x80x6	80	6	13.2	1683	1491800	110x110x4	110	4	13	1655	3059400	3338
90x90x2.5	90	2.5	6.74	859	1085500	120x120x3	120	3	10.8	1381	3123500	2240
90x90x4	90	4	10.5	1335	1619200	120x120x5	120	5	17.6	2236	4854700	3571
90x90x6	90	6	15.1	1923	2204800	120x120x5	120	5	17.6	2236	4854700	4159
100x100x2.5	100	2.5	7.53	959	1506300	140x140x10	140	10	38.1	4857	13116700	5816
100x100x4	100	4	11.7	1495	2263500	140x140x8.8	140	8.8	34.2	4352	12050300	5847
100x100x6	100	6	17	2163	3114700	140x140x7.1	140	7.1	28.3	3601	10314000	5764
100x100x8	100	8	21.4	2724	3659400	140x140x5.6	140	5.6	23	2930	8695500	5654
100x100x10	100	10	25.6	3257	4110800	140x140x4	140	4	16.8	2135	6516200	5392
110x110x2.5	110	2.5	8.31	1059	2023800	140x140x4	140	4	16.8	2135	6516200	3194
110x110x4	110	4	13	1655	3059400	150x150x10	150	10	41.3	5257	16525300	6912
110x110x6	110	6	18.9	2403	4245700	150x150x8	150	8	34	4324	14118300	6727
120x120x3	120	3	10.8	1381	3123500	150x150x4	150	4	18	2295	8078200	3676
120x120x5	120	5	17.6	2236	4854700	160x160x10	160	10	44.4	5657	20476700	7893
120x120x6	120	6	20.8	2643	5621600	160x160x8	160	8	36.5	4644	17412300	7287
120x120x8	120	8	26.4	3364	6768800	160x160x6	160	6	28.3	3603	14054800	6967
120x120x10	120	10	31.8	4057	7768100	160x160x4	160	4	19.3	2455	9871700	6512

140x140x4	140	4	16.8	2135	6516200	180x180x8.8	180	8.8	45.2	5760	27417300	7895
140x140x5.6	140	5.6	23	2930	8695500	180x180x8.8	180	8.8	45.2	5760	27417300	8690
140x140x7.1	140	7.1	28.3	3601	10314000	180x180x7.1	180	7.1	37.2	4737	23128400	8338
140x140x8.8	140	8.8	34.2	4352	12050300	180x180x7.1	180	7.1	37.2	4737	23128400	9089
140x140x10	140	10	38.1	4857	13116700	180x180x7.1	180	7.1	37.2	4737	23128400	9594
150x150x4	150	4	18	2295	8078200	180x180x5	180	5	27	3436	17368700	5731
150x150x6	150	6	26.4	3363	11459100	200x200x12.5	200	12.5	68.3	8704	48594200	12067
150x150x8	150	8	34	4324	14118300	180x180x5	180	5	27	3436	17368700	7760
150x150x10	150	10	41.3	5257	16525300	200x200x12.5	200	12.5	68.3	8704	48594200	13961
150x150x12.5	150	12.5	48.7	6204	18174400	180x180x5	180	5	27	3436	17368700	9640
160x160x4	160	4	19.3	2455	9871700	200x200x8.8	200	8.8	50.8	6464	38495900	8919
160x160x6	160	6	28.3	3603	14054800	200x200x7.1	200	7.1	41.6	5305	32316000	8908
160x160x8	160	8	36.5	4644	17412300	200x200x8.8	200	8.8	50.8	6464	38495900	11108
160x160x10	160	10	44.4	5657	20476700	200x200x7.1	200	7.1	41.6	5305	32316000	10962
160x160x12.5	160	12.5	52.6	6704	22750400	200x200x7.1	200	7.1	41.6	5305	32316000	12009
180x180x5	180	5	27	3436	17368700	220x220x10	220	10	63.2	8057	57824600	11493
180x180x7.1	180	7.1	37.2	4737	23128400	220x220x8	220	8	51.5	6564	48280100	11301
180x180x8.8	180	8.8	45.2	5760	27417300	220x220x6	220	6	39.6	5043	38133600	10803
180x180x12.5	180	12.5	60.5	7704	34064300	220x220x10	220	10	63.2	8057	57824600	15761
200x200x5	200	5	30.1	3836	24100900	250x250x6	250	6	45.2	5763	56720000	9599
200x200x7.1	200	7.1	41.6	5305	32316000	250x250x8	250	8	59.1	7524	72292000	12829
200x200x8.8	200	8.8	50.8	6464	38495900	250x250x10	250	10	72.7	9257	87066700	15721
200x200x12.5	200	12.5	68.3	8704	48594200	250x250x12.5	250	12.5	88	11204	101613100	19908
60.3x2	60.3	2	2.88	366	155800	88.9x2.5	88.9	2.5	5.33	679	633700	1045
60.3x2.9	60.3	2.9	4.11	523	215900	88.9x3.2	88.9	3.2	6.76	862	792100	1385
60.3x4	60.3	4	5.55	707	281700	101.6x6.3	101.6	6.3	14.8	1886	2150700	2593

76.1x2	76.1	2	3.65	466	319800	101.6x2.5	101.6	2.5	6.11	778	956100	1244
76.1x2.9	76.1	2.9	5.24	667	447400	101.6x2.5	101.6	2.5	6.11	778	956100	1445
76.1x4	76.1	4	7.11	906	590600	108x5	108	5	12.7	1618	2150600	2524
76.1x6.3	76.1	6.3	10.8	1381	848200	108x3.6	108	3.6	9.27	1181	1610600	2562
88.9x2.5	88.9	2.5	5.33	679	633700	114.3x2.5	114.3	2.5	6.89	878	1372600	1557
88.9x3.2	88.9	3.2	6.76	862	792100	114.3x2.5	114.3	2.5	6.89	878	1372600	1740
88.9x5	88.9	5	10.4	1318	1163700	114.3x2.5	114.3	2.5	6.89	878	1372600	2196
88.9x6.3	88.9	6.3	12.8	1635	1402400	127x6	127	6	17.9	2281	4184400	3916
101.6x2.5	101.6	2.5	6.11	778	956100	139.7x8	139.7	8	26	3310	7202900	4088
101.6x3.6	101.6	3.6	8.7	1108	1332400	133x4	133	4	12.7	1621	3375300	2729
101.6x5	101.6	5	11.9	1517	1774700	133x2.5	133	2.5	8.05	1025	2182700	2542
101.6x6.3	101.6	6.3	14.8	1886	2150700	127x2.5	127	2.5	7.68	978	1895300	2864
108x2.5	108	2.5	6.5	829	1153500	139.7x3	139.7	3	10.1	1288	3010900	2117
108x3.6	108	3.6	9.27	1181	1610600	139.7x5	139.7	5	16.6	2116	4805400	3297
108x5	108	5	12.7	1618	2150600	133x2.5	133	2.5	8.05	1025	2182700	2643
108x6.3	108	6.3	15.8	2013	2612300	133x2.5	133	2.5	8.05	1025	2182700	3038
114.3x2.5	114.3	2.5	6.89	878	1372600	152.4x6.3	152.4	6.3	22.7	2892	7729600	3770
114.3x3.6	114.3	3.6	9.83	1252	1919800	152.4x5	152.4	5	18.2	2315	6295400	3567
114.3x5	114.3	5	13.5	1717	2569200	152.4x6.3	152.4	6.3	22.7	2892	7729600	4609
114.3x6.3	114.3	6.3	16.8	2138	3127100	152.4x5	152.4	5	18.2	2315	6295400	4453
127x2.5	127	2.5	7.68	978	1895300	159x5	159	5	19	2419	7178800	3397
127x4	127	4	12.1	1546	2926100	159x5	159	5	19	2419	7178800	3965
127x6	127	6	17.9	2281	4184400	159x5	159	5	19	2419	7178800	4700
133x2.5	133	2.5	8.05	1025	2182700	159x3	159	3	11.5	1470	4474200	2495
133x4	133	4	12.7	1621	3375300	159x3	159	3	11.5	1470	4474200	3091
133x6	133	6	18.8	2394	4837200	168.3x6	168.3	6	24	3059	10086900	5453

139.7x3	139.7	3	10.1	1288	3010900	168.3x4	168.3	4	16.2	2065	6970900	3353
139.7x5	139.7	5	16.6	2116	4805400	168.3x3	168.3	3	12.2	1558	5322800	3674
139.7x8	139.7	8	26	3310	7202900	168.3x4	168.3	4	16.2	2065	6970900	5375
139.7x10	139.7	10	32	4075	8618900	168.3x3	168.3	3	12.2	1558	5322800	5633
152.4x3	152.4	3	11.1	1408	3930100	193.7x4	193.7	4	18.7	2384	10727900	3792
152.4x5	152.4	5	18.2	2315	6295400	193.7x6	193.7	6	27.8	3538	15597200	5853
152.4x6.3	152.4	6.3	22.7	2892	7729600	193.7x8	193.7	8	36.6	4667	20155400	7559
159x3	159	3	11.5	1470	4474200	193.7x4	193.7	4	18.7	2384	10727900	3854
159x5	159	5	19	2419	7178800	193.7x6	193.7	6	27.8	3538	15597200	5957
159x6.3	159	6.3	23.7	3022	8823800	193.7x4	193.7	4	18.7	2384	10727900	5406
168.3x3	168.3	3	12.2	1558	5322800	219.1x4	219.1	4	21.2	2703	15638400	4261
168.3x4	168.3	4	16.2	2065	6970900	219.1x6	219.1	6	31.5	4017	22819500	6082
168.3x6	168.3	6	24	3059	10086900	219.1x8	219.1	8	41.7	5306	29596300	8365
168.3x8	168.3	8	31.6	4029	12972700	219.1x4	219.1	4	21.2	2703	15638400	6732
168.3x10	168.3	10	39	4973	15639800	219.1x4	219.1	4	21.2	2703	15638400	7676
193.7x4	193.7	4	18.7	2384	10727900	244.5x6	244.5	6	35.29	4496	31985300	6880
193.7x6	193.7	6	27.8	3538	15597200	244.5x8	244.5	8	46.66	5944	41604500	9482
193.7x8	193.7	8	36.6	4667	20155400	244.5x10	244.5	10	57.83	7367	50731500	12034
193.7x10	193.7	10	45.3	5771	24415900	244.5x12.5	244.5	12.5	71.52	9111	61474200	14882
193.7x12.5	193.7	12.5	55.9	7116	29343100	244.5x6	244.5	6	35.29	4496	31985300	11612

Çizelge 7.3. Sistem 1 optimizasyon sonuçları

w	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
f	1.000	0.870	1.102	1.108	1.079	1.092	1.035	1.187	1.046	1.081	1.000
n _t (adet)	6	4	3	3	3	4	3	4	7	5	6
A _t (mm ²)	74.2	74.2	98.7	107.7	74.2	74.2	74.2	74.2	74.2	54.8	107.7
İç Eleman (mm)	127x6	159x3	100x100x10	152,4x5	152,4x5	152,4x5	139,7x10	120x120x8	139,7x10	110x110x4	120x120x10
Dış Eleman (mm)	159x5	193,7x4	140x140x4	193,7x6	193,7x6	193,7x6	168,3x3	160x160x6	168,3x3	150x150x10	160x160x4
A _{top} (mm ²)	4700	3854	5392	5853	5853	5853	5633	6967	5633	6912	6512
Maliyet (\$)	67.6	53.6	71.9	78.1	75.4	77.4	72.8	90.6	80.6	89.3	94.4
E _d (Nmm)	3951039	7569177	9493765	11946585	11666707	11492095	11850973	10781623	11827150	11331099	11950327
β	0.51	0.98	0.79	1.00	0.98	1.00	1.00	0.73	0.94	0.95	0.95
ε _{c,max}	0.00235	0.00246	0.00237	0.00247	0.00248	0.00245	0.0025	0.00249	0.00248	0.00245	0.00246
ε _{s,max}	0.00233	0.00244	0.00231	0.00238	0.00240	0.00236	0.002412	0.00240	0.00246	0.00237	0.00241
f _{pi} (MPa)	924.8	1080.8	1083.3	687.6	1043.9	765.1	1026.0	977.0	442.3	835.2	327.1
f _{pmax} (MPa)	1359.4	1528.1	1529.9	1158.7	1520.6	1232.8	1505.4	1452.4	909.1	1305.8	781.4
F _y (N)	554189.6	628648.2	528068.5	444483.2	454184.2	454132.5	456734.6	458275.7	432210.3	437694.5	404367.4
F _t (N)	411676.7	320767.1	320788.5	222241.6	232350.1	227066.3	228367.3	289950.4	229697.7	229007.5	211453.5
F _f (N)	142512.9	307881.2	207280.0	222241.6	221834.0	227066.3	228367.3	168325.3	202512.6	208687.0	192913.8
Δ _u (mm)	2.1	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
K ₁ (N/mm)	320147.2	258552.3	354808.8	385247.4	379396.1	383709.5	365621.9	453457.0	382875.7	44800.6	445298.9
K ₂ (N/mm)	25880.6	17253.8	17216.3	18791.6	12940.3	17253.8	12940.3	17253.8	30194.1	15905.0	37583.2
δ _{b,max} (mm)	7.5	7.7	7.7	8.1	8.2	8.0	8.3	8.2	8.0	8.1	7.8
Δ _{f,max} (mm)	19.1	19.9	19.0	19.7	19.7	19.5	19.9	19.9	20.0	19.5	19.6
F _{max} (N)	702751	719713	634666	575078	544868	572509	547268	582051	640509	551360	663829
I _{min} /I	1.10	1.15	1.19	2.02	2.13	2.03	1.79	2.14	1.53	1.02	2.16

Çizelge 7.4. Sistem 2 optimizasyon sonuçları

w	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
f	1.000	1.153	1.096	1.114	1.034	1.099	1.120	1.088	1.063	1.037	1.000
n _t (adet)	5	4	3	2	6	6	3	3	3	8	8
A _t (mm ²)	54.8	74.2	74.2	123.9	54.8	98.7	98.7	74.2	98.7	107.7	98.7
İç Eleman (mm)	127x6	127x6	100x100x10	159x6,3	168,3x3	168,3x3	152,4x5	152,4x5	100x100x10	152,4x5	120x120x6
Dış Eleman (mm)	159x5	159x5	140x140x4	193,7x4	219,1x4	219,1x4	193,7x6	193,7x6	140x140x4	193,7x6	160x160x8
A _{top} (mm ²)	4700	4700	5392	5406	4261	4261	5853	5853	5392	5853	7287
Maliyet (\$)	63.1	63.7	69.9	70.8	59.3	66.2	77.3	75.4	71.9	92.3	107.4
E _d (Nmm)	4767481	4762853	11147943	10667578	9927251	10165966	11122242	11193690	11176511	11792654	11673394
β	1.00	0.96	1.00	0.88	1.00	1.00	1.00	0.96	0.96	1.00	1.00
ε _{c,max}	0.00206	0.002058	0.00249	0.00250	0.00247	0.00247	0.00243	0.00250	0.002496	0.00250	0.00248
ε _{s,max}	0.00195	0.001951	0.00233	0.00237	0.00239	0.00242	0.00228	0.00233	0.002365	0.00238	0.00230
f _{pl} (MPa)	1202.0	1150.5	1084.1	1116.0	821.2	409.9	783.8	1101.2	838.0	223.8	243.8
f _{pmax} (MPa)	1572.2	1519.5	1551.6	1581.5	1274.8	858.6	1240.4	1570.6	1304.0	663.6	675.6
F _y (N)	659177.5	656421.6	482610.4	495788.4	539692.4	485568.7	464212.2	471241.6	477080.3	385732.8	385015.5
F _t (N)	329588.8	341423.3	241305.2	276482.4	270209.2	242784.4	232106.1	245106.0	248142.8	192866.4	192507.8
F _f (N)	329588.8	314998.4	241305.2	219306.0	269483.3	242784.4	232106.1	226135.6	228937.4	192866.4	192507.8
Δ _u (mm)	2.2	2.2	2.1	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.3	2.3
K ₁ (N/mm)	310207.5	311520.3	350532.9	352872.3	285910.0	301213.3	383672.0	379396.1	354808.8	416566.7	502148.4
K ₂ (N/mm)	15941.0	17253.8	12940.3	14403.1	19129.2	34432.5	17216.3	12940.3	17216.3	50110.9	45910.0
δ _{b,max} (mm)	6.4	6.4	8.0	8.0	7.8	7.7	7.9	8.1	8.0	7.6	7.4
Δ _{f,max} (mm)	16.5	16.5	19.5	19.5	19.5	19.7	19.1	19.5	19.6	19.5	18.9
F _{max} (N)	726794	729732	568833	591007	653015	695777	578604	559755	592058	718401	690771
I _{min} /I	1.06	1.06	1.33	2.75	1.50	1.41	2.00	2.07	1.28	1.61	1.50

Çizelge 7.5. Sistem 3 optimizasyon sonuçları

w	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
f	1.000	0.915	0.842	0.914	0.976	1.067	0.998	1.076	0.998	1.005	1.000
n _t (adet)	1	2	3	3	2	2	2	3	3	3	7
A _t (mm ²)	107.7	107.7	54.8	54.8	74.2	74.2	140.0	54.8	74.2	123.9	54.8
İç Eleman (mm)	114,3x6,3	139,7x5	139,7x3	120x120x3	139,7x5	127x4	159x3	114,3x6,3	127x4	159x3	159x5
Dış Eleman (mm)	152,4x5	168,3x3	168,3x4	150x150x4	168,3x3	159x5	193,7x4	152,4x5	159x5	193,7x4	193,7x6
A _{top} (mm ²)	4453	3674	3353	3676	3674	3965	3854	4453	3965	3854	5957
Maliyet (\$)	70.5	58.8	52.2	57.1	57.7	62.1	62.6	68.7	62.1	62.0	102.3
E _d (Nmm)	11402642	10608844	12071011	12086121	10801804	10292374	12204789	11432374	12425300	12472527	12545146
β	1.00	0.72	1.00	1.00	0.78	0.82	0.92	1.00	1.00	0.95	1.00
ε _{c,max}	0.00247	0.00245	0.00246	0.002463	0.00249	0.00250	0.00250	0.00246	0.00250	0.00245	0.002484
ε _{s,max}	0.00218	0.00224	0.00223	0.002235	0.00226	0.00226	0.00228	0.00217	0.00227	0.00225	0.002204
f _{pi} (MPa)	1000.1	700.1	667.5	642.9	979.3	907.8	373.0	636.5	431.9	267.3	199.1
f _{pmax} (MPa)	1642.7	1354.5	1324.2	1300.9	1640.1	1574.1	1040.3	1274.0	1098.3	920.6	839.6
F _y (N)	215512.8	234884.0	219603.9	211463.3	237221.2	228112.9	193802.1	209431.8	191429.8	188518.7	152881.5
F _t (N)	107756.4	150865.4	109801.9	105767.8	145310.0	134709.3	104432.1	104715.9	96135.5	99342.9	76440.8
F _f (N)	107756.4	84018.6	109801.9	105695.5	91911.2	93403.6	89370.0	104715.9	95294.3	89175.8	76440.8
Δ _u (mm)	1.1	1.0	1.1	1.1	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
K ₁ (N/mm)	225364.3	191757.8	173526.5	189514.2	188673.9	203077.6	203632.6	227973.7	206487.7	207843.3	312499.9
K ₂ (N/mm)	4952.0	9904.0	7561.5	7561.5	6820.2	6820.2	12869.3	7561.5	10230.2	17080.0	17643.4
δ _{b,max} (mm)	14.0	14.2	14.3	14.3	14.4	14.5	14.5	13.9	14.5	14.2	13.9
Δ _{f,max} (mm)	19.6	20.1	20.1	20.2	20.3	20.5	20.6	19.5	20.5	20.2	19.7
F _{max} (N)	280000	364543	318311	311356	327661	319531	368025	307369	330332	415763	390105
I _{min} /I	1.29	1.52	1.09	1.16	1.69	1.05	1.40	1.17	1.02	1.24	2.12

Çizelge 7.6. Sistem 4 optimizasyon sonuçları

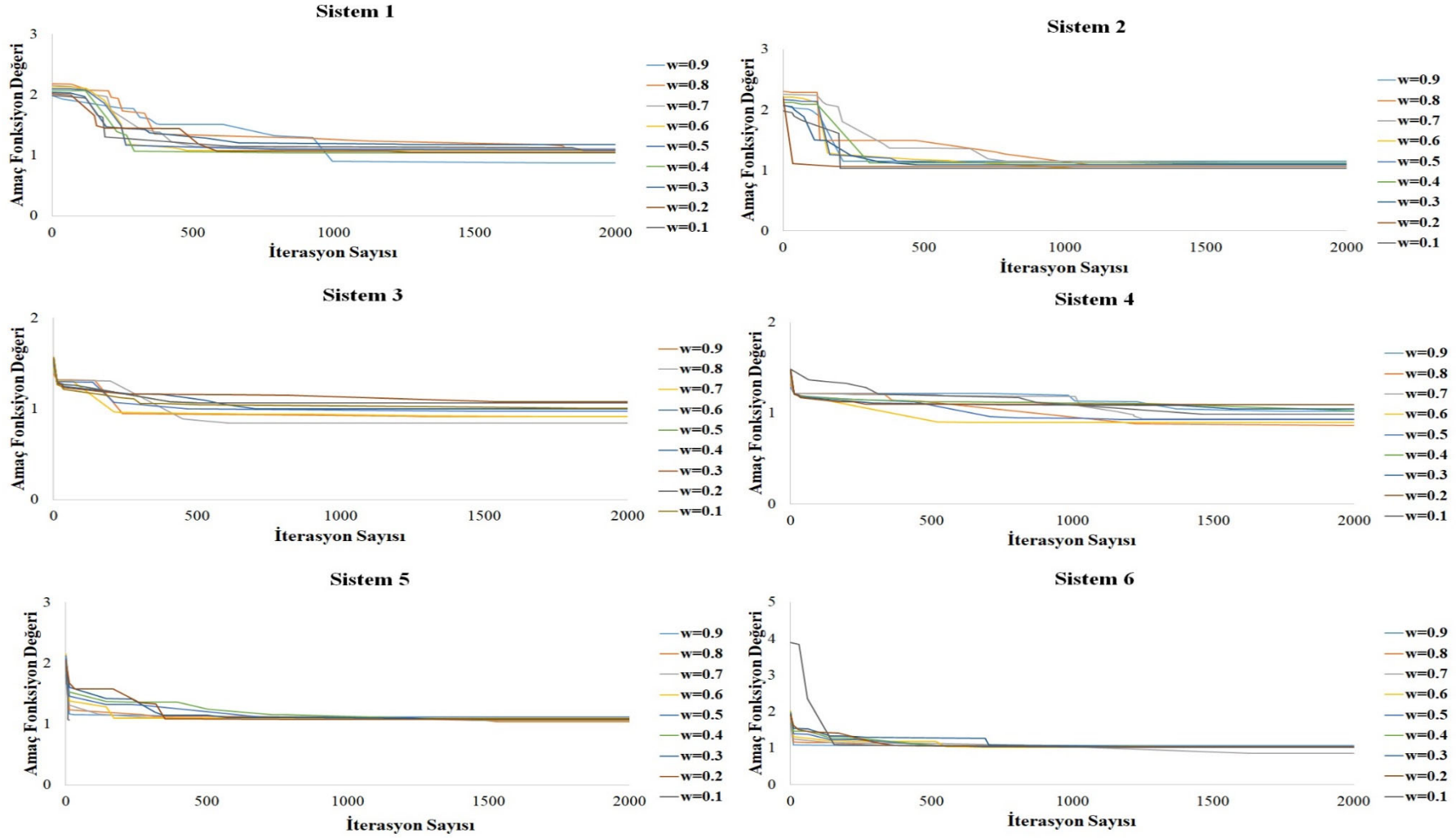
w	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
f	1.000	1.024	0.866	0.935	0.897	0.930	1.030	1.050	1.090	0.990	1.000
n _t (adet)	5	2	3	2	3	2	3	8	5	2	8
A _t (mm ²)	74.2	74.2	74.2	98.7	54.8	123.9	107.7	54.8	74.2	98.7	54.8
İç Eleman (mm)	168,3x3	127x6	120x120x3	127x4	152,4x3	152,4x3	152,4x3	139,7x8	120x120x10	139,7x3	140x140x4
Dış Eleman (mm)	219,1x4	159x5	150x150x4	159x5	193,7x4	193,7x4	193,7x4	168,3x4	160x160x4	168,3x4	180x180x8,8
A _{top} (mm ²)	4261	4700	3676	3965	3792	3792	3792	5375	6512	3353	7895
Maliyet (\$)	76.4	73.1	57.7	62.9	58.8	61.1	60.6	82.6	100.3	53.7	133.3
E _d (Nmm)	3865674	8857717	11322893	10855962	11699273	11810932	10572903	12323458	11846097	11704699	11902274
β	0.45	1.00	0.92	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	0.97	1.00	1.00
ε _{c,max}	0.00222	0.00211	0.00248	0.00245	0.00249	0.002496	0.00236	0.00244	0.00246	0.00249	0.00245
ε _{s,max}	0.00204	0.00182	0.00224	0.00220	0.00222	0.002258	0.00215	0.00222	0.00217	0.00224	0.00214
f _{pi} (MPa)	600.5	961.9	526.8	551.7	645.9	401.6	336.5	182.8	221.6	551.4	154.7
f _{pmax} (MPa)	1177.0	1503.3	1173.1	1186.6	1294.4	1052.1	952.2	811.2	844.9	1199.8	769.7
F _y (N)	287921.2	285476.6	216869.9	214183.5	212525.9	198980.8	217504.1	160430.4	160009.8	217713.5	135721.6
F _t (N)	222756.6	142738.3	117259.2	108908.8	106262.9	99490.4	108752.0	80215.2	82207.5	108856.1	67860.8
F _f (N)	65164.6	142738.3	99610.7	105274.8	106262.9	99490.4	108752.0	80215.2	77802.3	108857.4	67860.8
Δ _u (mm)	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	0.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1
K ₁ (N/mm)	227959.1	239458.3	192182.9	205331.2	195255.9	199081.1	202550.5	286212.8	339377.9	175038.8	410946.5
K ₂ (N/mm)	17050.4	6820.2	10230.2	9073.8	7561.5	11386.7	14856.1	20163.9	17050.4	9073.8	20163.9
δ _{b,max} (mm)	12.5	11.8	14.1	13.8	14.1	14.2	13.4	13.7	13.6	14.1	13.4
Δ _{f,max} (mm)	17.9	16.5	19.9	19.5	19.9	20.0	19.0	19.4	19.2	19.9	19.0
F _{max} (N)	480318	357674	349429	329457	310980	348748	400558	424797	382845	334433	398869
I _{min} /I	1.28	1.35	1.03	1.02	1.46	1.30	1.13	1.89	2.34	1.04	1.88

Çizelge 7.7. Sistem 5 optimizasyon sonuçları

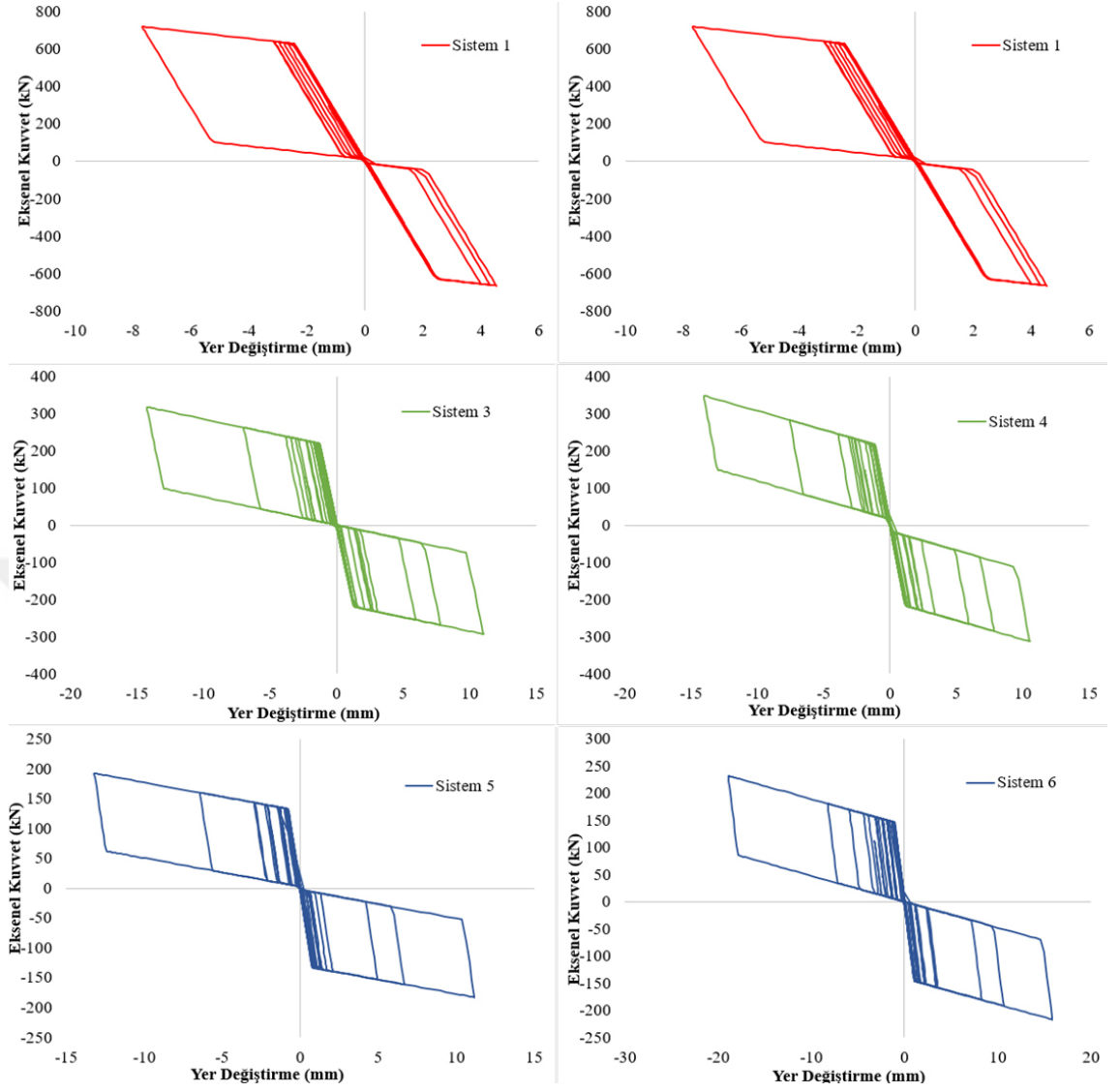
w	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
f	1.000	1.089	1.041	1.055	1.097	1.113	1.071	1.089	1.077	1.068	1.000
n _t (adet)	2	2	3	1	3	3	2	3	3	2	1
A _t (mm ²)	54.8	98.7	54.8	74.2	54.8	54.8	54.8	54.8	54.8	74.2	54.8
İç Eleman (mm)	133x6	139.7x10	159x6.3	139.7x10	152.4x5	168.3x4	139.7x10	152.4x5	152.4x5	139.7x10	193.7x8
Dış Eleman (mm)	168.3x6	168.3x3	193.7x4	168.3x3	193.7x6	219.1x6	168.3x3	193.7x6	193.7x6	168.3x3	244.5x10
A _{top} (mm ²)	5453	5633	5406	5633	5853	6082	5633	5853	5853	5633	12034
Maliyet (\$)	135.3	144.2	137.1	137.7	147.7	153.2	139.6	147.7	147.7	141.7	288.8
E _d (Nmm)	11731278	11532141	13007341	13138834	13553405	13715115	13667305	13780190	13973996	14025723	15007376
β	0.96	0.92	0.98	1.00	0.98	1.00	0.97	1.00	1.00	1.00	0.99
ε _{c,max}	0.002401	0.00237	0.00242	0.00246	0.00245	0.00242	0.00248	0.00245	0.00249	0.00249	0.00248
ε _{s,max}	0.002144	0.00213	0.00216	0.00218	0.00218	0.00216	0.00219	0.002176	0.00220	0.00220	0.00219
f _{pi} (MPa)	697.7	371.5	411.6	957.5	386.5	370.4	642.9	373.9	365.6	422.3	902.2
f _{pmax} (MPa)	1244.8	910.8	962.2	1518.3	950.8	921.9	1206.9	931.8	932.0	988.1	1465.6
F _y (N)	174123.1	135952.1	123923.7	142079.7	124118.7	121879.2	136527.7	123037.2	120298.5	125313.2	98830.8
F _t (N)	76522.8	73347.1	67719.9	71039.8	63588.5	60939.6	70514.2	61518.6	60149.3	62656.6	49475.1
F _f (N)	97600.3	62605.1	56203.8	71039.8	60530.2	60939.6	66013.5	61518.6	60149.3	62656.6	49355.8
Δ _u (mm)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
K ₁ (N/mm)	173894.1	182079.5	174016.9	178497.5	188010.2	195179.0	179529.0	188010.2	188010.2	180654.2	378317.9
K ₂ (N/mm)	3188.2	5738.8	4782.3	2156.7	4782.3	4782.3	3188.0	4782.3	4782.3	4313.4	1594.1
δ _{b,max} (mm)	18.8	18.6	18.9	19.3	19.4	19.0	19.4	19.2	19.5	19.5	19.4
Δ _{f,max} (mm)	20.8	20.5	20.9	21.3	21.5	21.0	21.4	21.2	21.5	21.5	21.4
F _{max} (N)	204461	238123	219835	181966	213759	209624	195953	211690	210411	206280	129331
I _{min} /I	1.09	1.03	1.85	1.35	1.36	1.53	1.25	1.37	1.38	1.19	7.18

Çizelge 7.8. Sistem 6 optimizasyon sonuçları

w	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
f	144.840	1.067	1.043	0.866	1.026	1.028	1.040	1.028	1.030	1.025	1.000
n _t (adet)	2	4	1	3	3	3	3	3	3	1	2
A _t (mm ²)	54.8	74.2	74.2	54.8	54.8	54.8	54.8	54.8	54.8	74.2	54.8
İç Eleman (mm)	152.4x5	150x150x4	159x5	168.3x3	152.4x5	152.4x5	152.4x5	159x6.3	152.4x5	140x140x5.6	120x120x8
Dış Eleman (mm)	193.7x6	180x180x5	193.7x6	219.1x4	193.7x6	193.7x6	193.7x6	193.7x4	193.7x6	180x180x8.8	160x160x6
A _{top} (mm ²)	5853	5731	5957	4261	5853	5853	5853	5406	5853	8690	6967
Maliyet (\$)	144.8	151.8	145.4	109.9	147.7	147.7	147.7	137.1	147.7	210.4	171.3
E _d (Nmm)	1134442	11278382	11598431	12495579	13431442	13438445	13228711	13099434	13496143	14250523	13933884
β	0.96	0.87	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ε _{c,max}	0.00238	0.00242	0.002288	0.00249	0.00249	0.00248	0.00246	0.00247	0.00249	0.002471	0.00250
ε _{s,max}	0.00190	0.00189	0.001845	0.00196	0.00197	0.00197	0.00195	0.00194	0.00197	0.001891	0.00195
f _{pi} (MPa)	697.7	237.7	1050.9	444.6	373.9	373.3	378.7	391.8	370.6	767.6	549.0
f _{pmax} (MPa)	11223.0	773.1	1555.1	994.8	924.1	920.9	921.6	937.4	920.4	1312.8	1099.9
F _y (N)	147123.1	125024.2	155938.0	146278.6	122415.6	122835.1	124601.9	128928.3	121925.8	113884.6	120416.5
F _t (N)	76522.8	70541.0	77969.0	73139.3	61513.1	61417.6	62300.9	64464.2	60962.9	56954.2	60208.3
F _f (N)	70600.3	54483.2	77969.0	73139.3	60902.4	61417.6	62300.9	64464.2	60962.9	56930.4	60208.3
Δ _u (mm)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
K ₁ (N/mm)	186416.1	188035.6	188640.3	138172.7	188010.2	188010.2	188010.2	174016.9	188010.2	274196.7	221289.8
K ₂ (N/mm)	3188.2	8226.9	2156.7	4782.3	4782.3	4782.3	4782.3	4782.3	4782.3	2156.7	3188.2
δ _{b,max} (mm)	18.1	18.4	17.3	18.9	18.9	18.8	18.7	18.8	18.9	18.8	19.0
Δ _{f,max} (mm)	19.9	20.4	19.1	20.9	20.9	20.8	20.6	20.7	20.9	20.7	20.9
F _{max} (N)	202254	278017	191561	231741	209821	209792	210747	215146	209287	153457	179106
I _{min} /I	1.43	1.34	1.73	1.06	1.38	1.38	1.38	1.89	1.39	2.61	1.74



Şekil 7.2. Tüm sistemlere ait arama geçmişleri



Şekil 7.3. Tüm sistemler için KMEDÇ eksenel kuvvet-şekil değiştirme grafikleri

ÖZGEÇMİŞ

Uğur ÖZMEN

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2019-2021	Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, Antalya
Lisans	Anadolu Üniversitesi
2016-2019	Açıköğretim Fakültesi, Sosyoloji Bölümü, Eskişehir
Lisans	Süleyman Demirel Üniversitesi
2005-2009	Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta