BÜYÜK ÖLÇEKLİ ÇELİK YAPILARIN SEZGİSEL OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİYLE OPTİMUM TASARIMI

İBRAHİM BEHRAM UĞUR

KASIM 2021

DİYARBAKIR

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BÜYÜK ÖLÇEKLİ ÇELİK YAPILARIN SEZGİSEL OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİYLE OPTİMUM TASARIMI

İBRAHİM BEHRAM UĞUR

DİCLE ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM-ÖĞRETİM VE SINAV YÖNETMELİĞİNİN BİR PARÇASI OLARAK
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALINDA
DOKTORA TEZİ
OLARAK HAZIRLANMIŞTIR

KASIM 2021

DİYARBAKIR

BÜYÜK ÖLÇEKLİ ÇELİK YAPILARIN SEZGİSEL OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİYLE OPTİMUM TASARIMI

İbrahim Behram UĞUR tarafından Dicle Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin bir parçası olarak hazırlanan bu çalışma, aşağıda bilgileri yazılı jüri üyeleri tarafından değerlendirilerek **İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı**'nda **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Neslihan Dalkılıç _____
Müdür, **Fen Bilimleri Enstitüsü**

Prof. Dr. Sadık Özgür DEĞERTEKİN _____
Danışman, **İnşaat Mühendisliği Bölümü,**
Dicle Üniversitesi

Sınav Jürisi:

Prof. Dr. Mehmet Sedat HAYALİOĞLU **(*)** _____
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi

Prof. Dr. Sadık Özgür DEĞERTEKİN **(**)** _____
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi

Prof. Dr. Oğuzhan HASANÇEBİ _____
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Serdar ÇARBAŞ _____
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÇETİNKAYA _____
Makine Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi

ONAY

Savunma Tarihi: 26 / 11 / 2021

(*) Sınav Jürisi kısmının birinci satırına Jüri Başkanının bilgilerini yazınız.
(**) Sınav Jürisi kısmının ikinci satırına Tez Danışmanının bilgilerini yazınız.

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tez çalışmasında yer alan tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bahse konu bu kural ve ilkelerin gerektirdiği üzere, bu çalışmada özgün olmayan tüm bilimsel içerikleri kurallara uygun biçimde alıntılayıp kaynak gösterdiğimi beyan ederim. Beyanımla çelişen herhangi bir delil bulunduğu takdirde tüm sorumluluğu üstleneceğimi kabul ederim.

Ad, Soyad: İbrahim Behram UĞUR

İmza: …….……

TEŞEKKÜR

Sadece bu tez çalışmasında değil lisansüstü eğitimimin her aşamasında, her türlü bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, hiçbir konuda desteğini esirgemeyen ve öğrencisi olmaktan büyük onur duyduğum değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Sadık Özgür DEĞERTEKİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca Doktora Tez İzleme Komitesi'nde yer alarak çalışmama destek veren Prof. Dr. Mehmet Sedat HAYALİOĞLU ve Dr. Öğr. Ü. Şükrü ÇETİNKAYA'ya teşekkürlerimi sunarım. Yine doktora tez çalışmamda desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Oğuzhan HASANÇEBİ'ye (Orta Doğu Teknik Üniversitesi), Prof. Dr. Saeed Gholizadeh'e (Urmia University) ve Doç. Dr. Serdar ÇARBAŞ'a (Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi) teşekkürü borç bilirim.

Doktora çalışmalarımdan dolayı uzun bir süre yanlarında bulunamadığım sevgili eşim Cennet YAMAN UĞUR'a ve biricik kızım Elis'e gösterdikleri sonsuz sevgi, anlayış ve fedakarlıktan ötürü teşekkür ederim.

Hayatımın her anında yanımda olan ve beni cesaretlendiren değerli aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER LİSTESİ v
TABLOLAR LİSTESİ viii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ ix
ÖZET xiv
ABSTRACT xv
1. GİRİŞ 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 5
2.1 Düzlem Çelik Çerçeve Sistemlerin Optimum Tasarımı Konusunda Yapılan Çalışmalar 5
2.2 Uzay Çelik Çerçeve Sistemlerin Optimum Tasarımı Konusunda Yapılan Çalışmalar 8
2.3 Paralel Hesaplama Yöntemi ile Yapı Sistemlerinin Optimizasyonu Konusunda Yapılan Çalışmalar 11
2.4 Jaya Algoritması Kullanılarak Mühendislik Alanında Yapılan Optimizasyon Çalışmaları 13
2.5 Cıvık Mantar Algoritması (SMA) Kullanılarak Yapılan Çalışmalar 14
3. MATERYAL VE METOT 17
3.1 Optimizasyon 17
3.2 Sezgisel Optimizasyon Yöntemleri 19
3.2.1 Genetik algoritma (GA) 19
3.2.2 Tavlama benzeşimi algoritması (SA) 20
3.2.3 Parçacık sürü optimizasyonu (PSO) 20
3.2.4 Karınca koloni optimizasyonu (ACO) 20
3.2.5 Jaya algoritması (JA) 21

3.2.6 Cıvık mantar algoritması (SMA) 24
3.2.7 Hibrit cıvık mantar – Jaya algoritması (HSMJA) 30
3.3 Yapı Mühendisliğinde Optimizasyon 31
3.4 Çerçeve Sistemlerin Statik Analizi 32
3.4.1 Düzlem çerçeve sistemlerin matris deplasman yöntemi ile analizi 33
3.4.2 Uzay çerçeve yapıların matris deplasman yöntemi ile analizi 39
3.5 Çelik Çerçeve Sistemlerinin Optimum Tasarım Problemi 42
3.5.1 Çelik çerçeve sistemlerin AISC-ASD yönetmeliğine göre tasarım sınırlayıcıları 44
3.5.2 Çelik çerçeve sistemlerin AISC-LRFD yönetmeliğine göre tasarım sınırlayıcıları 47
3.5.3 Deplasman sınırlayıcıları 51
3.5.4 Enkesit-boyut sınırlayıcıları 52
3.6 Open System for Earthquake Engineering Simulation (OPENSEES) v2.5.0 Yapısal Analiz Programı 53
3.7 SAP2000 Open Application Programming Interface (Açık Uygulama Programlama Ara yüzü, OAPI) 55
3.8 Çelik Çerçeve Sistemlerin JA Yöntemiyle Optimum Tasarımı 56
3.9 Çelik Çerçeve Sistemlerin SMA Yöntemiyle Optimum Tasarımı 61
3.10 Çelik Çerçeve Sistemlerin HSMJA Yöntemiyle Optimum Tasarımı 66
3.11 Çelik Çerçeve Sistemlerin Optimum Tasarımı için Paralel Hesaplama Yöntemi 69
3.12 Paralelleştirilmiş Hibrit Cıvık Mantar-Jaya Algoritması (PHSMJA) ile Uzay Çerçeve Sistemlerin Optimum Tasarımı 71
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 73
4.1 Düzlem Çelik Çerçeve Sistemlerin JA, SMA ve HSMJA Yöntemleri ile Optimum Tasarımı 73
4.1.1 Tek açıklıklı-on katlı düzlem çerçeve 74

4.1.2 Üç açıklıklı-on beş katlı düzlem çelik çerçeve 84
4.1.3 Üç açıklıklı-yirmi dört katlı düzlem çelik çerçeve 90
4.1.4 224 elemanlı merkezi çaprazlı çelik çerçeve 98
4.2 Uzay Çelik Çerçevelerin JA, SMA ve PHSMJA Yöntemleri ile Optimum Tasarımı 107
4.2.1 135 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçeve 109
4.2.2 1026 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçeve 117
4.2.3 1040 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçeve 128
4.2.4 3860 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçeve 137
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 147
KAYNAKLAR 149
ÖZGEÇMİŞ 155

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1 Jaya algoritmasının akış diyagramı 24
Şekil 3.2 Cıvık mantarın besin arama davranışı (Li vd., 2020'den değiştirilerek) 25
Şekil 3.3 SMA algoritmasının işlem adımları 27
Şekil 3.4 SMA algoritması akış diyagramı 29
Şekil 3.5 Düzlem çerçeve elemanı 33
Şekil 3.6 Serbestlik dereceleri için rijitlik katsayıları 34
Şekil 3.7 Düzlem çerçeve elemanın eğimli durumu 36
Şekil 3.8 Uzay çerçeve elemanı ve serbestlik dereceleri 40
Şekil 3.9 Uzay çerçeve elemanın eğimli durumu 41
Şekil 3.10 Kolon-kiriş ve kolon-kolon birleşimleri için enkesit-boyut sınırları 53
Şekil 3.11 MATLAB-OPENSEES arası veri akışı 54
Şekil 3.12 MATLAB-SAP2000 etkileşim diyagramı (Sextos ve Balatas, 2011'den değiştirilerek) 56
Şekil 3.13 Çelik çerçeve sistemlerin JA ile optimum tasarımı için akış diyagramı ... 60
Şekil 3.14 SMA ile çerçeve sistem optimizasyonu (Li vd., 2020'den değiştirilerek) 61
Şekil 3.15 Çelik çerçeve sistemlerin SMA ile optimum tasarımı için akış diyagramı 65
Şekil 3.16 Çelik çerçeve sistemlerin HSMJA ile optimum tasarımı için akış diyagramı 68
Şekil 3.17 Çevrimiçi paralelleştirilmiş optimizasyon şeması 71
Şekil 4.1 Tek açıklıklı-on katlı düzlem çelik çerçeve 75
Şekil 4.2 Tek açıklıklı-on katlı düzlem çerçevenin farklı optimizasyon yöntemleri için yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması (I. optimizasyon durumu) 79
Şekil 4.3 Tek açıklıklı-on katlı düzlem çerçevenin farklı optimizasyon yöntemleri için yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması (II. optimizasyon durumu) 79
Şekil 4.4 Tek açıklıklı- on katlı düzlem çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) HSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait eleman dayanım oranları (I. optimizasyon durumu) 81
Şekil 4.5 Tek açıklıklı- on katlı düzlem çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) HSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait katlar arası göreli ötelenme oranları (I. optimizasyon durumu) 82

Şekil 4.6 Tek açıklıklı- on katlı düzlem çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) HSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait eleman dayanım oranları (II. optimizasyon durumu) 84
Şekil 4.7 Üç açıklıklı-on beş katlı düzlem çelik çerçeve 85
Şekil 4.8 Üç açıklıklı-on beş katlı düzlem çerçevenin farklı optimizasyon yöntemleri için yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması 87
Şekil 4.9 Üç açıklıklı-on beş katlı düzlem çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) HSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait eleman dayanım oranları 89
Şekil 4.10 Üç açıklıklı-on beş katlı düzlem çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) HSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait katlar arası göreli ötelenme oranları 90
Şekil 4.11 Üç açıklıklı-yirmi dört katlı düzlem çelik çerçeve 92
Şekil 4.12 Üç açıklıklı-yirmi dört katlı düzlem çelik çerçevenin farklı optimizasyon yöntemleri için yakınsama eğrilerinin karşılaştırılması 95
Şekil 4.13 Üç açıklıklı-yirmi dört katlı düzlem çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) HSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait eleman dayanım oranları 97
Şekil 4.14 Üç açıklıklı- yirmi dört katlı düzlem çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) HSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait katlar arası göreli ötelenme oranları 98
Şekil 4.15 224 elemanlı çaprazlı düzlem çelik çerçeve (Hasançebi vd., 2010'dan değiştirilerek) 99
Şekil 4.16 224 elemanlı merkezi çaprazlı düzlem çelik çerçevenin farklı optimizasyon yöntemleri için yakınsama eğrilerinin karşılaştırılması 104
Şekil 4.17 224 elemanlı çaprazlı düzlem çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) HSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait eleman dayanım oranları 106
Şekil 4.18 224 elemanlı çaprazlı düzlem çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) HSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait katlar arası göreli ötelenme oranları 107
Şekil 4.19 135 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçeve (a) Üç boyutlu görünüş (b) Plan (c) Kolon yerleşimi (Azad, 2021) 110
Şekil 4.20 135 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin farklı optimizasyon yöntemleri için yakınsama eğrilerinin karşılaştırılması 114
Şekil 4.21 135 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) PHSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait dayanım oranları 116

Şekil 4.22 135 elemanlı çaprazlı düzlem çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) PHSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait katlar arası göreli ötelenme oranları 117
Şekil 4.23 1026 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçeve (a) Üç boyutlu görünüş (b) İç aksların önden görünüşü (c) Dış aksların önden görünüşü (d) Yan görünüş (e) Kolon yerleşimi (Azad, 2021) 119
Şekil 4.24 1026 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin farklı optimizasyon yöntemleri için yakınsama eğrilerinin karşılaştırılması 125
Şekil 4.25 1026 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) PHSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait eleman dayanım oranları 126
Şekil 4.26 1026 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) PHSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait katlar arası göreli ötelenme oranları 127
Şekil 4.27 1040 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçeve (a) Üç boyutlu görünüş (b) Yapı geometrisi (c)Plan ve kolon yerleşimi (Hasançebi vd., 2010) 129
Şekil 4.28 1040 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin farklı optimizasyon yöntemleri için yakınsama eğrilerinin karşılaştırılması 133
Şekil 4.29 1040 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) PHSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait eleman dayanım oranları 135
Şekil 4.30 1040 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) PHSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait katlar arası göreli ötelenme oranları 136
Şekil 4.31 3860 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçeve (a) Üç boyutlu görünüş (b) Dış aks kesit görünüşü (c) İç aks kesit görünüşü (d) Kolon yerleşimi (Azad, 2021) 138
Şekil 4.32 3860 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin farklı optimizasyon yöntemleri için yakınsama eğrilerinin karşılaştırılması 142
Şekil 4.33 3860 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) PHSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait eleman dayanım oranları 144
Şekil 4.34 3860 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) PHSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait katlar arası göreli ötelenme oranları 145

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 4.1 Tek açıklıklı-on katlı düzlem çelik çerçevenin farklı popülasyon sayılarına göre optimum 74
Tablo 4.2 Tek açıklıklı-on katlı düzlem çelik çerçevenin optimum tasarım sonuçlarının karşılaştırılması (I. optimizasyon durumu) 77
Tablo 4.3 Tek açıklıklı-on katlı düzlem çelik çerçevenin optimum tasarım sonuçlarının karşılaştırılması (II. optimizasyon durumu) 78
Tablo 4.4 Üç açıklıklı-on beş katlı düzlem çelik çerçevenin optimum tasarım sonuçlarının karşılaştırılması 86
Tablo 4.5 Üç açıklıklı-yirmi dört katlı düzlem çelik çerçevenin optimum tasarım sonuçlarının karşılaştırılması 93
Tablo 4.6 224 elemanlı merkezi çaprazlı düzlem çelik çerçeveye etkiyen rüzgâr yükleri 100
Tablo 4.7 224 elemanlı çaprazlı düzlem çelik çerçevenin optimum tasarım sonuçlarının karşılaştırılması 102
Tablo 4.8 135 elemanlı uzay çelik çerçevenin farklı popülasyon sayılarına göre optimum tasarım sonuçları 108
Tablo 4.9 135 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin optimum tasarım sonuçlarının karşılaştırılması 113
Tablo 4.10 1026 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçeve sistemin optimum tasarım sonuçlarının karşılaştırılması 122
Tablo 4.11 1040 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçeve sistemin optimum tasarım sonuçlarının karşılaştırılması 131
Tablo 4.12 3860 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçeve sistemin optimum tasarım sonuçlarının karşılaştırılması 140

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simge	Açıklama
$f(x)$	Amaç fonksiyonu
$g(x)$	Eşitsizlik için sınırlayıcı fonksiyonu
$h(x)$	Eşitlik için sınırlayıcı fonksiyonu
r	[0-1] aralığında rastgele üretilen reel sayı
$X_{k,l,it}$	*it*'inci iterasyondaki *l*'inci tasarımın *k*'ıncı tasarım değişkeni
X_{eniyi}	Popülasyondaki en iyi tasarıma ait tasarım değişkenlerini içeren vektör
$X_{enkötü}$	Popülasyondaki en kötü tasarıma ait tasarım değişkenlerini içeren vektör
$f_p(X)$	Cezalandırılmış amaç fonksiyonu
ε_{con}	Yakınsama toleransı
$\vec{X}(t+1)$	Cıvık mantar algoritmasında modifiye edilmiş konum vektörü
$\vec{X}_{A,B}$	Rastgele seçilen konum vektörleri
$\vec{X}_b$	Besin konsantrasyonunun en fazla olduğu konum vektörü
$\overrightarrow{vc}$	1'den 0'a doğru lineer olarak azalan bir vektördür
$\overrightarrow{vb}$	İterasyon sayısına bağlı lineer değişen vektör
t veya *it*	Mevcut iterasyon sayısı
T veya *itermaks*	Maksimum iterasyon sayısı
DF	Tüm iterasyonların en iyi amaç fonksiyonu
wF	İterasyondaki en kötü amaç fonksiyonu
z,*p*	Cıvık mantar algoritması parametreleri
UB, LB	Konum vektörlerinin alt ve üst sınır değerleri
gr	HSMJA'da algoritma baskınlık oranı
u_1, u_2	-*x* yönünde eksenel deformasyonlar
v_1, v_2	-*y* yönündeki deplasmanlar
w_1, w_2	-*z* yönündeki deplasmanlar

$\theta_{x1,y1,z1}$	-*x, y ve z* yönü etrafındaki dönmeler
k	Eleman rijitliği
F_i	Düğüm noktası kuvvet vektörü
d_i	Düğüm noktası deplasman değeri
f_i	Ankastrelik kuvvet vektörü
E	Malzeme elastisite modülü
A	Eleman enkesit alanı
L	Eleman uzunluğu
I	Enkesit atalet momenti
a, β, γ	Elemanın sırasıyla *x, y* ve *z* eksenleriyle yaptığı açılar
T_i	Transformasyon matrisi
ψ	Toplam sınırlayıcı ihlal değeri
ε	Ceza parametresi
$W_p(A)$	Cezalandırılmış ağırlık fonksiyonu
f_{bx}, f_{by}	*x* ve *y* eksenleri etrafında eğilme etkisindeki elemanın gerekli eğilme gerilmeleri
F_{bx}, F_{by}	*x* ve *y* eksenleri etrafında eğilme etkisindeki elemanın izin verilen en büyük eğilme gerilmeleri
F_y	Akma dayanımı
F'_{ex}, F'_{ey}	Elemanın *x* ve *y* eksenlerine göre Euler gerilmeleri
F_a	İzin verilen en büyük eksenel basınç gerilmesi
C_{mx}, C_{my}	İkinci mertebe momentleri için azaltma katsayıları
λ	Narinlik oranı
C_c	Kritik burkulma değeri
G_A, G_B	*A* ve *B* uçlarının bağıl rijitlik oranları
f_v	Kayma gerilmesi
C_v	Elemanın gövde kayma katsayısı
P_u, P_n	Gerekli ve müsaade edilen eksenel basınç dayanımları
ϕ	Azaltma katsayıları
M_u, M_n	Gerekli ve müsaade edilen eğilme dayanımları

V_u, V_n	Gerekli ve müsaade edilen kesme dayanımları
K	Efektif uzunluk faktörü
F_{cr}	Kritik basınç gerilmesi
J	Polar atalet momenti
G	Kayma modülü
Z	Plastisite modülü
S	Eğilme eksenine göre kesit modülü
C_b	Moment düzeltme katsayısı
M_p	Plastik eğilme dayanımı
$B_{f,b}$, $B_{f,c}$	Kolon ve kiriş başlık genişliği
D	Toplam enkesit yüksekliği
$t_{f,c}$	Kolon başlık kalınlığı
$pop_{başlangıç}$	Başlangıç popülasyonu
ng	Eleman grup sayısı
np	Popülasyon sayısı
D	Zati yük
L	Hareketli yük
E_x, E_y	-*x* ve *y* yönünde sistemin kütle merkezine etki eden deprem yükünü
E_{ex}, E_{ey}	-*x* ve *y* yönünde sistemin kütle merkezine %5 lik eksantrisite ile etki eden deprem yükünü
c_s	Sismik tasarım katsayısı
W_s	Sistemin toplam ağırlığı
h	Kat yüksekliği
F_x	Kat seviyesine etki eden deprem kuvveti
T	Yapı periyodu
C_T	Yapı tipi sismik katsayısı
Δ_T	En üst kat deplasman değeri
H	Yapı yüksekliği
Δ_n	*n'*inci katın deplasman değeri
R	Sınır deplasman değeri
p_w	Rüzgâr yükü
K_z	Rüzgâr hızına maruz kalma faktörü

K_{zt}	Topografik katsayı
K_d	Rüzgâr yönü faktörü
V	Rüzgâr hızı
C_p	Dış basınç katsayısı
G	Ani rüzgâr faktörü

Kısaltma	**Açıklama**
ABC	Artifical Bee Colony
ACO	Ant Colony Optimization
ACSS	Advanced Charged System Search
ADS	Adaptive Dimensional Search
AHS	Advanced Harmony Search
AISC	American Institute of Steel Construction
ANN	Artificial Neural Network
ASCE	American Society of Civil Engineers
ASD	Allowable Stress Design
BB-BC	Big Bang-Big Crunch
BBO	Biogeographia Based Optimization
CBO	Colliding Bodies Optimization
CPO	Cyclical Parthenogenesis Optimization
CS	Cuckoo Search
CSS	Charged System Search
DAJA	Discrete Advanced Jaya Algorithm
DE	Dolphin Echolocation
EDE	Enhanced Dolphin Echolocation
EFFA	Enhanced Firefly Algorithm
EHBMO	Enhanced Honey Bee Mating Optimization
EMFO	Enhanced Moth Flame Optimization
ES	Evolution Strategies
EWOA	Enhanced Whale Optimization Algorithm
FA	Firefly Algorithm

GA	Genetic Algorithm
GPU	Graphic Processing Unit
HBMO	Honey Bee Mating Optimization
HS	Harmony Search
HSMJA	Hybrid Slime Mould Jaya Algorithm
JA	Jaya Algorithm
LRFD	Load and Resistance Factor Design
MBB-BC	Modified Big Bang-Big Crunch
MBLS	Migration Based Local Search
MFO	Moth Flame Optimization
MPI	Message Passing Interface
MPSO	Modified Particle Swarm Optimization
PHSMJA	Parallel Hybrid Slime Mould Jaya Algorithm
PSO	Particle Swarm Optimization
QDSO	Quantum Behaved Developed Swarm Optimizer
SA	Simulated Annealing
OAPI	Open Application Programming Interface
SBO	School Based Optimization
SGA	Search Group Optimization
SMA	Slime Mould Optimization
SQ	Simulated Quenching
SSO	Shuffled Shepherd Optimization
STD	Standard Deviation
TEO	Thermal Exchange Optimization
TLBO	Teaching-Learning Based Optimization
Tribe-ISA	Tribe Interior Search Algorithm
TS	Tabu Search
UEBB-BC	Upper Bound Strateghy Exponential Big Bang-Big Crunch
VBS	Vibration Based Search
WEO	Water Evporation Optimization
WOA	Whale Optimization Algorithm

ÖZET

BÜYÜK ÖLÇEKLİ ÇELİK YAPILARIN SEZGİSEL OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİYLE OPTİMUM TASARIMI

UĞUR, İbrahim Behram
Doktora, İnşaat Mühendisliği Bölümü
Danışman: Prof. Dr. Sadık Özgür DEĞERTEKİN
Kasım 2021, 155 sayfa

Sezgisel optimizasyon yöntemleri, doğa olayları, hayvanların sürü veya besin arama davranışı, fizik yasaları ve evrimsel süreçlerle optimizasyon problemleri arasındaki analojiyi esas almaktadır. Bu tez kapsamında, düzlem ve büyük ölçekli uzay çelik çerçevelerin optimum tasarımı için Jaya Algoritması (JA), cıvık mantar algoritması (SMA) ve hibrit cıvık mantar-Jaya algoritması (HSMJA) yöntemleri önerilmiştir. JA, en kötü çözümden uzaklaşma ve en iyi çözüme yaklaşma prensibine dayanan ve diğer birçok sezgisel optimizasyon yönteminden farklı olarak algoritmaya özgü parametreler içermeyen bir optimizasyon yöntemidir. SMA, soğuk ve nemli ortamlarda yaşayan tek hücreli Physarum Polycephalum adı verilen bir mantar türünün besin arama davranışından ve morfolojik değişimlerinden esinlenerek modellenmiş bir optimizasyon yöntemidir. Bu çalışmada, JA ve SMA'dan daha güçlü bir yöntem elde etmek amacıyla JA'nın hızlı yakınsama kapasitesi ve SMA'nın güçlü arama kabiliyeti bir araya getirilerek hibrit cıvık mantar-Jaya algoritması adı verilen (HSMJA) bir yöntem de geliştirilmiştir. Her üç yöntemin etkinliğini test etmek amacıyla literatürden alınan dört düzlem ve dört uzay çelik çerçevenin dayanım, deplasman ve enkesit-boyut sınırlayıcıları altında optimum tasarımı icra edilmiştir. Optimizasyon algoritmalarını ve formülasyonunu içeren ana program MATLAB programlama dilinde kodlanmıştır. Çelik çerçevelerin yapısal analizleri ise düzlem çelik çerçeveler için OPENSEES yapı analiz yazılımına, uzay çelik çerçeve sistemler için ise açık kaynak kodları (OAPI) kullanılarak SAP2000 yapı analiz yazılımına yaptırılmıştır. Büyük ölçekli uzay çerçevelerin optimum tasarımında yapı analiz süresi oldukça uzun zaman almaktadır. Hesaplama süresini azaltmak amacıyla optimum tasarım sürecinde yapı analizi yapılacak tasarımların aynı anda çevrim içi bir veri tabanından yardımcı bilgisayarlara dağıtıldığı paralel bir hesaplama yöntemi geliştirilmiştir. Bu paralel hesaplama yöntemi HSMJA'ya entegre edilerek paralel hibrid cıvık mantar-jaya algoritması adı verilen (PHSMJA) bir yöntem geliştirilmiş ve büyük ölçekli uzay çelik çerçevelerin optimum tasarımında kullanılmıştır. JA, SMA, HSMJA ve PHSMJA'nın farklı başlangıç popülasyonları için yapılan farklı icraları sonucunda elde edilen tasarımlar arasındaki en hafif tasarım ve bu tasarımın elde edilmesi için gereken yapı analiz sayısı tablolarda sunulmuştur. Ayrıca elde edilen tasarımlara ait ortalama ağırlık, standart sapma gibi istatistiksel veriler ve en kötü tasarıma ait ağırlık değeri de tablolarda sunulmuş ve literatürdeki diğer yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda HSMJA ile, SMA, JA ve literatürdeki diğer yöntemlerden daha hafif tasarımlar elde edilebildiği kanıtlanmıştır. Ayrıca önerilen PHSMJA ile hesaplama süresinin JA ve SMA'ya kıyasla %83 ile %88 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Cıvık mantar algoritması, Jaya algoritması, Hibrit cıvık mantar Jaya algoritması, Paralel hesaplama, Çelik çerçeveler, Optimum tasarım

ABSTRACT

OPTIMUM DESIGN OF LARGE-SCALE STEEL STRUCTURES USING METAHEURISTIC OPTIMIZATION METHODS

UGUR, Ibrahim Behram
PhD in Department of Civil Engineering
Supervisor: Prof. Dr. Sadik Ozgur DEGERTEKIN
November 2021, 155 pages

Metaheuristic optimization methods are based on analogies between natural events, herd or foraging behavior of animals, the laws of physics, and evolutionary processes and optimization problems. In this thesis, Jaya Algorithm (JA), slime mould algorithm (SMA) and hybrid slime mould-Jaya algorithm (HSMJA) methods are proposed for optimum design of planar and large-scale space steel frames. JA is an optimization method based on the principle of moving away from the worst solution and approaching the best solution, and unlike many other heuristic optimization methods, it does not contain algorithm-specific parameters. SMA is a metaheuristic method inspired by the foraging behavior and morphological alterations of a eukaryote called Physarum Polycephalum which inhabits cold and humid places. In this study, a method called hybrid slime mould-Jaya algorithm (HSMJA) was developed by combining the fast convergence capacity of JA and the strong search capability of SMA in order to obtain a more powerful method than JA and SMA. In order to test the effectiveness of the three methods presented in this study, the optimum design of four planar and four space steel frames taken from the literature under the strength, displacement and geometric-size constraints was performed. The main program containing the optimization algorithms and formulation is coded in the MATLAB programming language. Structural analyses were made by OPENSEES software for planar steel frames and SAP2000 software using open application programming interface (OAPI) for space steel frames. The structural analyses time take quite a long time in the optimum design of large-scale space frames. In order to reduce the computational time, a parallel computation method has been developed in which the designs to be analyzed in the optimum design process are simultaneously distributed from an online database to slave computers. This parallel computation method was integrated into HSMJA and a method called, parallel hybrid slime mould-jaya algorithm (PHSMJA), was developed and used in the optimum design of large-scale space steel frames. The lightest design among the designs obtained as a result of different executions of proposed algorithms for different initial populations and the number of structural analyses required to obtain this design are presented in the tables. Average weight and standard deviation of different designs obtained by different executions of the algorithms and the weight of the worst design are also presented in the tables and compared with other methods in the literature. As a result of the comparisons, it has been proven that lighter designs can be obtained with HSMJA than SMA, JA and other methods in the literature. In addition, it was determined that the computational time with the proposed PHSMJA was reduced by 83% to 88% compared to JA and SMA.

Keywords: Slime mould algorithm, Jaya algorithm, Hybrid slime mould-Jaya algorithm, Parallel computing, Steel frames, Optimum design

1. GİRİŞ

İnsanlığın varoluşuyla beraber yaşamın vazgeçilmez unsuru olan barınma ihtiyacı, tarihsel süreçte artan nüfus artışı ve yoğun kentleşme ile daha da önem kazanmıştır. Teknoloji ve sanayi alanındaki gelişmeler, fabrika yapıları, köprüler, sanayi binaları, spor tesisleri, uçak hangarları, büyük depolar, atölyeler gibi farklı yapı formlarına olan talebi arttırmıştır. Bu tip yapıların inşaatında genellikle çelik yapı sistemlerinin tercih edilmesinin nedeni, çeliğin malzeme olarak homojen ve izotrop olması, geniş açıklıklara imkân yaratması, imalat kolaylığı, geri dönüşüme uygunluğu ve hafif olmasıdır. Günden güne artan yapı yoğunluğu ile birlikte kısıtlı hammaddeye olan ihtiyacı azaltmak ve yapı maliyetini düşürmek amacıyla çelik yapı sistemlerinin optimize edilerek projelendirilmesi, kaçınılmaz hale gelmiştir.

Matematiksel olarak optimizasyon, bir fonksiyonun belirli koşullar altında maksimum veya minimum değerinin araştırılması işlemidir. Optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan yöntemler, klasik ve sezgisel yöntemler olmak üzere ikiye ayrılır. Klasik optimizasyon yöntemleri, optimumluk kriteri ve dinamik programlama gibi matematiksel operatörlerin kullanıldığı yöntemler olup genel olarak sürekli değişkenli problemlerin çözümü için geliştirildiğinden ayrık değişkenli problemlerde yetersiz kalmaktadır. Pratikte kullanılan birçok tasarım problemi ise ayrık değişkenlere sahiptir. Bu tip problemlerin çözümü için klasik optimizasyon yöntemlerine alternatif olarak biyolojik olaylar, evrimsel süreç, fizik yasaları, gen aktarımı, hayvanların sürü davranışı gibi doğal olayların gözlemlenip taklit edilmesiyle oluşturulan sezgisel optimizasyon yöntemleri geliştirilmiştir. Sezgisel yöntemler, matematiksel bağıntılar kullanılarak rastgele üretilen değişkenlerle elde edilen çözümlerin değerlendirilip her adımda daha iyi çözüme yakınsamayı amaçlayan iteratif yöntemlerdir. Sezgisel optimizasyon yöntemleri, mevcut adımda önceki çözümlere ait bilgilerin kullanılmaya devam edilmesi ve matematiksel operatörlerle arama yerine rastgele bir arama işlemine sahip olması nedeniyle klasik yöntemlere göre daha işlevseldir. Çalışma prensibinde tek bir yöntemin kullanıldığı yöntemlerin yanı sıra mevcut algoritmaya yeni denklemler eklenerek geliştirilen veya birden fazla yöntemin birleştirilmesiyle oluşturulan hibrit sezgisel optimizasyon yöntemleri de mevcuttur. Sezgisel optimizasyon yöntemleri, birçok mühendislik alanında olduğu gibi inşaat mühendisliği alanında da popülerliğini korumaktadır. Hidrolik yapılar,

istinat duvarları, su iletim hatları, karayolu planlaması ve yapı sistemlerinin tasarımı, sezgisel optimizasyon yöntemlerinin inşaat mühendisliği alanındaki uygulamalarına örnek gösterilebilir.

Çelik yapı sistemlerinin optimum tasarımı genel olarak yapının dış yükler etkisinde dayanımını kaybetmeden ve müsaade edilen değerleri aşmadan yer değiştirme yapacak şekilde en küçük enkesitlerle boyutlandırılması olarak tanımlanabilir. İki boyutlu ve küçük ölçekli çelik yapılarda optimum tasarım işlemi kolaylıkla yapılabilirken gerçek ölçekli bir yapının optimum tasarımında ise durum oldukça zordur. Bunun nedeni, yönetmelikte belirtilen yük kombinasyonlarına göre dayanım sınır oranını ve deplasman sınırlarını, aynı düğüm noktasına bağlı yapı elemanlarının enkesit boyutlarının sınır şartlarını aynı anda sağlayan en hafif yapı tasarımın elde edilmesinin oldukça karmaşık olmasıdır. Bunun yanında oldukça fazla tasarım değişkeni ile çok geniş bir tasarım uzayında optimum tasarımın aranması ve uygulanabilir en hafif tasarımın elde edilmesi, çok uzun süren yapı analizleri gerekmektedir. Böyle karmaşık ve hesaplama açısından uzun zaman alan problemin üstesinden gelebilmek için dağıtık veya paralel hesaplama tekniklerinden yararlanılabilir. Paralel hesaplama tekniğinde amaç, oldukça zaman alan yapı analizlerinin bir ana bilgisayar vasıtasıyla yardımcı bilgisayarlara dağıtılarak eş zamanlı çalıştırılması ve sonuçların derlenmesidir. Bu şekilde, büyük ölçekli yapı sistemlerinin optimum tasarımının daha kısa sürede tamamlanması mümkün olmaktadır.

Bu doktora tez çalışmasının ilk kısmında, optimizasyon yöntemlerinin etkinliğini karşılaştırmak için literatürde sıkça kullanılan düzlem çelik çerçeve sistemlerin statik yükler altında ve ilgili yönetmeliklerde belirtilen tasarım sınırlayıcılarına bağlı optimum tasarımı yapılmıştır. Düzlem çerçevelerin statik analizi OPENSEES v2.0.5 yapı analiz yazılımına yaptırıldığından yapı analizler için ayrıca herhangi bir kodlama yapılmamıştır. Optimizasyon yöntemlerini içeren ana program MATLAB programlama dilinde kodlanmış ve OPENSEES yazılımından elde edilen sonuçlarla interaktif bir şekilde çalıştırılmıştır.

Tez çalışmasının ikinci kısmında ise gerçek ölçekli uzay çelik çerçeve sistemlerin optimum tasarımı ele alınmıştır. Uzay çelik çerçevelerin statik analizi ise dünya çapında genel kabul görmüş ve piyasada sıkça kullanılan bir yapı analiz yazılımı olan SAP2000 v21'e yaptırılmıştır. MATLAB programlama dilinde kodlanan optimizasyon yöntemleri ile SAP2000 v21'den elde edilen sonuçlar arasındaki alışveriş için SAP2000 OAPI (Open Application Programming Interface) açık kaynak kodları kullanılmıştır.

Tez kapsamında, birçok mühendislik problemine uyarlanan Jaya algoritması (JA) ile 2020 yılında geliştirilen ve cıvık mantarların besin arama prensibine dayalı sezgisel bir yöntem olan cıvık mantar algoritması (Slime Mould Algorithm, SMA), çelik çerçeve sistemlerin optimizasyonunda ilk defa kullanılmıştır. Ayrıca bu iki yöntemin birleştirilmesiyle daha güçlü yakınsama davranışına sahip hibrit cıvık mantar–Jaya algoritması (Hybrid Slime Mould-Jaya Algorithm, HSMJA) adlı yeni bir yöntem geliştirilmiştir.

Uzay çelik çerçevelerin optimizasyonunda işlem yoğunluğunun büyük bir kısmını oluşturan yapısal analizler zaman maliyeti açısından ciddi bir sorun teşkil etmektedir. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için her iterasyonda oluşturulan yeni tasarımların yapı analizlerini gerçekleştirmek üzere yardımcı bilgisayarlara internet ortamında eş zamanlı olarak dağıtılması, analiz edilmesi ve sonuçların bir araya getirilerek değerlendirilmesi aşamalarından oluşan yeni çevrimiçi bir paralel yöntem geliştirilmiştir. Bu paralel yöntem sayesinde bir bilgisayarın yapacağı iş yükünü istenilen sayıda bilgisayara paylaştırmak mümkündür. Bu durum optimizasyon süresini ciddi oranda kısaltacağından gerçek ölçekli çelik çerçeve sistemlerin optimum tasarımında büyük bir avantaj sağlamaktadır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Düzlem ve uzay çelik çerçeve sistemlerin sezgisel optimizasyon yöntemleriyle optimum tasarımı konusunda literatürde yer alan çalışmalar bu bölümde incelenecektir. Birinci kısımda düzlem çelik çerçeve sistemlerinin optimum tasarımı ile ilgili yapılan çalışmalar, ikinci kısımda büyük ölçekli uzay çelik çerçeve sistemlerin optimum tasarımı ile ilgili yapılan çalışmalar, üçüncü kısımda paralel hesaplama yönteminin yapısal optimizasyon problemlerine uygulanması ile ilgili yapılan çalışmalar ve dördüncü kısımda ise Jaya ve cıvık mantar algoritması kullanılarak mühendislik alanında yapılan optimizasyon çalışmaları özetlenmiştir.

2.1 Düzlem Çelik Çerçeve Sistemlerin Optimum Tasarımı Konusunda Yapılan Çalışmalar

Son 20 yılda yapısal optimizasyon alanında sürekli olarak yeni optimizasyon yöntemlerinin geliştirilmesiyle birlikte çok sayıda çalışma yapılmıştır. Özellikle düzlem çelik çerçeveler hesaplama açısından daha basit olduğundan bu tip yapıların optimum tasarımı konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Bu konuyla ilgili yapılan çalışmalar kronolojik olarak aşağıdaki gibidir:

Sezgisel yöntemlerin ilk örneklerinden biri olan genetik algoritma (GA), Holland tarafından (1975) yılında öne sürülmüş ve Goldberg (1989) tarafından geliştirilmiştir. Popülasyondaki en sağlam bireyin hayatta kalma prensibine dayanan bu yöntem Pezehsk vd. (2000) tarafından düzlem çelik çerçevelerin optimum tasarımında kullanılmıştır.

Camp vd. (2005) yaptıkları çalışmada, Dorigo (1999) tarafından öne sürülen karıncaların yiyecek arama stratejilerini taklit eden karınca koloni algoritmasını (Ant Colony Algorithm, ACO) kullanarak düzlem çelik çerçevelerin optimizasyonunu icra etmişlerdir.

Saka (2007), tavlama benzeşimi (Simulated Annealing, SA) ve GA yöntemlerini kullanarak düzlem çelik yapıların optimizasyonunu Amerikan Çelik Yapı Enstitüsü'nün (AISC) yük ve dayanım faktörüne göre tasarım (LRFD) ve emniyet

gerilmeleri yöntemine göre tasarım (ASD) yönetmeliklerine göre ayrı ayrı icra etmiş ve sonuçları birbiriyle karşılaştırmıştır.

Değertekin (2008)'de yaptığı çalışmada Geem (2001) tarafından hazırlanan, müzisyenlerin notalar arasında en iyi armoniyi yakalamak için uyguladıkları işlem adımlarından esinlenerek öne sürülmüş armoni arama yöntemini düzlem çerçeve sistemlerinde kullanmış, elde ettiği sonuçları ise GA ve ACO yöntemleri ile karşılaştırmıştır.

Hasançebi vd. (2010) tarafından, gerçek boyutlu çelik çerçeve sistemlerinin yanı sıra bir tane düzlem çerçeve sisteminin optimum tasarımının yapıldığı çalışmada GA, SA, evrimsel stratejiler (Evolution Strategies, ES), parçacık sürü optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO), tabu arama (Tabu Search, TS), karınca koloni optimizasyonu (ACO) ve armoni arama (Harmony Search, HS) yöntemleri kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Doğan ve Saka, (2012) yılında parçacık sürü optimizasyonu (PSO) yöntemini kullanarak düzlem çelik çerçevelerin AISC-LRFD yönetmeliğine göre optimum tasarımını icra etmiş ve elde ettikleri sonuçları literatürdeki diğer sezgisel optimizasyon yöntemleriyle karşılaştırmışlardır.

Gholizadeh ve Poorhosseini (2015), yunusların çıkardığı seslerin yankısıyla yön bulma davranışını taklit eden yunus ekolokasyon algoritmasını (Dolphin Echolocation, DE) modifiye ederek yeni bir yöntem geliştirmiş (Enhanced Dolphin Echolocation, EDE) ve bu yöntemi üç farklı düzlem çelik çerçeve sistemine uygulamışlardır. Elde edilen sonuçlar DE ve literatürdeki diğer yöntemler ile karşılaştırılmış ve EDE'nin diğer sezgisel optimizasyon yöntemlerinden daha iyi sonuçlar elde edebildiğini göstermişlerdir.

Kaveh ve Ghazaan (2017), yaptıkları çalışmada kambur balinaların avlanma stratejilerinden esinlenerek oluşturulan balina optimizasyonu algoritmasına (Whale Optimization Algorithm, WOA) yeni stratejiler ekleyerek modifiye etmiş (Enhanced Whale Optimization Algorithm, EWOA) ve bu yöntemleri düzlem çelik çerçevelerin

optimum tasarımına uygulamışlardır. Elde edilen sonuçlar diğer sezgisel optimizasyon yöntemleriyle karşılaştırılmış ve geliştirilen yöntemin geçerliliği kanıtlanmıştır.

Gholizadeh vd. (2017) öne sürdükleri çalışmada, gece kelebeklerin ay ışığını kullanarak uçuş güzergahını ayarlama davranışından esinlenerek ortaya konulmuş gece kelebeği algoritmasını (Moth-Flame Optimization, MFO) yeni denklemlerle modifiye etmiş (Enhanced Moth-Flame Optimization, EMFO) ve her iki yöntemi kullanarak düzlem çelik çerçeve sisteminin optimum tasarımını icra etmişlerdir.

Farshchin vd. (2018), okullardaki geleneksel eğitim sürecini taklit ederek oluşturulmuş okul esaslı optimizasyon (School Based Optimization, SBO) yöntemini düzlem çelik çerçevelerin optimum tasarımında kullanmış, diğer optimizasyon yöntemlerine kıyasla daha etkili çözümler sunabileceğini öne sürmüşlerdir.

Kaveh vd. (2020) yılında sundukları kapsamlı çalışmada yapay arı koloni (Artificial Bee Colony, ABC), büyük patlama-büyük çöküş (Big Bang-Big Crunch, BB-BC), döngüsel kendiliğinden türeme optimizasyonu (Cyclical Parthenogenesis Optimization, CPO), guguk kuşu arama (Cuckoo Search, CS), termal değişim (Thermal Exchange Optimization, TEO), öğretme-öğrenme esaslı optimizasyon (Teaching Learning Based Optimization, TLBO) ve su buharlaşması optimizasyonu (Water Evaporation Optimization, WEO) yöntemlerini kullanarak düzlem çerçeve sistemlerinin optimizasyonunu icra etmişlerdir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında CS yönteminin daha etkili olduğu ileri sürülmüştür.

Kaveh vd. (2021)'de yaptıkları çalışmada çoban optimizasyonu (Shuffled shepherd optimization, SSO) yöntemini kullanılarak düzlem çelik çerçeve ve kafes sistemlerin optimum tasarımını ele almışlardır. SSO yöntemi, bir çobanın koyun sürüsünü otlatmak için sürüye öncülük eden atın iç güdülerinden faydalanarak optimum güzergahı belirlemesi esasına dayanmaktadır (Kaveh ve Zaerreza, 2020).

Ghatte (2021) yaptığı çalışmada global arama sürecinde kullanılmak üzere ateş böceği algoritması (Firefly Algorithm, FA) ile lokal arama sürecinde yer almak suretiyle biyocoğrafya esaslı optimizasyonunu (Biogeography Based Optimization, BBO)

birleştirerek hibrit bir yöntem geliştirmiş ve bu yöntemi düzlem çelik sistemlerin optimizasyonunda kullanmıştır.

2.2 Uzay Çelik Çerçeve Sistemlerin Optimum Tasarımı Konusunda Yapılan Çalışmalar

Teknolojinin günden güne gelişmesi ile bilgisayarların hesaplama gücü ve işlem kapasitesi de artmaktadır. Artan işlem gücü, gerçek ölçekli optimizasyon problemlerinin makul sürede çözülmesine olanak tanımaktadır. Bilgisayar işlemci teknolojisindeki hızlı gelişmelerle birlikte son on yılda uzay çelik çerçeve sistemlerin optimizasyonu alanında yapılan çalışmalar büyük ilgi görmüş ve gerçek ölçekteki sistemlerin optimum tasarımı mümkün olmuştur.

Hasançebi vd. (2010) tarafından gerçek boyutlu çelik çerçeve sistemlerinin optimum tasarımının yapıldığı çalışmada, AISC-ASD şartlarına uygun olarak 325 ve 568 elemanlı çelik çerçeve GA, SA, ES, PSO, TS, ACO ve HS olmak üzere yedi farklı sezgisel optimizasyon yöntemi ile optimize edilmiş ve sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Her iki örnekte de ES algoritmasının en hafif tasarımı elde ettiği ve en iyi yakınsama gücüne sahip olduğu belirtilmiştir.

Hasançebi vd. (2010), sundukları çalışmada armoni arama algoritmasını geliştirerek adaptif armoni arama adlı yeni bir yöntem (Adaptive Harmony Search, AHS) ileri sürmüş ve 744 elemanlı uzay çelik çerçeve sistemin AISC-ASD yönetmeliğine göre optimizasyonuna uygulamışlardır. Elde edilen sonuçlar, literatürde yaygın olarak kullanılan sezgisel yöntemlerle karşılaştırılmış ve AHS yöntemiyle elde edilen tasarımın en hafif tasarım olduğu belirlenmiştir.

Kazemzadeh vd. (2013), uzay çelik çerçeve sistemlerinin optimizasyonu için gerekli yapısal analiz sayısını azaltarak hesaplama maliyetini düşürecek bir üst sınır stratejisi geliştirmiş ve büyük patlama-büyük çöküş (Big bang-big crunch, BB-BC) algoritmasına uygulamışlardır. Geliştirilen bu yeni yöntemin etkinliğini görmek için 135 ve 1028 elemanlı gerçek boyutlu çelik çerçeve sistemini optimize etmiş ve bu stratejinin gerekli yapısal analiz sayısını önemli ölçüde düşürdüğünü ileri sürmüşlerdir.

Gholizadeh ve Fettahi (2014) yılında, standart parçacık sürü optimizasyonunu uzay çelik çerçeve sistemlerin optimum tasarımında etkili olacak şekilde modifiye ederek yeni bir algoritma geliştirmiş (Modified Partical Swarm Optimization, MPSO) ve biri düzlem olmak üzere iki farklı çelik çerçeve sistem üzerinde test etmişlerdir.

Çarbaş (2016)'da yaptığı çalışmada, ateşböceği algoritmasının (FA) uzay çelik çerçeve sistemlerin optimizasyonu probleminde lokal optimuma takıldığını ve en hafif tasarımı bulma performansının yetersiz olduğunu tespit etmiş ve yönteme yeni stratejiler ilave ederek gelişmiş ateş böceği algoritmasını (Enhanced Firefly Algorithm, EFFA) ileri sürmüştür. Bu yöntemle optimize edilen iki farklı uzay çerçeve sisteminin optimum sonuçları literatürdeki diğer yöntemlerle karşılaştırmıştır.

Aydoğdu vd. (2016) arıların nektar arama davranışının taklit edilmesi esasına dayanan yapay arı koloni algoritması (ABC) (Karaboğa, 2005) ile Fransız matematikçi Paul Levy tarafından geliştirilen bir istatistiksel dağılım yöntemi olan Levy uçuş stratejisinin bir araya getirilmesiyle elde edilen yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirilen yöntemin etkinliğini araştırmak için çoklu yükleme durumlarına maruz 132, 428 ve 1024 elemanlı uzay çelik çerçeve sistemlerin optimizasyonu yapılmıştır. Sonuçlar değerIendirildiğinde, Levy uçuş stratejisinin standart yöntemin yakınsama ve en iyi çözümü bulma davranışını önemli ölçüde iyileştirdiği tespit edilmiştir.

Kaveh ve Bolandgerami (2017) yılında hazırladıkları çalışmada tasarım değişkenlerinin (eleman gruplarının) kademeli olarak arttırıldığı bir strateji geliştirmiş ve çarpışan cisimler algoritmasına (Colliding Bodies Optimization, CBO) uygulamışlardır. Oluşturulan kademeli yöntem 1860, 3590 ve 3328 elemanlı çelik çerçeve sistemlerine uygulanmış ve sonuçlar değerlendirildiğinde kademeli yöntemin standart CBO'ya göre çok daha hafif tasarımlar elde edildiği belirlenmiştir.

Gholizadeh vd. (2017) öne sürdükleri çalışmada, gece kelebeği algoritmasını (MFO) ve modifiye edilmiş gece kelebeği algoritmasını (EMFO) kullanarak 1040 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçeve sisteminin optimum tasarımını araştırmış ve elde ettiği sonuçlar literatürdeki diğer yöntemlerle karşılaştırmışlardır. Geliştirilen EMFO

yöntemin yakınsama ve optimuma ulaşma açısından tatmin edici olduğu ve büyük ölçekli çerçeve sistemler için kullanılmasının avantajlı olduğu öne sürülmüştür.

Hasançebi ve Kazemzadeh (2019) yılında yaptıkları çalışmada, adaptif boyutsal arama (Adaptive Dimensional Search, ADS) yöntemini kullanarak boyutları 132 ile 1860 eleman sayısı arasında değişen beş farklı uzay çelik çerçeve sisteminin optimum tasarımını gerçekleştirmişlerdir. ADS ile elde edilen sonuçlar, literatürdeki diğer sezgisel optimizasyon yöntemleriyle karşılaştırılmış her örnek için en iyisi olmasa bile tatmin edici bir performansa sahip olduğu belirlenmiştir.

Talatahari ve Azizi (2020), gelişmiş kuantum davranışlı parçacık sürü optimizasyonu (Quantum-behaved developed swarm optimizer, QDSO) yönteminin geçerliliğini kanıtlamak için 10, 20 ve 60 katlı büyük ölçekli çelik çerçeve sistemlerin optimizasyonunu icra etmişlerdir. Elde edilen optimum tasarımlar, çalışma kapsamında geleneksel yöntem olarak tanımlanan tasarım mühendisinin tecrübelerine dayanarak boyutlandırma yapıp elde ettiği tasarımlar ile karşılaştırılmış ve QDSO ile çok daha hafif tasarımlar elde edildiği tespit edilmiştir.

Kazemzadeh (2020), büyük ölçekli yapısal optimizasyon problemlerinde yakınsamaya etkisi olmayacak gereksiz analizlerden kaçınarak zaman maliyetini düşüren yakınsama eğrisi gözlemi (Monitored Convergence Curve, MCC) stratejisini geliştirmiştir. Bu yeni strateji, optimizasyon işleminin önceki icrasında elde edilen yakınsama eğrisini mevcut icradaki yakınsama eğrisiyle kıyaslayarak algoritmaya daha hızlı ve etkili bir yakınsama davranışı kazandırmıştır. MCC stratejisi, BB-BC yöntemi ile beraber kullanılarak 135, 1026 ve 3860 elemanlı uzay çelik çerçeve sistemlerinin optimum tasarımına uygulanmıştır. Elde edilen sonuçla MCC ile güçlendirilmiş yöntemlerin yakınsama performansının standart hallerine göre daha güçlü olduğu vurgulanmıştır.

Talatahari vd. (2021), tek serbestlik dereceli bir sistemin viskoz sönümlemeli serbest titreşim hareketinden esinlenerek oluşturulan titreşimli parçacık sistemi optimizasyonunu (Vibrating Particle System, VBS) (Kaveh ve Ghazan, 2017), BBO yöntemine ait göç esaslı lokal arama (Migration Based Local Search, MBLS) stratejisiyle seri, paralel ve karışık olmak üzere farklı şekillerle bir araya getirerek üç

farklı hibrit yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemleri 10 katlı 1028 elemanlı ve 20 katlı 3580 elemanlı büyük ölçekli çerçeve yapıların optimum tasarımında kullanmış ve sonuçları birbiriyle karşılaştırmışlardır. Bu kıyaslamalar sonucunda Hibrit VPS-MBLS-III ile en hafif tasarım sonuçları elde edilmiştir.

Kaveh vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, yüklü sistem araması (Charged System Search, CSS), Levy uçuş yönteminin zıtlık esaslı öğrenme stratejisiyle modifiye edilerek yeni bir yöntem öne sürülmüş (Advanced Charged System Search, ACSS) ve uzay çelik çerçeve sistemlerin optimum tasarımında kullanılmıştır. AISC-LRFD yönetmeliğindeki esaslara bağlı olarak ACSS ile elde edilen optimum tasarımların, standart yönteme ve diğer yöntemlere göre daha iyi olduğu belirtilmiştir.

2.3 Paralel Hesaplama Yöntemi ile Yapı Sistemlerinin Optimizasyonu Konusunda Yapılan Çalışmalar

Paralel hesaplama, bir işlemin tek bir bilgisayarın işlemcileri arasında paylaştırılması veya ana bilgisayar olarak tanımlanmış herhangi bilgisayarın, bir işlemi ona bağlı bir bilgisayar kümesine ağ üzerinden dağıtması olarak tanımlanabilir. Yapısal analizler, yapı sistemlerinin optimizasyonunda işlem yoğunluğunun en fazla olduğu aşamadır. Her iterasyonda yeniden oluşturulan tasarımlar birbirinden bağımsız olduğu için her bir tasarımın yapısal analizi diğer işlemcilere veya ağdaki diğer bilgisayarlara eş zamanlı bir şekilde dağıtılarak yaptırılabilir. Böylelikle büyük ölçekli yapı sistemlerinin optimum tasarımı makul bir sürede gerçekleştirilebilir. Literatürde paralel hesaplama yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar şu şekildedir:

Park ve Sung, (2002) tarafından tavlama benzeşimi (SA) ve söndürme benzeşimi (Simulated Quenching, SQ) olmak üzere iki kademeden oluşan paralel hesaplamalı bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde yerel ağ üzerinde ana bilgisayar tarafından "mesaj geçiş arayüzü" (Message Passing Interface, MPI) ile yardımcı bilgisayarlara dağıtım yapılır ve analizler yaptırıldıktan sonra sonuçlar değerlendirilir. Bu yöntem 21 katlı iki farklı düzlem çerçevenin optimum tasarımında kullanılmış, yardımcı bilgisayar sayısına bağlı toplam işlem süreleri kıyaslanmıştır.

Rajan ve Nguyen (2004)'te yaptıkları çalışmada MPI kütüphanesini kullanarak ana bilgisayar ile yardımcı bilgisayarlar arasında iletişimi yerel ağ üzerinde gerçekleştiren

ve genetik algoritma ile birleştirilmiş bir yöntem geliştirmişlerdir. Yardımcı bilgisayar kümeleri homojen ve heterojen olarak ayrı ayrı yapılandırılmış ve bu yöntemlerle iki farklı düzlem çelik kafes sistem optimize edilip sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Park vd. (2006), ana-yardımcı bilgisayar konfigürasyonunu yerel ağ üzerinde kurarak genetik algoritma ile paralelize edilmiş bir yöntem geliştirmiş ve bu yöntemle 25 elemanlı çelik kafes sistem ile 11 ve 21 katlı iki düzlem çelik çerçeve sisteminin optimizasyonunu icra etmişlerdir. Algoritma FORTRAN programlama dilinde kodlanmış ve bilgisayarlar arası iletişim için MPI kütüphanesi kullanılmıştır. Bir ile sekiz arası yardımcı bilgisayar sayısı kullanılarak yapılan farklı optimum tasarım işlemlerinde, yardımcı bilgisayar sayısı arttıkça toplam hesaplama süresinin kısaldığı ancak nihai ağırlık değerine bir etkisi olmadığı belirlenmiştir.

Hasançebi vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada, ana-yardımcı bilgisayar yapılandırılması oluşturularak bilgisayarlar arası iletişimin MPI'nin yüksek performans için geliştirilmiş versiyonu MPICH (Message Passing Interface-Chameleon) ile yapıldığı, analizlerin SAP2000 ile gerçekleştirildiği, evrim stratejisi algoritmasının (ES) kullanıldığı paralel bir optimizasyon yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemle 1040, 3590 ve 7648 elemanlı büyük ölçekli çelik çerçeve yapıların optimum tasarımı yapılmıştır. Dört çekirdekli sekiz farklı yardımcı bilgisayar kullanılarak DELPHI programlama dilinde kodlanan programın 11 farklı "çalıştırılan çekirdek sayısı × bilgisayar sayısı" kombinasyonu ile çalışma performansı test edilmiş ve çalışma hızları karşılaştırılmıştır.

Kaveh vd. (2015), MATLAB programının döngüdeki bağımsız işlemleri işlemcilere aynı anda dağıtıp yaptıran gömülü paralel hesaplama aracını kullanarak üç boyutlu çelik çerçeve sistemlerin spektral ve eşdeğer statik yükler altındaki optimum tasarımını icra etmişlerdir. Optimizasyon yöntemi olarak Levy uçuş stratejisiyle güçlendirilmiş CS algoritması kullanılmıştır. 325 ve 504 elemanlı çelik çerçeve sistemlerinin spektral ve eşdeğer deprem yüklerine göre optimum sonuçları karşılaştırılmıştır.

2.4 Jaya Algoritması Kullanılarak Mühendislik Alanında Yapılan Optimizasyon Çalışmaları

Basit ve sade bir yapıya sahip olan ve algoritmaya özgü parametre içermeyen Jaya algoritması, 2016 yılından bu yana mühendisliğin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. JA ile farklı mühendislik dallarında yapılan çalışmaların bazıları aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Gao vd. (2016), yaptıkları çalışmada büyük ölçekli kentsel trafik sinyali kontrolü probleminin çözümünde komşuluk stratejisi yöntemi ile lokal arama kabiliyeti geliştirilen JA yöntemini icra etmişlerdir. Bu problemde amaç belirli bir zaman aralığında toplam ulaşım ağındaki gecikmeyi en aza indirmektir. Singapur trafik ağına ait trafik sinyalleri kullanılarak yürütülen bu çalışmada, geliştirilmiş JA ile elde edilen sonuçlar mevcut trafik sinyal kontrol sistemi ile karşılaştırılmış ve geliştirilen yöntemin üstünlüğü doğrulanmıştır.

Wang vd. (2018) tarafından Li-ion batarya modeli parametrelerinin tahmini için grafik işlem birimi (Graphics Processing Unit, GPU) üzerinde paralelize edilerek çalıştırılan yeni bir JA öne sürülmüştür. Sunulan yeni algoritmanın etkinliği, iki farklı batarya modelinin parametrelerinin tahmin edilmesi probleminde test edilmiş ve sonuçlar, gerçek deneylerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. JA yönteminin GPU üzerinde paralel çalışması işlem süresini büyük oranda azaltarak zaman tasarrufu sağlamıştır.

Ocłoń vd. (2018) yer altı elektrik kablo sisteminin malzeme maliyetinin en aza indirilmesi için modifiye edilmiş JA'yı kullanmışlardır. Tasarım değişkeni olarak kablo dolgu boyutları ve kablo iletken alanı seçilmiştir. Kablo iletken sıcaklığının 65°C'yi geçmemesi şartıyla en düşük maliyetli malzeme tasarımı modifiye JA ile yapılmış ve sonuçlar standart JA ve PSO yöntemleri ile karşılaştırılarak yöntemin geçerliliği kanıtlanmıştır.

Değertekin vd. (2018), kafes yapı sistemlerinin enkesit, şekil ve topoloji bakımından sürekli tasarım değişkenleri ile optimum tasarımı için JA'yı kullanmışlardır. Hesaplama süresini kısaltmak amacıyla standart JA formülasyonu modifiye edilmiştir. Kafes yapıların optimum tasarımındaki etkinliğini görmek için altı adet kafes yapı

sistemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, JA'nın diğer optimizasyon yöntemlerine göre optimum ağırlık, standart sapma ve gerekli yapısal analiz sayısı bakımından daha iyi olduğunu göstermiştir.

Değertekin vd. (2019), kafes yapı sistemlerinin enkesit, şekil ve topoloji bakımından ayrık tasarım değişkenleri ile optimum tasarımı için gelişmiş Jaya algoritmasını (Discrete advanced Jaya Algorithm, DAJA) sunmuşlardır. Geliştirilen yöntemin etkinliği, yedi farklı kafes örneği üzerinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar DAJA'nın diğer sezgisel optimizasyon yöntemlerine göre daha az yapısal analiz sayısı ile daha hafif tasarımlar elde ettiğini göstermiştir.

Chong vd. (2021) yaptıkları çalışmada hidroelektrik santralin rezervuar yönetimini JA ile optimize etmişlerdir. Bu problemde amaç, hidroelektrik santral tarafından üretilen enerjinin kurulu kapasiteden sapma miktarının en aza indirilmesidir. JA, diğer sezgisel yöntemlere kıyasla en iyi çözümü sunsa da yakınsama gücü açısından özellikle PSO yöntemine göre oldukça zayıf kalmıştır.

Değertekin vd. (2021) doğal frekans sınırlayıcıları altında çelik kafes sistemlerin tasarım ve şekil optimizasyonunu parametresiz bir JA geliştirerek icra etmişlerdir. Geliştirilen yöntemde genel kontrol parametreleri optimizasyon sürecinin seyrine göre kendiliğinden uyarlanacak şekilde oluşturulmuştur. Şekil ve tasarım değişkenlerine sahip sekiz farklı kafes sistem kullanılarak yapılan optimizasyonda sonuçlar literatürdeki diğer yöntemlerle karşılaştırılmış ve geliştirilen yöntemin üstünlüğü kanıtlanmıştır.

2.5 Cıvık Mantar Algoritması (SMA) Kullanılarak Yapılan Çalışmalar

Li vd. tarafından (2020) yılında öne sürülen cıvık mantar algoritması (Slime Mould Algorithm, SMA), kısa sürede birçok alanda yeni çalışmalara uygulanmış olan yeni bir optimizasyon algoritmasıdır. Bugüne kadar SMA kullanılarak yapılan çalışmaların başlıcaları şunlardır:

Zubaidi vd. (2020), küresel iklim değişikliğine dayalı kentsel su ihtiyacının tahmini probleminin çözümü için yapay sinir ağları (Artificial Neural Network, ANN) yöntemi ile SMA'yı birleştirerek yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirilen hibrit yöntem ile, sadece ANN kullanılarak elde edilen sonuçlardan daha etkili sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmanın, artan su ihtiyacı için yerel su yöneticilerinin yapacağı planlamalara katkı sunabileceği ve mevcut su sistemlerinin verimli bir şekilde yönetilmesine yardımcı olabileceği gösterilmiştir.

Zhao vd. (2021) tarafından çeşitli stratejilerle modifiye edilen SMA ile çok eşikli görüntü ayrıştırma yöntemi birleştirilerek yeni bir yöntem ileri sürülmüş ve bu yöntem, kronik obstruktif akciğer hastalarının (KOAH) tomografi görüntülerine uygulanmıştır. Görüntü kalitesi değerlendirildiğinde uygulanan yöntemin olağanüstü bir performans gösterdiği, böylelikle doktorların doğru teşhis koyması ve doğru tedavi planlaması yapmasına yardımcı olabileceği sonucuna varılmıştır.

Nguyen vd. (2020) SMA yönteminin lokal optimuma takılmasını önlemek ve yakınsama hızını arttırmak için uyarlamalı ağırlık katsayısı ve tersine öğrenme stratejilerini kullanmışlardır. Geliştirilen yeni yöntemin etkinliğinin testi için, bazı matematiksel fonksiyonların yanı sıra kademeli rezervuarlarda optimum su yönetimi problemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, geliştirilmiş SMA'nın diğer yöntemlere göre daha iyi olduğu belirtilmiştir.

Anter vd. (2021) yaptıkları çalışmada Covid-19 hastalarının göğüs röntgen filmlerinden hastalığın üst düzey özellikleri ile ilgili bilgi edinerek hızlıca tanı konulmasını sağlayan bir optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Bu modelde, Levy dağılım stratejisi ile güçlendirilen SMA (LSMA) ve uyarlanabilir bulanık C ortalamaları (Adaptive Fuzzy C-Means, AFCM) yöntemi birleştirilmiştir. Elde edilen yöntemin performansı geleneksel makine öğrenmesi ve derin öğrenme teknikleri dahil olmak üzere diğer sezgisel yöntemlerle karşılaştırılmış ve üstünlüğü doğrulanmıştır. Bu çalışmanın, enfekte Covid-19 hastalarının erken tespiti konusunda faydalı olabileceği kanıtlanmıştır.

Wei vd. (2021) kablosuz sensör ağı (Wireless Sensor Network, WSN) kapsama kontrolü, güvenilir izleme hizmetleri sağlamak için ağ kapsamının en üst düzeye çıkarılması için basitleştirilmiş bir SMA (Simplified Slime Mould Algorithm, SSMA) yöntemi geliştirmişlerdir. Bu yöntem ile yapılan optimizasyon işlemiyle, ağdaki cihazların enerjisini etkin bir şekilde kontrol etme, algılanan hizmet kalitesini iyileştirme amaçlanmıştır. 13 tip WSN ile yapılan kapsama optimizasyonunda SSMA yönteminin en az diğer yöntemler kadar iyi olduğu ispat edilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1 Optimizasyon

Optimizasyon insan yaşamının ayrılmaz bir parçasıdır. Verdiğimiz herhangi bir karar, en iyi veya en iyiye yakın bir durumu belirleme girişimidir. Genel bir bakış açısıyla, herhangi bir optimizasyon problemi bir karar verme problemi olarak kabul edilebilir ve asıl soru, probleme bulunan çözümden daha iyi bir çözüm olup olmadığıdır. Beightler vd. (1967) tarafından optimizasyonun üç aşamalı bir karar verme süreci olduğu ifade edilmiştir. Bu aşamalar, problemin uygun bir şekilde modellenmesi, amaç fonksiyonunun bulunması ve kullanılacak optimizasyon yöntemleri olarak sıralanmıştır. Ayrıca en uygun çözümün belirlenmesi için problemin matematiksel olarak düzgün tanımlanması son derece önemlidir. Tanımlanan problem için en iyi amaç fonksiyonunun bulunması, bu süreç için ise etkili bir optimizasyon yönteminin kullanımı da oldukça önemlidir. Optimizasyon yöntemleri, bilgisayar teknolojisinin ilerlemesiyle birlikte büyük bir gelişme göstermiştir.

Optimizasyon terimi, bir fonksiyona ait değişkenlerin sınırlandırılmış bir değer kümesi içinden sistemli bir şekilde seçilerek fonksiyonun maksimum veya minimum değerinin araştırılması süreci olarak tanımlanabilir. Bir optimizasyon problemin üç temel unsuru; amaç fonksiyonu, tasarım değişkenleri ve sınırlayıcılardır. Problemin matematiksel ifadesi olan amaç fonksiyonunun en büyük veya en küçük değeri araştırılır. Tasarım değişkenleri, amaç fonksiyonunun bağlı olduğu değişkenlerdir ve bu değerlere göre amaç fonksiyonunun değeri artar veya azalır. Bu değerler, problemin tipine göre sürekli veya ayrık değişken olarak tanımlanır. Sürekli değişkenler, belirli sayılar arasında sonsuz değer alabilir. Ayrık değişkenler ise önceden belirlenmiş değerler kümesi içindeki sınırlı sayıda değerlerden seçilen değişkenlerdir. Mühendislik problemlerinin optimizasyonunda çoğunlukla ayrık tasarım değişkenleri kullanılarak optimizasyon işlemi icra edilir.

Herhangi bir optimizasyon problemi matematiksel olarak genel formda yazılacak olursa:

$$max\ [f(x)] \text{ veya } min[f(x)] \tag{3.1}$$

$$g_i(x) \leq 0 \; ; \; h_j(x) = 0 \; ; \qquad i=1,...,m \; , j=1,...,n \tag{3.2}$$

Yukarıdaki ifadelerde "$f(x)$", amaç fonksiyonunu, "$g_i(x)$", belirli bir değer aralığında olması istenen eşitsizlik sınırlayıcısını, "$h_j(x)$" eşitlik sınırlayıcısını, "m" ve "n" sınırlayıcı sayılarını, x ise tasarım değişkenini temsil eder. Bu sınırlayıcılar, uygunluk denklemleri olarak da tanımlanır ve elde edilen çözümün uygunluk derecesini belirler. Bazı optimizasyon problemlerinde sınırlayıcı bulunmadığı için amaç fonksiyonunun maksimum veya minimum değerini veren tasarım değişkenlerini bulmak yeterlidir. Bu tip problemlere sınırlayıcısız optimizasyon problemleri adı verilir.

Mühendislik alanında herhangi bir tasarım yapılırken tasarımın belirlenen tüm ihtiyaçları karşılaması aynı zamanda en düşük maliyete veya maksimum verimliliğe sahip olması amaçlanır. Burada maliyet veya verimlilik, amaç fonksiyonuna; belirlenen ihtiyaçlar, sınırlayıcılara; tasarım elemanları ise tasarım değişkenlerine karşılık gelir. Mühendisliğin farklı disiplinleri için icra edilen birçok optimizasyon uygulaması mevcuttur. Minimum ağırlıklı uçak tasarımı, uzay araçları için en uygun yörünge tayini, minimum maliyetli baraj, köprü, kule, baca, konut ve sanayi yapısı gibi inşaat mühendisliği yapılarının tasarımı, maksimum fayda sağlayan su sistemlerinin tasarımı, makine mühendisliği kapsamında dişli, rulman vb. makine parçalarının optimum tasarımı, maksimum verimlilik sağlayan pompa, türbin ve ısı transfer ekipmanların tasarımı, sanayi yapıları için en uygun boru hattı ağlarının seçimi, elektrik şebekelerinin en uygun tasarımı, trafik sinyalizasyon sistemlerinin optimum tasarımı bu uygulamalara örnek olarak gösterilebilir (Rao, 2019).

Genel olarak optimizasyon yöntemleri, deterministik ve stokastik olmak üzere iki gruba ayrılır. Deterministik yöntemlerde kesin bir prosedür vardır ve hem tasarım değişkenleri hem de amaç fonksiyonları için izlenen yol bellidir. Klasik yöntemlerin çoğu deterministik olmakla birlikte genellikle sürekli değişkenli optimizasyon işlemlerinde etkili olmaktadır. Bu yöntemlerin gradyan tabanlı formülasyonları bazen gerçeklikten uzak yaklaşımlar içerdiğinden pratiğe yönelik ayrık değişkenli optimizasyon işlemlerinde işlevsiz kalmaktadır. Bu yüzden pratiğe dönük gerçek tasarım problemlerinin optimizasyonu için klasik yöntemlere alternatif olarak sezgisel yöntemler zamanla büyük ilgi görmüştür. Sezgisel yöntemlerde, klasik yöntemlerin

aksine rastgelelik bulunur. Sezgisel algoritmaların modifikasyon denklemlerinde rastgele değerler kullanıldığından, her çalıştırıldığında farklı dizi ve çözümler elde edilir. Her ne kadar nihai sonuçlar birbirine yakın olsa da oluşturulan bireyler ve optimuma giden yollar birbirinden farklı olacaktır.

3.2 Sezgisel Optimizasyon Yöntemleri

Sezgisel yöntemler, araştırma uzayını keşfetmek ve sömürmek için farklı kavramları rasyonel bir şekilde bir araya getirerek oluşturulmuş yinelemeli bir üretim süreci olarak tanımlanır. Sezgisel yöntemlerde en uyguna yakın çözümleri verimli bir şekilde elde etmek üzere bilgiyi yapılandırmak için farklı öğrenme stratejileri kullanılır. Genellikle evrim, biyolojik sistemler, sürü zekâsı, fizik yasaları gibi doğadaki farklı fenomenlerden ilham alınarak oluşturulan sezgisel yöntemlerin çalışma prensibi, bu fenomenlerin kural tabanlı teorilerini ile rastgelelik olayını sistemli bir şekilde birleştirerek daha verimli bir keşif ve sömürü süreci ortaya koymaktır (Kaveh ve Bakhshpoori, 2019).

3.2.1 Genetik algoritma (GA)

Holland (1975) tarafından öne sürülen genetik algoritma, bir popülasyondaki en sağlam bireyin hayatta kalma ve neslini devam ettirme prensibine dayalı sezgisel bir yöntemdir. Genetik biliminin yeniden üretim, çaprazlama ve mutasyon esaslarının optimum çözümü araştırma sürecine uyarlanmasıyla elde edilmiştir. Genetik algoritma diğer geleneksel yöntemlerden farklı olarak tek bir başlangıç noktası yerine bir nokta kümesi (popülasyon) ile başladığı için çözümün lokal optimuma takılması engellenmiş olur. Popülasyondaki her çözüm, bireye ait kromozomları ifade eder ve 0 ile 1 ‘den oluşan diziler şeklinde ifade edilir. Bu durum algoritmanın ayrık değişkenli optimizasyon problemlerine uygulanabilir olmasını sağlar. Her yeni iterasyonda rastgele ebeveynler kullanılarak kromozomların evrimi gerçekleşir ve önceki nesle ait kromozomların çaprazlanması ile yeni bir nesil üretilir. Bu durum, mevcut bilgilerle yeni kombinasyonlar üreterek daha uygun bireylere sahip popülasyonlar elde etmeye olanak tanır.

3.2.2 Tavlama benzeşimi algoritması (SA)

Kirkpatrick vd. (1983) tarafından geliştirilen tavlama benzeşimi algoritması, metallerin yüksek sıcaklıklarda ergitilip tavlanması işleminden esinlenerek oluşturulmuştur. Bir metal, ergitildiğinde atomları birbirine göre serbestçe hareket edecek duruma gelir. Sıcaklık azaldıkça atomların hareketi kısıtlanır ve düzenli hale geçmeye başlar. İşlem sonunda mümkün mertebe en düşük iç enerjiye sahip kristal formunu oluşturma eğilimi gösterir. Bu kristallerin oluşma süreci metalin soğutulma hızına bağlıdır. Erimiş haldeki metalin sıcaklığı ani olarak düşürülürse kristal halini elde edemeyebilir ve bu durum metalin içinde kusurlara neden olabilir (Rao 2019). Bu yüzden en düşük iç enerjiye karşılık gelen en uygun katılaşma durumunun oluşması için sıcaklığın yavaş ve kontrollü bir şekilde düşürülmesi gerekir. Bu uygun soğutma işlemi, tavlama olarak adlandırılır.

3.2.3 Parçacık sürü optimizasyonu (PSO)

Eberhart ve Kennedy (1995) tarafından geliştirilen parçacık sürü optimizasyonu, balık ve kuş gibi beraber hareket eden hayvan sürülerinin sosyal davranışlarından esinlenerek öne sürülmüş bir optimizasyon yöntemidir. Parçacık olarak ifade edilen kavram, sürüdeki her bir kuşu veya balığı temsil eder. Her bir parçacık, kendi zekasının yanı sıra sürünün grup zekasını kullanarak hareket eder. Örneğin, sürüdeki bir birey veya parçacık, besine giden daha iyi bir yol keşfederse sürünün diğer parçacıkları da o yöne doğru hareket eder. Her bir parçacık başlangıçta araştırma uzayına rastgele dağıtık şekilde konumlanır, hız ve konum olmak üzere iki özelliği bulunur. Her parçacık araştırma uzayında dolaşır ve keşfettiği en iyi konumu belirler; en iyi konum bilgilerini diğer parçacıklara iletir. Böylelikle diğer parçacıkların en iyi konuma göre hız ve konum durumlarını güncellemeleri sağlanır ve sürünün en uygun konumu bulunur.

3.2.4 Karınca koloni optimizasyonu (ACO)

İlk kez Dorigo (1992) tarafından öne sürülen karınca koloni optimizasyonu, karınca kolonilerinin yuva ile besin kaynağı arasındaki en kısa yolu bulma yönteminden ilham alınarak oluşturulmuş sezgisel bir optimizasyon yöntemidir. Karınca kolonileri binlerce karıncadan oluşur ve birbirleriyle iletişim kurmak için özel olarak

salgıladıkları feromon hormonunu kullanır. Besin aramak için rastgele dağılan karıncalar, besin bulduklarında feromon salgılayarak diğer karıncalara bir mesaj bırakır. Diğer karıncalar rastgele dolaşmak yerine feromon salgılanan ve besin kaynağının bulunduğu bölgeye doğru ilerler ve besin miktarına göre feromon miktarını pekiştirir. Böylelikle besin kaynağına giden en kısa yol bulunmuş olur.

3.2.5 Jaya algoritması (JA)

Sanskrit dilinde "zafer" anlamına gelen Jaya, 2016 yılında Rao tarafından ileri sürülmüş sade ve uygulanması kolay bir yöntemdir. Temel prensibi en kötü çözümden mümkün mertebe uzaklaşıp en iyi çözüme olabildiğince yakınsamaktır. Jaya'nın en önemli özelliği, diğer sezgisel yöntemlerden farklı olarak yönteme özgü parametreler içermemesidir. JA, sadece genel kontrol parametreleri olan popülasyon sayısı ve maksimum iterasyon sayısına ihtiyaç duyar.

Jaya algoritmasında, tasarım değişkenlerinin modifiye edilmesi için tek bir denklem kullanılır. "$X_{k,l,it}$" *it-inci* iterasyonda, *l'inci* tasarım için *k'ıncı* tasarım değişkenini ifade etmek üzere, yeni tasarım değişkeni aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilir:

$$X_{k,l,t}^{yeni} = X_{k,l,it} + r_{1,k,it}\left(X_{k,eniyi,it} - \left|X_{k,l,it}\right|\right) - r_{2,k,it}\left(X_{k,enkötü,it} - \left|X_{k,l,it}\right|\right) \tag{3.3}$$

Bu denklemde "*it"* iterasyon sayısını, "*l"* popülasyondaki tasarım sırasını, "*k"* tasarım değişkeni sırasını ifade etmek üzere; "$X_{k,l,t}^{yeni}$," modifiye edilen yeni tasarım değişkenini, "$r_{1,k,it}$" ve "$r_{2,k,it}$" 0 ile 1 arasında rastgele üretilmiş reel sayıları, "$X_{k,eniyi,it}$" popülasyondaki en iyi tasarıma ait tasarım değişkenini, "$X_{k,enkötü,it}$" popülasyondaki en kötü tasarıma ait tasarım değişkenini temsil eder. "$r_{1,k,it}\left(X_{k,eniyi,it} - \left|X_{k,l,it}\right|\right)$" terimi, mevcut çözümün en iyi çözüme yakınsama eğilimini, "$-r_{2,k,it}\left(X_{k,enkötü,it} - \left|X_{k,l,it}\right|\right)$" ise en kötü çözümden ıraksama eğilimini ifade etmektedir (Rao, 2016).

Bu çalışma kapsamında, standart Jaya algoritmasının araştırma sürecini iyileştirmek amacıyla modifikasyon denklemine yeni bir strateji eklenmiştir. Bu stratejide, kötü çözümlerin iyi çözümlerle yer değiştirdiği elitizm konseptinin aksine popülasyonun

belirli sayıda iyi ve kötü çözümlerin oluşturduğu vektörler tanımlanır. Popülasyon amaç fonksiyonu değerleri küçükten büyüğe doğru sıralandığında ilk *n* çözüme ait tasarım değişkenleri en iyi tasarım vektörüne $X^{i}_{eniyi} = \left[X^{1}_{eniyi}\ X^{2}_{eniyi}\ ..X^{n}_{eniyi}\ \right]$ son *n* çözüm ise en kötü tasarım vektörüne $X^{i}_{enkötü} = [X^{1}_{enkötü}\ X^{2}_{enkötü}\ ..X^{n}_{enkötü}\ ]$ atanır. Denklem (3.3)'te kullanılmak üzere, en iyi ve en kötü çözüm bu vektörlerden rastgele seçilir. Bu işlem algoritmanın lokal optimumda takılmasını engellediği gibi araştırma uzayının da daha verimli bir şekilde keşfedilmesine olanak sağlar. Ayrıca, durdurma kriteri olarak maksimum iterasyon sayısı yerine denklem (3.4) belirlenmiştir. Her farklı çalıştırma sonunda optimum tasarımın bulunduğu iterasyon sayısı farklıdır ve iterasyon sayısı için sabit bir sınır değeri belirlemek yerine dinamik bir denklem kullanmak daha faydalı olacaktır (Lamberti ve Pappalettere, 2009).

$$\frac{STD\left[f_p(X^1), f_p(X^2), \ldots f_p(X^{np})\right]}{\sum_{i=1}^{np}\left(\frac{1}{f_p(X^{\mathrm{i}})}\right)} \leq \varepsilon_{con} \tag{3.4}$$

Denklem (3.4)'te, "$f_p\left(X^i\right)$" popülasyondaki *i-inci* tasarımın cezalandırılmış amaç fonksiyonunu, "*np"* popülasyon sayısını, "ε_{con}" yakınsama toleransını ifade etmektedir. Bu tolerans değeri 10^{-4} olarak belirlenmiştir.

Yukarıda yapılan açıklamalar dikkate alınarak bu çalışmada sunulan JA için genel işlem adımları aşağıdaki gibidir:

Adım 1: Popülasyon sayısı *np*, tasarım değişkeni sayısı *ng* ve durdurma kriterini tanımla. Başlangıç popülasyonunu rastgele oluştur. Popülasyondaki her tasarım için cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerini hesapla. İterasyon sayacını başlat, it = 0.

Adım 2: İterasyon sayacını arttır, *it = it+1*.

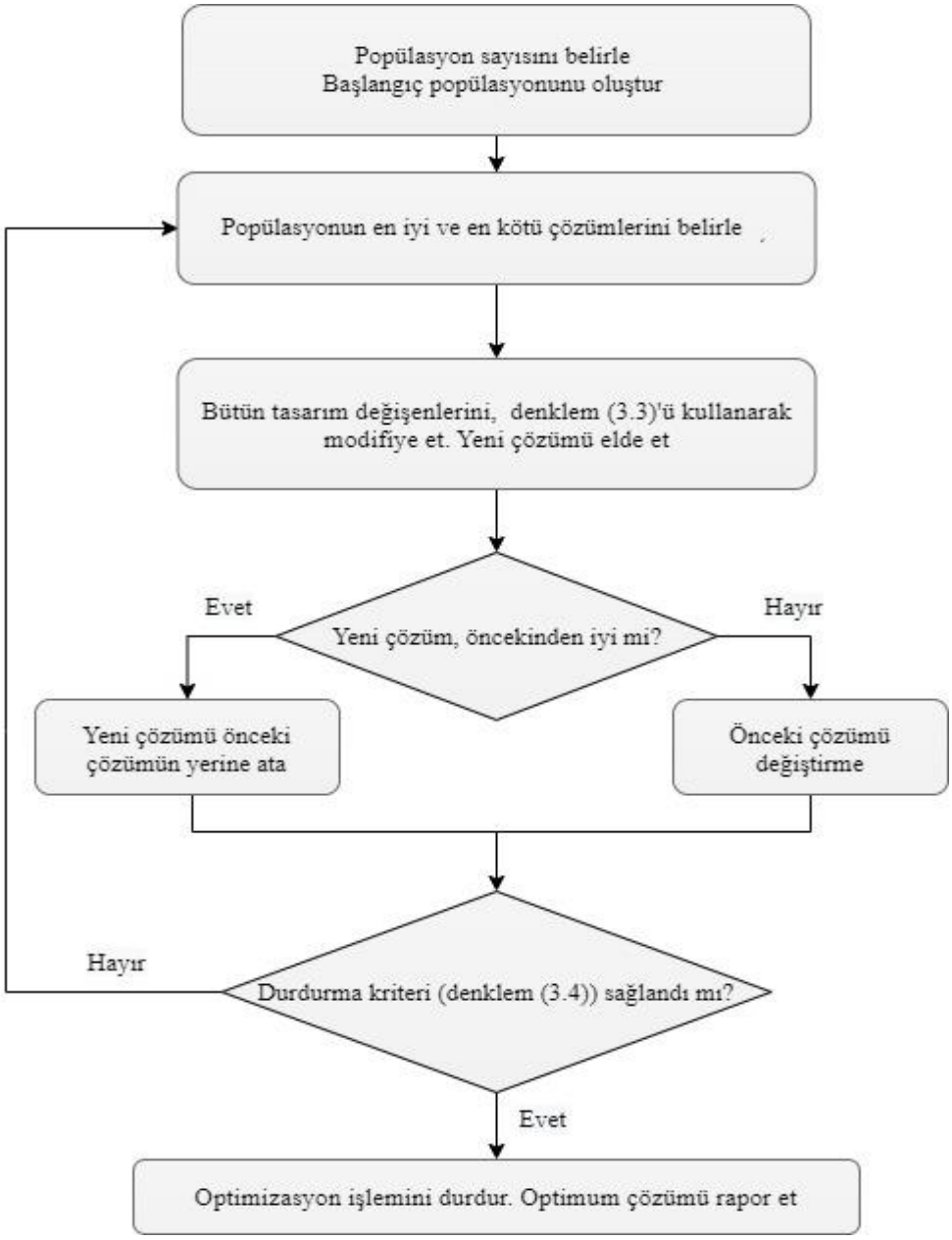
Adım 3: Popülasyondaki en iyi ve en kötü çözümleri belirle.

Adım 4: Tüm tasarım değişkenlerini denklem (3.3)'ü kullanarak güncelle ve yeni tasarımı elde et.

Adım 5: Yeni tasarımın cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerini hesapla. Eğer $f_p\left(X^{yeni}\right)<f_p\left(X^{eski}\right)$ ise yeni çözümü eskisinin üzerine yaz. Değilse eski çözümü değiştirmeden sakla.

Adım 6: Eğer denklem (3.4) sağlanıyor ise optimizasyonu durdur ve sonuçları rapor et. Aksi durumda 2. adıma git.

Adım adım açıklanan JA yöntemi için akış diyagramı Şekil 3.1'deki gibidir.

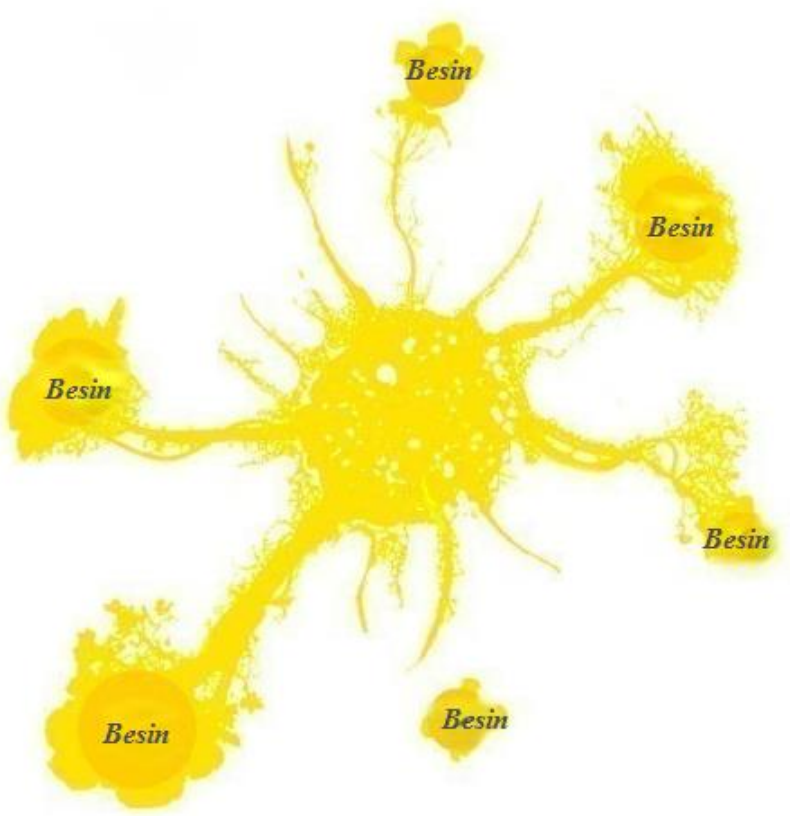


Şekil 3.1 Jaya algoritmasının akış diyagramı

3.2.6 Cıvık mantar algoritması (SMA)

Li vd. (2020) yılında geliştirdikleri cıvık mantar algoritması, soğuk ve nemli ortamlarda yaşayan tek hücreli Physarum Polycephalum adı verilen bir mantar türünün besin arama davranışından ve morfolojik değişimlerinden esinlenerek geliştirilmiş sezgisel bir optimizasyon yöntemidir. Mantardaki organik madde besin arar, çevreler ve sindirmek için enzim salgılar. En önemli özelliği, aynı anda birden fazla besin kaynağına bağlanabilecek bir damar ağı formu geliştirebilmesidir. Bu damarların ön

uçları, besinin sitoplazmanın içine akışını sağlamak için fan şeklinde uzanır. Bu damar ağı besine yaklaştığında biyo-osilatörler besinin damar boyunca sitoplazmaya akışını arttıran dalgalar yayar. Etrafta yeterince besin bulunması durumunda cıvık mantarlar 900 cm^2'ye kadar yayılabilir (Kessler, 1982). Cıvık mantarın besin arama davranışı Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.2 Cıvık mantarın besin arama davranışı (Li vd., 2020'den değiştirilerek)

Besin miktarı ne kadar fazlaysa akış da aynı oranda hızlı olur ve akışın geçtiği damar aynı oranda kalınlaşır (Nakagaki ve Yamada, 2000). Bu durum, mantarın besinlere bağlanması için en uygun yolu belirlemesine olanak sağlar.

Cıvık mantar, besin arama stratejilerini besin maddesinin yoğunluğuna göre dinamik olarak ayarlayabilir. Besin kaynaklarının yoğunluğu yüksek olduğunda, sınırlı bölge arama yöntemini (Karevia ve Odell, 1987) kullanacak ve böylece aramayı, bulunan besin kaynaklarına odaklayacaktır. Başlangıçta bulunan besin kaynağının yoğunluğu düşükse, bölgedeki diğer besin kaynaklarını keşfetmek için mevcut bölgeyi terk

edecektir (Latty ve Beekman, 2009). Bu adaptif arama stratejisi, farklı yoğunluktaki besin bloklarının dağılmış olduğu bölgede daha etkili olur.

Yöntemin matematiksel modeli aşağıda verilmiştir:

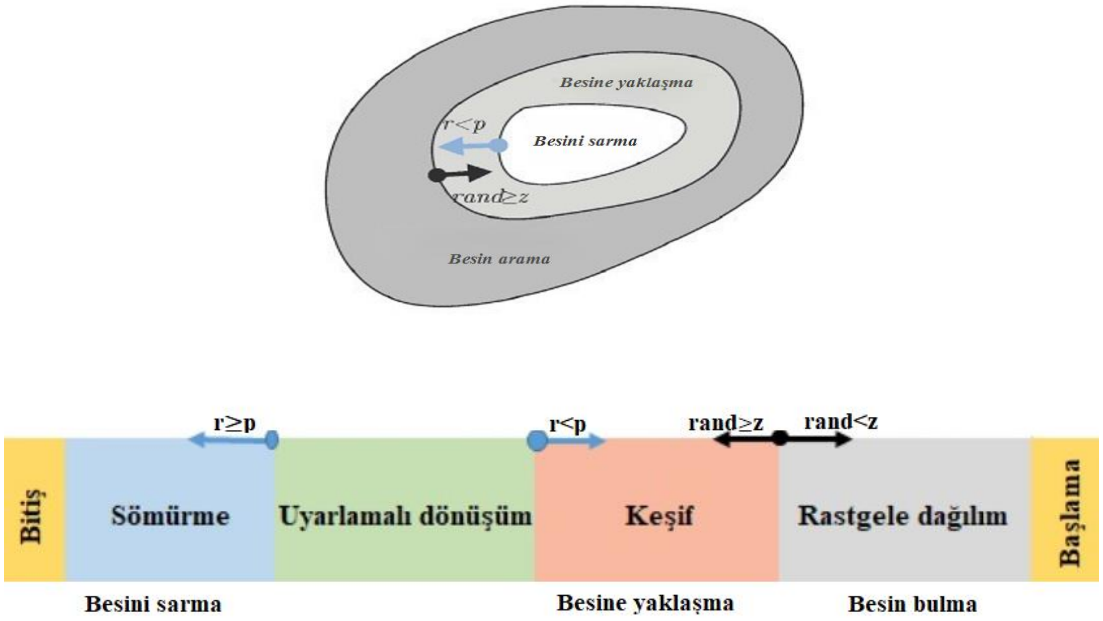
$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} r_1 \cdot (UB - LB) + LB \quad eğer\ r_2 < z & (1) \\ \vec{X}_B(\mathrm{t}) + \overrightarrow{vb} \cdot \left(\vec{W} \cdot \vec{X}_A(t) - \vec{X}_B(t)\right) eğer\ r_3 < p & (2) \\ \overrightarrow{vc} \cdot \vec{X}(t)\ eğer\ r_3 \geq p & (3) \end{cases} \tag{3.5}$$

$$p = \tanh |S(i) - DF| \tag{3.6}$$

burada "*UB*" ve "*LB*" sırasıyla araştırma uzayının üst ve alt limit değerleri, "z" rastgeleliği sağlayan bir optimizasyon sabitini, "$\vec{X}(t)$" *t*'inci iterasyonda mantarın konumunu (tasarım değişkenini), "$\vec{X}_B(\mathrm{t})$" *t*'inci iterasyonda en fazla besin konsantrasyonuna sahip yerin konumunu "$\vec{X}_A$" *ve* "$\vec{X}_B$" ise rastgele seçilen konumları, "r_1", "r_2 "ve "r_3" [0,1] aralığında rastgele üretilen reel sayıları, "*S(i)*" popülasyondaki *i'*inci amaç fonksiyonunu, "*DF" t'*inci iterasyona kadar elde edilen en iyi amaç fonksiyonu değerini göstermektedir. "$\overrightarrow{vc}$" 1'den 0'a doğru iterasyon sayısına bağlı olarak $(1 - t/T)$ lineer azalan bir vektördür. "$\overrightarrow{vb}$" ise [-a, a] aralığında değişen bir vektördür. "*a*" değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$a = \operatorname{arctanh}\left(-\left(\frac{t}{T}\right) + 1\right) \tag{3.7}$$

burada "*t"* mevcut iterasyon sayısı, "*T"* ise maksimum iterasyon sayıdır. "*W",* cıvık mantarın ağırlığını temsil eder ve farklı besin konsantrasyonlarına göre besin kaynağına yaklaşma hızını belirleyen dinamik bir değişkendir. Denklem (3.8)'de, cıvık mantarın damar genişliği ile keşfedilen besinin konsantrasyonu arasındaki negatif ve pozitif geri besleme, matematiksel olarak gösterilmiştir. SMA'nın işlem adımları Şekil 3.4'te özetlenmiştir.



Şekil 3.3 SMA algoritmasının işlem adımları

$$\overrightarrow{W}(koku_indeksi(i)) = \begin{Bmatrix} 1 + r \cdot \log\left(\frac{bF - S(i)}{bF - wF} + 1\right) \\ 1 - r \cdot \log\left(\frac{bF - S(i)}{bF - wF} + 1\right) \end{Bmatrix} \quad (3.8)$$

$$koku_indeksi = sırala(S) \quad (3.9)$$

burada "*r"* bileşeni, damarın kasılma modu belirsizliğini taklit eder. "*Log"*, sayısal değerin değişim oranını azaltmak için kullanılır, böylelikle daralma frekansı değeri çok fazla değişmez. Besin konsantrasyonu yeterli düzeyde olduğunda, o bölgedeki ağırlık büyük olur, az olduğunda ise o bölgedeki ağırlık azalır. Böylece cıvık mantar, yeni besin kaynaklarını keşfetmek üzere diğer bölgelere yönlenir (Li vd., 2020).

"koku_indeksi" küçükten büyüğe doğru sıralanmış amaç fonksiyonları kümesini, "*bF"* en iyi amaç fonksiyonu değerini, "*wF"* ise en kötü amaç fonksiyonu değerini ifade eder. Bu çalışmada kullanılan SMA yöntemi aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

Adım 1: Popülasyon sayısı (*np)*, tasarım değişkeni sayısı (*ng)*, maksimum iterasyon sayısını (*T)* tanımla. Başlangıç konum vektörlerini rastgele oluştur. Popülasyondaki

her konum için cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerini hesapla. İterasyon sayacını başlat, *it = 0*.

Adım 2: İterasyon sayacını arttır, *it = it+1*.

Adım 3: Cezalandırılmış amaç fonksiyonlarını küçükten büyüğe doğru sıralayarak *koku_indeksini* belirle. *Koku_indeksi* vektörünün ilk ve son değerlerini sırasıyla *bF ve wF* değişkenlerine ata.

Adım 4: *W* değerini denklem (3.8)'e göre hesapla. En iyi konum vektörünü güncelle (*DF, Xb).* Rastgele bir reel sayı üret (r_2)

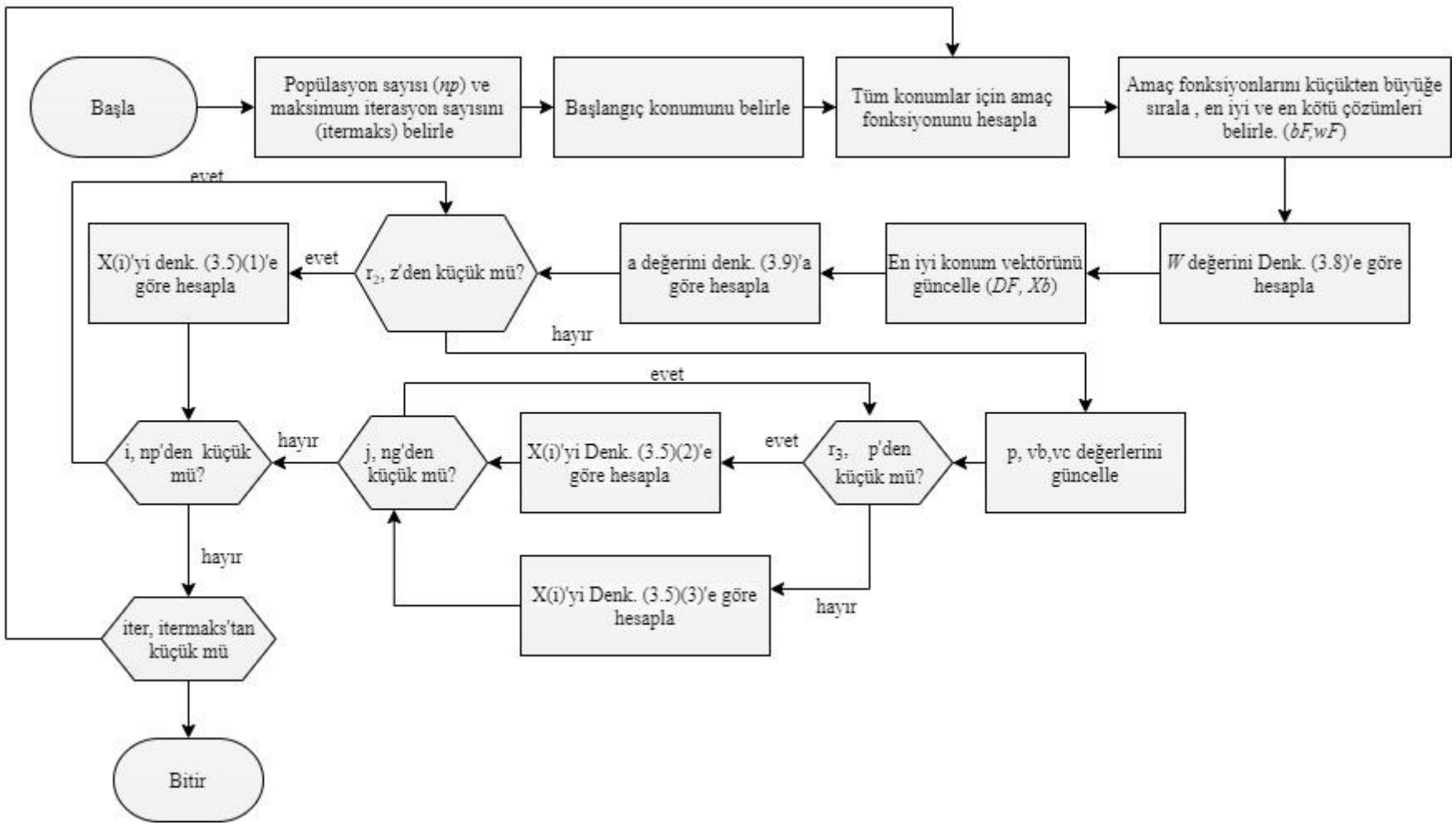
Adım 5: Eğer r_2 değeri *z'*den küçük ise tasarım değişkenlerini denklem (3.5)(1)'e göre güncelle.

Adım 6: Eğer r_2 değeri z'den büyük veya eşit ise *a, p, va* ve *vb'*yi hesapla. Rastgele bir reel sayı (r_3) üret ve *p* ile karşılaştır. Eğer r_3, *p*'den küçük ise denklem (3.5)(2)'e göre; büyük veya eşit ise denklem (3.5)(3)'ye göre tasarım değişkenlerini güncelle

Adım 7: Güncellenen tasarım değişkenleri ile cezalandırılmış amaç fonksiyonlarını hesapla.

Adım 8: Maksimum iterasyon sayısına ulaşıldığında optimizasyonu durdur. *DF ve Xb* değerlerini rapor et. Aksi durumda 2. adıma git.

SMA yönteminin detaylı akış diyagramı ise Şekil 3.4'te adım adım gösterilmiştir.



Şekil 3.4 SMA algoritması akış diyagramı

3.2.7 Hibrit cıvık mantar – Jaya algoritması (HSMJA)

Bu doktora tezi kapsamında ilk kez öne sürülecek olan hibrit cıvık mantar-Jaya algoritması, SMA yönteminin güçlü arama kabiliyeti ile JA'nın hızlı yakınsama davranışının birleştirilmesiyle ortaya konulmuş bir yöntemdir. Standart SMA algoritmasının optimum çözüme yakınsama hızını arttırmak, keşif ve sömürü bölgeleri arasındaki dengeyi iyileştirmek için JA'da kullanılan ve tasarımı modifiye eden denklemler mevcut SMA algoritmasına entegre edilmiştir. SMA yönteminin tasarım değişkenlerinin modifiye edildiği denklem (3.5)'deki r_2 değeri, yeni tanımlanan *gr* sabitine göre karşılaştırılarak JA'da kullanılan (3.3) denklemi, algoritmaya eklenmiştir.

"*gr*" sabiti, optimizasyonu yönlendirecek olan yöntemin baskınlık oranını temsil etmektedir. Bu durumda, rastgele oluşturulan r_2 değerinin *gr'*den küçük olması durumunda SMA yöntemine ait denklemler, büyük olması durumunda ise JA'ya ait denklem kullanılacaktır. HSMJA optimizasyon algoritmasının işlem adımları aşağıdaki gibidir:

Adım 1: Popülasyon sayısı (*np),* tasarım değişkeni sayısı (*ng),* maksimum iterasyon sayısını (*T),* baskınlık oranı (*gr*) tanımla. Başlangıç konum vektörlerini rastgele oluştur. Popülasyondaki her konum için cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerini hesapla. İterasyon sayacını başlat, *it = 0*.

Adım 2: İterasyon sayacını arttır, *it = it+1*.

Adım 3: Cezalandırılmış amaç fonksiyonlarını küçükten büyüğe doğru sıralayarak *koku_indeksini* belirle. *Koku_indeksi* vektörünün ilk ve son değerlerini sırasıyla *bF ve wF* değişkenlerine ata.

Adım 4: *W* değerini denklem (3.8)'e göre hesapla. En iyi konum vektörünü güncelle (*DF, Xb).* Rastgele bir reel sayı üret (r_2)

Adım 5: Eğer r_2 değeri *z'*den küçük ise tasarım değişkenlerini denklem (3.5)(1)'e göre güncelle.

Adım 6: Eğer r_2, *z*'den büyük veya eşit ise, r_2 sayısını baskınlık oranı (gr) ile karşılaştır. Eğer r_2, gr'den büyük ise JA'ya ait denklem (3.3)'e göre aksi durumda ise rastgele bir reel sayı (r_3) üret ve *p* ile karşılaştırma durumuna göre SMA'ya ait (3.5)(2) veya (3.5)(3) denklemlerini kullanarak tasarım değişkenlerini modifiye et.

Adım 7: Modifiye edilen tasarım değişkenlerini kullanarak üretilen her bir tasarımın cezalandırılmış ağırlık hesapla. Popülasyondaki en iyi ve en kötü tasarımları belirle.

Adım 8: Maksimum iterasyon sayısına ulaşıldığında optimizasyonu durdur. *DF ve Xb* değerlerini rapor et. Aksi durumda 2. adıma git.

3.3 Yapı Mühendisliğinde Optimizasyon

Yapı mühendisliğinde optimizasyon; bir yapının tasarım, inşa, işletme ve bakım gibi birçok aşamasında kullanılmaktadır. Özellikle tasarım aşamasında yaygın olarak kullanılan yapısal optimizasyon, öngörülen koşullar altında belirli hedeflere ulaşmak için yapı bileşenlerinin en uygun şekilde boyutlandırılması veya konfigürasyonu olarak ifade edilebilir. Yapısal optimizasyon dört gruba ayrılır:

Enkesit optimizasyonu: Yapıların taşıyıcı elemanlarının enkesit alanlarının tasarım değişkeni olarak ele alındığı enkesit minimizasyonu işlemidir.

Şekil optimizasyonu: Yapının düğüm noktası koordinatlarının tasarım değişkeni olarak tanımlandığı konfigürasyon optimizasyonu işlemidir. Şekil optimizasyonunda; yapıda belirlenen düğüm noktaları belli sınırlar dahilinde yer değiştirebilir.

Topoloji optimizasyonu: Düğüm noktalarının sayısı, elemanların bağlantıları ve eleman sayısı olarak tanımlanan yapı topolojisinde, taşıyıcı sistemden çıkarılması mümkün olan elemanların silinmesiyle en uygun tasarımın elde edilmesi işlemidir.

Eş zamanlı optimizasyon: Enkesit, şekil veya topoloji optimizasyonlarının herhangi ikisi veya hepsini aynı anda icra eden optimizasyon türüdür.

Yapı mühendisliği kapsamında yapılan optimizasyon çalışmalarında, yapı maliyetinin en aza düşürülmesi ve yapı performansının geliştirilmesi amaç fonksiyonu olarak kullanılmaktadır. Yapı maliyetine doğrudan etki eden minimum yapı ağırlığı, en yaygın kullanılan amaç fonksiyonudur.

Bir yapının tasarımı yapılırken öncelikle ihtiyaçlar göz önünde bulunmaktadır. İhtiyaçları karşılayacak şekilde kullanılacak malzemelerin türü ve özellikleri ile yapı geometrisi belirlenerek bir tasarım modeli oluşturulur. Oluşturulan modelde taşıyıcı elemanların ön boyutlandırılması rastgele yapılır. Yapının maruz kalacağı yükleme durumları belirlenir. Yükleme ve ön boyutlandırma işlemlerinden sonra oluşturulan modelin analizi yapılır. Analiz sonuçlarının, istenen veya yönetmeliklerde belirlenen sınır değerler dahilinde olup olmadığı kontrol edilir. Bu sınırlar, genellikle enkesit, gerilme, dayanım, deplasman, katlar arası göreli ötelenme oranı ve enkesit-boyut sınırlayıcıları olarak belirlenmektedir. Sınır değerlerin ihlal edilmesi durumunda tasarım değişkeni olarak tanımlanan unsurlar, kullanılan optimizasyon yöntemine göre sistematik bir şekilde güncellenerek yeniden analiz yapılır. Bu işlem, sınır değerleri sağlayan en hafif tasarım elde edilinceye kadar tekrarlanır.

3.4 Çerçeve Sistemlerin Statik Analizi

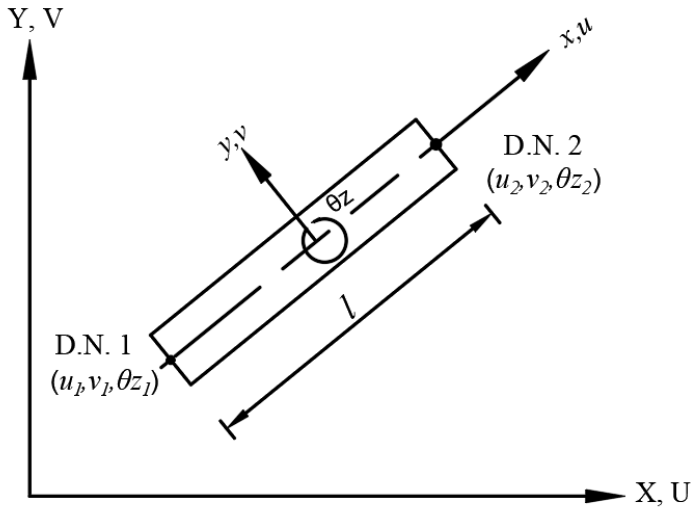
Çerçeve sistem, kolon ve kiriş gibi taşıyıcı elemanların birbirine mafsallı, rijit veya yarı rijit bir şekilde bağlanmasıyla oluşturulan yapı modelidir. Pratikte üç boyutlu olan çerçeve sistemler, hesap kolaylığı olması açısından bazı kabuller yapılarak iki boyutlu şekilde de modellenebilir. Kafes sistemler, düğüm noktaları mafsallı olduğu için sadece eksenel kuvvet etkisindeyken çerçeve sistemler ise eksenel kuvvetin yanı sıra kesme ve eğilme etkisine de maruz kalmaktadır. Bu durum, çerçeve sistemlerin yapısal analizini kafes sistemlere göre daha karmaşık hale getirmektedir.

Çerçeve sistemlerin optimizasyonun yapılabilmesi için elemanların eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti ve yönetmeliklerden alınan sınır değerlere göre

belirlenen dayanım oranlarının yanı sıra düğüm noktası deplasman değerlerinin sınırlayıcıları sağlayıp sağlamadığının kontrol edilmesi gerekir. Bu değerlerin elde edilebilmesi, sistemin statik analiziyle mümkündür. Yapı sistemlerinin analizi için virtüel iş, kuvvet, açı gibi klasik yöntemlerin dışında matris deplasman yöntemi de kullanılmaktadır. Bu çalışmada çelik çerçeve yapıların statik analizinde matris deplasman yöntemi kullanılmıştır.

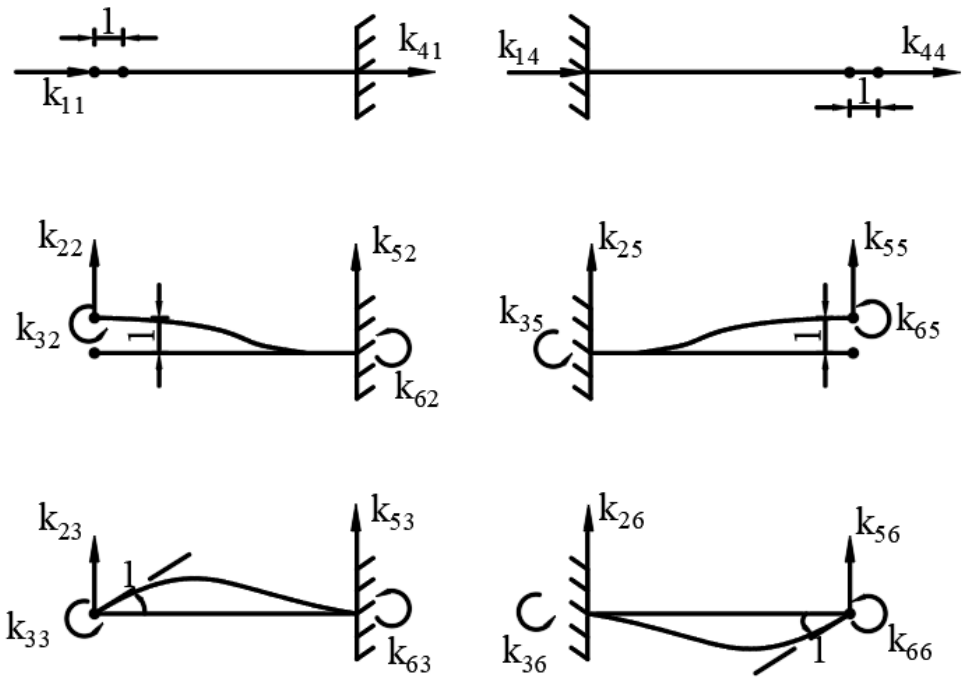
3.4.1 Düzlem çerçeve sistemlerin matris deplasman yöntemi ile analizi

Bu tez çalışmasında düzlem çerçeve yapıların statik analizi için MATLAB programlama dilinde ayrıca bir kodlama yapılmamıştır. Bunun yerine yapı analizleri OPENSEES yazılımına yaptırılmış ve elde edilen iç kuvvetler MATLAB ortamında kodlanan optimizasyon ana programına aktarılmıştır. Bu şekilde kodlamada yapılabilecek olası hatalar bertaraf edildiği gibi OPENSEES gibi bir yapı analiz yazılımı kullanılarak analizden elde edilen sonuçların doğruluğundan emin olunmuştur. Bu bölümde OPENSEES yazılımının kullandığı matris deplasman yöntemi kısaca açıklanmıştır. Şekil 3.5'teki gibi l_e uzunluğunda düzlem bir çerçeve elemanı ele alındığında, çubuğun lokal koordinat sistemine göre *x* yönündeki eksenel deformasyonları u_1, u_2; *y* yönündeki deplasmanları v_1, v_2 *ve z* yönü etrafındaki dönmeleri θ_{z1}, θ_{z2} olmak üzere altı farklı serbestlik derecesi vardır. Serbestlik derecesi, bir elemanın deplasman yapabildiği doğrultuların toplam sayısını ifade etmektedir. Şekil 3.5'te *X* ve *Y*, global eksen takımını göstermektedir.



Şekil 3.5 Düzlem çerçeve elemanı

Bir sistemin belirli bir doğrultuda birim yer değiştirme yapması için uygulanması gereken kuvvete rijitlik (*k*) denir. Kuvvetin uygulandığı doğrultunun serbestlik derecesi numarası *i* ile, birim yer değiştirmenin meydana geldiği serbestlik derecesi numarası *j* ile gösterilmek üzere elemanın rijitlik katsayısı (k_{ij}); diğer tüm serbestlik dereceleri doğrultusundaki deplasmanlar sıfır olmak koşuluyla *j* serbestlik derecesinde birim deplasman oluşturmak için *i* serbestlik derecesine uygulanması gereken kuvvete eşittir. k_{ij} parametresini elde etmek için elemanın *j* doğrultusunda birim deplasman olduğu ve diğer doğrultulardaki deformasyonların sıfır olduğu kabul edilir. Bu durum için *i* doğrultusundaki kuvvet hesaplanır. Bu işlem, elemanın bütün serbestlik dereceleri için ayrı ayrı uygulanarak eleman rijitlik katsayıları elde edilmiş olur. Düzlem çerçeve çubuğunun her bir serbestlik derecesi için rijitlik katsayıları Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Serbestlik dereceleri için rijitlik katsayıları

Çerçeve çubuğun uç deplasmanları ile rijitlik katsayıları arasındaki bağıntı aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$
\begin{aligned}
F_1 &= k_{11}\cdot u_1 + k_{12}\cdot v_1 + k_{13}\cdot \theta_{z1} + k_{14}\cdot u_2 + k_{15}\cdot v_2 + k_{16}\cdot \theta_{z2}\\
F_2 &= k_{21}\cdot u_1 + k_{22}\cdot v_1 + k_{23}\cdot \theta_{z1} + k_{24}\cdot u_2 + k_{25}\cdot v_2 + k_{26}\cdot \theta_{z2}\\
F_3 &= k_{31}\cdot u_1 + k_{32}\cdot v_1 + k_{33}\cdot \theta_{z1} + k_{34}\cdot u_2 + k_{35}\cdot v_2 + k_{36}\cdot \theta_{z2}\\
F_4 &= k_{41}\cdot u_1 + k_{42}\cdot v_1 + k_{43}\cdot \theta_{z1} + k_{44}\cdot u_2 + k_{45}\cdot v_2 + k_{46}\cdot \theta_{z2}\\
F_5 &= k_{51}\cdot u_1 + k_{52}\cdot v_1 + k_{53}\cdot \theta_{z1} + k_{54}\cdot u_2 + k_{55}\cdot v_2 + k_{56}\cdot \theta_{z2}\\
F_6 &= k_{61}\cdot u_1 + k_{62}\cdot v_1 + k_{63}\cdot \theta_{z1} + k_{64}\cdot u_2 + k_{65}\cdot v_2 + k_{66}\cdot \theta_{z2}
\end{aligned}
\tag{3.10}
$$

Denklem (3.10) matris formunda aşağıda gibi yazılabilir;

$$
\begin{Bmatrix} F_1\\ F_2\\ F_3\\ F_4\\ F_5\\ F_6 \end{Bmatrix} =
\begin{bmatrix}
k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16}\\
k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26}\\
k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36}\\
k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46}\\
k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56}\\
k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66}
\end{bmatrix}
\cdot
\begin{Bmatrix} u_1\\ v_1\\ \theta_{z1}\\ u_2\\ v_2\\ \theta_{z2} \end{Bmatrix} +
\begin{Bmatrix} f_1\\ f_2\\ f_3\\ f_4\\ f_5\\ f_6 \end{Bmatrix}
\tag{3.11}
$$

Denklem (3.11) kapalı formda şu şekilde yazılabilir;

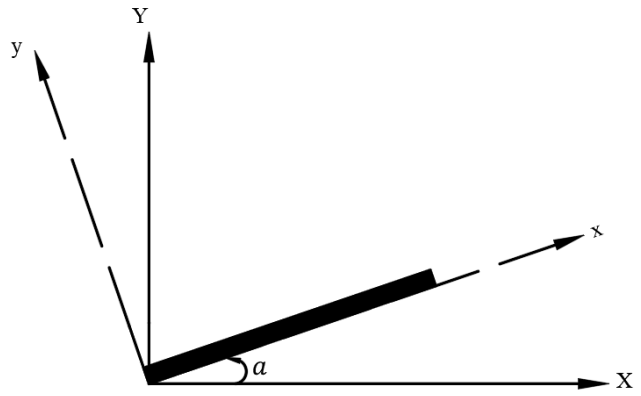
$$\{F_i\} = [k_i]\cdot\{d_i\} + \{f_i\} \tag{3.12}$$

Lokal koordinatlardaki rijitlik denklemi olarak ifade edilen Denklem (3.12)'de "$\{F_i\}$", düğüm noktalarına etkiyen uç kuvvetler vektörü; "$[k_i]$" elemanın rijitlik matrisi; "$\{d_i\}$" düğüm noktası deplasman vektörü; "$\{f_i\}$" ise açıklıklara etki eden yükün meydana getirdiği ankastrelik kuvvet vektörünü göstermektedir (Tezcan, 1970).

Rijitlik katsayıları mukavemet bilgileri kapsamında eksenel deformasyon ile açı yöntemi kullanılarak elde edilen dönme bağıntıları ile elde edilir. Düzlem çerçeve elemana ait lokal rijitlik matrisi aşağıdaki şekildedir.

$$[k_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix}_{6x6} \quad (3.13)$$

Burada, "*E*" elastisite modülünü, "*A*" elemanın enkesit alanını "*L*" ise eleman uzunluğunu temsil etmektedir. Çerçeve sistemin global rijitlik matrisinin oluşturulabilmesi için öncelikle bir elemanın lokal rijitlik matrisinin oluşturulup transformasyon (dönüşüm) matrisi yardımıyla global koordinatlara çevrilmesi gerekir.



Şekil 3.7 Düzlem çerçeve elemanın eğimli durumu

Şekil 3.7'de eğimli olarak verilen bir elemanın *x* ve *y* lokal koordinatları, *X* ve *Y* global koordinatlarını göstermek üzere global eksenlerle a açısı yapan lokal eksenlerde dönüşüm yapmak için;

$$x = X \cdot cosa + Y \cdot sina \quad (3.14)$$

$$y = Y \cdot cosa + X \cdot sina \quad (3.15)$$

Lokal ve global eksenler arasındaki bu bağıntılar dikkate alınarak koordinat dönüşümü aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} cosa & sina & 0 \\ -sina & cosa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} \tag{3.16}$$

$$[r] = \begin{bmatrix} cosa & sina & 0 \\ -sina & cosa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.17}$$

Elemana ait koordinat dönüşüm matrisi ise şu formda yazılabilir:

$$[T] = \begin{bmatrix} r & 0 \\ 0 & r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cosa & sina & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -sina & cosa & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & cosa & sina & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -sina & cosa & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.18}$$

Global ve lokal koordinatlardaki eleman rijitlik matrisleri arasındaki bağıntı şu şekildedir:

$$\left[k_{global}\right] = [T_i]^T \cdot [k_{lokal}] \cdot [T_i] \tag{3.19}$$

(3.19) bağıntısı yardımıyla lokal koordinatlardaki eleman rijitlik matrisleri global koordinatlara dönüştürülür. Daha sonra her bir eleman rijitlik matrisi, serbestlik derecelerine göre toplanarak sistemin global rijitlik matrisi şu şekilde hesaplanır:

$$[K_{sistem}] = \sum_{i=1}^{m} [T_i]^T \cdot \left[k_{lokal,i}\right] \cdot [T_i] \tag{3.20}$$

Dönüşüm matrisi kullanılarak global ve lokal koordinatlardaki kuvvet vektörü arasındaki bağıntı denklem (3.21)'de, deplasman vektörü arasındaki bağıntı denklem (3.22)'de verilmiştir:

$$\{F_{lokal}\} = [T] \cdot \{F_{global}\} \tag{3.21}$$

$$\{d_{lokal}\} = [T] \cdot \{d_{global}\} \tag{3.22}$$

Dönüşüm matrisi ortogonal matris olduğundan tersi ve transpozesi birbirine eşit olduğundan aşağıdaki bağıntı yazılabilir:

$$[T]^T = [T]^{-1} \tag{3.23}$$

Lokal koordinatlarda rijitlik denklemi ise aşağıdaki gibi yazılır:

$$\{F_{lokal}\} = [k_{lokal}] \cdot \{d_{lokal}\} \tag{3.24}$$

Denklem (3.24)'de "$\{d_{lokal}\}$" ifadesi yerine denklem (3.22) yazılarak aşağıdaki bağıntı elde edilir:

$$\{F_{lokal}\} = [k_{lokal}] \cdot [T] \cdot \{d_{global}\} \tag{3.25}$$

Bu ifadede "$\{F_{lokal}\}$" yerine denklem (3.21)'deki ifade yazılıp denklemin her iki tarafı "$[T]^{-1}$ ile çarpıldığında denklem (3.27) elde edilir.

$$[T]^{-1} \cdot [T] \cdot \{F_{global}\} = [T]^{-1} \cdot [k_{lokal}] \cdot [T] \cdot \{d_{global}\} \tag{3.26}$$

$$\{F_{global}\} = [T]^T \cdot [k_{lokal}] \cdot [T] \cdot \{d_{global}\} \tag{3.27}$$

$[T]^T \cdot \{k_{lokal}\} \cdot [T]$ ifadesi denklem (3.19)'dan görüldüğü üzere $\{k_{global}\}$'e eşit olduğundan;

$$\{F_{global}\} = [k_{global}] \cdot \{d_{global}\} \tag{3.28}$$

$$\{d_{global}\} = [k_{global}]^{-1} \cdot \{F_{global}\} \tag{3.29}$$

Burada, "F_{global}" serbestlik derecesi dikkate alınarak sistemin düğüm noktalarına etkiyen dış kuvvetler vektörüdür. Global rijitlik matrisi oluşturulduktan sonra dış yükler vektörü tanımlanarak bilinmeyen deplasman vektörü denklem (3.28)'den türetilen denklem (3.29) ile hesaplanabilir. Böylelikle düğüm noktalarına ait deplasman değerleri elde edilmiş olur. Elde edilen deplasman vektörü denklem (3.25)'te yerine yazılarak elemanların uç kuvvetleri hesaplanır (McGuire vd., 2000).

3.4.2 Uzay çerçeve yapıların matris deplasman yöntemi ile analizi

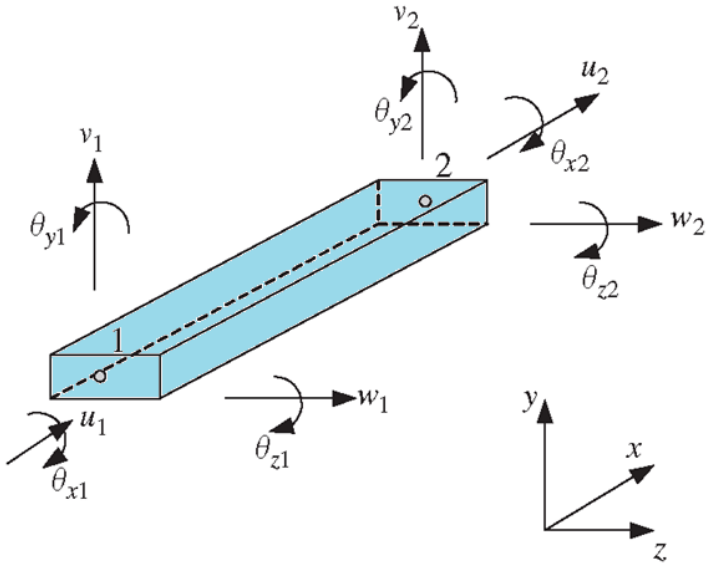
Düzlem çelik çerçeve sistemlere benzer şekilde uzay çelik çerçeve sistemlerin yapısal analizi için de MATLAB'da ayrıca bir kodlama yapılmamış, bunun yerine tüm statik analiz işlemleri SAP2000 yapı analiz yazılımına yaptırılmıştır. Bu şekilde karmaşık kodlama işlemleriyle zaman kaybedilmemiş ve olası kodlama hatalarının önüne geçilmiştir. SAP2000'de elde edilen eleman dayanım oranları ve deplasman değerleri MATLAB'da kodlanan optimizasyon yöntemi ve problemini içeren ana programa aktarılmıştır. MATLAB ve SAP2000 arasındaki bu etkileşim/alış-veriş tüm optimum tasarım süreci boyunca devam etmiştir. Bu açıklamalar dikkate alınarak SAP2000'de kullanılan uzay çelik çerçeve sistemlerin matris deplasman yöntemi ile çözüm adımları düzlem çerçevelerdeki ile benzerdir. Şekil 3.8'de gösterildiği üzere uzay çerçeve elemanın ilk ucunda altı, ikinci ucunda altı olmak üzere on iki serbestlik derecesi bulunmaktadır. Dolayısıyla elemanın lokal rijitlik matrisinin boyutları da 12×12 olur. Uzay çerçeve elemana ait lokal rijitlik matrisi denklem (3.30)'da gösterilmiştir.

$$[k_{ij}] =$$

$$\begin{bmatrix}
\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} \\
0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\
0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\
0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 \\
0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} \\
-\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} \\
0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\
0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\
0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\
0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L}
\end{bmatrix}_{12x12}$$

(3.30)

Burada "I_y" elemanın -y eksenine göre atalet momentini, "I_z" -z eksenine göre atalet momentini, "G" kayma modülünü, "J" ise polar atalet momentini ifade eder. Kayma modülü, $G = E/(2 \cdot (1 + v))$ şeklinde hesaplanır. "E" ve "v" sırasıyla malzeme için elastisite modülü ve Poisson oranıdır.

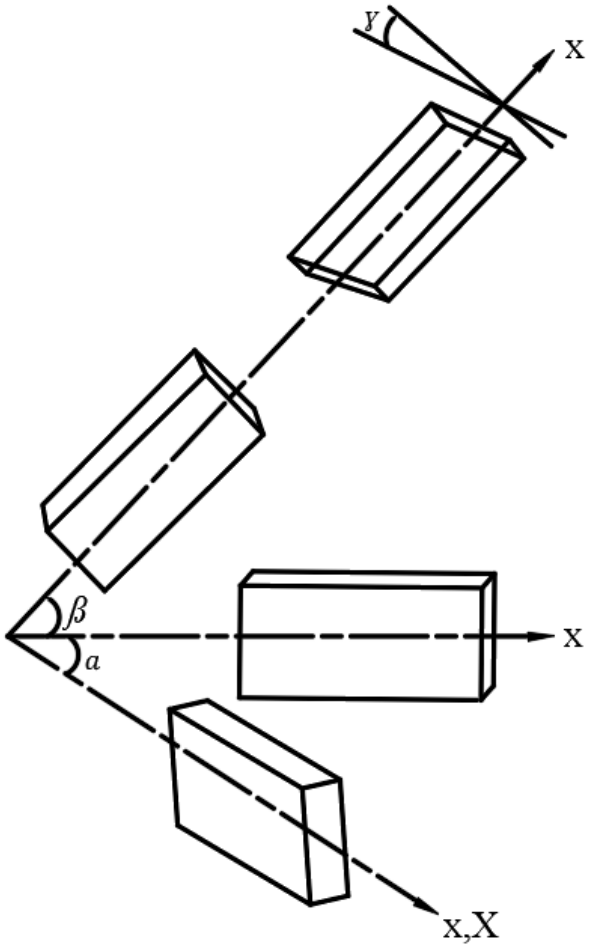


Şekil 3.8 Uzay çerçeve elemanı ve serbestlik dereceleri

Uzay çerçeve elemanın deplasman vektörü aşağıdaki formda gösterilebilir:

$$\{d\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \theta_{x1} \\ \theta_{y1} \\ \theta_{z1} \\ u_1 \\ v_2 \\ w_3 \\ \theta_{x2} \\ \theta_{y2} \\ \theta_{z2} \end{Bmatrix} \tag{3.31}$$

Şekil 3.9'da eğimli olarak verilen uzay çerçeve elemanın lokal *x, y* ve *z* eksenlerinin global eksenlerle yaptığı açılar *a, ß* ve *γ* olduğu göz önüne alındığında, bir düğüm noktasının için oluşturulan transformasyon matrisi aşağıdaki gibidir:



Şekil 3.9 Uzay çerçeve elemanın eğimli durumu

$$[T] = \begin{bmatrix} cos\beta \cdot cosa & sin\beta & -cos\beta \cdot sina \\ sina \cdot sin\gamma - cosa \cdot sin\beta \cdot cos\gamma & cos\beta \cdot cos\gamma & cosa \cdot sin\gamma + sina \cdot sin\beta \cdot cos\gamma \\ sina \cdot sin\gamma - cosa \cdot sin\beta \cdot cos\gamma & -cos\beta \cdot sin\gamma & cosa \cdot sin\gamma - sina \cdot sin\beta \cdot cos\gamma \end{bmatrix} \tag{3.32}$$

Çerçeve elemanın her iki ucu ve bütün serbestlik dereceleri için oluşturulmuş koordinat transformasyon matrisi şu şekilde ifade edilebilir (Aydoğdu, 2010):

$$[T] = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{11} & b_{12} & b_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{21} & b_{22} & b_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{31} & b_{32} & b_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{11} & b_{12} & b_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{21} & b_{22} & b_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{31} & b_{32} & b_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix}_{12x12} \tag{3.33}$$

Uzay çerçeve elemanın rijitlik matrisi, dönüşüm matrisi ve bilinmeyen deplasman vektörü belirlendikten sonra geriye kalan işlem adımları (3.19) - (3.29) denklemleriyle verilen düzlem çerçeve elemanın hesabı ile aynıdır.

3.5 Çelik Çerçeve Sistemlerinin Optimum Tasarım Problemi

Çelik çerçeve sistemlerin optimum tasarımı, göz önüne alınan yönetmelikte bulunan tasarım sınırlayıcılarını sağlamak koşuluyla taşıyıcı elemanların standart enkesit listesinde yer alan enkesitlerden seçilerek en hafif tasarımın bulunması işlemidir. Bu problem, matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir;

$$A_i \in S = \{A_1, A_2, \dots A_{nsc}\} \tag{3.34}$$

$$W(A) = \sum_{k=1}^{ng} A_k \sum_{i=1}^{nm} \gamma_{k,i} L_{k,i} \qquad k=1,2,\ldots,ng\ ;\ i=1,2,\ldots,nm \qquad (3.35)$$

$$g_j(A) \leq 0 \qquad j=1,2\ldots.nc \qquad (3.36)$$

Burada "$W(A)$" çelik çerçeve sistemin ağırlığını, "*ng*" eleman grup (tasarım değişkeni) sayısını, "*nm*" gruptaki toplam eleman sayısını, "*i*" eleman numarasını ve "*k*" eleman grup sırasını göstermek üzere; "γ" malzeme birim hacim ağırlığını, "*L*" eleman uzunluğunu, "*A*" eleman gruplarına atanabilecek enkesit alanlarını, "*S*" enkesit listesini, "*ncs*" ayrık enkesit listesindeki toplam enkesit sayısını temsil eder. "$g_j(A)$" deplasman, dayanım ve enkesit-boyut sınırlayıcılarını içeren tasarım sınırlayıcısı, "*nc*" ise toplam sınırlayıcı sayısıdır. Sınırlayıcı kontrolü ile göz önüne alınan tasarımın sınırlayıcıları ihlal edip etmedikleri kontrol edilir. Optimum tasarım işleminde tasarım sınırlayıcılarını ihlal eden ve ihlal etmeyen tasarımları ayırt etmek için cezalandırılmış amaç fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu fonksiyon ile sınırlayıcıları ihlal eden tasarımlar, sınırlayıcıları ihlal etme oranlarında cezalandırılır. Bu açıklamalara göre bu çalışmada kullanılan cezalandırılmış amaç fonksiyonu şu şekilde ifade edilir:

$$W_p(A) = (1 + \psi)^{\varepsilon} \times W(A) \qquad (3.37)$$

$$\psi = \sum_{j=1}^{ncs} max\,[0, g_j(A)] \qquad (3.38)$$

Burada, "ψ" her bir tasarıma ait dayanım, düğüm deplasman, katlar arası göreli ötelenme ve enkesit-boyut sınırlayıcı ihlallerinin toplamı,"ε" ceza parametresi ve "$W_p(A)$" ise cezalandırılmış çerçeve ağırlık değeridir. Tez kapsamında çelik çerçeve sistemlerin optimizasyonu için sınırlayıcılar, American Institute of Steel Construction-Allowable Stress Design (AISC-ASD) ve American Institute of Steel Construction-Load and Resistance Factor Design (AISC-LRFD) yönetmeliklerindeki şartlara göre belirlenmiştir.

3.5.1 Çelik çerçeve sistemlerin AISC-ASD yönetmeliğine göre tasarım sınırlayıcıları

1989'da yürürlüğe giren AISC-ASD yönetmeliğinin çelik çerçeve sistemlerin tasarımında dayanım sınırlayıcılarının kontrolü aşağıda sıralanan denklemlerle yapılmaktadır.

Hem eğilme hem eksenel basınç etkisindeki çerçeve sistem taşıyıcı elemanlarının tasarımı yapılırken aşağıda verilen dayanım sınırlayıcılarının sağlanması gerekir:

Eğer $f_a/F_a > 0.15$ ise

$$\left[\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_a}{F'_{ex}}\right) \cdot F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{\left(1 - \frac{f_a}{F'_{ey}}\right) \cdot F_{by}}\right] - 1 \leq 0 \tag{3.39}$$

$$\left[\frac{f_a}{0.60F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}}\right] - 1 \leq 0 \tag{3.40}$$

Eğer $f_a/F_a \leq 0.15$ ise

$$\left[\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}}\right] - 1 \leq 0 \tag{3.41}$$

Eksenel çekme etkisindeki eleman için ise aşağıdaki şartın sağlanması gereklidir:

$$\left[\frac{f_a}{0.60F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}}\right] - 1 \leq 0 \tag{3.42}$$

burada "f_a" hesaplanan eksenel gerilmeyi, "f_{bx}" ve "f_{by}" sırasıyla *x* ve *y* eksenleri etrafında eğilme etkisindeki elemanın eğilme gerilmelerini, "F_{bx}" ve "F_{by}" sırasıyla *x* ve *y* eksenleri etrafında eğilme etkisindeki elemanın müsaade edilen eğilme gerilmelerini "F'_{ex}" ve "F'_{ey}" elemanın ana eksenlerine göre Euler gerilmelerini, "F_a" eksenel basınç etkisindeki eleman için müsaade edilen eksenel basınç gerilmesini,

"C_{mx}" ve "C_{my}" ikinci mertebe momentlerinin azaltma katsayılarını temsil etmektedir. "F_a" elemanın elastik veya inealastik burkulma durumuna bağlı olarak AISC-ASD bölüm E2'de yer alan ve aşağıda verilen bağıntılara göre hesaplanır. "C_m" katsayısı, yanal ötelenmeli çerçevelerin basınç elemanları için 0.85 alınırken yanal ötelenmesi önlenmiş çerçeveler için ise $C_m = 0.6 - 0.4(M_1 \,/\, M_2)$ denklemiyle hesaplanır. $M_1 \,/\, M_2$ küçük olan uç moment değerinin büyük uç moment değerine oranıdır.

Eğer eleman narinlik oranını ifade eden λ, kritik burkulma değerinden küçükse inelastik burkulma söz konusu olur ve müsaade edilen eksenel basınç gerilmesi aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$F_a = \frac{\left[1 - \frac{(\lambda)^2}{2{C_c}^2}\right] \cdot F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3\lambda}{8C_c} - \frac{(\lambda)^3}{8{C_c}^3}} \tag{3.43}$$

burada "C_c" kritik burkulma değeri olup $C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}}$ ifadesiyle elde edilir. "$\lambda = Kl/r$" elemanın narinlik oranını temsil eder. "F_y" malzemenin akma dayanımıdır. Narinlik oranı hesabındaki "*K*" efektif uzunluk faktörünü, "*L*" eleman uzunluğunu ve "*r*" atalet yarıçapını gösterir.

Eğer narinlik oranı, kritik burkulma değerinden büyükse burkulma elastiktir ve emniyet gerilmesi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$F_a = \frac{12\pi^2 E}{23(\lambda)^2} \tag{3.44}$$

Kritik burkulma gerilmelerinin hesabı yapılırken efektif uzunluk faktörü *K* değerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu amaçla Dumonteil (1992) tarafından öne sürülen aşağıdaki denklemler kullanılarak kolonların efektif uzunluk faktörü sırasıyla yanal ötelenmesi önlenmiş ve yanal ötelenmesi önlenmemiş çerçeveler için yaklaşık olarak hesaplanabilir.

Yanal ötelenmesi önlenmiş (çaprazlı) çerçeve elemanlar için;

$$K = \frac{3G_AG_B + 1.4(G_A + G_B) + 0.64}{3G_AG_B + 2(G_A + G_B) + 1.28} \tag{3.45}$$

Yanal ötelenmesi önlenmemiş çerçeve elemanlar için ise aşağıdaki bağıntı kullanılır.

$$K = \sqrt{\frac{1.6G_AG_B + 4(G_A + G_B) + 7.5}{G_A + G_B + 7.5}} \tag{3.46}$$

Burada, "G_A" ve "G_B" değerleri sırasıyla *A* ve *B* ucunun relatif rijitlik oranları olup şu şekilde hesaplanır.:

$$G_A = \frac{\sum \frac{I_c}{L_c}}{\sum \frac{I_b}{L_b}} \tag{3.47}$$

burada, "I_c" ve "L_c" sırasıyla *A* ucuna bağlanan kolonların atalet momentini ve uzunluğunu, "I_b" ve "L_b" sırasıyla *A* ucuna bağlanan kirişlerin atalet momentini ve uzunluğunu temsil etmektedir.

Elemanların eksenel ve eğilme dayanımlarının yanı sıra kayma dayanımlarının da kontrolünün yapılması gerekir. Çerçeve elemanlar için emniyetli kayma gerilmesi değeri aşağıdaki şekilde kontrol edilir:

$$f_v \leq F_v = 0.40C_vF_y \tag{3.48}$$

burada, "f_v" kayma gerilmesini, "C_v" elemanın gövde kayma katsayısını, "F_v" ise müsaade edilen kayma gerilmesi değerini temsil eder.

3.5.2 Çelik çerçeve sistemlerin AISC-LRFD yönetmeliğine göre tasarım sınırlayıcıları

1993'te yürürlüğe giren AISC-LRFD yönetmeliğinin çelik çerçeve sistemlerin tasarımı ile ilgili esasları aşağıda verilmiştir. Buna göre dayanım sınırlayıcıları aşağıdaki etkileşim denklemleriyle kontrol edilir:

$$Eğer\ \frac{P_u}{\phi_c P_n} \geq 0.2$$
$$g_s(A) = \frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9}\left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}}\right) - 1 \leq 0 \tag{3.49}$$

$$Eğer\ \frac{P_u}{\phi_c P_n} < 0.2$$
$$g_s(A) = \frac{P_u}{2\phi_c P_n} + \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}}\right) - 1 \leq 0 \tag{3.50}$$

$$\frac{V_u}{\phi_v V_n} - 1 \leq 0 \tag{3.51}$$

burada, "P_u" ve "P_n" basınç veya çekme durumu için elemanın sırasıyla gerekli ve müsaade edilen eksenel dayanımını, " M_{ux}" ve "M_{uy}" *x* ve *y* ekseni etrafındaki gerekli eğilme dayanımını, "M_{nx}" ve "M_{ny}" *x* ve *y* ekseni etrafındaki müsaade edilen eğilme dayanımını göstermektedir. "ϕ_c" eksenel dayanım katsayısı olup basınç elemanları için 0.85, çekme elemanları için ise 0.9'dur. "ϕ_b" eğilme dayanımı katsayısı olup 0.9 olarak alınır. Kayma kapasitesinin hesaplandığı denklem (3.51)'de "V_u" ve "V_n" sırasıyla gerekli ve müsaade edilen kayma dayanımıdır, ϕ_v kayma dayanımı katsayısı olup 0.9 olarak alınır.

Çekme etkisindeki bir elemanın akma sınır durumu için müsaade edilen eksenel dayanımı şu şekildedir:

$$P_n = F_y \cdot A_g \tag{3.52}$$

burada "A_g" net enkesit alanı, "F_y" malzeme akma dayanımını ifade eder. Basınç etkisindeki bir elemanın eksenel basınç dayanımı ise şu şekide hesaplanır:

$$P_n = F_{cr} \cdot A_g \tag{3.53}$$

$$\begin{aligned} &Eğer\ \lambda_c \leq 1.5 \\ &F_{cr} = \left(0.658^{{\lambda_c}^2}\right) \cdot F_y \end{aligned} \tag{3.54}$$

$$\begin{aligned} &Eğer\ \lambda_c > 1.5 \\ &F_{cr} = \left[\frac{0.877}{{\lambda_c}^2}\right] \cdot F_y \end{aligned} \tag{3.55}$$

$$\lambda_c = \frac{Kl}{r\pi}\sqrt{\frac{F_y}{E}} \tag{3.56}$$

burada "*K*" efektif uzunluk faktörü, "*r*" atalet yarıçapı, "*l*" eleman uzunluğu "*E*" malzeme elastisite modülü, "λ_c" kritik narinlik oranını, "F_{cr}" kritik basınç gerilmesi değerini temsil eder.

Çift yönlü simetrik enkesitli elemanlar için burkulmanın kayma merkezi etrafında gerçekleştiği durumlarda burulmalı burkulma sınır değeri için kritik dayanım aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\lambda_e = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}} \tag{3.57}$$

$$F_e = \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z l)^2} + G \cdot J_T\right] + \frac{1}{I_x + I_y} \tag{3.58}$$

$$Eğer\ \lambda_e \leq 1.5$$
$$F_{cr} = \left(0.658^{\lambda_e{}^2}\right) \cdot F_y \tag{3.59}$$

$$Eğer\ \lambda_e > 1.5$$
$$F_{cr} = \left[\frac{0.877}{\lambda_e{}^2}\right] \cdot F_y \tag{3.60}$$

burada, "C_w" sapma sabiti, *G* kayma modülü, "J_T" burulma sabiti, "I_x" *ve* "I_y" *x* ve *y* eksenleri için atalet momentleri, "*l*" eleman uzunluğu, "K_z" burulmalı burkulma için efektif uzunluk faktörüdür.

Eğilme dayanımının hesabında akma sınırı, yanal burulmalı burkulma, başlıkta yerel burkulma ve gövdede yerel burkulma olmak üzere dört farklı sınır durumu bulunur ve bu sınır durumlardan elde edilen minimum moment değeri, eğilme dayanımı için belirlenecek emniyetli eğilme momenti olur.

Akma sınır şartı için eğilme dayanımı şu şekilde hesaplanır:

$$M_n = M_p = F_y \cdot Z \leq 1.5 \cdot F_y \cdot S \tag{3.61}$$

burada "*Z*" plastisite modülünü, "*S*" eğilme eksenine göre kesit modülünü temsil eder.

Çift yönde simetrik enkesitli elemanların yanal burulmalı burkulma sınır durumu için eğilme dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\begin{aligned} Eğer\, L_b \leq L_p &\qquad M_n = M_p \\ Eğer\, L_b < L_r \leq L_p &\qquad M_n = C_b\left[M_p - \left(M_p - M_r\right)\left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}\right)\right] \leq M_p \\ Eğer\, L_b > L_r &\qquad M_{cr} \leq M_p \end{aligned} \tag{3.62}$$

burada, "L_b" stabilite elemanlarının desteklediği noktalar arasındaki mesafe, "L_p" akma sınır durumu için yanal olarak desteklenmeyen sınır uzunluk, "L_r" elastik olmayan yanal burulmalı burkulma durumu için sınır uzunluk, "C_b" yanal burulmalı burkulma sınır durumunda moment düzeltme katsayısı, "M_p" plastik eğilme momentini, "M_r" gerekli eğilme momenti dayanımı, "M_{cr}" elastik yanal burulmalı burkulma için kritik eğilme moment değeridir.

Çift yönde simetrik enkesitli elemanların yerel burulmalı burkulma sınır durumunun başlık ve gövdede olması durumunda iki farklı eğilme dayanımı hesabı söz konusudur. Kompakt olmayan başlıklara sahip çift simetri eksenli enkesitlerin başlıkları için yerel burulmalı burkulma sınır dayanımı şu şekilde hesaplanır:

$$\begin{aligned} &Eğer\, \lambda_f \le \lambda_p^f && M_n = M_p \\ &Eğer\, \lambda_p^f < \lambda_f \le \lambda_r^f && M_n = C_b\left[M_p - \left(M_p - M_r^f\right)\left(\frac{\lambda_f - \lambda_p^f}{\lambda_r^f - \lambda_p^f}\right)\right] \le M_p \\ &Eğer\, \lambda_f > \lambda_r^f && M_{cr}^f \le M_p \end{aligned} \tag{3.63}$$

burada, "λ_f" başlığın narinlik oranını, "λ_p^f" kompakt başlık için narinlik oranı sınır değeri, "λ_r^f" kompakt olmayan başlık için narinlik sınırı, "M_r^f" başlığın sınır burkulma dayanımı, "M_{cr}^f" başlık için yerel burulmalı burkulma kritik elastik moment değeridir.

Enkesit gövdesi için yerel burulmalı burkulma sınır dayanımı aşağıdaki denklemle hesaplanır:

$$\begin{aligned} &Eğer\, \lambda_w \le \lambda_p^w && M_n = M_p \\ &Eğer\, \lambda_p^w < \lambda_w \le \lambda_r^w && M_n = C_b\left[M_p - \left(M_p - M_r^w\right)\left(\frac{\lambda_w - \lambda_p^w}{\lambda_r^w - \lambda_p^w}\right)\right] \le M_p \end{aligned} \tag{3.64}$$

burada, "λ_w" gövde narinlik oranını, "λ_p^w" kompakt gövde için narinlik oranı sınırını, "λ_r^w" kompakt olmayan gövde için narinlik oranı sınırını, "M_r^w" gövdenin sınır burkulma dayanımını temsil eder.

Çift simetri eksenli enkesitlerin kesme dayanımı aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanır.

$$V_n = 0.6F_{yw}A_w \tag{3.65}$$

Burada, "V_n" karakteristik kesme dayanımını, "F_{yw}" akma gerilmesini, "A_w" ise gövde alanını ifade etmektedir.

3.5.3 Deplasman sınırlayıcıları

Kullanılabilirlik sınır durumları için tasarımda taşıyıcı sistemin yer değiştirmelerinin belirli sınırlar dahilinde olması gerekmektedir. ASCE Ad Hoc Komitesi Raporu'nda (1986) maksimum yanal ötelenme değerinin, taşıyıcı sistemin toplam yüksekliğinin *(H)* 1/750'si ile 1/250'si aralığında olmasının makul olduğu ve tavsiye edilen sınır değerin *H*/400 olduğu belirtilmiştir. Buna göre çerçevede en üst kat yanal deplasman sınırlayıcısı şu şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{\Delta_T}{H} - R \leq 0 \tag{3.66}$$

burada "Δ_T" taşıyıcı sistemin en üst kat yanal deplasmanını, "*H*" taşıyıcı sistemin toplam yüksekliğini "*R*" deplasman sınır değerini ifade eder.

Taşıyıcı sistemin katlar arası göreli ötelenme değerlerinin de belirli sınırlar dahilinde olması beklenir. Bu sebeple ardışık iki kat arasındaki yanal deplasman farkının kat yüksekliğine oranının sınır değerden küçük olması istenir. Bu amaçla kullanılan katlar arası göreli ötelenme sınırlayıcısı ise aşağıda verilmiştir:

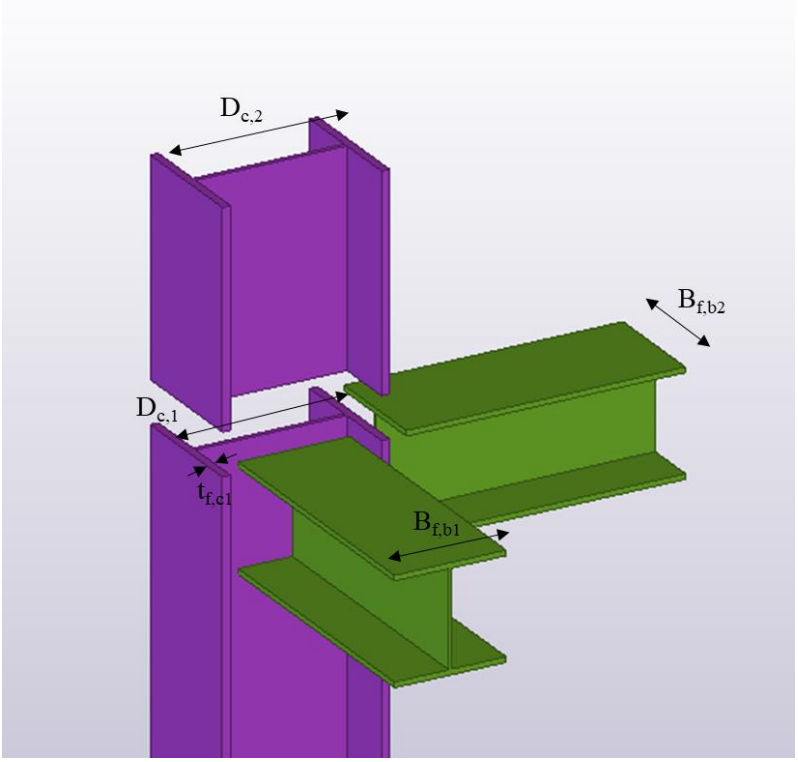
$$\frac{(\Delta_{n+1} - \Delta_n)}{h_n} - R_I \leq 0 \qquad n = 1,2 \dots ns \tag{3.67}$$

burada, "Δ_{n+1}" ve "Δ_n" ardışık katların deplasmanlarını, "*ns*" toplam kat sayısını, "h_n" *n*'inci katın yüksekliğini, "R_I" katlar arası göreli ötelenme için sınır değerini göstermektedir.

3.5.4 Enkesit-boyut sınırlayıcıları

Yapısal optimizasyon problemlerinde, dayanım ve deplasman sınırlayıcılarına ek olarak enkesit-boyut sınırlayıcıları da kullanılmaktadır. Enkesit-boyut sınırlayıcıları düğüm noktalarında elemanların birbirine bağlanma şekline göre enkesit boyutlarını sınırlar. Şekil 3.10'da görüldüğü üzere, uygun bir kolon-kiriş birleşimi oluşturmak için $B_{f,b1}$ kiriş başlık genişliğinin, kolon gövde uzunluğunu gösteren D_c-$2t_{f,c}$ değerinden küçük olması gerekmektedir. Öte yandan $B_{f,b2}$ kiriş başlık genişliğinin, kolon başlık genişliğinden $B_{f,}$ büyük olmaması gerekmektedir.

Uygun bir kolon-kolon birleşimi için ise $D_{c,2}$ kolonunun toplam enkesit yüksekliğinin, kolonunun toplam enkesit yükseklğinden $D_{c,1}$ küçük olması gerekmektedir. Bu çalışmada kolon-kolon birleşimleri için enkesit sınırlayıcıları göz önünde bulundurulmamış sadece kolon-kiriş enkesit sınırlayıcıları dikkate alınmıştır.



Şekil 3.10 Kolon-kiriş ve kolon-kolon birleşimleri için enkesit-boyut sınırları

Bu açıklamalar esas alınarak tez çalışmasında kullanılan enkesit-boyut sınırlayıcıları şu şekilde ifade edilir:

$$g_{g,1} = \frac{B_{f,b1}}{D_{c,1} - 2t_{f,c1}} - 1 \leq 0 \tag{3.68}$$

$$g_{g,2} = \frac{B_{f,b2}}{B_{f,c1}} - 1 \leq 0 \tag{3.69}$$

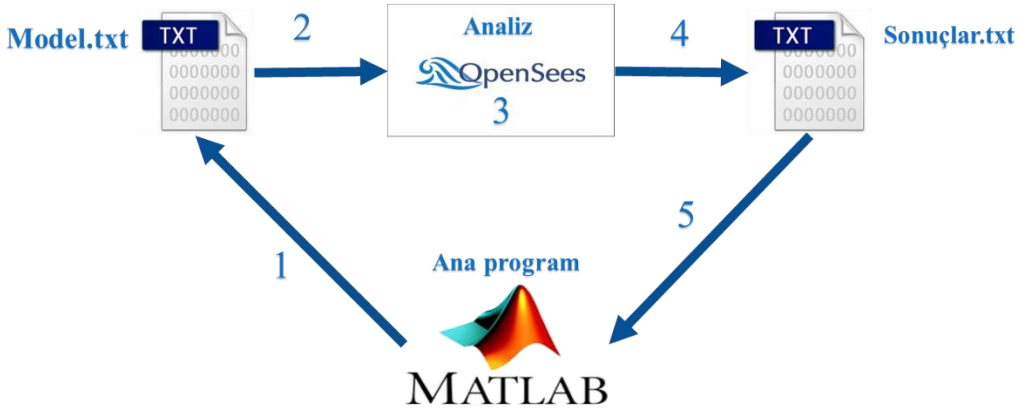
burada, "$B_{f,b1}$" ve "$B_{f,b2}$" sırasıyla birinci ve ikinci kirişin başlık genişliklerini, "$t_{f,c}$" kolon başlığının kalınlığını, "$B_{f,c}$" kolon başlık genişliğini, D_c kolonun enkesit yüksekliğini ifade eder.

3.6 Open System for Earthquake Engineering Simulation (OPENSEES) v2.5.0 Yapısal Analiz Programı

OPENSEES, yapı sistemlerinin statik ve dinamik analizi için kullanılan açık kaynak kodlu sonlu elemanlar yöntemini kullanan ve Amerikan Pasifik Deprem Mühendisliği

Araştırma Merkezi tarafından geliştirilmiş bir yazılımdır. Farklı malzeme modelleri, eleman tipi, çözüm yöntemi ve algoritmalarına sahip geniş kütüphanesi ile yapı sistemlerinin doğrusal veya doğrusal olmayan davranışlarının modellenmesinde kullanıcıya büyük imkanlar tanır. Açık kaynak kodlu olması, yeni malzeme modellerinin ve eleman tiplerinin yanı sıra birçok parametrenin kullanıcı tarafından tanımlanabilmesine fırsat verir.

OPENSEES'in grafik ara yüzü bulunmadığından herhangi bir çerçeve sistemin modeli, düğüm noktası koordinatları, elemanların uç düğüm noktaları, mesnetler, yüklemeler gibi bilgilerin manuel olarak girilmesiyle oluşturulur. Bu durum düzlem çerçeveler için sorun olmazken büyük ölçekli uzay çerçeveler için oldukça elverişsiz olmaktadır. Düzlem çerçeve sistemlerin optimum tasarımında, statik analizlerini icra etmek üzere OPENSEES programı MATLAB ile etkileşimli olarak kullanılmıştır. Programların birbiriyle etkileşimini gösteren diyagram Şekil 3.11'de verilmiştir



Şekil 3.11 MATLAB-OPENSEES arası veri akışı

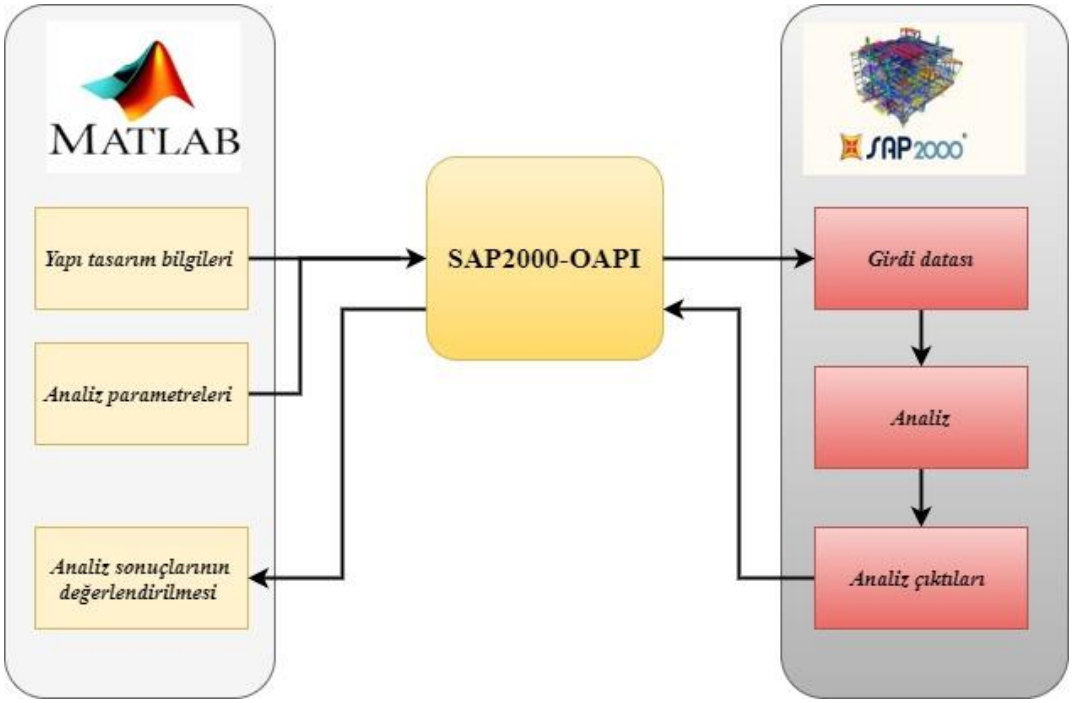
. Bu etkileşim şu adımlardan meydana gelmektedir: (i) yapı modelinin girdi data dosyası, MATLAB tarafından oluşturulur. (ii) OPENSEES programı bu girdi dosyasını okur, (iii) OPENSEES ile yapısal analiz icra edilir. (iv) OPENSEES'ten elde edilen analiz sonuçları bir çıktı dosyasına yazılır. (v) Sonuçlar MATLAB ortamında okunup derlenir. OPENSEES ile çıktısı oluşturulan analiz sonuçları, sadece taşıyıcı elemanların uç kuvvetleri ile düğüm noktası deplasmanlarını kapsar. Dayanım sınırlayıcılarının kontrolü için MATLAB'te ayrıca bir kodlama yapılmıştır.

3.7 SAP2000 Open Application Programming Interface (Açık Uygulama Programlama Ara yüzü, OAPI)

Yapısal analiz programı denildiğinde akla ilk gelen programlardan biri olan SAP2000 kırk yılı aşkın süredir yapı mühendisliği alanında varlığını sürdüren ve yaygın kullanıcı ağına sahip ticari bir yapı analiz yazılımıdır. Grafik ara yüzü sayesinde kompleks yapı sistemlerin modellenmesinde büyük kolaylık sağlayan bu program, hazır enkesit listeleri, farklı tasarım yönetmelik kontrolleri ve farklı çözüm yöntemlerine uygun analiz modülleri gibi özellikleriyle oldukça kullanışlıdır. Buna ek olarak açık kaynak kodlarının derlendiği OAPI özelliği, SAP2000'de yapılan modelleme, analiz, tasarım kontrolü gibi işlemlere belirli programlama dilleri ile kolaylıkla erişilmesini ve çalışma esnasında yazılıma doğrudan bağlantı kurulmasını sağlamaktadır. OAPI ile SAP2000'in işlevselliğini arttıran yeni eklentiler hazırlanabilir, ihtiyaçlara göre tasarlanmış özel uygulamalar ve bu uygulamalara ait ara yüzler geliştirilebilir.

Bu tez çalışmasında uzay çerçeve sistemlerin yapısal analizi için OPENSEES yazılımı yerine SAP2000-OAPI kullanılmıştır. Bunun nedeni, SAP2000 yazılımı ile büyük ölçekli çerçeve sistemlerin modellenmesinin daha pratik olması, deprem ve rüzgâr kuvvetlerinin SAP2000 yazılımındaki hazır yönetmelik modülleri kullanılarak kolaylıkla hesaplanabilmesidir. Ayrıca göz önüne alınan tasarım yönetmeliklerine göre gerekli dayanım kontrollerinin yapılabilmesi tüm bu hesaplamalar için fazladan bir kodlama gerektirmemesi yapısal analizlerin SAP2000 ile yapılmasının bir diğer tercih sebebidir.

Uzay çerçeve sistemlerin yapısal statik analizi için SAP2000-OAPI ile MATLAB etkileşimi Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 MATLAB-SAP2000 etkileşim diyagramı (Sextos ve Balatas, 2011'den değiştirilerek)

Bu diyagrama göre, MATLAB'de hazırlanan yapı tasarım bilgileri, analiz için gerekli parametreler OAPI kodları yardımıyla SAP2000 programına girdi bilgileri olarak aktarılır. SAP2000 programı gelen girdi bilgilerine göre yapı analizi icra edilir. Tasarım için belirlenen yönetmelik kurallarına göre eleman dayanım oranları ve düğüm deplasman değerleri hesaplanır. Yapılan tüm işlemler sonunda elde edilen çıktılar gene OAPI aracılığı ile MATLAB'e aktarılır. Optimizasyon yöntemlerinin kodlarını içeren MATLAB'de, gelen bu bilgilere göre mevcut tasarım sınırlayıcılarının ihlal edilip edilmediği dikkate alınarak cezalandırılmış amaç fonksiyonu hesaplanır. Optimizasyon yöntemi tarafından yeni üretilen çerçeve tasarımı yapısal analizin icrası için tekrar SAP2000'e gönderilir. Optimum tasarım süreci tamamlanıncaya kadar bu işlemler tekrarlanır.

3.8 Çelik Çerçeve Sistemlerin JA Yöntemiyle Optimum Tasarımı

Çelik çerçeve sistemlerin JA ile optimum tasarımında öncelikle popülasyon sayısı *(np)* ve durdurma kriteri için gerekli parametreler belirlenir. Popülasyonu oluşturan her bir tasarım, tasarım değişkeni olarak tanımlanan belirli sayıda *(ng)* eleman grubundan oluşur. Bu eleman gruplarına hazır enkesit listesinde bulunan ve aşağıdaki verilen

denklemler göre rastgele üretilen tam sayı değerlerine karşılık gelen çelik profil enkesitler atanır. Böylelikle başlangıç popülasyonu üretilmiş olur.

$$A_i^k = round\left(A_i^{min} + rand \cdot \left(A_i^{max} - A_i^{min}\right)\right) \tag{3.70}$$

burada "A_i^k" popülasyondaki *k-ıncı* tasarımın *i-nci* tasarım değişkenini, "A_i^{min}" ve "A_i^{max}" hazır enkesit listesindeki maksimum ve minimum enkesitleri, "*rand*", [0,1] arasında rastgele üretilen bir reel sayısı ifade eder.

Popülasyondaki her çerçeve tasarımının analizi için Bölüm 3.6 veya 7'de belirtilen adımlar uygulanır. Elde edilen sonuçlara göre her bir tasarımın cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri (3.37)-(3.69) denklemleri kullanılarak hesaplanır. Küçükten büyüğe doğru sıralanan cezalandırılmış amaç fonksiyonlarından ilk *n* adet tasarım en iyi tasarım vektörüne $\{W_p^{eniyi,1}\ W_p^{eniyi,2} W_p^{eniyi,3}\}$, son *n* adet tasarım en kötü tasarım vektörüne atanır $\{W_p^{enkötü,1}\ W_p^{enkötü,2} W_p^{enkötü,3}\}$. Bu çalışma kapsamında *n* parametresine 1 ile 5 arasında beş farklı değer atanarak optimizasyon işlemi yapılmış ve *n* değerinin 3 olarak alınması uygun görülmüştür. En küçük cezalandırılmış amaç fonksiyonu ($W_p^{eniyi}(A)$), en iyi tasarım vektöründen, en büyük cezalandırılmış amaç fonksiyonu en kötü tasarım vektöründen rastgele seçilir ($W_p^{enkötü}(A)$). Tasarım popülasyonundaki her bir çerçeve sisteme ait tasarım değişkenleri aşağıdaki denklemle modifiye edilir ve yeni tasarımlar oluşturulur. Tasarım değişkenleri hazır listede bulunan ayrık enkesitlerin sıra numarasına göre seçildiğinden oluşturulan yeni tasarım değişkenlerinin tamsayı olması gerekir. Bu sebeple standart JA denklemine yuvarlatma komutu (*round)* eklenmiştir.

$$A_{k,l,t}^{new} = round\left(A_{k,l,it} + r_{1,k,it}\left(A_{k,best,it} - \left|A_{k,l,it}\right|\right) - r_{2,k,it}\left(A_{k,worst,it} - \left|A_{k,l,it}\right|\right)\right) \tag{3.71}$$

Elde edilen yeni tasarımların analiz sonuçlarına göre (3.37)-(3.69) denklemleri kullanılarak yeni tasarımların cezalandırılmış ağırlık fonksiyonları hesaplanır ($W_p^{yeni}(A)$). Yeni tasarımın cezalandırılmış ağırlık fonksiyonu önceki tasarımın fonksiyonundan küçük veya eşitse ($W_p^{yeni}(A) \leq W_p^{önceki}(A)$), yeni tasarım öncekiyle

değiştirilir, büyükse önceki çözüm aynen kalır. Popülasyondaki tüm yeni tasarımlar, önceki tasarımlarla karşılaştırılarak bir döngü tamamlanır. Bu döngü, denklem (3.4)'de verilen durdurma kriteri sağlanıncaya kadar devam eder, durdurma kriteri sağlanınca optimizasyon işlemi tamamlanır. Tasarım sınırlayıcılarını ihlal etmeyen en düşük ağırlık fonksiyonu değerine sahip tasarım, optimum tasarım olarak kaydedilir.

Yukarıda açıklanan çelik çerçeve sistemlerin JA yöntemi ile optimizasyonu için işlem adımları aşağıdaki gibidir:

Adım 1: Popülasyon sayısı *np*, eleman grup sayısı *ng* ve (3.4)'te verilen durdurma kriterini tanımla Başlangıç popülasyonunu ($pop_{başlangıç}$) (çerçeve yapı tasarımlarını) denklem (3.70)'e göre rastgele oluştur. Bu denklem matris formda şu şekilde yazılabilir:

$$pop_{başlangıç} = \begin{bmatrix} A_1^1 & A_2^1 & \dots & \dots & A_{ng}^1 \\ A_1^2 & A_2^2 & \dots & \dots & A_{ng}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_1^{np-1} & A_2^{\mathrm{np}-1} & \dots & \dots & A_{ng}^{np-1} \\ A_1^{np} & A_2^{np} & \dots & \dots & A_{ng}^{np} \end{bmatrix} \tag{3.72}$$

burada, her bir sıra, bir çerçeve tasarımını göstermektedir. Popülasyondaki her bir çerçeve tasarım için cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerini (3.37-3.68) denklemlerini kullanarak elde et. İterasyon sayacını başlat, *it = 0*.

Adım 2: İterasyon sayacını arttır, *it = it+1*.

Adım 3: Popülasyondaki en iyi ve en kötü çerçeve tasarım vektörlerini belirle. Çerçeve tasarım sayacını başlat *ids* = 0, (*ids =1, 2,..np*).

Adım 4: Çerçeve tasarım sayacını bir arttır. (*ids = ids + 1*)

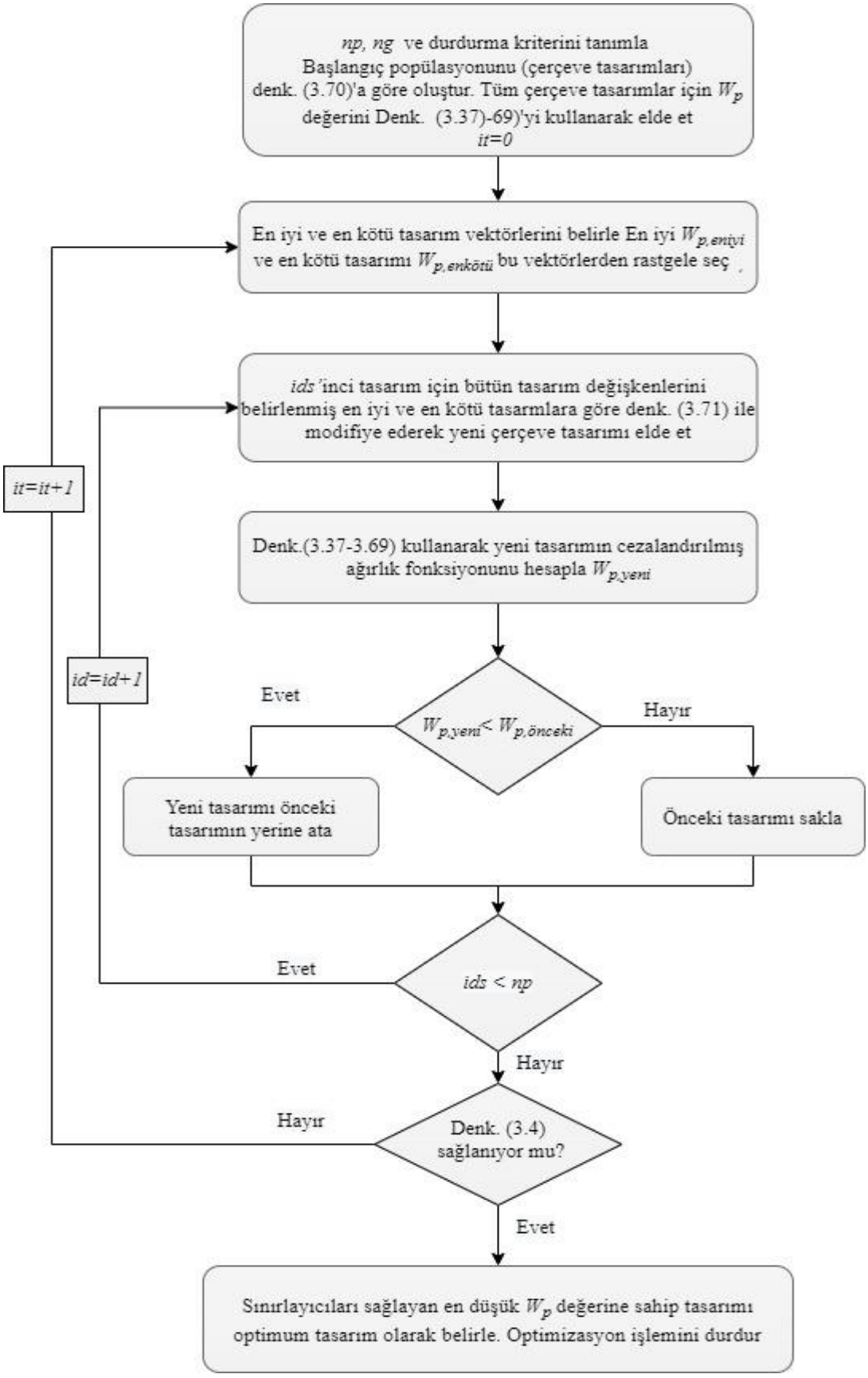
Adım 5: *ids*'inci çerçeve yapının tüm tasarım değişkenlerini denklem (3.71)'i kullanarak güncelle ve yeni tasarımı elde et.

Adım 6: Yeni tasarımların analiz sonuçlarına göre (3.37)-(3.69) denklemlerini kullanarak $W_p^{yeni}(A)$ değerini hesapla. Eğer $W_p^{yeni}(A) \leq W_p^{önceki}(A)$ ise yeni tasarımı öncekinin yerine ata. Aksi durumda önceki tasarımı değiştirmeden bırak.

Adım 7: Eğer *ids* > *np* ise 8. adıma git, aksi durumda 4. adıma git.

Adım 8: Eğer denklem (3.4) sağlanıyorsa ise tüm sınırlayıcıları sağlayan en düşük $W_p(A)$ değerine sahip tasarımı optimum tasarım olarak belirle. Aksi durumda 2. adıma git.

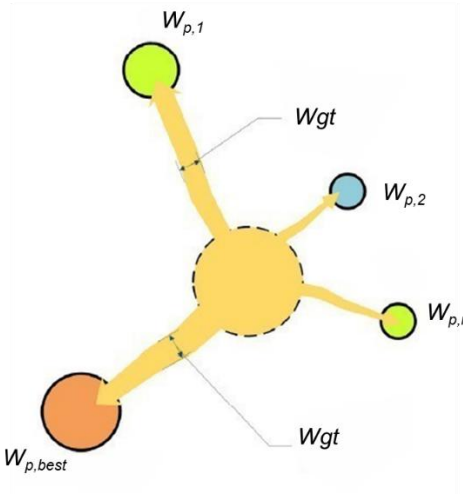
Yukarıda adım adım açıklanan JA ile çelik çerçevelerin optimum tasarım algoritması Şekil 3.13'te sunulmuştur.



Şekil 3.13 Çelik çerçeve sistemlerin JA ile optimum tasarımı için akış diyagramı

3.9 Çelik Çerçeve Sistemlerin SMA Yöntemiyle Optimum Tasarımı

Çelik çerçeve sistemlerin SMA ile optimizasyonunda eleman grubu olarak tanımlanan her bir tasarım değişkeni, SMA'daki konum vektörüne karşılık gelir. Şekil 3.14'te araştırılan uygulanabilir en hafif çerçeve tasarımı ($W_{p,eniyi}$) ise besin yoğunluğu en fazla olan bölgeyi temsil eder.



Şekil 3.14 SMA ile çerçeve sistem optimizasyonu (Li vd., 2020'den değiştirilerek)

Öncelikle JA yönteminde olduğu gibi denklem (3.69) kullanılarak başlangıç popülasyonu oluşturulur. Popülasyondaki her çerçeve tasarımının uygunluk durumunun kontrolü için kullanılacak analiz programına göre bölüm 3.6 veya 3.7'de belirtilen analiz adımları uygulanır. Elde edilen sonuçlara göre her bir tasarımın cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri (3.37)-(3.68) denklemleri kullanılarak hesaplanır. *Koku_indeksi* tüm tasarımlar için hesaplanan cezalandırılmış ağırlık fonksiyonlarının küçükten büyüğe sıralanmış matrisidir ve adını SMA kapsamında besin miktarı fazla olan bölgenin koku yoğunluğunun fazla olması olayından alır. *Koku_indeksi*'nin en küçük elemanı en iyi tasarım (W_p^{eniyi}), en büyük elemanı ise en kötü tasarım ($W_p^{enkötü}$) olarak atanır. Tasarım değişkenlerinin modifiye edilmesi için hesaplanması gereken *Wgt* parametresi aşağıdaki gibidir:

$$\overrightarrow{W_{gt}}(koku_indeksi(i)) = \begin{Bmatrix} 1+r \cdot \log\left(\dfrac{W_{p,eniyi}-W_p(i)}{W_{p,eniyi}-W_{p,enkötü}}+1\right); Eğer\ i \le \dfrac{np}{2} \\ 1-r \cdot \log\left(\dfrac{W_{p,eniyi}-W_p(i)}{W_{p,eniyi}-W_{p,enkötü}}+1\right); Eğer\ i > \dfrac{np}{2} \end{Bmatrix} \quad (3.73)$$

Burada "$\overrightarrow{Wgt}(koku_indeksi(i))$", *i*-inci tasarımın *koku_indeksi* matrisindeki sıra numarasına karşılık gelen algoritmaya özgü bir parametreyi, "*r*" [0,1] aralığında rastgele üretilmiş bir reel sayıyı, "$W_p(i)$" *i'*nci tasarımın cezalandırılmış ağırlık değerini ifade eder. Algoritmanın bir diğer parametresi olan *vb,* [*-a,a*] arasında rastgele salınım yapar ve iterasyon sayısına bağlı olarak kademeli bir şekilde sıfıra yakınsar.

$$a = \operatorname{arctanh}\left(-\left(\frac{iter}{iter_{max}}\right)+1\right) \tag{3.74}$$

$$p = tanh\,|W_p\,(i)\; -\; DF| \tag{3.75}$$

"*vc*", 1'den başlayıp doğrusal bir şekilde sıfıra yakınsayan iterasyon sayısına bağlı bir değişkendir. "*z''*, bu çalışma kapsamında 0.03 olarak tanımlanmıştır. "p'' değişkeni optimizasyon sürecinin keşif bölgesine yönlendirilmesinde kullanılan bir karşılaştırma operatörüdür. Denklem (3.75)'te kullanılan "DF" mevcut iterasyona kadar elde edilmiş en iyi tasarımı ifade eder. Rastgele üretilen reel sayı r_2, p'den büyük veya eşitse arama uzayının sömürüsü, küçük ise arama uzayının keşfi söz konusudur. Buna bağlı olarak kullanılan modifiye denklemleri şu şekildedir:

$$\mathrm{A}_{i,j}^{yeni} = \begin{cases} round\left(A_{min} + r_3 \cdot (A_{max} - A_{min})\right) & e\check{g}er\ r_1 < z \quad (3.76) \\ round\left(A_{eniyi,j} + \overrightarrow{vb} \cdot \left(\overrightarrow{Wgt} \cdot A_{A,j} - A_{B,j}\right)\right) & e\check{g}er\ r_2 < p \quad (3.77) \\ round\left(\overrightarrow{vc} \cdot A_{i,j}\right) & e\check{g}er\ r_2 \geq p \quad (3.78) \end{cases}$$

Burada, "r_1", "r_2" ve "r_3" [0,1] aralığında rastgele üretilmiş reel sayıları, "$A_{eniyi,j}$" popülasyondaki en iyi tasarımın *j*-inci tasarım değişkenini, "$A_{A,j}$" ve "$A_{B,j}$" rastgele seçilen iki tasarımın *j'*inci tasarım değişkenini, "$\overrightarrow{vb}$" ve "$\overrightarrow{vc}$" iterasyon sayısına bağlı parametreleri, "$A_{i,j}$" *i*'nci tasarımın *j*'inci tasarım değişkenini, "$\overrightarrow{W}gt$" en iyi tasarıma (besine) ulaşmak için hesaplanan parametreyi, $\mathrm{A}_{i,j}^{yeni}$ ise modifiye edilmiş tasarım değişkenini ifade eder. Standart SMA formülü, sürekli tasarım değişkenli optimizasyon problemlerine göre hazırlanmıştır. Bu sebeple formüle eklenen "*round*" ile, denklem sonucu elde edilen reel sayılar tam sayı olarak yukarı yuvarlanarak SMA

yöntemini ayrık tasarım değişkenli bir tasarım problemi olan çelik çerçeve sistemlerin optimum tasarımına uygun hale getirmiştir.

Elde edilen yeni tasarımların statik analizleri yapıldıktan sonra uygunluk durumlarına bağlı olarak cezalandırılmış ağırlık fonksiyonları (3.37)-(3.69) denklemlerine göre hesaplanır. Popülasyonun *koku_indeksi* oluşturulup $W_{p,eniyi}$ ve $W_{p,enkötü}$ değerleri bulunur. Burada eğer $W_{p,eniyi}$ değeri *DF*'den küçük ise *DF*'nin yeni değeri $W_{p,eniyi}$ olur. Bu işlemler maksimum iterasyon sayısına ulaşıncaya kadar tekrar eder. Maksimum iterasyon sayısına ulaşıldığında ise optimizasyon işlemi tamamlanır ve son elde edilen *DF* değeri optimum tasarım olarak belirlenir. Çelik çerçeve sistemlerin SMA yöntemi ile optimum tasarımının işlem adımları aşağıdaki gibidir:

Adım 1: Popülasyon sayısı ve maksimum iterasyon sayısı değerlerini gir. Başlangıç popülasyonunu (çerçeve yapılar) oluştur. Cezalandırılmış amaç fonksiyonunu $W_p(A)$ dayanım, deplasman ve enkesit-boyut sınırlayıcıları denklemlerini kullanarak hesapla. $W_p(A)$'yı küçükten büyüye doğru sıralayarak *koku_indeksi*ni hesapla. En hafif ve en ağır tasarımı belirle.

Adım 2: İterasyon sayacını başlat. *it=it+1.*

Adım 3: Wgt değerini denklem (3.73)'e göre, *a* değerini de denklem (3.74)'e göre hesapla.

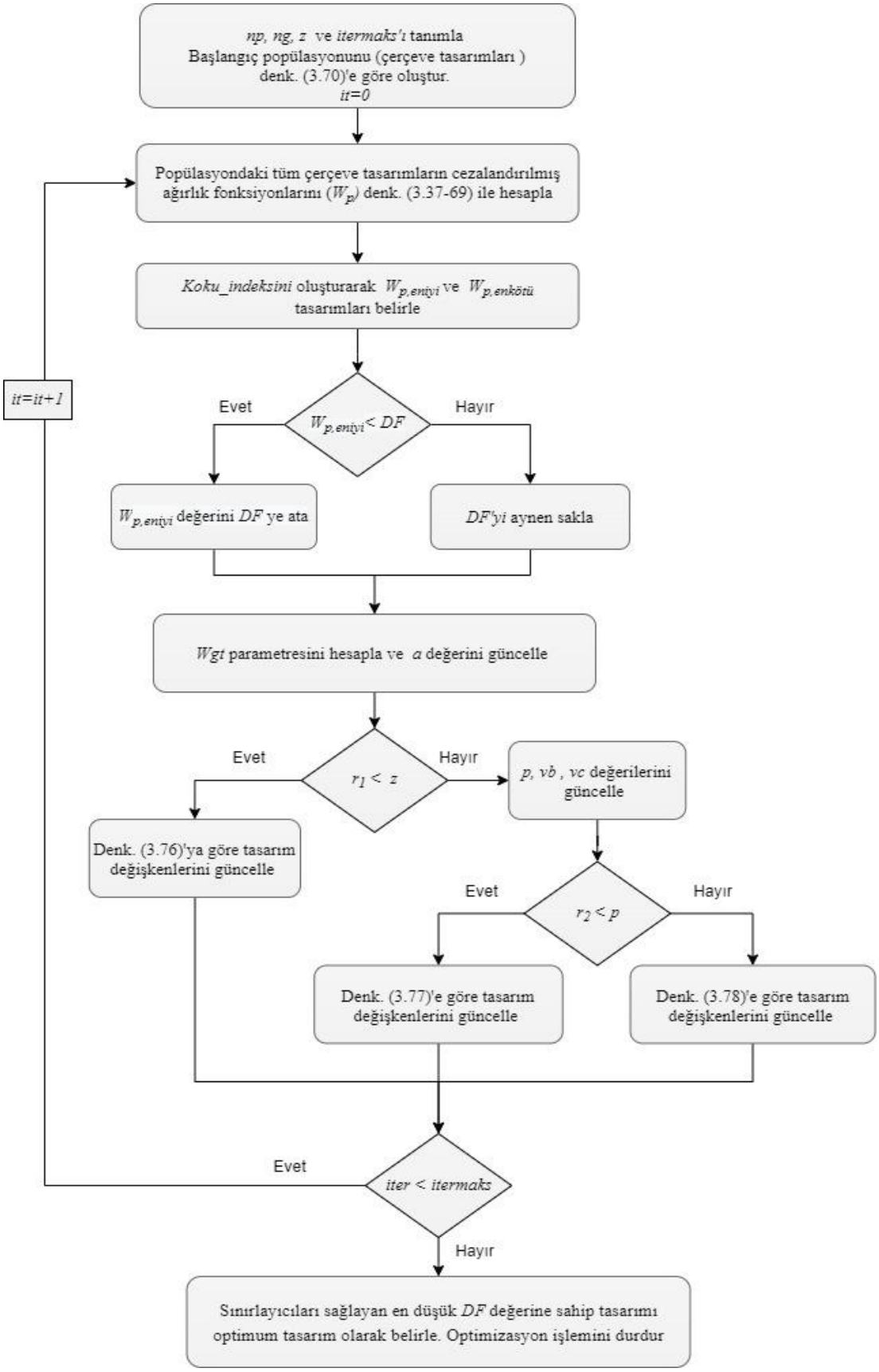
Adım 4: Rastgele üretilen değeri (r_1), *z* ile karşılaştır. Denklem (3.76-78)'deki koşullara göre *i'nci* tasarımın, tasarım değişkenlerini modifiye et.

Adım 5: Modifiye edilen tasarım değişkenlerini kullanarak üretilen her bir tasarımın cezalandırılmış ağırlık değerlerini $W_p(A^{yeni})$ hesapla. Popülasyondaki en iyi ve en kötü tasarımları belirle.

Adım 6: Eğer iterasyondaki en iyi tasarım ($W_{p,eniyi}(A)$) o iterasyona kadar bulunan en iyi tasarımdan (*DF)* hafifse *DF*'yi iterasyondaki en iyi tasarım $W_{p,eniyi}(A)$ ile değiştir, değilse aynen sakla.

Adım 7: Maksimum iterasyon sayısına ulaşınca optimizasyon işlemini durdur. Sınırlayıcıları sağlayan en hafif tasarımı optimum tasarım olarak belirle. Aksi durumda *Adım 2*'ye git.

Yukarıda adım adım açıklanan SMA yöntemi akış diyagramı olarak Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.15 Çelik çerçeve sistemlerin SMA ile optimum tasarımı için akış diyagramı

3.10 Çelik Çerçeve Sistemlerin HSMJA Yöntemiyle Optimum Tasarımı

Bu tez kapsamında JA ve SMA'nın beraber kullanılmasıyla her ikisinden de daha güçlü olan bir hibrit yöntem olan HSMJA ile daha güçlü bir yakınsama davranışı, keşif ve sömürü bölgeleri arasındaki dengeyi iyileştirmek ve en iyi tasarımı elde etmede daha etkili bir arama yapılması amaçlanmıştır.

HSMJA'da standart SMA algoritmasındaki rastgele oluşturulan r_1 sayısının z ile karşılaştırılmasına ek olarak gr sabiti eklenmiştir. gr, her iterasyon için kullanılacak algoritmayı belirleyen baskınlık oranıdır. Yapılan hesaplar sonucunda çelik çerçeve sistemlerin optimizasyonu için bu sabitin 0.7 olarak tanımlanmasının uygun olacağına karar verilmiştir. Bu durumda, r_1 sayısı z'den büyük aynı zamanda 0.7'den küçükse, SMA algoritması, 0.7'den büyükse JA algoritması denklemleri kullanılır. Çelik çerçeve sistemlerin HSMJA ile optimum tasarımı aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır.

Adım 1: Popülasyon sayısı ve maksimum iterasyon sayısı değerlerini gir. Başlangıç popülasyonunu (çerçeve yapıları) oluştur. Cezalandırılmış amaç fonksiyonunu $W_p(A)$ dayanım, deplasman ve enkesit-boyut sınırlayıcıları denklemlerini kullanarak hesapla. $W_p(A)$'yı küçükten büyüye doğru sıralayarak *koku_indeksi*ni oluştur. En hafif ve en ağır tasarımı belirle.

Adım 2: İterasyon sayacını başlat. *it=it+1*.

Adım 3: Wgt değerini denklem (3.73)'e göre, *a* değerini de denklem (3.74)'e göre hesapla.

Adım 4: Rastgele bir reel sayı üret (r_1) ve z ile karşılaştır. Eğer $r_1 < z$ ise Denklem (3.76)'ya göre *i'nci* tasarımın tasarım değişkenlerini modifiye et.

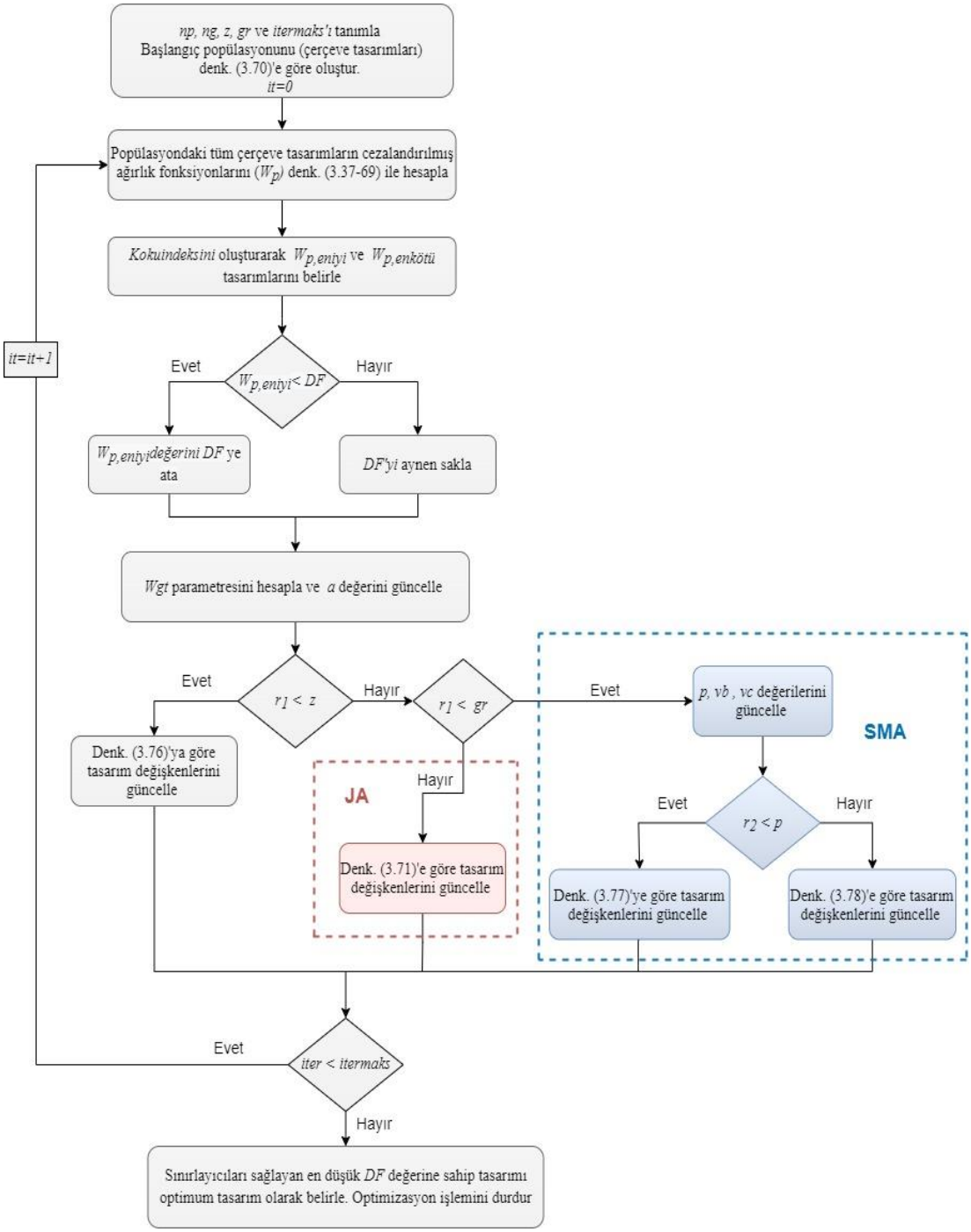
Adım 5: Eğer $r_1 \geq z$ ise, r_1 sayısını baskınlık oranı (gr) ile karşılaştır. Eğer $r_1 > gr$ ise JA'ya ait denklem (3.70)'e göre tasarım değişkenlerini modifiye et. Eğer $r_1 \leq gr$ ise SMA'ya ait (3.77) veya (3.78) denklemlerime göre tasarım değişkenlerini modifiye et.

Adım 5: Modifiye edilen tasarım değişkenlerini kullanarak üretilen her bir tasarımın cezalandırılmış ağırlık değerlerini $W_p(A^{yeni})$ hesapla. Popülasyondaki en iyi ve en kötü tasarımları belirle.

Adım 6: Eğer iterasyondaki en iyi tasarım ($W_{p,eniyi}(A)$) o ana kadar bulunan en iyi tasarımdan (*DF)* hafifse *DF*'yi $W_{p,eniyi}(A)$ ile değiştir, değilse aynen sakla.

Adım 7: Maksimum iterasyon sayısına ulaşınca optimizasyon işlemini durdur. Sınırlayıcıları sağlayan en hafif tasarımı optimum tasarım olarak belirle. Aksi durumda *Adım 2*'ye git.

Yukarıda adım adım açıklanan HSMJA için akış diyagramı, Şekil 3.16'daki gibidir.



Şekil 3.16 Çelik çerçeve sistemlerin HSMJA ile optimum tasarımı için akış diyagramı

3.11 Çelik Çerçeve Sistemlerin Optimum Tasarımı için Paralel Hesaplama Yöntemi

Paralel hesaplama, bir işlemin işlemciler arasında eş zamanlı olarak paylaştırılması veya bir ana bilgisayar ile bir işlemin aynı ağ üzerindeki yardımcı bilgisayarlara dağıtılması ve çift yönlü veri akışının sağlanmasıyla oluşturulan bir sistemdir. Bu sistem, işlem yoğunluğu fazla olan büyük ölçekli problemlerin çözümünde kolaylık sağlar. Çelik çerçeve sistemlerin optimizasyonu konusunda işlem yoğunluğunun en fazla olduğu aşama, çerçevelerin statik analizinin yapıldığı aşamadır. Çerçevenin eleman sayısı, yükleme sayısı, yük kombinasyonu sayısı ne kadar fazla olursa çözüm için hesaplanması gereken matrisin büyüklüğü, elemanların dayanım oranı, düğüm noktası deplasmanları ve katlar arası göreli ötelenmelerinin hesaplanmasına bağlı olarak işlem yoğunluğu ve süresi o kadar fazla olur.

Büyük (gerçek) ölçekli çelik çerçeve sistemlerin optimum tasarımında popülasyondaki her tasarımın sınırlayıcı kontrolünün yapılması için SAP2000 kullanılarak statik analizinin yapılması gerekmektedir. Taşıyıcı eleman sayısı, yükleme tipi ve yükleme kombinasyonu sayısı gibi etkenlere bağlı olarak işlem yoğunluğu ve süresi artan analizlerin optimizasyon sürecinde binlerce kez tekrar edileceği düşünüldüğünde ciddi bir zaman maliyeti oluşturacağı açıktır. Bu durumun üstesinden gelebilmek için çevrimiçi bir paralel hesaplama yöntemi hazırlanmıştır. Bu yöntemin amacı, optimizasyon sürecinde bir popülasyonda üretilen tasarım bilgilerini, çevrimiçi ağ üzerindeki her bir yardımcı bilgisayara eş zamanlı dağıtıp statik analizlerini yaptırarak işlem yoğunluğunu azaltmaktır. Her bir tasarım birbirinden bağımsız olduğu için bu ayrık hesaplama işlemi optimum tasarıma yakınsama sürecini etkilemez. Bu yöntem; ana (master) bilgisayar, yardımcı (slave) bilgisayarlar, çevrimiçi veri tabanı olarak kullanılan Google Sheets ve bunlar arasındaki iletişimi sağlamak için tanımlanmış MATLAB bağlantı kodları olmak üzere dört temel unsurdan oluşur. Bu unsurlar aşağıdaki gibidir:

Ana bilgisayar: Optimizasyon sürecinin yönetildiği birimdir. Kullanılan optimizasyon yönteminin ana denklemleri bu birimde işlenir. Başlangıç popülasyonun üretilmesi, tasarımların yardımcı bilgisayarlara dağıtımı, analiz sonuçlarının

derlenmesi ve tasarım değişkenlerinin modifiye edilerek yeni tasarımların elde edilmesinden sorumludur.

Yardımcı bilgisayar: Ana bilgisayar tarafından oluşturulan her bir tasarımın cezalandırılmış ağırlık fonksiyonunun hesaplandığı birimdir. Çevrimiçi veri tabanından okunan tasarımlar, SAP2000 programı yardımıyla analiz edilir, tasarım kontrolü yapılır ve cezalandırılmış ağırlık fonksiyonu değeri hesaplanır.

Çevrimiçi veri tabanı: Ana ve yardımcı bilgisayarlar arasındaki veri alış-verişinin yapıldığı birimdir. Bu çalışma kapsamında çevrimiçi veri tabanı olarak Google Sheets API (Google E-tablo Uygulama Programlama Ara Yüzü) kullanılmıştır. Bu uygulama, MATLAB ve Python dahil birçok programlama dili ile çevrimiçi tablolara veri yazma, okuma ve değiştirme imkânı sunar. Tasarım değişkenleri ve cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerleri, bu tablolara yazılır.

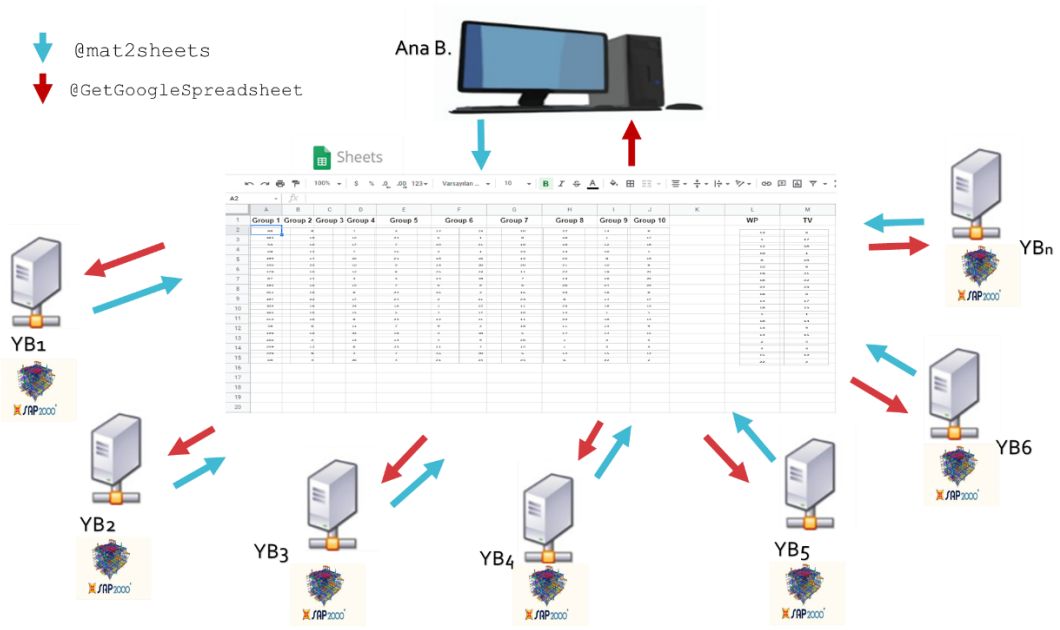
Bağlantı fonksiyonları*:* Ana ve yardımcı bilgisayarların, çevrimiçi veri tabanı ile iletişimini sağlayan aracı fonksiyonlardır. Tasarım değişkenlerinin ve cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerlerinin veri tabanına yazılması ve okunmasını sağlayan bu fonksiyonlar aşağıdaki gibidir:

matlab2sheets (MATLAB to Google Sheets): Bogaard (2021) tarafından geliştirilen bu fonksiyon, Google Sheets API uygulamasındaki çevrimiçi tablolara MATLAB üzerinden veri aktarılmasını veya tablodaki mevcut verilerin değiştirilmesini sağlar.

*GetGoogleSpreadshee*t: Daniel (2021) tarafından MATLAB programlama dilinde yazılan bu fonksiyon, Google Sheets API çevrimiçi tablolarından MATLAB'e veri aktarılmasını sağlar.

Hazırlanan paralel optimizasyon algoritmasına ait veri akış şeması Şekil 3.17'de verilmiştir. Bu algoritma, herhangi bir sezgisel optimizasyon yöntemi ile kolayca entegre edilebilir şekilde kodlanmıştır. Düzlem çelik çerçevelerin küçük ölçekli olması nedeniyle paralel hesaplama yöntemi sadece uzay çelik çerçeveler için kullanılmıştır.

Bu yöntem kapsamında paralelleştirme işlemi çevrimiçi olarak yapıldığından, internete bağlı ve gerekli programların yüklü olduğu her bilgisayar, yardımcı bilgisayar olarak tanımlanabilir. Oluşturulan konfigürasyonda yardımcı bilgisayar sayısı arttırılıp azaltılabilir. Bu tez çalışmasında, 10 adet yardımcı bilgisayar kullanılmıştır.



Şekil 3.17 Çevrimiçi paralelleştirilmiş optimizasyon şeması

3.12 Paralelleştirilmiş Hibrit Cıvık Mantar-Jaya Algoritması (PHSMJA) ile Uzay Çerçeve Sistemlerin Optimum Tasarımı

Paralel hesaplama yönteminin Bölüm 3.2.7'de detayları verilmiş olan HSMJA algoritmasına entegre edilmesiyle PHSMJA yöntemi elde edilmiştir. Standart HSMJA işlem adımlarından farklı olarak cezalandırılmış ağırlık değerleri hesabı için oluşturulan tasarım değişkenleri ana bilgisayardan yardımcı bilgisayarlara dağıtılır. PHSMJA kullanılarak oluşturulan optimizasyon programı, ana ve yardımcı bilgisayarlar için ayrı ayrı kodlanmış iki bölümden oluşur. Bu kodlamaların işlem adımları aşağıda verilmiştir.

1- Ana bilgisayarda, kullanılacak optimizasyon yöntemi için gerekli parametreler girilir ve başlangıç popülasyonu üretilir. Çelik çerçeve sistemlerin optimizasyonunda

tasarım değişkenleri, hazır enkesit listesindeki sıra numaraları ile eşleştirilerek belirlenir.

2- Ana bilgisayar, başlangıç popülasyonundaki her bir tasarım değişkeni, Google Sheets API'de açılan çevrimiçi tablonun ilgili hücresine, *mat2sheets* fonksiyonu kullanılarak yazdırılır. Çevrimiçi tablodaki her bir satır, popülasyondaki her bir tasarımı temsil eder.

3- Yardımcı bilgisayarın her biri, çevrimiçi tabloda kendisi için belirlenmiş satırdaki hücrelerde veri (tasarım değişkeni) olup olmadığını *getgooglespreadsheet* fonksiyonu ile periyodik olarak kontrol eder. Eğer varsa, o satırdaki verileri *getgooglespreadsheet* ile alıp enkesit listesinde karşılık gelen çelik profil enkesiti eleman gruplarına atayarak SAP2000 programı yardımıyla statik analizini yapar, sınırlayıcı ihlallerini belirler ve cezalandırılmış ağırlık fonksiyonu değerlerini *mat2sheets* fonksiyonuyla çevrimiçi tablonun ilgili satırının sonuna yazar.

4- Ana bilgisayar, çevrimiçi tabloda her bir tasarımın cezalandırılmış ağırlık fonksiyonu değerinin yazdırıldığı hücresini *getgooglespreadsheet* fonksiyonu ile periyodik olarak kontrol eder. Tüm tasarımlara ait değerlerin yazdırılması tamamlandığında sonuçları otomatik olarak alır ve hücreleri siler. Popülasyondaki en iyi ve en kötü çözüm belirlenir. Elde edilen en iyi tasarım $W_{p,eniyi}$ o iterasyona kadar elde edilen en iyi tasarım değerinden (DF) küçük ise $DF = W_{p,eniyi}$ olarak güncellenir.

5- Ana bilgisayar, HSMJA optimizasyon yöntemine ait modifikasyon denklemleri olan (3.70)-(3.78) denklemleri ile yeni tasarım değişkenlerini oluşturup çevrimiçi tabloya *mat2sheets* fonksiyonu kullanarak tekrar işler.

6- Durdurma kriteri sağlandığında optimizasyon işlemi sona erer ve sınırlayıcıları sağlayan en düşük ağırlığa sahip tasarım, optimum tasarım olarak raporlanır. Aksi durumda 3. adıma gidilir ve döngü devam eder.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Düzlem Çelik Çerçeve Sistemlerin JA, SMA ve HSMJA Yöntemleri ile Optimum Tasarımı

JA, SMA ve HSMJA yöntemlerinin düzlem çelik çerçevelerin optimizasyonu konusunda geçerliliğini test etmek için daha önce literatürde kullanılan tek açıklı-on katlı düzlem çelik çerçeve, üç açıklıklı-on beş katlı düzlem çelik çerçeve, üç açıklıklı-yirmi dört katlı düzlem çelik çerçeve ile 224 elemanlı çaprazlı düzlem çelik çerçeve olmak üzere dört farklı tasarım örneği optimize edilmiş ve elde edilen sonuçlar diğer sezgisel yöntemlerle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Optimum tasarımda yapısal analizler OPENSEES analiz programına yaptırılmış ve ana programa entegre edilmiştir. Optimizasyon işlemi için oluşturulan ana program ise MATLAB programlama dilinde kodlanmıştır.

Bu tez kapsamında önerilen algoritmalar, her düzlem tasarım örneği için 20 farklı kez icra edilmiş ve tasarım sınırlayıcılarını sağlayan en hafif çelik çerçevenin elde edildiği icra sonucundaki ağırlık değeri ile bu ağırlığı elde etmek için gerekli yapısal analiz sayısı tablolarda verilmiştir. Öne sürülen yöntemlerden elde edilen sonuçların tutarlılığını değerlendirmek üzere 20 farklı icra sonucunda elde edilen tasarımlara ait ortalama ağırlık, en kötü ağırlık ve standart sapma (STD) gibi istatistiksel parametreler ve sınırlayıcı ihlal yüzdeleri tablolarda sunulmuştur. Ayrıca, optimum tasarımların taşıyıcı elemanlarının dayanım oranları, katlar arası göreli ötelenme oranları grafiklerde sunulmuştur.

Düzlem çelik çerçeve sistemlerin optimizasyonu için önerilen algoritmaların en uygun popülasyon sayısının belirlenmesi için tek açıklı-on katlı düzlem çerçeve örneğinin 10, 20, 30, 40 ve 50 popülasyon sayısı ile optimizasyonu yapılmış ve elde edilen optimum ağırlık değerleri ile yapı analiz sayıları Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 Tek açıklıklı-on katlı düzlem çelik çerçevenin farklı popülasyon sayılarına göre optimum tasarım sonuçları

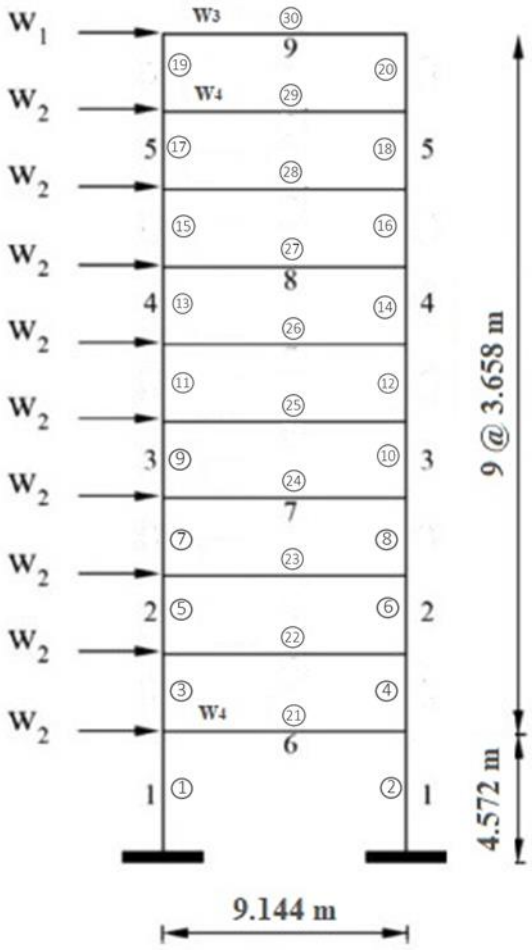
Popülasyon sayısı (np)	Tek açıklıklı-on katlı düzlem çelik çerçeve					
	JA		SMA		HSMJA	
	Ağırlık (kg)	Yapı analiz sayısı	Ağırlık (kg)	Yapı analiz sayısı	Ağırlık (kg)	Yapı analiz sayısı
10	29743	9848	30844	12522	30107	10732
20	**29202**	**10256**	31058	10487	31262	13393
30	29364	16957	29216	12478	29370	12343
40	29937	12543	**29098**	**12174**	**29165**	**11528**
50	30844	11258	29574	13491	29937	12642

Tablo 4.1'de görüldüğü üzere, düzlem çerçevelerin optimum tasarımında en uygun popülasyon sayısı JA için 20, SMA ve HSMJA için ise 40 olarak belirlenmiş ve diğer düzlem çerçeve örnekleri için de aynı değerler kullanılmıştır. Ceza fonksiyonlarının hesabında kullanılan ceza sabiti (ε) değeri, her üç yöntemde 1 olarak alınmıştır. SMA ve HSMJA yöntemlerinde rastgeleliği sağlayan *z* parametresinin değeri 0.03 olarak belirlenmiş, HSMJA yönteminde *gr* baskınlık oranı 0.7 olarak tanımlanmış, JA yönteminde en iyi ve en kötü çözüm vektörlerin uzunluğunu belirten n değeri 3 olarak alınmıştır.

4.1.1 Tek açıklıklı-on katlı düzlem çerçeve

Bu tez çalışmasında sunulan ilk tasarım örneği literatürde yaygın olarak kullanılan tek açıklı on katlı düzlem çelik çerçevedir. Çelik çerçeveye ait yükleme durumu, taşıyıcı eleman gruplandırması, eleman numaralandırılması ve sistem geometrisi Şekil 4.1'de verilmiştir. Taşıyıcı eleman sayısı 30 olan sistemin elemanları ardışık iki katın kolonları ve ardışık üç katın kirişleri aynı gruba dahil olacak şekilde 9 farklı eleman grubuna (tasarım değişkeni) ayrılmıştır. Çerçevenin maruz kaldığı yükler, yatay doğrultuda kat seviyelerine etki eden w_1=2.224 kN ve w_2=4.448 kN tekil yükler, düşey doğrultuda ise çatı ve normal kat kirişlerine etki eden sırasıyla w_3=43.782 kN/m ve w_4=87.563 kN/m üniform yayılı yükler şeklindedir. Kirişler, AISC'deki 267 adet hazır W enkesitin bulunduğu listeden, kolonlar ise bu liste içinde W12 ve W14 olan enkesitler arasından seçilecek şekilde tanımlanmıştır. Kolonların, yanal ötelenmesi

önlenmediği kabul edilirken kirişlerin yanal ötelenmesi önlenmemiş uzunluğu ise açıklık uzunluğunun 1/5'i olarak göz önüne alınmıştır.



Şekil 4.1 Tek açıklıklı-on katlı düzlem çelik çerçeve

Literatürde bu tasarım örneği iki farklı tasarım sınırlayıcıları kullanılarak optimize edilmiştir. Birinci durumda AISC-LRFD yönetmeliğindeki dayanım sınırlayıcıları ve katlar arası göreli ötelenme oranının kat yüksekliğinin 1/300'ünden küçük olması sınırlayıcısı kullanılırken ikinci durumda ise AISC-LRFD yönetmeliğindeki dayanım sınırlayıcıları ile beraber en üst kat en büyük deplasman değerinin çerçeve yüksekliğinin 1/300'ünden küçük olması sınırlayıcısı kullanılmıştır. Bu çalışmada, her iki durum göz önünde bulundurularak iki farklı optimizasyon yapılmıştır.

I. ve II. optimizasyon durumları için JA, SMA ve HSMJA ile elde edilen sonuçlar Tablo 4.2 ve 4.3'te verilen GA (Pezeshk vd., 2000), ACO (Camp vd., 2005), HS (Değertekin, 2008), SGA (Carraro vd., 2017), HBMO ve EHBMO (Maheri vd., 2017)

ve SBO (Farshchin vd., 2018) yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. I. durumda, JA ile 10256 analiz sonunda 29202 kg, SMA ile 12187 analiz sonunda 29098,41 kg ve HSMJA ise 11528 analiz sonunda 29165.08 kg ağırlığında optimum tasarım bulunmuştur. SMA ile elde edilen optimum tasarım, SBO'ya ait optimum tasarımdan %0.18 daha ağır olmasına rağmen gerekli analiz sayısı, ortalama ağırlık ve özellikle standart sapma değerleri açısından SMA sonuçlarının daha iyi olduğu görülmektedir. HBMO ve EHBMO yöntemleriyle elde edilen sonuçları için sınırlayıcı kontrolü yapıldığında tasarım sınırlayıcılarının sırasıyla %155 ve %78.9 oranında ihlal edildiği saptanmıştır. Söz konusu yöntemler dışındaki diğer yöntemlerin ise sınırlayıcıları tam olarak sağladığı görülmüştür.

Tablo 4.2 Tek açıklıklı-on katlı düzlem çelik çerçevenin optimum tasarım sonuçlarının karşılaştırılması (I. optimizasyon durumu)

	GA (Pezeshk vd., 2000)	SBO (Farshchin vd., 2018)	HBMO (Maheri vd., 2017)	EHBMO (Maheri vd., 2017)	JA	**SMA**	HSMJA
1	W14×233	W14×233	W14×159	W14×159	W14×233	**W14×233**	W14×233
2	W14×176	W14×176	W14×159	W14×159	W14×176	**W14×176**	W14×176
3	W14×159	W14×159	W14×159	W14×132	W14×159	**W14×159**	W14×159
4	W14×99	W14×99	W14×159	W14×109	W14×99	**W14×99**	W14×99
5	W12×79	W14×61	W14×145	W14×90	W14×68	**W12×65**	W14×68
6	W33×118	W33×118	W21×73	W24×94	W33×118	**W33×118**	W33×118
7	W30×90	W30×90	W21×73	W24×94	W30×90	**W30×90**	W30×90
8	W27×84	W27×84	W24×76	W18×76	W27×84	**W24×84**	W24×84
9	W24×55	W18×46	W24×76	W24×62	W18×46	**W21×44**	W21×44
En iyi ağırlık (kg)	29545.19	29046.82	27675.49	26178.63	29202	**29098.41**	29165.08
Yapı analiz sayısı	*	12691	1823	1340	10256	**12187**	11528
Ortalama ağırlık (kg)	*	29882.67	*	*	29589.92	**29242.88**	29402
En kötü ağırlık (kg)	*	*	*	*	30284.79	**29495.79**	30285.35
STD (kg)	*	377.39	*	*	448.1994	**133.36**	408
En büyük katlar arası ötelenme oranı	0.0033	0.0033	0.00851	0.00596	0.00330	**0.0033**	0.0033
Katlar arası ötelenme sınırı	0.00333	0.00333	0.00333	0.00333	0.00333	**0.00333**	0.00333
Dayanım oranı	0.967	1	1.91	1.438	0.968	**0.998**	0.968
En büyük sınırlayıcı ihlal yüzdesi (%)	-	-	155.1	78.9	-	-	-

II. durumda, JA ile 7688 sonunda 28399.42 kg, SMA ile 9721 analiz sonunda 28317.77 kg ve HSMJA ise 6933 analiz sonunda 28385.36 kg ağırlığında optimum tasarım bulunmuştur. SMA ile SBO elde edilen optimum tasarımlar aynı olup, tüm yöntemler arasında bulunan en hafif tasarımdır ancak SBO'nun optimum tasarımı bulmak için gerekli analiz sayısı 11677 iken, SMA 9721 yapı analizi sonunda aynı değeri bulmuştur. İstatistiksel sonuçlar incelendiğinde HSMJA yöntemine ait standart sapma ve ortalama ağırlık değerlerinin diğer tüm yöntemlere göre daha iyi olduğu görülmektedir. HS ve SGA yöntemleriyle daha hafif tasarımlar elde edilmesine karşın

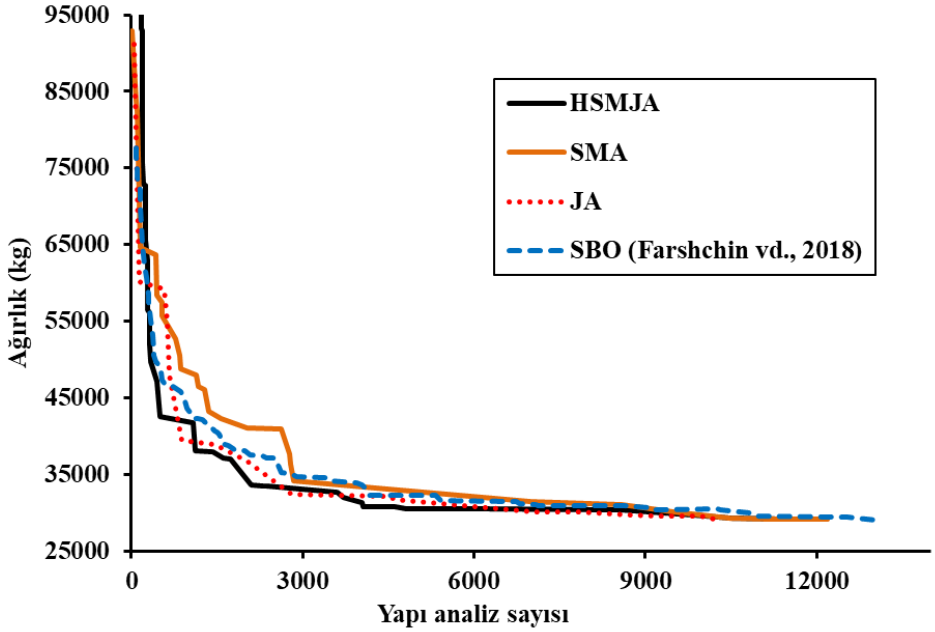
bu yöntemler dayanım sınırlayıcılarını %5.02 ve %1.48 oranında ihlal ettiklerinden dolayı tasarım sınırlayıcılarını sağlayan diğer yöntemlerle kıyaslanmaları mümkün değildir.

Tablo 4.3 Tek açıklıklı-on katlı düzlem çelik çerçevenin optimum tasarım sonuçlarının karşılaştırılması (II. optimizasyon durumu)

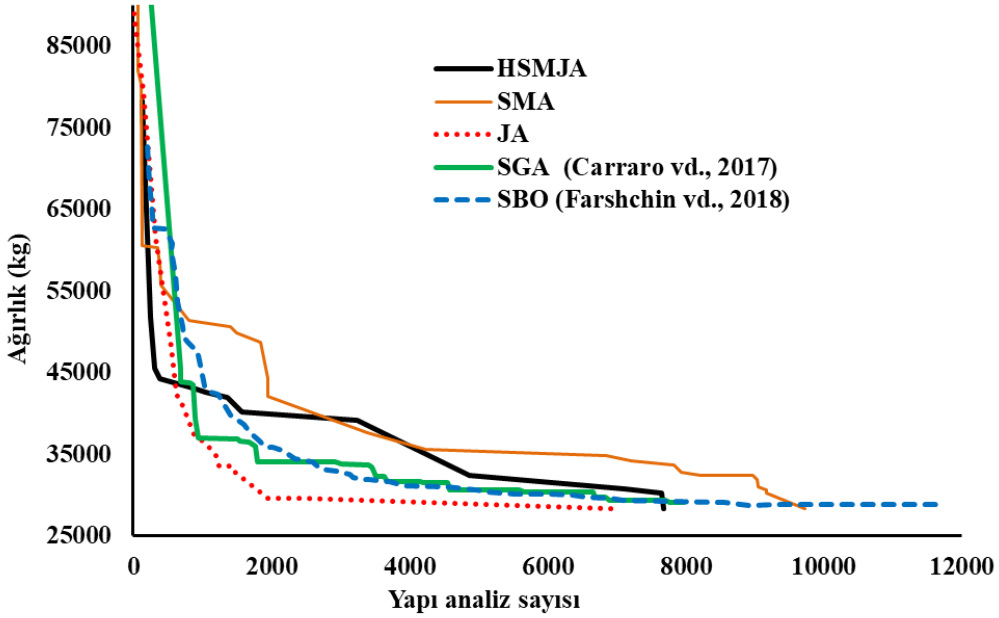
	ACO (Camp vd., 2005)	HS (Degerteki n 2008)	SGA (Carraro vd., 2017)	SBO (Farshchin vd., 2018)	JA	**SMA**	HSMJA
1	W14×233	W14×211	W14×233	W14×233	W14×233	**W14×233**	W14×233
2	W14×176	W14×176	W14×176	W14×176	W14×176	**W14×176**	W14×176
3	W14×145	W14×145	W14×132	W14×145	W14×145	**W14×145**	W14×145
4	W14×99	W14×90	W14×99	W14×99	W14×99	**W14×99**	W14×99
5	W12×65	W14×61	W14×68	W14×61	W12×65	**W14×61**	W12×65
6	W30×108	W33×118	W30×108	W30×108	W30×108	**W30×108**	W30×108
7	W30×90	W30×99	W30×90	W30×90	W30×90	**W30×90**	W30×90
8	W27×84	W24×76	W27×84	W27×84	W27×84	**W27×84**	W24×84
9	W21×44	W18×46	W21×50	W18×46	W21×44	**W18×46**	W21×44
En iyi ağırlık (kg)	28399.42	28061.04	28241.57	28317.77	28399.42	**28317.77**	28385.36
Yapı analiz sayısı	8300	3690	7980	11677	7688	**9721**	6933
Ortalama ağırlık (kg)	*	28541.39	*	*	28550.47	**28623.28**	28432.99
En kötü ağırlık (kg)	*	*	*	*	28811.28	**29180.89**	28644.36
STD (kg)	310.3	0.8	3187.4	320.6	154.2	**282.1658**	114.3
En üst kat en büyük deplasman (cm)	10.7	10.5	10.7	10.7	10.7	**10.7**	11.0
Deplasman sınırı (cm)	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	**12.5**	12.5
Dayanım oranı	0.986	1.0502	1.0148	0.999	0.986	**0.99**	0.998
Sınırlayıcı ihlal yüzdesi (%)	0	5.02	1.48	0	0	**0**	0

*Mevcut değil.

Her iki optimizasyon durumu için, optimum tasarım süresi boyunca çerçeve ağırlığının yapı analiz sayısına göre değişim grafikleri Şekil 4.2 ve 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.2 Tek açıklıklı-on katlı düzlem çerçevenin farklı optimizasyon yöntemleri için yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması (I. optimizasyon durumu)

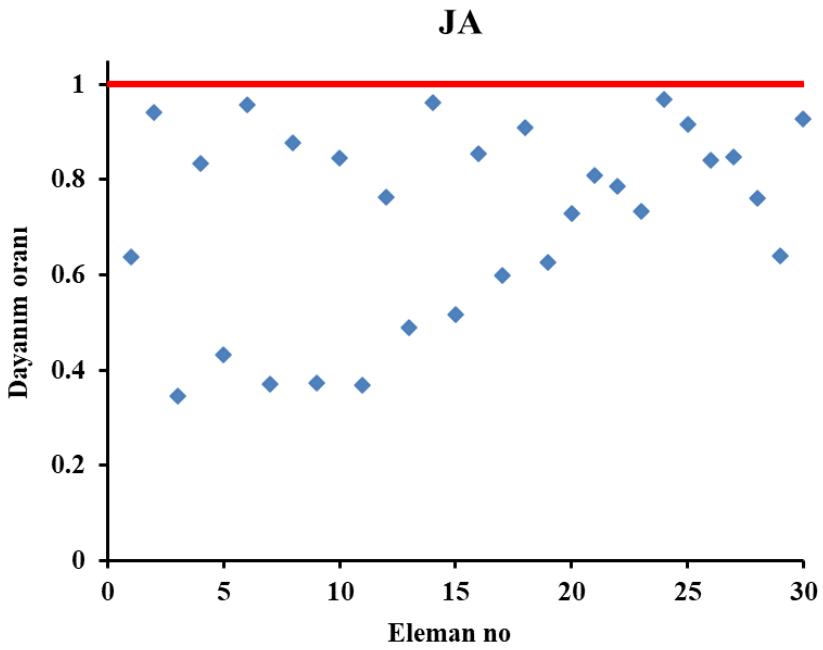


Şekil 4.3 Tek açıklıklı-on katlı düzlem çerçevenin farklı optimizasyon yöntemleri için yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması (II. optimizasyon durumu)

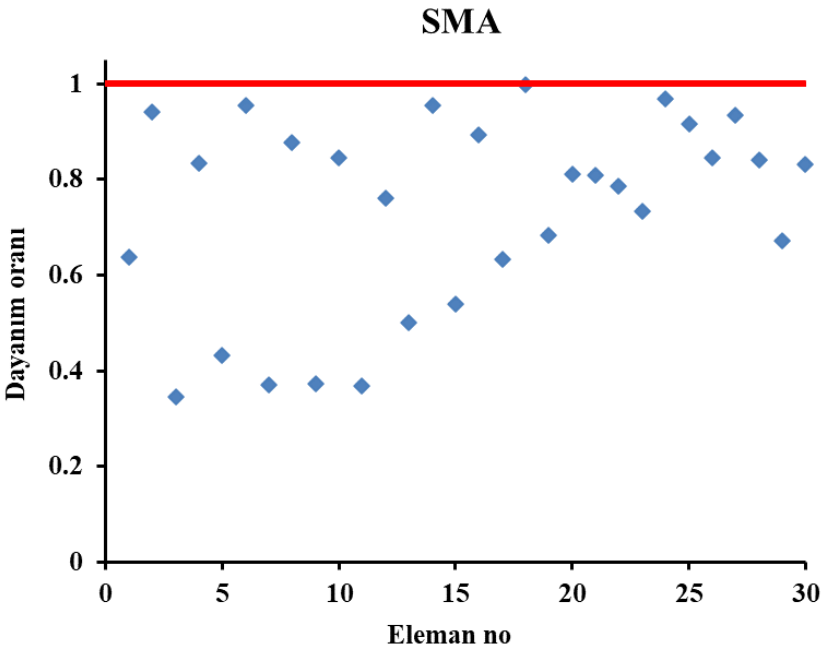
Her iki durumda da optimum tasarıma yakınsama hızı bakımından HSMJA'nın tatmin edici bir performans gösterdiği belirlenmiştir.

Her iki optimizasyon durumu için üç farklı yöntemle elde edilen optimum tasarımların taşıyıcı eleman dayanım oranları ve her bir kat için hesaplanan katlar arası göreli

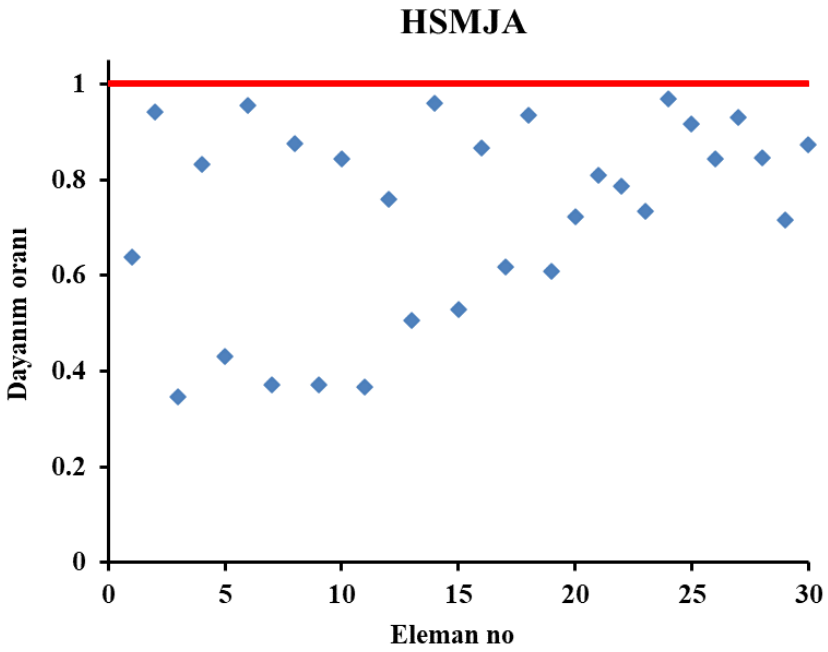
ötelenme oranları Şekil 4.5 ve 4.6'da sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde elde edilen tasarımların dayanım ve deplasman sınırlarını sağladığı açıkça görülmektedir.



(a)

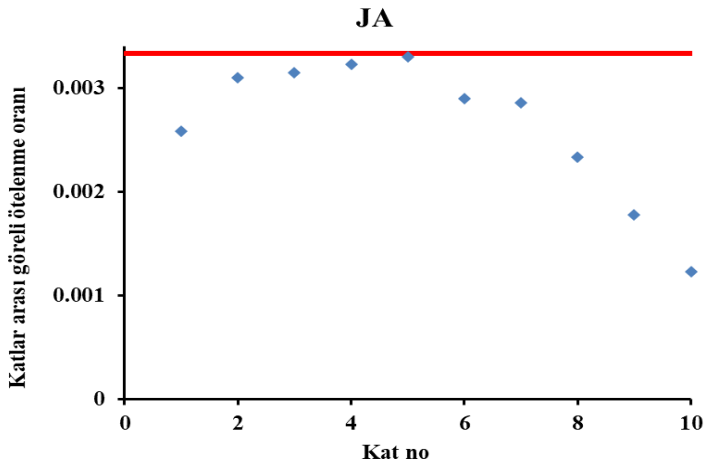


(b)

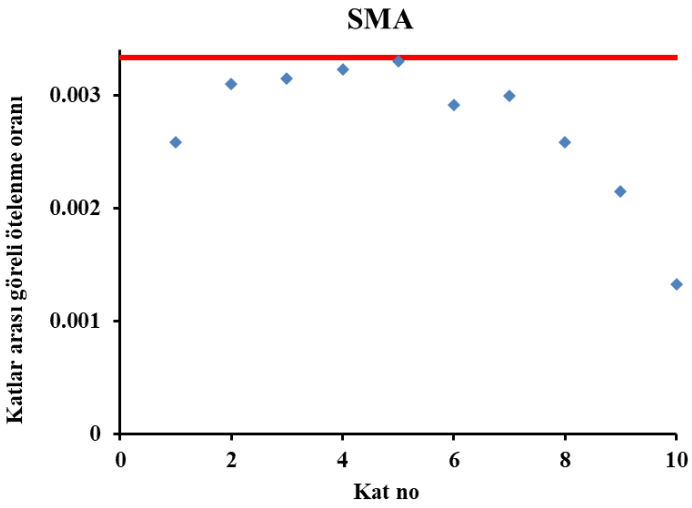


(c)

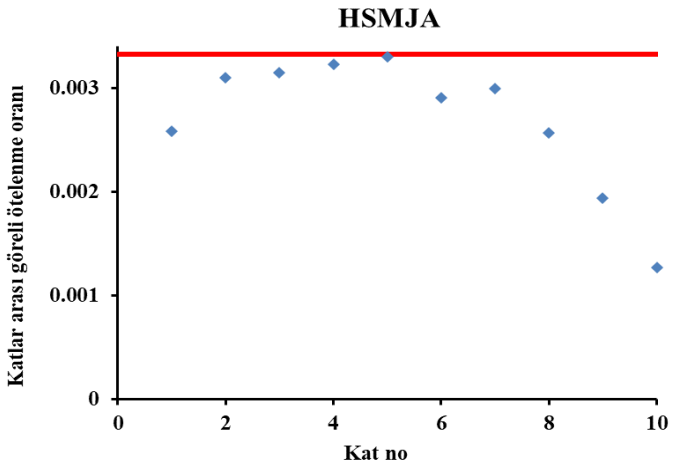
Şekil 4.4 Tek açıklıklı- on katlı düzlem çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) HSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait eleman dayanım oranları (I. optimizasyon durumu)



(a)

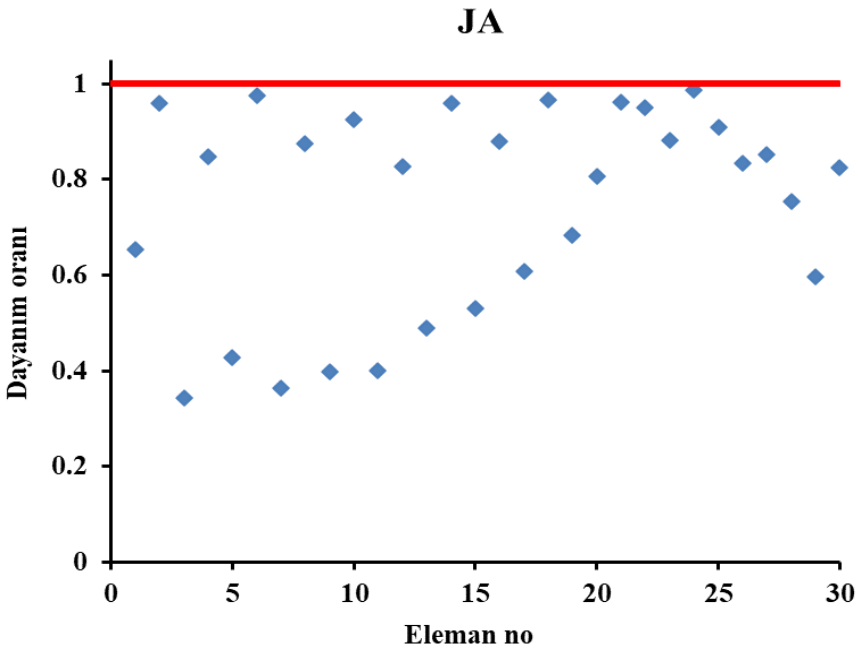


(b)

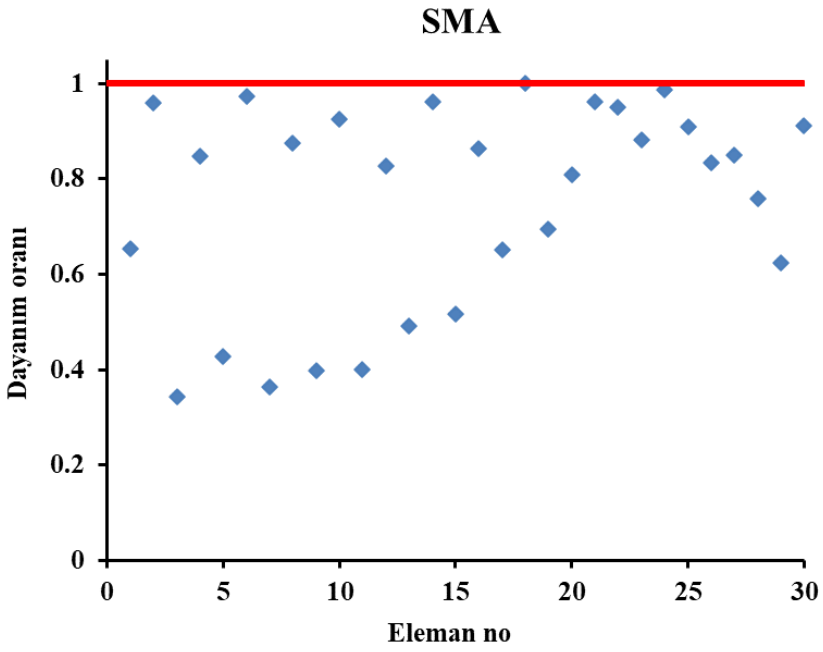


(c)

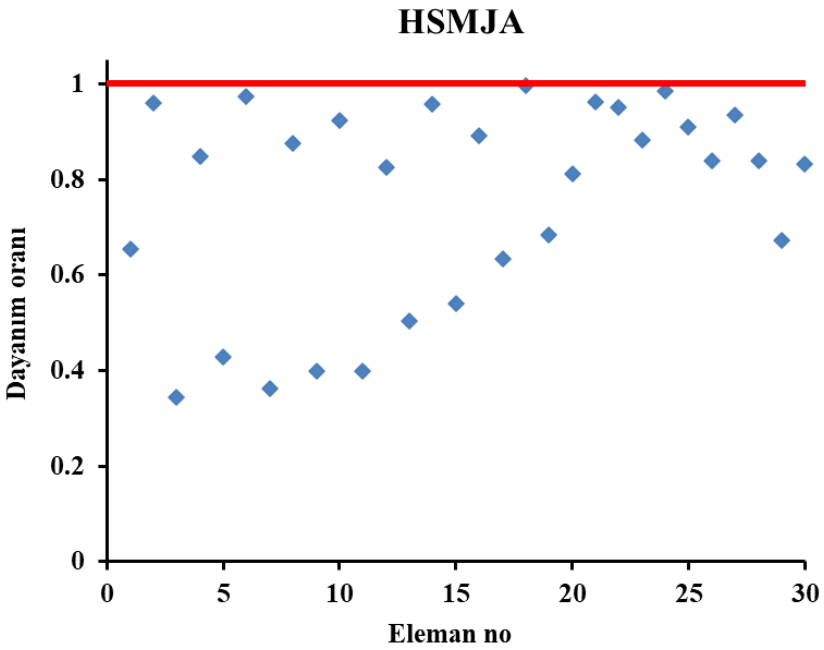
Şekil 4.5 Tek açıklıklı- on katlı düzlem çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) HSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait katlar arası göreli ötelenme oranları (I. optimizasyon durumu)


JA
Dayanım oranı
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
5
10
15
20
25
30
Eleman no

(a)


SMA
Dayanım oranı
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
5
10
15
20
25
30
Eleman no

(b)

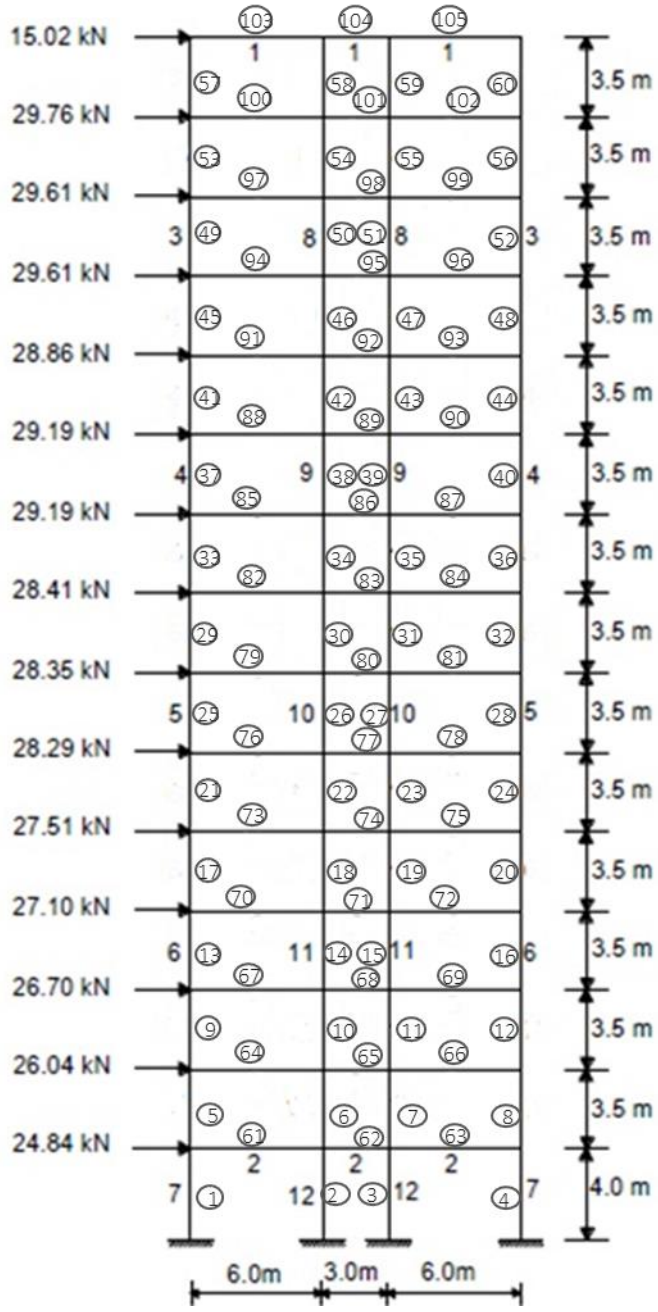


(c)

Şekil 4.6 Tek açıklıklı- on katlı düzlem çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) HSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait eleman dayanım oranları (II. optimizasyon durumu)

4.1.2 Üç açıklıklı-on beş katlı düzlem çelik çerçeve

İlk defa Saka (2007) tarafından hem AISC-LRFD hem de AISC-ASD yönetmeliğine göre GA ve SA yöntemleri ile optimum tasarımı yapılan üç açıklı-on beş katlı düzlem çelik çerçeve sistemin geometrisi, yükleme durumu ve eleman gruplandırılması Şekil 4.7'de verilmiştir. Çerçeve sistemin 12 farklı eleman grubuna ayrılmış toplam 105 taşıyıcı elemanı bulunmaktadır.



Şekil 4.7 Üç açıklıklı-on beş katlı düzlem çelik çerçeve

Sistem, düşeyde normal kat kirişlerine etkiyen 27 kN/m, çatı katı kirişlerine etkiyen 12.4 kN/m zati yük, yatayda ise her kat seviyesine göre hesaplanmış farklı rüzgâr yüklerine maruzdur. Çelik malzeme için elastisite modülü 200 kN/mm^2'dir. Deplasman sınırlayıcıları olarak katlar arası göreli ötelenme ve en üst kat en büyük deplasman değerleri göz önüne alınmış ve 1.17 cm ve 17.67 cm ile sınırlandırılmıştır. Taşıyıcı elemanların dayanım oranları ise AISC-LRFD yönetmeliğindeki formüllere göre hesaplanmıştır.

Tablo 4.4'te üç açıklı-on beş katlı düzlem çelik çerçeve sistemin JA, SMA ve HSMJA ile elde edilen optimum tasarımları literatürdeki GA (Saka, 2007), SA (Saka,2007) ve PSO (Doğan ve Saka, 2012) 'dan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

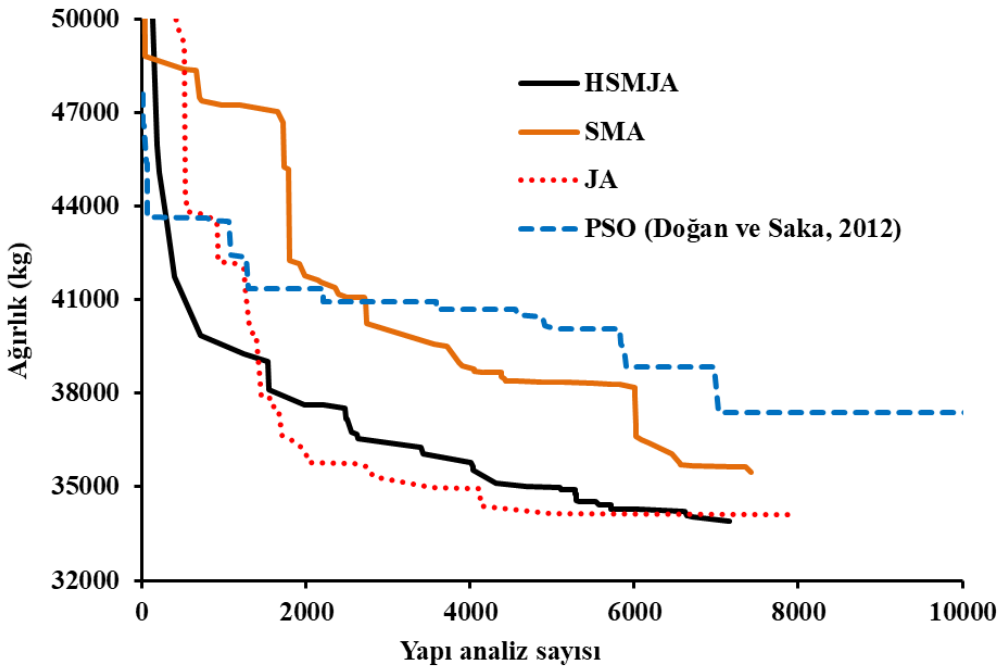
Tablo 4.4 Üç açıklıklı-on beş katlı düzlem çelik çerçevenin optimum tasarım sonuçlarının karşılaştırılması

	GA (Saka, 2007)	SA (Saka, 2007)	PSO (Doğan ve Saka, 2012)	JA	SMA	**HSMJA**
1	W21×50	W21×50	W6×9	W8×21	W8×18	**W8×18**
2	W24×55	W21×57	W21×44	W21×44	W21×44	**W21×44**
3	W10×39	W10×33	W10×33	W14×30	W8×40	**W10×54**
4	W14×53	W10×39	W10×33	W16×40	W12×40	**W16×36**
5	W14×53	W12×53	W14×53	W18×50	W24×55	**W21×48**
6	W14×68	W16×67	W21×111	W24×68	W24×68	**W21×68**
7	W24×117	W24×104	W21×111	W24×104	W27×102	**W30×90**
8	W14×43	W10×39	W14×61	W8×28	W12×30	**W8×24**
9	W14×48	W14×48	W14×61	W14×43	W24×62	**W16×40**
10	W14×68	W14×61	W24×76	W21×62	W24×62	**W24×62**
11	W14×109	W14×99	W27×94	W30×90	W27×84	**W30×90**
12	W16×100	W14×99	W27×102	W30×108	W30×124	**W30×108**
En iyi ağırlık (kg)	40949	39262	37360	34103	35460	**33896**
Yapı analiz sayısı	25000	15500	7000	7870	7427	**7165**
Ortalama ağırlık (kg)	*	*	*	35381	36144	**34664**
En kötü ağırlık (kg)	*	*	*	37395	37039.	**36752**
STD (kg)	*	*	*	1366	680.9	**1199**
En büyük katlar arası göreli ötelenme (cm)	1.12	1.17	1.07	1.04	1.02	**1.16**
Katlar arası göreli ötelenme sınırı (cm)	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	**1.17**
Dayanım oranı	0.95	0.91	3.36	0.99	0.96	**0.99**
Sınırlayıcı ihlal yüzdesi (%)	0	0	236	0	0	**0**

*Mevcut değil

Tablo 4.4'ten görüleceği üzere HSMJA ile, 7165 yapı analiz sonunda bulunan 33896 kg ağırlığındaki tasarım, en iyi tasarım olarak belirlenmiştir. GA, SA ve PSO yöntemlerine ait ortalama ağırlık, standart sapma gibi veriler mevcut olmadığından istatistiksel bir karşılaştırma yapılamamıştır. Sınırlayıcı ihlal durumu incelendiğinde, PSO ile bulunan tasarımın deplasman sınırlarını sağladığı ancak dayanım sınırlarını çok büyük bir oranda ihlal ettiği tespit edilmiştir. Bu tasarım örneğinde, HSMJA'nın optimum tasarımı bulmada gerek analiz sayısı gerekse de optimum ağırlık bakımından en iyi yöntem olduğu tespit edilmiştir.

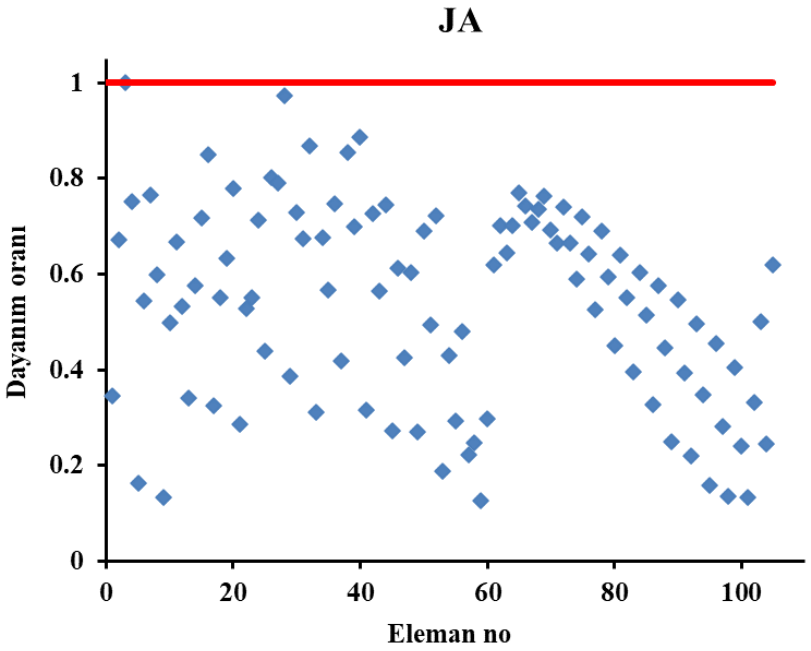
Kullanılan üç farklı yöntem ile PSO (Doğan ve Saka, 2012) yöntemine ait optimum tasarıma yakınsama eğrileri Şekil 4.8'de verilmiştir. Buna göre, JA ve HSMJA yöntemlerinin hızlı bir yakınsama davranışı gösterdiği, SMA yönteminin ise nispeten yavaş bir yakınsama ve daha ağır bir nihai tasarıma varma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir.



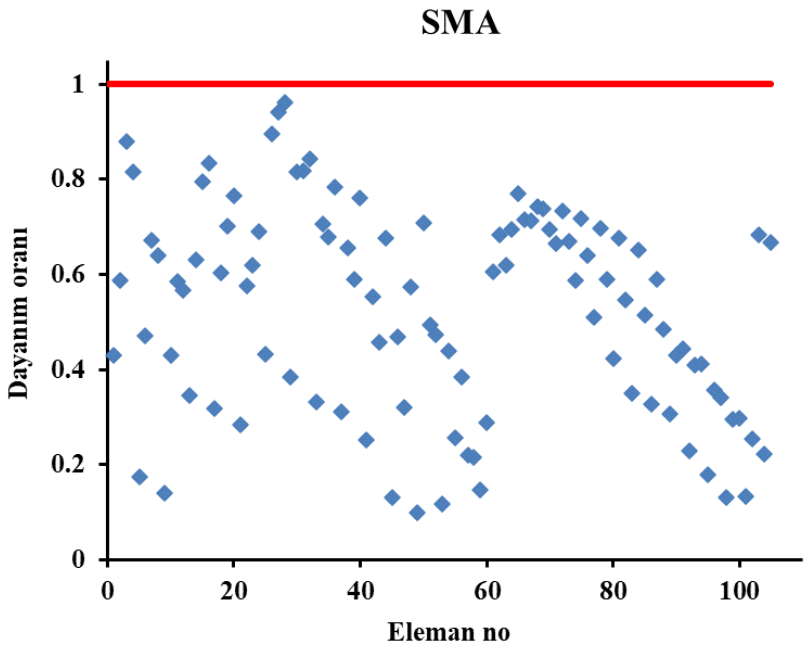
Şekil 4.8 Üç açıklıklı-on beş katlı düzlem çerçevenin farklı optimizasyon yöntemleri için yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması

Üç açıklı-on beş katlı çerçeve için JA, SMA ve HSMJA ile elde edilen optimum tasarımların taşıyıcı eleman dayanım oranları ve her bir kat için hesaplanan katlar arası göreli ötelenme oranları Şekil 4.9 ve 4.10'da verilmiştir. Grafikler incelendiğinde

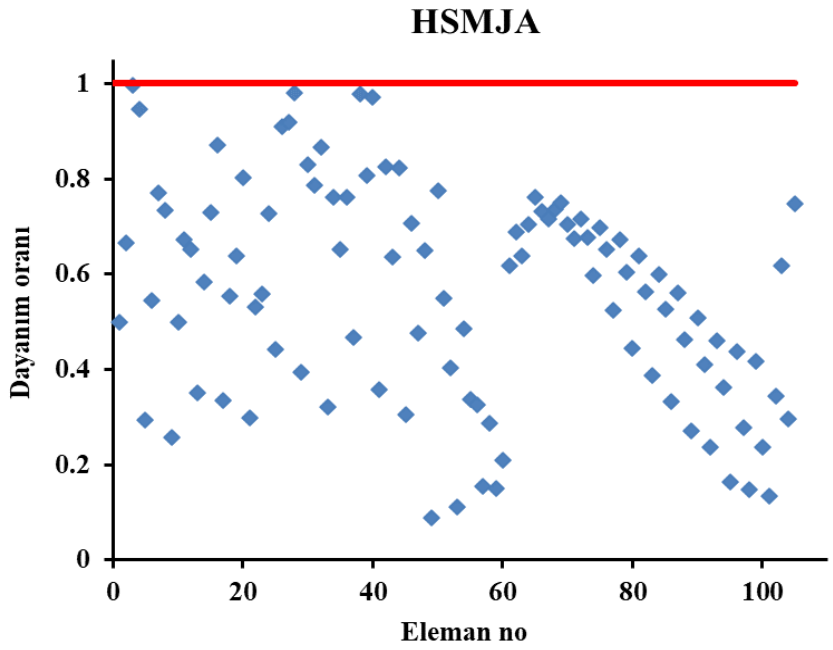
taşıyıcı elemanların dayanım kapasitesi sınır değerlere ulaşmışken, katlar arası göreli ötelenme oranları ise sınır değerin altında kaldığı görülmektedir. Bu durum, optimizasyon sürecinde dayanım sınırlayıcılarının belirleyici rol oynadığını göstermektedir.



(a)

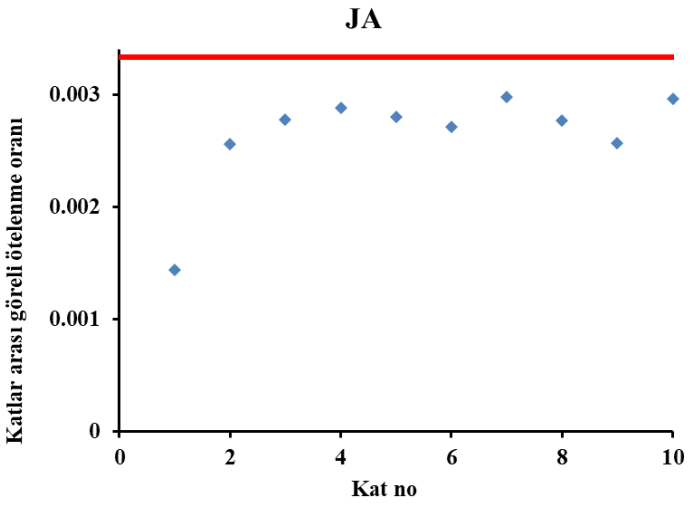


(b)

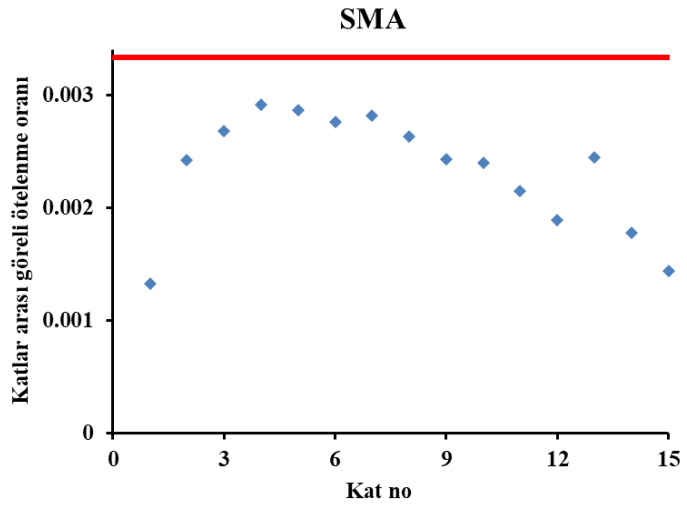


(c)

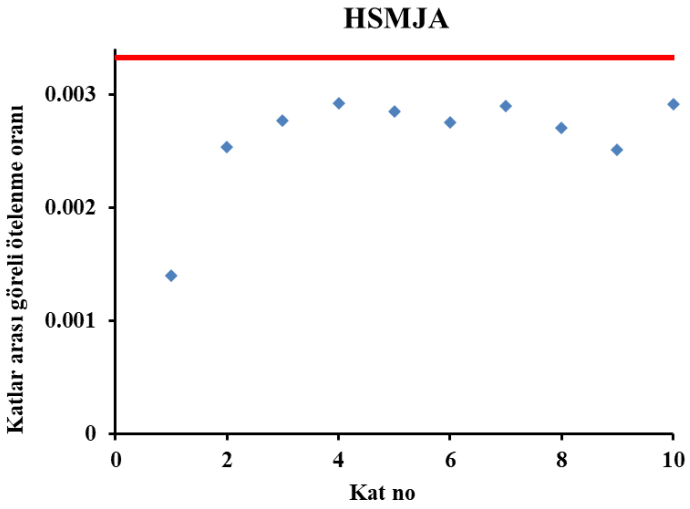
Şekil 4.9 Üç açıklıklı-on beş katlı düzlem çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) HSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait eleman dayanım oranları



(a)



(b)



(c)

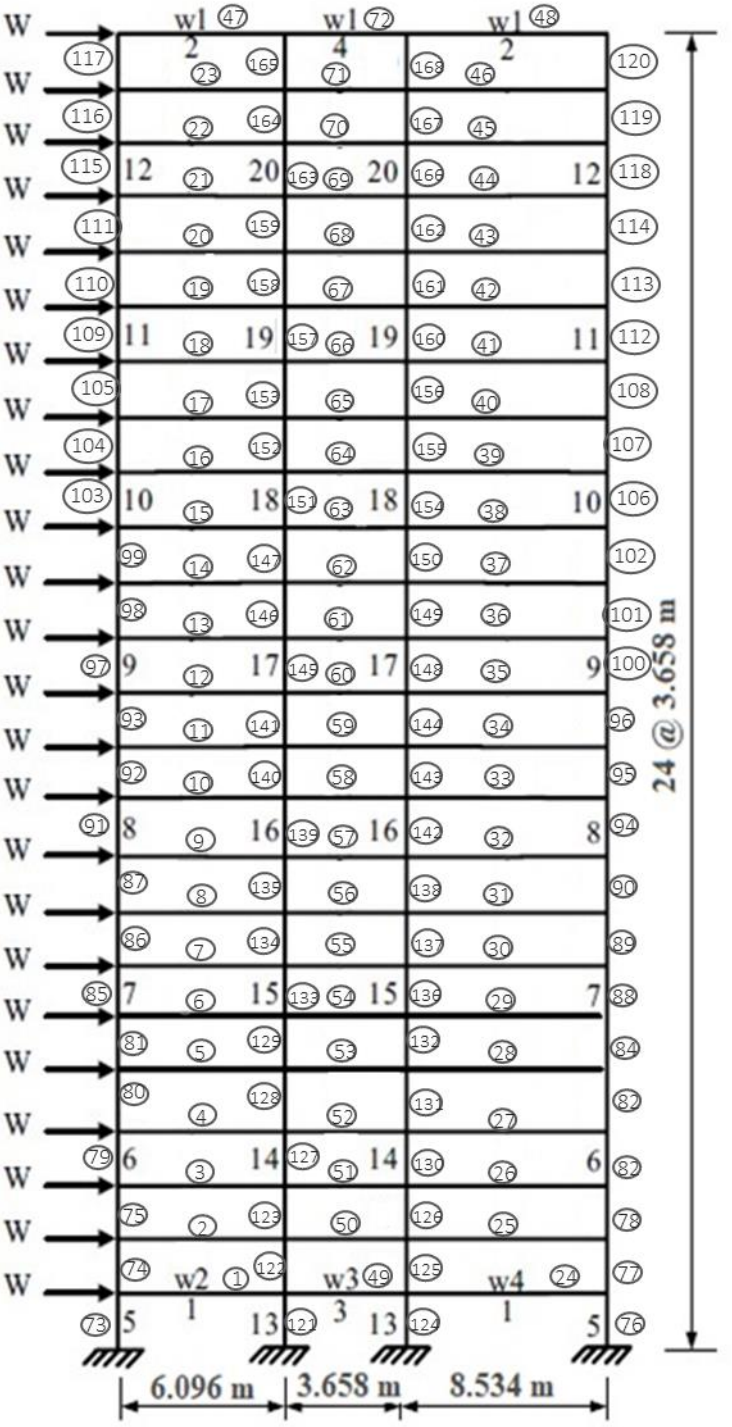
Şekil 4.10 Üç açıklıklı-on beş katlı düzlem çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) HSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait katlar arası göreli ötelenme oranları

4.1.3 Üç açıklıklı-yirmi dört katlı düzlem çelik çerçeve

İlk olarak Davison ve Adams (1974) tarafından optimize edilen üç açıklı-yirmi dört katlı düzlem çelik çerçeve sistem literatürde en sık kullanılan karşılaştırma örneklerinden biridir. Toplamda 168 taşıyıcı elemanı bulunan çerçeve sistem elemanları, 20 farklı eleman grubuna ayrılmıştır. Bu gruplandırma, ardışık üç katın iç ve dış kolonları ile çatı ve normal kat kirişleri ayrı bir grup olacak şekilde yapılmıştır. Sistemin geometrisi, eleman gruplandırması ve yükleme durumları Şekil 4.11'de

verilmiştir. Çelik çerçeveye; yatay doğrultuda W=25.63 kN büyüklüğünde tekil yükler, düşey doğrultuda en üst kat kirişlerine w_1=0.407 kN/m ve normal kat kirişlerine w_2=0.591 kN/m, w_3=0.643 kN/m, w_4=0.553 kN/m büyüklüğünde üniform yayılı yükler etki etmektedir. Çerçeve sistemin malzeme elastisite modülü 29782 ksi (205340 MPa), akma dayanımı ise 33.4 ksi (230.3 MPa)'dır. Tüm taşıyıcı elemanların kendi uzunlukları boyunca desteksiz olduğu varsayılmıştır. Her kolon eleman için efektif uzunluk faktörü *(K)*, Dumonteil'in (1993) yanal ötelenmesi önlenmemiş çerçeve sistemler için hazırladığı bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır. Düzlem dışı - *y* ekseni için efektif uzunluk faktörü (K_y) 1 olarak alınmıştır. Kirişlere atanacak enkesitler, AISC'nin standart W enkesitlerin tanımlı olduğu listeden, kolonlara ise bu listedeki W14 enkesitler arasından seçilecek şekilde sınırlandırılmıştır. Tasarım sınırlayıcıları AISC-LRFD yönetmeliğindeki tasarım şartlarına göre belirlenmiştir.

Tek açıklı-yirmi dört katlı düzlem çelik çerçevenin optimum tasarım SMA, JA ve HSMJA yöntemleri icra edilmiş ve elde edilen sonuçlar literatürde daha önce ACO (Camp vd., 2005), HS (Değertekin, 2008), SGA (Carraro vd., 2017), WOA ve EWOA (Kaveh ve Ghazaan, 2017), HBMO ve EHBMO (Maheri vd., 2017) ve SBO (Farshchin vd., 2018) ile elde edilen optimum tasarım değerleri ile Tablo 4.5'te karşılaştırılmıştır. HSMJA kullanılarak 16306 yapı analizi sonunda elde edilen 91259 kg ağırlığındaki tasarım, literatürdeki en hafif tasarım olarak belirlenmiştir. SMA ile 13097 yapı analizi sonunda 92110 kg, JA ile 18732 yapı analizi sonunda 91682 kg ağırlığında tasarımlar elde edilmiştir. SMA yöntemi optimum tasarım için daha az sayıda analiz gerektirmesine rağmen elde edilen nihai tasarım bakımından JA ve HSMJA'nın gerisinde kalmıştır. Tüm yöntemlere ait optimum tasarımların sınırlayıcı kontrolü yapılmış, dayanım oranları ve deplasman değerleri tabloda sunulmuştur. Buna göre; SGA, HBMO ve EHBMO yöntemleriyle bulunan tasarımların sırasıyla %34, %893 ve %1766 gibi çok büyük oranlarda tasarım sınırlayıcılarını ihlal ettiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.11 Üç açıklıklı-yirmi dört katlı düzlem çelik çerçeve

Tablo 4.5 Üç açıklıklı-yirmi dört katlı düzlem çelik çerçevenin optimum tasarım sonuçlarının karşılaştırılması

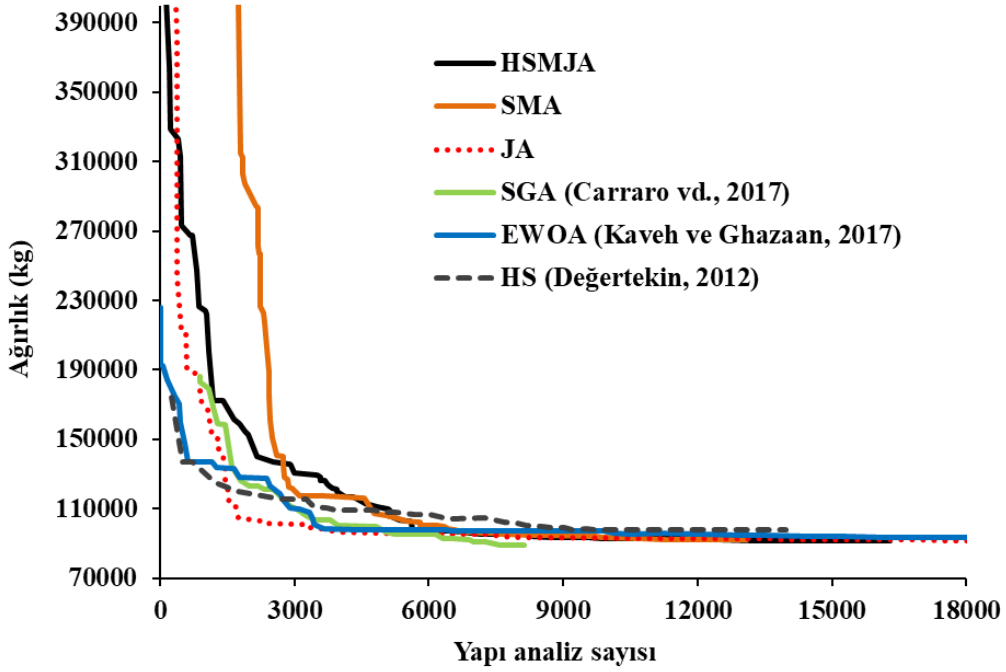
	ACO (Camp vd., 2005)	HS (Değertekin, 2012)	SGA (Carraro vd., 2017)	HBMO (Maheri vd., 2017)	EHBMO (Maheri vd., 2017)	WOA (Kaveh ve Ghazaan, 2017)	EWOA (Kaveh ve Ghazaan, 2017)	SBO (Farshchin vd., 2018)	JA	SMA	**HSMJA**
1	W30×90	W30×90	W24×68	W10×22	W10×15	W30×90	W30×90	W30×90	W30×90	W30×90	**W30×90**
2	W8×18	W10×22	W21×55	W27×539	W36×256	W10×17	W10×30	W8×18	W6×15	W16×26	**W12×19**
3	W24×55	W18×40	W24×62	W8×21	W6×16	W21×62	W24×55	W21×48	W24×55	W24×55	**W24×55**
4	W8×21	W12×16	W12×87	W33×221	W27×146	W14×26	W6×8.5	W6×8.5	W16×26	W6×8.5	**W6×8.5**
5	W14×145	W14×176	W14×159	W14×145	W14×145	W14×109	W14×159	W14×152	W14×159	W14×120	**W14×159**
6	W14×132	W14×176	W14×145	W14×145	W14×120	W14×145	W14×99	W14×120	W14×120	W14×120	**W14×132**
7	W14×132	W14×132	W14×120	W14×68	W14×26	W14×109	W14×120	W14×109	W14×109	W14×90	**W14×109**
8	W14×132	W14×109	W14×99	W14×22	W14×26	W14×99	W14×74	W14×74	W14×74	W14×90	**W14×74**
9	W14×68	W14×82	W14×68	W14×48	W14×53	W14×53	W14×74	W14×82	W14×82	W14×74	**W14×61**
10	W14×53	W14×74	W14×48	W14×68	W14×99	W14×43	W14×43	W14×43	W14×38	W14×34	**W14×38**
11	W14×43	W14×34	W14×48	W14×132	W14×159	W14×34	W14×30	W14×34	W14×53	W14×30	**W14×34**
12	W14×43	W14×22	W14×34	W14×342	W14×30	W14×22	W14×22	W12×19	W14×22	W14×22	**W14×22**
13	W14×145	W14×145	W14×109	W14×159	W14×145	W14×120	W14×90	W14×109	W14×90	14×109	**W14×90**
14	W14×145	W14×132	W14×82	W14×109	W14×26	W14×99	W14×120	W14×109	W14×109	14×109	**W14×99**
15	W14×120	W14×109	W14×99	W14×99	W14×74	W14×109	W14×90	W14×99	W14×90	W14×109	**W14×90**
16	W14×90	W14×82	W14×109	W14×48	W14×26	W14×82	W14×99	W14×99	W14×90	W14×90	**W14×90**
17	W14×90	W14×61	W14×90	W14×43	W14×26	W14×90	W14×68	W14×68	W14×61	W14×74	**W14×74**
18	W14×61	W14×48	W14×74	W14×53	W14×26	W14×61	W14×61	W14×61	W14×61	W14×74	**W14×61**
19	W14×30	W14×30	W14×43	W14×176	W14×370	W14×38	W14×43	W14×34	W14×22	W14×43	**W14×34**
20	W14×26	W14×22	W14×43	W14×211	W14×109	W14×22	W14×22	W14×22	W14×22	W14×22	**W14×22**

Tablo 4.5 (Devam)

	ACO (Camp vd., 2005)	HS (Değertekin, 2012)	SGA (Carraro vd., 2017)	HBMO (Maheri vd., 2017)	EHBMO (Maheri vd., 2017)	WOA (Kaveh ve Ghazaan, 2017)	EWOA (Kaveh ve Ghazaan, 2017)	SBO (Farshchin vd., 2018)	JA	SMA	**HSMJA**
En iyi ağırlık (kg)	100001	97459	88227	97453	85565	93675	92301	91817	91682	92110	**91259**
Yapı analiz sayısı	15500	13924	8010	2074	1826	19640	18820	14572	18732	13097	**16306**
Ortalama ağırlık (kg)	104123	100978	96861	*	*	98190.5	94640	95054	94798.1	94323.6	**92356.7**
En kötü ağırlık (kg)	*	*	*	*	*	110287.2	102520	*	96154	98115.5	**93974.2**
STD (kg)	2068	*	3187	*	*	*	*	3198.	769.5	1906.8	**891.75**
Katlar arası göreli ötelenme oranı	0.00307	0.0329	0.00447	0.0331	0.0622	0.00332	0.00332	0.0032	0.00333	0.00333	**0.00333**
Katlar arası göreli ötelenme sınırı	0.00333	0.00333	0.00333	0.00333	0.00333	0.00333	0.00333	0.0033	0.00333	0.00333	**0.00333**
Dayanım oranı	0.779	0.0774	0.949	4.69	10.75	0.974	0.817	0.998	0.949	0.991	**0.952**
Sınırlayıcı ihlal yüzdesi (%)	0	0	34	893	1766	0	0	0	0	0	**0**

*Mevcut değil

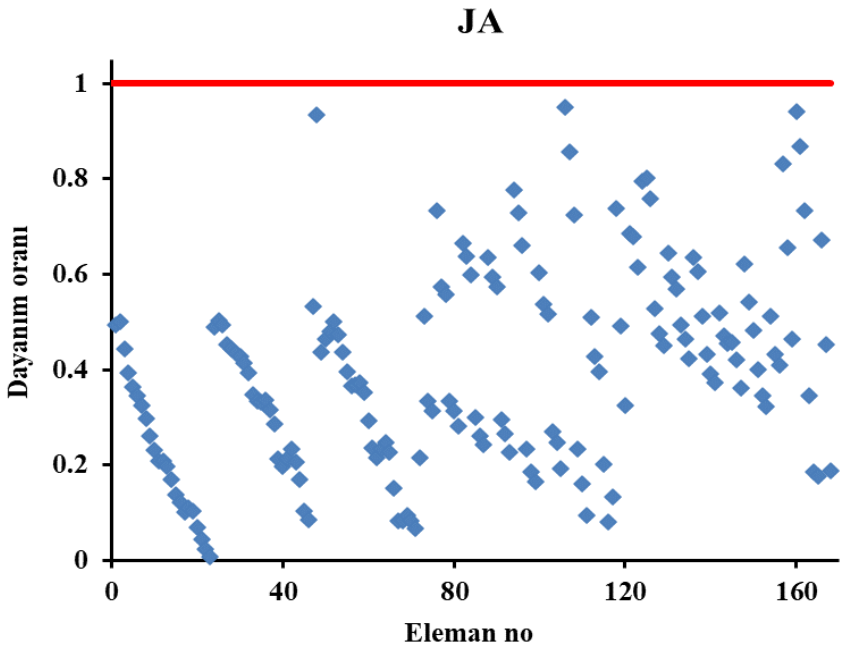
Şekil 4.12'de optimum tasarım sürecinde yapı ağırlığının yapı analiz sayısına göre değişimini gösteren yakınsama eğrileri sunulmuştur. Yakınsama hızı olarak EWOA, HS ve JA yöntemlerinin diğerlerine kıyasla daha iyi bir performans gösterdiği görülmektedir ancak en düşük ağırlık değerine ulaşma konusunda HSMJA gerek analiz sayısı gerekse yakınsama davranışı açısından diğer yöntemlere göre daha etkili olduğu görülmüştür.



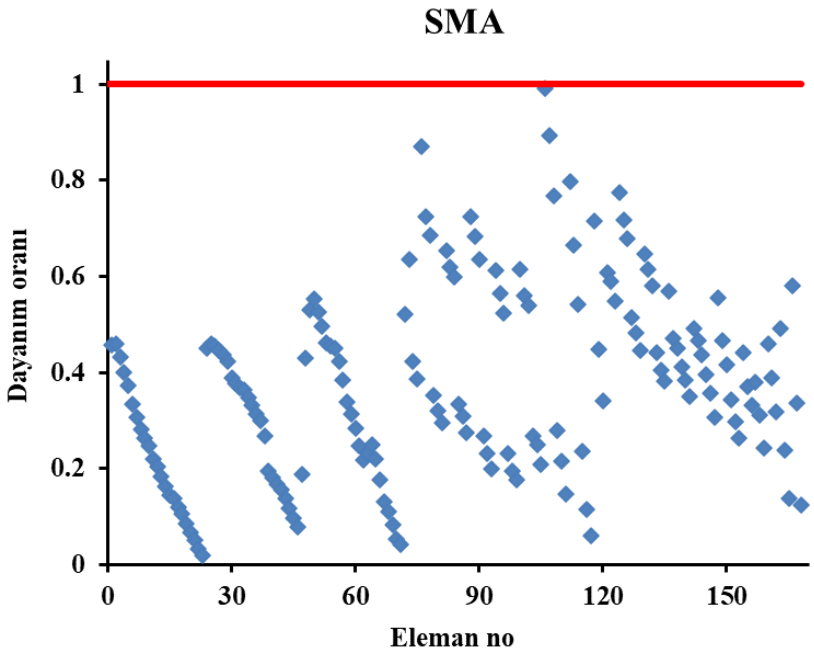
Şekil 4.12 Üç açıklıklı-yirmi dört katlı düzlem çelik çerçevenin farklı optimizasyon yöntemleri için yakınsama eğrilerinin karşılaştırılması

JA, SMA ve HSMJA ile elde edilen optimum tasarımların taşıyıcı eleman dayanım oranları ve her bir kat için hesaplanan katlar arası göreli ötelenme oranları Şekil 4.13 ve 4.14'te sunulmuştur. Şekillerden açıkça görüldüğü üzere, bu çalışmada sunulan JA, SMA ve HSMJA yöntemlerinden elde edilen optimum tasarımlar, dayanım ve deplasman sınırlayıcılarını ihlal etmemektedir.

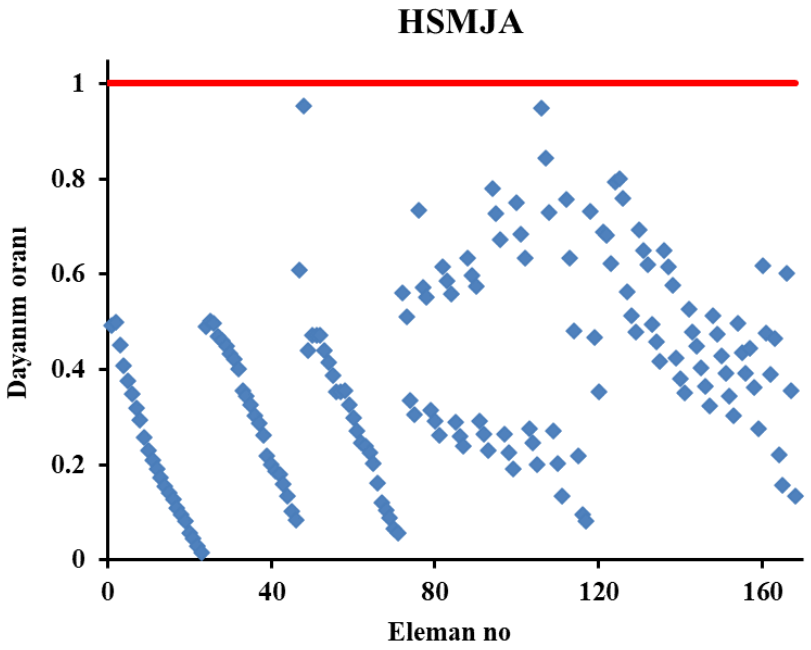
Önceki tasarım örneğinin aksine, katlar arası göreli ötelenme oranları sınır değerlerde iken elemanların dayanım oranları sınır değerin altında olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, optimizasyon sürecinde katlar arası göreli ötelenme sınırlayıcılarının belirleyici rol oynadığını göstermektedir.


JA
Dayanım oranı
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
40
80
120
160
Eleman no

(a)

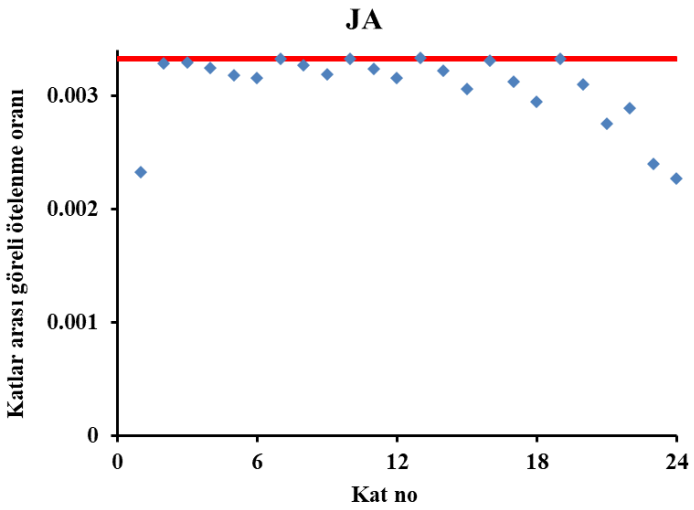

SMA
Dayanım oranı
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
30
60
90
120
150
Eleman no

(b)

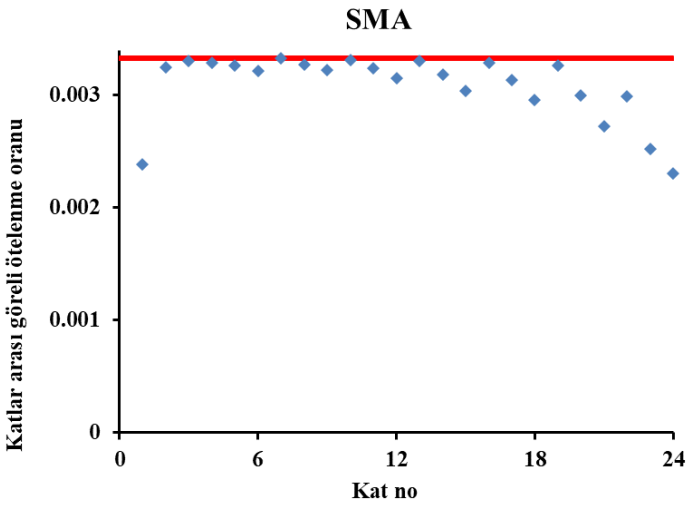


(c)

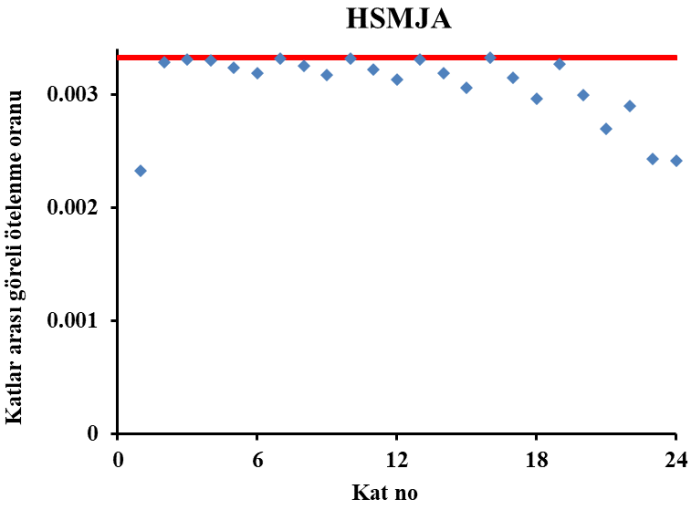
Şekil 4.13 Üç açıklıklı-yirmi dört katlı düzlem çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) HSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait eleman dayanım oranları



(a)



(b)



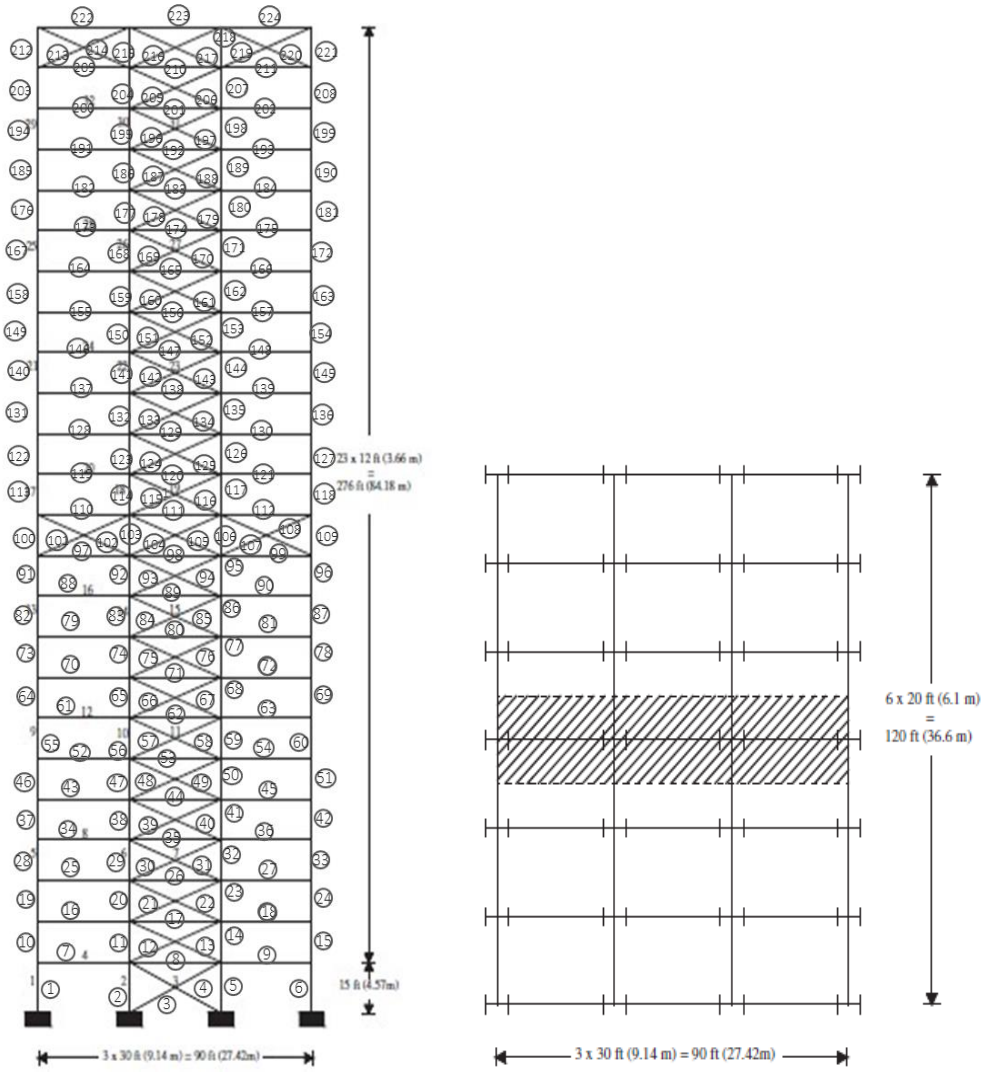
(c)

Şekil 4.14 Üç açıklıklı- yirmi dört katlı düzlem çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) HSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait katlar arası göreli ötelenme oranları

4.1.4 224 elemanlı merkezi çaprazlı çelik çerçeve

Düzlem çerçeve olarak sunulan son karşılaştırma örneği, 224 elemanlı merkezi çaprazlı çelik çerçevedir. İlk olarak Hasançebi vd. (2010) tarafından yedi farklı sezgisel optimizasyon yöntemi kullanılarak optimize edilen bu çerçeve, Şekil 4.15'te görüldüğü gibi üç boyutlu bir yapının kısa doğrultusundaki orta aksın enkesiti alınarak elde edilmiştir. Toplam yüksekliği 291 ft (88.7 m) olan sistemin kolonlar arası mesafesi 30 ft (9.14 m)'dir. Yanal ötelenmesi orta açıklıklara uygulanan X tipi çaprazlarla önlenmiş, yatay rijitliği arttırmak için 12 ve 24. katların tüm açıklıklarına

da aynı tip çaprazlar eklenerek yapının deplasmanı sınırlandırılmıştır. Taşıyıcı elemanlar, ardışık üç katın iç kolonları, dış kolonları, kiriş ve çaprazları olmak üzere 32 farklı eleman grubuna ayrılmıştır. Çerçeve sistemin malzeme elastisite modülü 29000 ksi (19948 MPa), akma dayanımı ise 36 ksi (248.2 MPa)'dır. Kolonlara atanacak enkesitler, 297 farklı W enkesitin tanımlı olduğu listeden seçilirken kiriş ve çaprazlara atanacak enkesitler ise alan, atalet momenti ve atalet yarıçapı değerlerine göre sınıflandırılmış sırasıyla 171 ve 147 farklı W enkesitten oluşan listelerden seçilmiştir.



Şekil 4.15 224 elemanlı çaprazlı düzlem çelik çerçeve (Hasançebi vd., 2010'dan değiştirilerek)

Çerçeve sistemin ASCE7-05 (American Society of Civil Engineers)'e göre hesaplanan zati, hareketli, kar ve rüzgâr yüklerinin birleşiminden meydana gelen tek bir yükleme durumu bulunmaktadır. Buna göre zati yük 60.13 lb/ft^2 (2.88 kN/m^2) hareketli yük 50

lb/ft^2 (2.39 kN/m^2), kar yükü 25 lb/ft^2 (1.20 kN/m^2) olarak belirlenmiştir. Hesaplanan bu yükler eşdeğer yayılı yüklere dönüştürüldüğünde; çatı katı kirişlerine etkiyen zati yük 1001.62 lb/ft (14.62 kN/m), normal kat kirişlerine etkiyen zati yük 1453.72 lb/ft (21.22 kN/m) olarak hesaplanmıştır. Rüzgâr yükü, rüzgâr hızının 91 mph (40.68 m/s) olması durumuna göre basınç ve emme yönlerinde farklı olmak üzere kat seviyelerine etkiyen yatay tekil yükler olarak hesaplanmış ve Tablo 4.6'da sunulmuştur (Hasançebi vd., 2010). Dayanım sınırlayıcıları AISC-ASD yönetmeliğinde belirtilen şartlara göre düzenlenmiştir. Deplasman sınırlayıcılarında; müsaade edilen en büyük katlar arası göreli ötelenme kat yüksekliğinin 1/400'ünü ve müsaade edilen en büyük en üst kat deplasmanı toplam yapı yüksekliğinin 1/400'ünü aşmayacak şekilde göz önüne alınmıştır.

Tablo 4.6 224 elemanlı merkezi çaprazlı düzlem çelik çerçeveye etkiyen rüzgâr yükleri

Kat	Basınç (kN)	Emme (kN)
1	7.517	10.916
2	8.598	10.916
3	9.653	10.916
4	10.480	10.916
5	11.174	10.916
6	11.770	10.916
7	12.299	10.916
8	12.775	10.916
9	13.216	10.916
10	13.620	10.916
11	13.994	10.916
12	14.346	10.916
13	14.679	10.916
14	14.995	10.916
15	15.293	10.916
16	15.578	10.916
17	15.849	10.916
18	16.107	10.916
19	16.361	10.916
20	16.601	10.916
21	16.832	10.916
22	17.059	10.916
23	17.277	10.916
24	8.745	5.458

Daha önce Hasançebi vd. (2010) tarafından SA, ESs, TS, ACO, PSO, SGA ve HS; Gholizadeh ve Poorhoseini (2015) tarafından MDE ile optimum tasarımı yapılan 224 elemanlı çaprazlı düzlem çelik çerçeve bu çalışmada JA, SMA ve HSMJA yöntemleriyle ayrı ayrı optimize edilmiştir. JA, SMA, HSMJA ve literatürdeki diğer optimizasyon yöntemlerinden elde edilen sonuçlar Tablo 4.7'de sunulmuştur. JA, SMA ve HSMJA ile elde edilen sırasıyla 107.57 ton, 105.65 ton ve 102.96 ton ağırlığındaki tasarımlar, literatürde en hafif tasarım olan ve MDE ile elde edilen tasarımdan sırasıyla %2.56, %4.3 ve %6.73 daha hafiftir. Öte yandan HSMJA yöntemiyle elde edilen tasarımın analiz sayısı, standart sapma, ortalama ağırlık gibi istatistiksel değerleri diğer yöntemlere kıyasla daha düşüktür. Bu durum oluşturulan hibrit yöntemin diğer standart algoritmalara göre daha tutarlı sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Tablo 4.7 224 elemanlı çaprazlı düzlem çelik çerçevenin optimum tasarım sonuçlarının karşılaştırılması

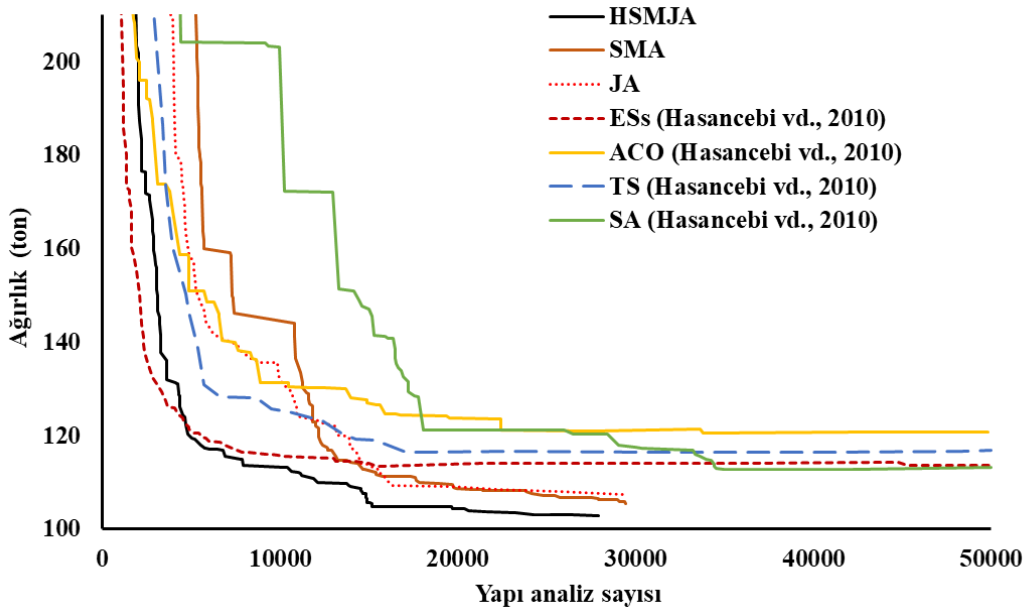
	SA (Hasançebi vd., 2010)	ESs (Hasançebi vd., 2010)	TS (Hasançebi vd., 2010)	ACO (Hasançebi vd., 2010)	PSO (Hasançebi vd., 2010)	SGA (Hasançebi vd., 2010)	HS (Hasançebi vd., 2010)	MDE (Gholizadeh ve Poorhoseini, 2015)	JA	SMA	**HSMJA**
1	W14×109	W14×109	W12×120	W14×120	W27×146	W18×143	W24×146	W12×120	W14×145	W24×131	**W14×120**
2	W40×277	W40×277	W36×280	W40×268	W36×260	W40×328	W14×233	W36×282	W14×257	W40×268	**W14×283**
3	W8×40	W10×39	W8×40	W10×45	W10×39	W10×39	W10×49	W14×38	W10×33	W12×26	**W8×24**
4	W16×40	W16×40	W16×45	W16×40	W16×40	W16×40	W16×40	W18×40	W18×40	W18×35	**W16×36**
5	W14×99	W30×108	W18×106	W33×118	W18×130	W18×119	W14×109	W24×104	W18×119	W14×109	**W24×104**
6	W12×190	W12×210	W30×191	W40×221	W14×176	W21×201	W21×201	W36×256	W30×191	W12×190	**W36×194**
7	W10×39	W8×35	W8×35	W8×35	W8×35	W8×35	W10×39	W6×20	W8×24	W12×26	**W12×26**
8	W16×45	W14×43	W16×45	W14×43	W16×40	W16×40	W16×40	W24×55	W16×40	W21×44	**W21×44**
9	W14×90	W27×94	W18×97	W14×90	W21×101	W14×99	W21×101	W30×99	W10×100	W27×102	**W10×100**
10	W14×145	W14×145	W40×167	W33×152	W21×182	W12×152	W14×132	W30×173	W36×150	W27×178	**W33×152**
11	W8×31	W8×35	W10×33	W14×43	W8×401	W10×39	W12×45	W6×20	W6×20	W5X19	**W8×24**
12	W16×45	W14×43	W16×45	W18×50	W16×45	W16×45	W16×50	W21×48	W21×44	W21×44	**W18×40**
13	W30×90	W30×90	W27×94	W30×90	W21×101	W30×99	W21×147	W30×108	W24×104	W12×96	**W21×122**
14	W27×114	W30×116	W10×112	W27×129	W10×112	W30×235	W21×147	W36×135	W27×129	W12×120	**W12×106**
15	W8×40	W8×40	W10×39	W8×35	W8×35	W8×31	W14×61	W8×24	W8×24	W6×25	**W6×25**
16	W18×50	W18×50	W16×50	W18×60	W18×50	W24×76	W24×68	W21×48	W16×40	W14×38	**W21×44**
17	W10×68	W21×73	W24×76	W21×83	W12×87	W16×67	W14×82	W21×73	W14×82	W24×76	**W12×87**
18	W24×104	W24×104	W18×97	W24×104	W18×86	W14×99	W14×109	W21×111	W30×124	W14×109	**W18×106**
19	W8×31	W8×31	W8×31	W8×31	W8×31	W10×33	W10×33	W6×20	W5×19	W5×19	**W6×15**
20	W16×45	W14×43	W16×50	W16×40	W16×40	W14×43	W16×40	W21×44	W18×46	W21×44	**W21×44**
21	W14×53	W24×76	W14×53	W21×62	W24×84	W10×60	W18×71	W21×55	W10×68	W10×100	**W16×57**
22	W12×72	W8×31	W14×68	W21×73	W12×53	W14×74	W14×90	W12×72	W12×72	W14×74	**W18×76**

Tablo 4.7 (Devam)

23	W8×31	W8×31	W8×31	W8×31	W8×31	W8×35	W8×48	W10×22	W8×21	W6×15	**W5×16**
24	W16×40	W16×40	W16×40	W16×40	W24×68	W18×50	W16×45	W16×45	W14×38	W18×35	**W18×40**
25	W16×40	W16×40	W14×43	W16×67	W21×68	W16×45	W14×74	W12×45	W16×57	W14×48	**W10×49**
26	W10×54	W10×49	W12×45	W12×53	W10×39	W12×53	W27×129	W21×55	W10×54	W14×120	**W18×50**
27	W8×31	W8×31	W8×31	W10×33	W8×31	W8×40	W12×40	W6×15	W6×20	W4×13	**W5×16**
28	W16×40	W16×40	W16×40	W16×40	W16×40	W16×45	W16×40	W18×46	W18×35	W18×35	**W18×35**
29	W8×31	W8×31	W8×35	W14×53	W24×76	W10×60	W21×83	W16×36	W8×40	W16×36	**W16×40**
30	W8×35	W8×35	W10×33	W12×45	W14×61	W16×67	W14×61	W21×62	W10×100	W10×45	**W14×43**
31	W8×31	W8×31	W10×33	W10×33	W8×31	W8×31	W10×49	W6×15	W6×20	W5×16	**W6×15**
32	W14×43	W14×43	W18×55	W18×55	W24×68	W24×68	W18×65	W21×44	W16×31	W18×35	**W18×35**
En iyi ağırlık (ton)	112.15	112.68	115.98	120.06	122.66	129.49	136.23	110.4	107.57	105.65	**102.96**
Yapı analiz sayısı	50000[1]	50000	50000[1]	50000	50000	50000	50000	30000	29427	28979	**27932**
Ortalama ağırlık (ton)	*	*	*	*	*	*	*	*****	113.26	111.69	**108.86**
En kötü ağırlık (ton)	*	*	*	*	*	*	*	*****	121.60	119.51	**117.39**
Standard sapma (ton)	*	*	*	*	*	*	*	*****	6.17	5.47	**4.81**
En büyük katlar arası göreli ötelenme oranı	0.00166	0.001715	0.001625	0.001582	0.001556	0.001503	0.001436	0.001909	0.001732	0.001786	**0.002171**
Katlar arası göreli ötelenme sınırı	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025
Dayanım oranı	0.998	0.997	0.989	0.965	0.998	0.973	0.989	0.948	0.998	0.995	0.985
Sınırlayıcı ihlal yüzdesi (%)	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-

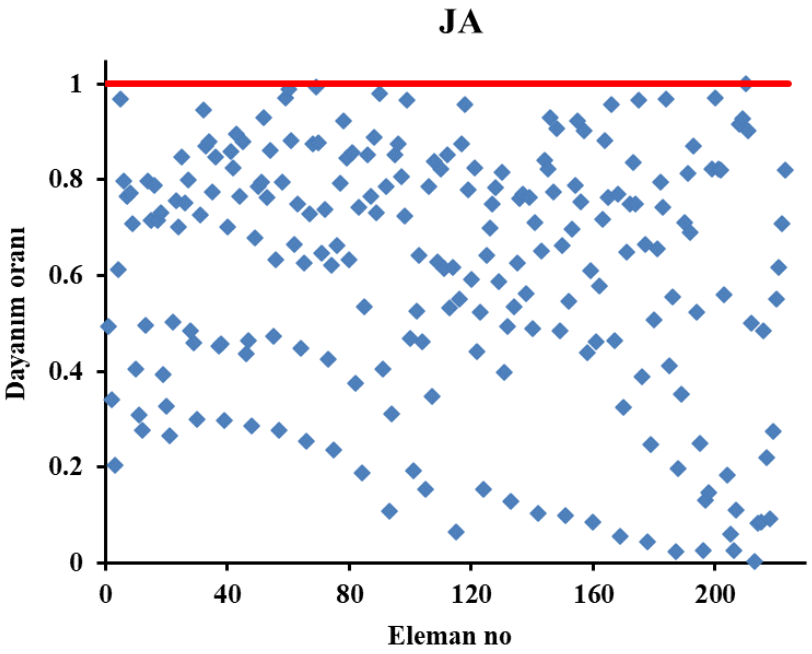
* Mevcut değil, [1]Yapılan çalışmada SA ve ESs ile sırasıyla 10000 ve 30000 analiz sayısında optimuma yakın değere ulaşıldığı ancak maksimum analiz sayısına kadar optimizasyona devam edildiği belirtilmiştir.

Literatürdeki yöntemlere ait optimum tasarıma yakınsama eğrileri Şekil 4.16'da verilmiştir. Yakınsama eğrileri incelendiğinde ESs yönteminin yakınsama hızının diğerlerine kıyasla daha iyi olmasına rağmen elde ettiği nihai optimum tasarım değerinin daha ağır olduğu görülmektedir. JA yöntemi, ortalama bir yakınsama davranışı gösterirken, SMA yönteminin nispeten yavaş kaldığı görülmektedir. Tüm eğriler göze alındığında HSMJA'nın en güçlü yakınsama davranışına sahip olduğu söylenebilir.

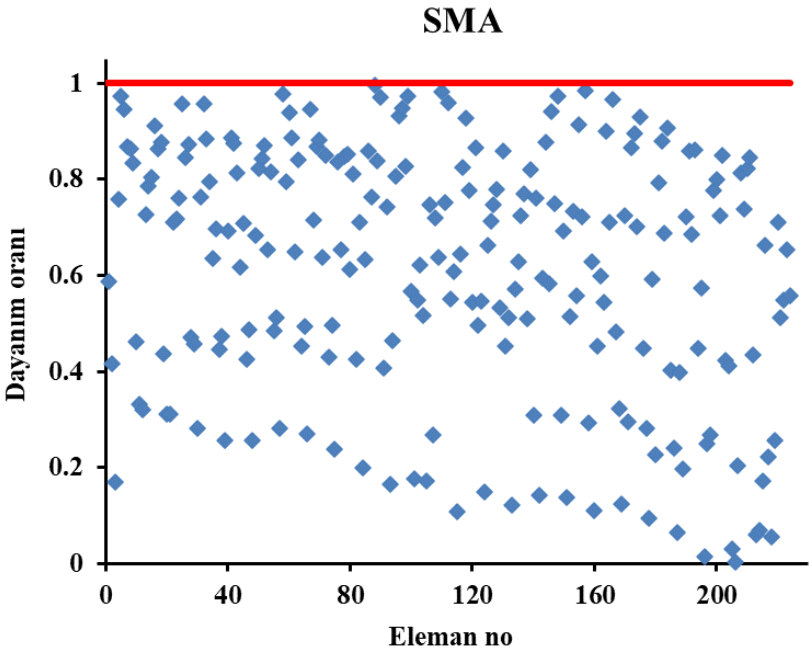


Şekil 4.16 224 elemanlı merkezi çaprazlı düzlem çelik çerçevenin farklı optimizasyon yöntemleri için yakınsama eğrilerinin karşılaştırılması

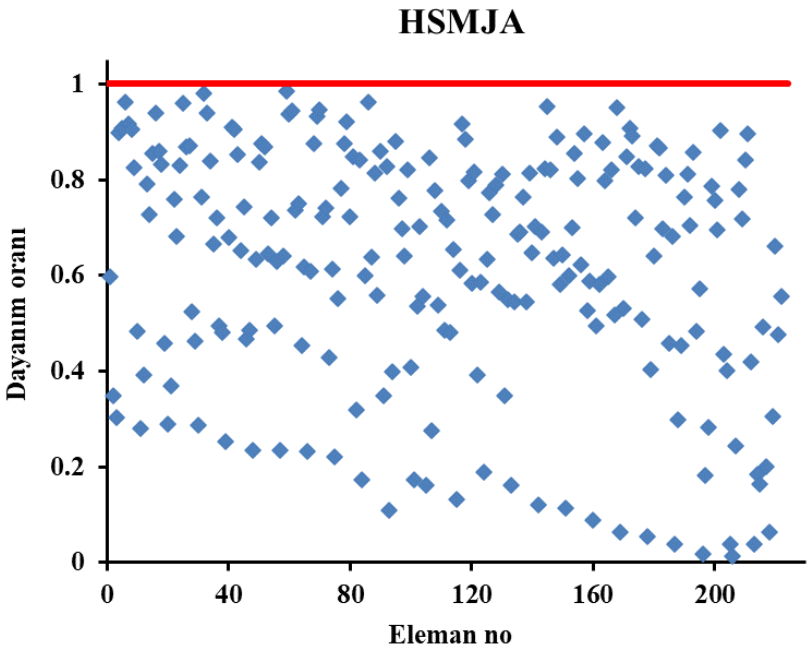
JA, SMA ve HSMJA ile elde edilen optimum tasarımların taşıyıcı elemanlarının dayanım oranları ve katlar arası göreli ötelenme oranları Şekil 4.17 ve 4.18'de sunulmuştur. Şekil 4.18'den görüleceği üzere, optimum tasarımlara ait katlar arası göreli ötelenme oranlarının, sınır değerlerin çok altında olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, 12. katın katlar arası göreli ötelenme oranının diğer katlara göre düşük olmasının nedeni, 12. katın açıklıklarında bulunan çapraz elemanların yatay rijitliği arttırmasıdır. Şekil 4.17'den anlaşılacağı üzere bu tasarım örneğinde dayanım sınırlayıcılarının belirleyici olduğu tespit edilmiştir.


JA
Dayanım oranı
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
40
80
120
160
200
Eleman no

(a)

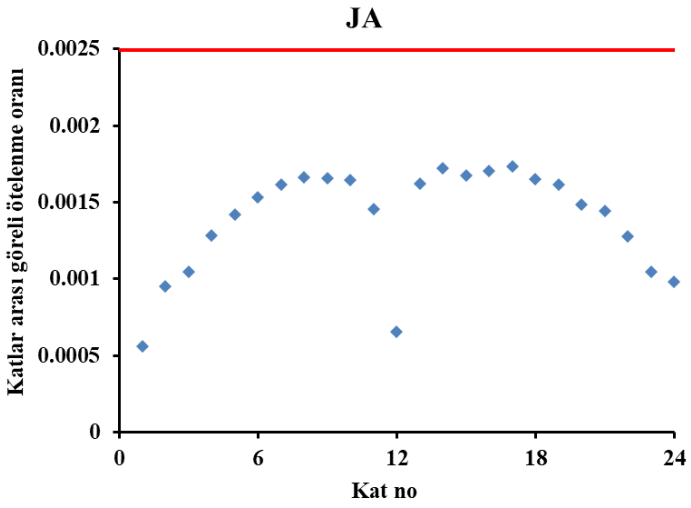

SMA
Dayanım oranı
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
40
80
120
160
200
Eleman no

(b)

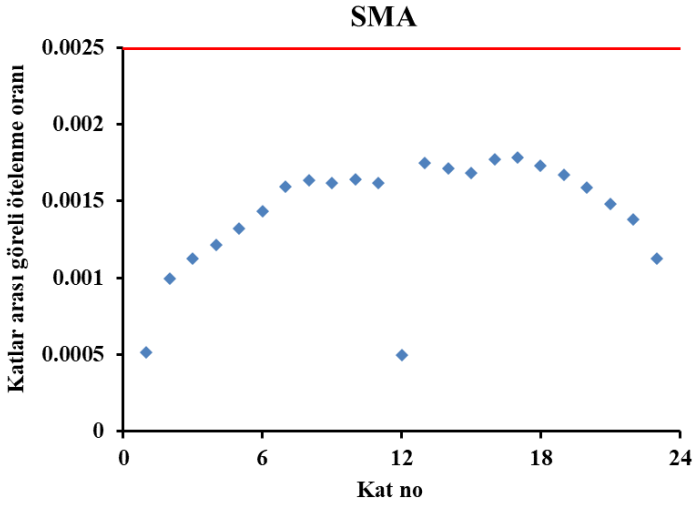


(c)

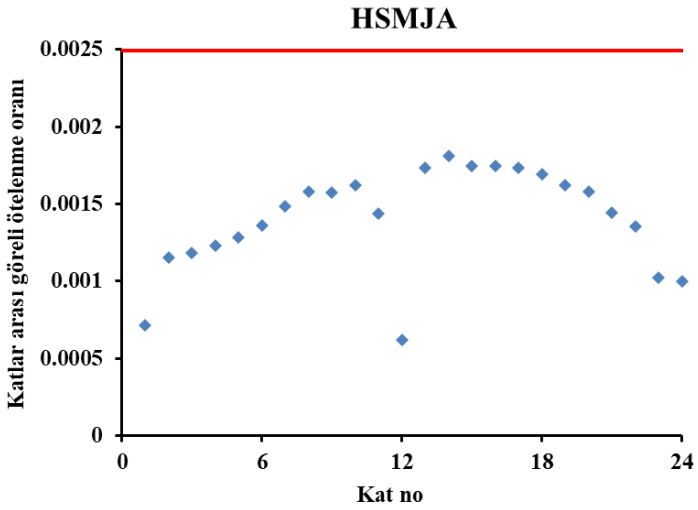
Şekil 4.17 224 elemanlı çaprazlı düzlem çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) HSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait eleman dayanım oranları



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.18 224 elemanlı çaprazlı düzlem çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) HSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait katlar arası göreli ötelenme oranları

4.2 Uzay Çelik Çerçevelerin JA, SMA ve PHSMJA Yöntemleri ile Optimum Tasarımı

Öne sürülen sezgisel algoritmaların uzay çelik çerçeve sistemlerin optimum tasarımında etkinliğinin araştırılması için literatürde yer alan 135 elemanlı çaprazlı uzay çerçeve, 1028 elemanlı çaprazlı uzay çerçeve, 1040 elemanlı çaprazlı uzay çerçeve ile 3860 elemanlı çaprazlı uzay çerçeve örnekleri optimize edilmiş ve diğer yöntemlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapı analizleri SAP2000 yazılımına yaptırılmış ve MATLAB programlama dilinde kodlanmış olan ana optimizasyon programına entegre edilmiştir. Hazırlanan program, 3860 elemanlı uzay

çelik çerçeve örneğinde her bir yöntem için beş, diğer örneklerde ise her bir yöntem için 10 farklı kez icra edilmiş ve tasarım sınırlayıcılarını sağlayan en hafif tasarım ile bu tasarımın elde edilmesi için gereken yapı analiz sayısı tablolarda verilmiştir. Ayrıca farklı icralar sonucu hesaplanan ortalama ağırlık, en kötü ağırlık ve standart sapma gibi istatistiksel değerler ile birlikte varsa sınırlayıcı ihlal yüzdeleri tablolarda sunulmuştur.

Uzay çelik çerçeve sistemlerin optimum tasarımı için önerilen JA, SMA ve PHSMJA algoritmalarında en uygun popülasyon sayısının belirlenmesi için 135 elemanlı uzay çerçeve örneğinin 10, 20, 30, 40 ve 50 popülasyon sayıları için optimum tasarım yapılmış ve elde edilen optimum ağırlık değerleri ile yapı analiz sayıları Tablo 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4.8 135 elemanlı uzay çelik çerçevenin farklı popülasyon sayılarına göre optimum tasarım sonuçları

Popülasyon sayısı (np)	**JA**		**SMA**		**PHSMJA**	
	Ağırlık (kg)	**Yapı analiz sayısı**	**Ağırlık (kg)**	**Yapı analiz sayısı**	**Ağırlık (kg)**	**Yapı analiz sayısı**
10	43.44	23902	41.14	21191	40.01	20457
20	41.67	22761	41.60	23656	39.94	19804
30	39.94	26585	38.27	24985	38.47	20863
40	**39.69**	**24761**	**37.02**	**22277**	**36.97**	**22064**
50	40.40	25487	39.78	19853	37.76	23198

Tablo 4.8'deki sonuçlara göre, uzay çerçevelerin optimum tasarımında en uygun popülasyon sayısı her üç yöntem için 40 olarak belirlenmiş ve diğer uzay çerçeve örnekleri için de bu değer kullanılmıştır.

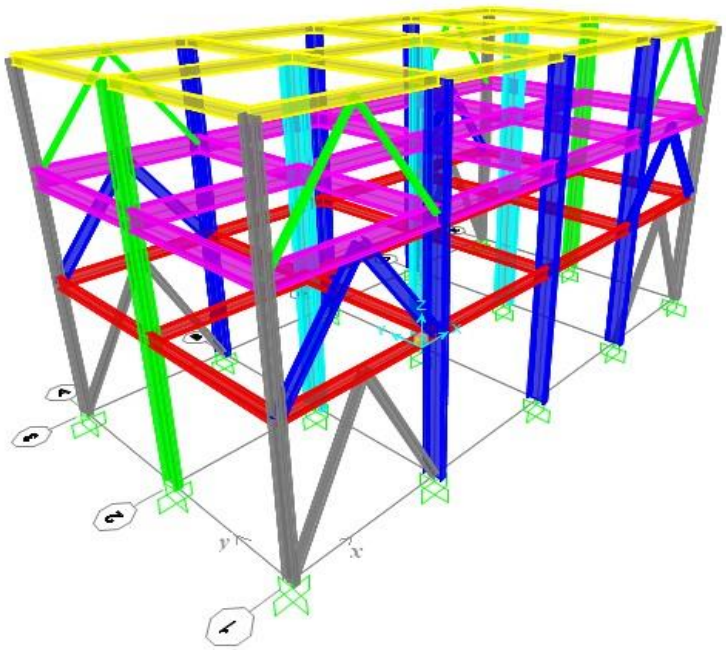
Ceza fonksiyonlarının hesabında kullanılan ceza sabiti (ε) değeri, her üç yöntemde 1 olarak alınmıştır. SMA ve PHSMJA yöntemlerinde rastgeleliği sağlayan *z* parametresinin değeri 0.03 olarak belirlenmiş, PHSMJA yönteminde *gr* baskınlık oranı 0.7 olarak tanımlanmış, JA yönteminde en iyi ve en kötü çözüm vektörlerin uzunluğunu belirten *n* değeri 3 olarak alınmıştır.

135, 1026 ve 3860 elemanlı uzay çelik çerçeve sistemlerin malzeme elastisite modülü, 20 GPa, akma dayanımı 248.2 MPa olarak tanımlanmıştır. Bu örneklerin sınırlayıcı şartları AISC-LRFD yönetmeliğinde belirlenen esaslara göre düzenlenmiştir. Optimizasyon işlemini durdurma kriteri olarak maksimum iterasyon sayısı şartı konulmuş olup, her bir örnek için sırasıyla 625, 1250 ve 1250 iterasyon sayısı olarak belirlenmiştir. Ayrıca bu örneklerin kullanıldığı orijinal çalışmada enkesit-boyut sınırlayıcılarının yanı sıra eleman kayma alanları ihmal edilirken bu çalışma kapsamında kolon-kiriş birleşimleri için belirlenen enkesit-boyut sınırlayıcıları da hesaba katılarak optimizasyon işlemi icra edilmiştir.

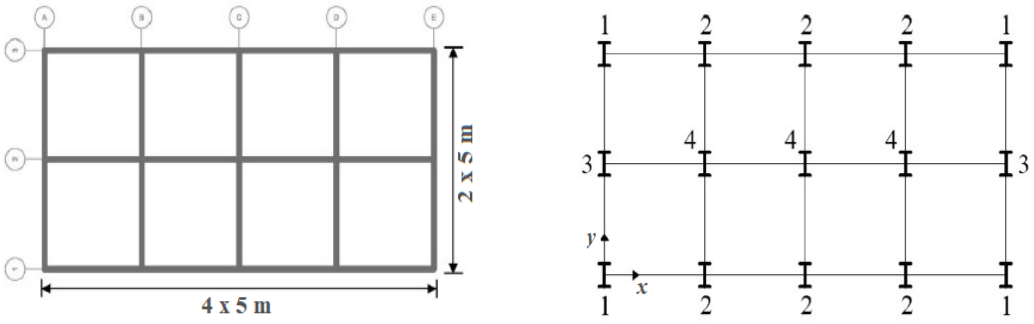
1040 elemanlı uzay çelik çerçeve sistemin malzeme elastisite modülü, 203.89 GPa, akma dayanımı ise 253.1 MPa olarak tanımlanmıştır. Sınırlayıcı koşulları, AISC-ASD yönetmeliğinde tanımlanan sınır değerlere göre düzenlenmiştir. Maksimum iterasyon sayısı 625 olarak tanımlanmıştır.

4.2.1 135 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçeve

Uzay çelik çerçeve sistemlerin optimum tasarımı için kullanılan ilk örnek olan üç katlı, 135 elemanlı çaprazlı çerçeve örneği (Azad vd., 2013) kullanılmıştır. Sistemin geometrisi, eleman gruplandırılması ve üç boyutlu görünüşü Şekil 4.19'da verilmiştir.



(a)



(b) (c)

Şekil 4.19 135 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçeve (a) Üç boyutlu görünüş (b) Plan (c) Kolon yerleşimi (Azad, 2021)

Köşe kolonlar, *xz* eksenindeki kenar kolonlar, *xy* eksenindeki kenar kolonlar, iç kolonlar, her katın kirişleri ve çaprazları farklı grupta olacak şekilde taşıyıcı elemanlar 10 farklı eleman grubuna ayrılmıştır. Sistemin yanal rijitliğinin arttırılması için *xz* doğrultusunda V tipi çaprazlar kullanılmıştır. Sisteme etki eden yükler, ASCE7-98 (2000)'de belirtilen 10 farklı yük birleşime göre aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

1. 1.4D
2. 1.2D + 1.6 L
3. 1.2D + 1.0E_x +0.5L
4. 1.2D + 1.0E_{ex}+0.5L
5. 1.2D + 1.0E_y+0.5L
6. 1.2D + 1.0E_{ey}+0.5L
7. 0.9D + 1.0E_x
8. 0.9D + 1.0E_{ex}
9. 0.9D + 1.0E_y
10. 0.9D + 1.0E_{ey}

burada, "D" zati yükü, "L" hareketli yükü, "E_x" ve "E_{ey}", *x* ve *y* yönünde sistemin kütle merkezine etki eden deprem yükünü, "E_{ex}" ve "E_{ey}", *x* ve *y* yönünde sistemin kütle merkezine %5 lik eksantrisite ile etki eden deprem yükünü ifade eder. Normal ve çatı katı kirişlerine etki eden zati yükler sırasıyla 20 kN/m ve 15 kN/m, hareketli yükler ise

sırasıyla 12 kN/m ve 7 kN/m olarak belirlenmiştir. Ayrıca, sistemin kendi ağırlığı da hesaba katılmıştır. Deprem yükleri, ASCE 7-98 (2000) Bölüm 9.5.5'te belirtilen eşdeğer deprem yükü yöntemi esaslarına göre hesaplanmıştır. Bu örnekte sismik taban kesme kuvveti;

$$V = c_s . W_s \tag{4.1}$$

şeklinde hesaplanır. Burada "c_s" sismik tasarım katsayısını, "W_s" sistemin toplam zati ağırlığını temsil etmektedir. c_s katsayısı, yapı önem katsayısına ve çerçevenin kısa periyottaki spektral ivmesine bağlı olarak hesaplanır. Bu örnekte $c_s = 0.15$ olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan taban kesme kuvveti her bir kata aşağıdaki denklem hesaplanarak etki ettirilir:

$$F_x = \frac{w_x h_x^k V}{\sum_{i=1}^{n} w_i h_i^k} \tag{4.2}$$

burada "F_x" *x* seviyesinde etki eden deprem kuvvetini, "*w"* ilgili katın ağırlığını, "h_i*"* *i*-nci katın tabandan yüksekliğini, *k* ise sistemin periyoduna bağlı yapı yükseklik katsayısıdır. Periyodu 0.5 saniyenin altında olan yapı sistemleri için 1, periyodu 2.5 saniyenin üzerinde olan sistemler için ise 2 alınmaktadır. Bu iki değer aralığında ise *k* parametresi lineer enterpolasyon yöntemi ile elde edilir. ASCE 7-98 (2000) yönetmeliğine göre yaklaşık periyot hesabı aşağıdaki bağıntı ile elde edilir:

$$T = C_T . h_n^{3/4} \tag{4.3}$$

burada "C_T" ASCE 7-98 (2000) Tablo 9.5.5.3.2'te belirtilen, çerçeve sistemin tipine göre değişen bir katsayı olup ve bu örnekte 0.0853 alınmıştır. "h_n" çerçeve sistemin yüksekliği olup 12 m'dir. Bu değerler denklem (4.3)'te yerine yerleştirildiğinde çerçeve sistemin yaklaşık periyodu 0.55 saniye olarak belirlenir. Yukarıda belirtildiği gibi sistemin periyodu 0.5 saniyeden büyük olduğu için lineer enterpolasyon ile *k* parametresi 1.025 olarak hesaplanır. Bulunan bu değerler ile denklem (4.2) kullanılarak katlara etki eden deprem yükleri hesaplanmış olur. Optimizasyon yapılırken her iterasyonda tasarım değişkenleri (eleman gruplarına atanan enkesitler)

güncelleneceğinden çerçeve sistemin ağırlığı sürekli değişecektir. Bu yüzden, deprem yüklemeleri sabit olarak tanımlanmamış, sistemin ağırlığına göre değişecek şekilde modellenmiştir. Çerçeve kirişleri, uzunlukları boyunca döşeme sistemi tarafından desteklendiği için yanal ötelenmesi önlenmiş olarak modellenmiştir. Kolon ve çaprazlar ise uzunlukları boyunca yanal ötelenmeleri önlenmemiş olarak tanımlanmıştır. Efektif uzunluk faktörü (K) kiriş ve çaprazlar için 1 olarak alınmıştır. Kolonlar için eğilmede zayıf yöndeki K faktörü 1 olarak alınırken, eğilmede kuvvetli yöndeki K faktörü, Bölüm 3.5.1'deki bağıntılara göre hesaplanmıştır.

En üst kat en büyük deplasman için müsaade edilen değer 0.03 m olarak belirlenmiş, en büyük katlar arası göreli ötelenme değeri de kat yüksekliğinin 400'de biri (h/400) olarak hesaplanmıştır. Döşemeler, rijit diyafram varsayımı yapılarak modellendiğinden, her bir katın farklı düğüm noktalarının yatay doğrultudaki deplasmanı birbirine eşit olmaktadır.

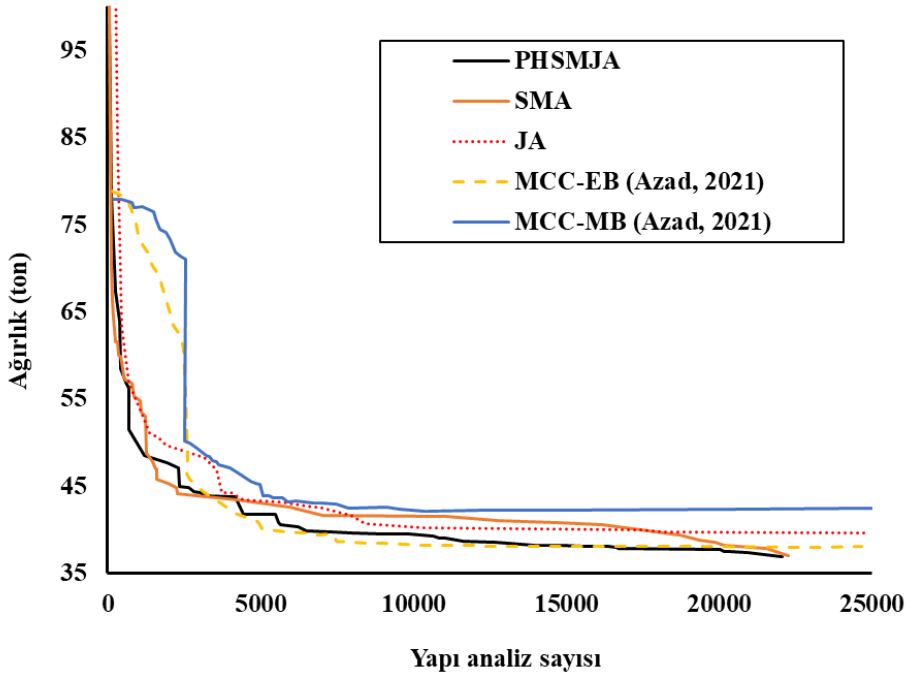
Daha önce Azad (2021) tarafından MBB-BC, MCC-MB, MCC-EB ve EBB-BC yöntemleriyle optimum tasarımı yapılan 135 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin JA, SMA ve paralel hesaplama ile icra edilen PHSMJA yöntemleriyle optimizasyonu yapılmıştır. JA, SMA ve PHSMJA elde edilen sonuçlar literatürdeki diğer optimizasyon yöntemlerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalı olarak Tablo 4.9'da sunulmuştur. Buna göre sınırlayıcıları sağlayan en hafif tasarım, PHSMJA ile 22064 yapı analizi sonunda 36.97 ton olarak bulunmuştur. JA ve SMA ile sırasıyla 24761 ve 22277 yapı analizi sonunda 39.69 ton ve 37.02 ton ağırlıklara sahip tasarımlar elde edilmiştir. Bu durumda JA'nın diğer yöntemlere göre daha kötü bir performans gösterdiği, SMA'nın ise PHSMJA'dan sonra en iyi tasarıma sahip yöntem olduğu söylenebilir. Literatürdeki tasarımlar için sınırlayıcı kontrolleri yapıldığında MCC-EB ile elde edilen tasarımın dayanım sınırlayıcılarını %0.72 oranında ihlal ettiği tespit edilmiştir.

Tablo 4.9 135 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin optimum tasarım sonuçlarının karşılaştırılması

		MBB-BC (Azad, 2021)	MCC-MB (Azad, 2021)	EBB-BC (Azad, 2021)	MCC-EB (Azad, 2021)	JA	SMA	**PHSMJA**
1	KL1	W24×62	W16×40	W16×40	W16×36	W12×35	W12×35	**W16×40**
2	KL2	W24×68	W21×62	W18×60	W24×68	W21×68	W24×68	**W18×60**
3	KL3	W18×50	W36×150	W27×84	W24×68	W24×94	W24×84	**W24×68**
4	KL4	W21×68	W21×62	W24×68	W30×90	W21×68	W24×68	**W30×90**
5	KR1	W21×44	W14×26	W21×44	W16×26	W21×50	W21×44	**W18×35**
6	KR2	W18×35	W24×55	W18×35	W24×55	W21×44	W21×44	**W24×55**
7	KR3	W16×26	W12×16	W16×26	W12×16	W10×22	W12×16	**W12×16**
8	ÇR1	W16×36	W16×36	W14×30	W8×24	W12×30	W8×28	**W8×24**
9	ÇR2	W16×26	W10×22	W16×26	W14×22	W8×21	W6×15	**W6×15**
10	ÇR3	W16×26	W21×44	W4×13	W4×13	W6×15	W6×15	**W4×13**
En iyi Ağırlık (ton)		39.52	39.98	37.36	36.76	39.69	37.02	**36.97**
Yapı analiz sayısı		25000	25000	25000	25000	24761	22277	**22064**
Ortalama ağırlık (ton)		46.07	41.41	39.15	37.33	43.18	40.19	**39.9**
En kötü ağırlık (ton)		56.69	54.91	41.66	38.42	44.11	42.51	**41.67**
STD (ton)		4.44	3.76	1.39	0.44	1.32	2.05	**1.71**
Dayanım sınırlayıcısı ihlali yüzdesi (%)		0	0	0	0.72	0	0	**0**

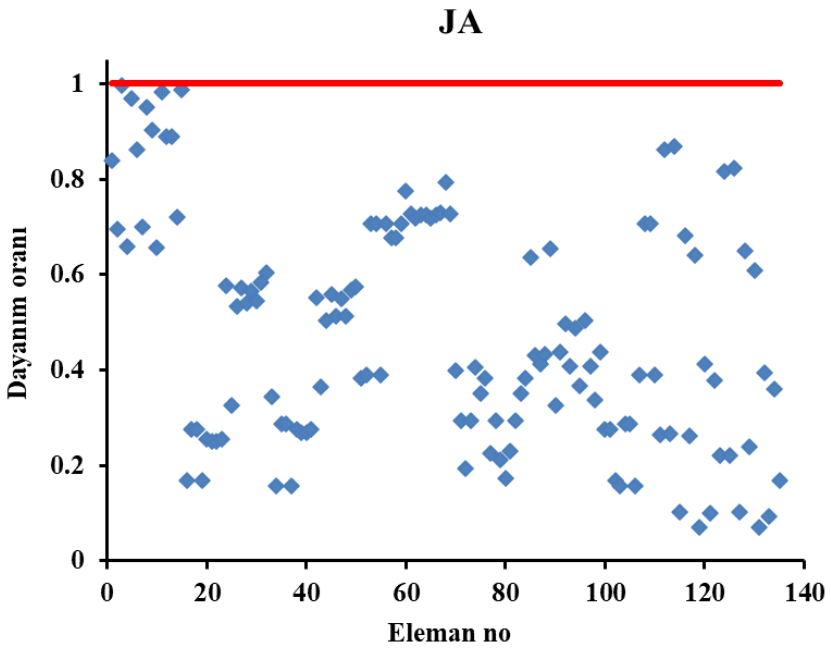
KL: Kolon grubu, KR: Kiriş grubu, ÇR: Çapraz grubu

MCC-EB ve MCC-MB yöntemlerinin ortalama yakınsama eğrileri göz önüne alınarak hazırlanan grafikte JA, SMA ve PHSMJA yöntemlerinin optimum tasarıma yakınsama eğrileri karşılaştırılmıştır (Şekil 4.20). Hazırlanan grafikte, JA, SMA ve PHSMJA benzer bir yakınsama davranışına sahip olsa da nihai sonuca ulaşma açısından PHSMJA'nın çok daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, her üç yöntemin yakınsama hızının, literatürdeki diğer yöntemlerin hızına göre daha iyi olduğu saptanmıştır.

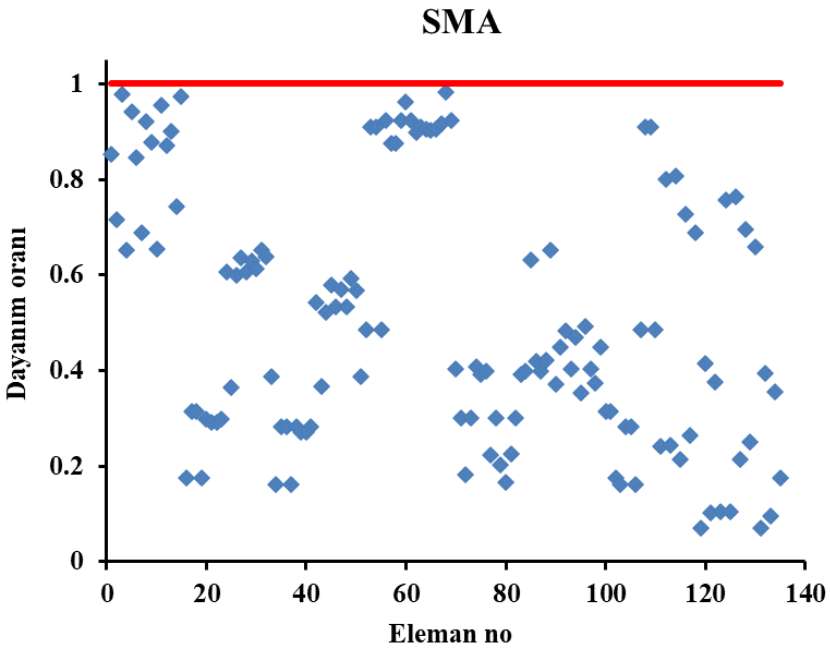


Şekil 4.20 135 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin farklı optimizasyon yöntemleri için yakınsama eğrilerinin karşılaştırılması

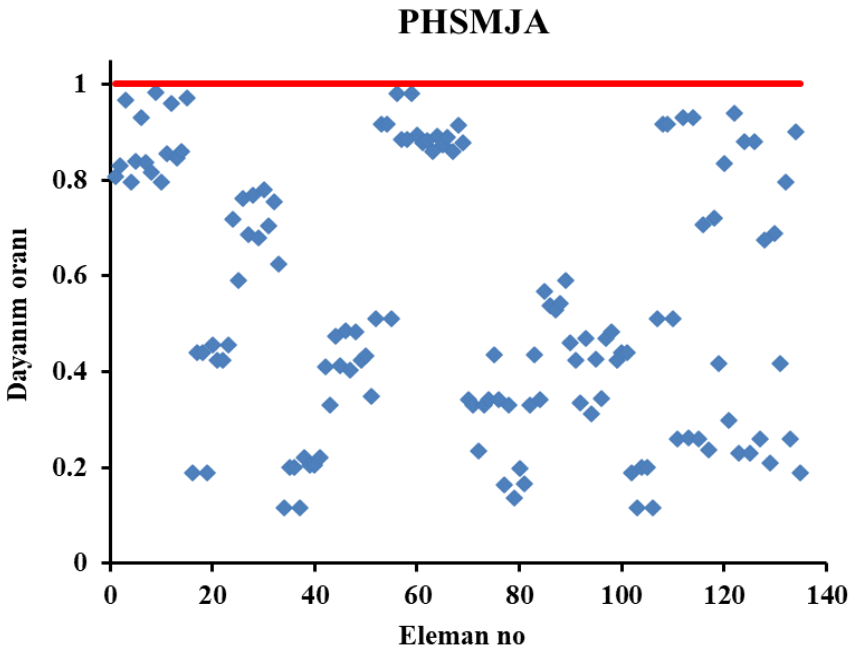
Her üç yöntem için yapılan optimizasyonda 25000 yapısal analiz icra edilmiştir. Optimizasyon süreleri değerlendirildiğinde, JA ile 24 saat 30 dakika, SMA ile 22 saat 18 dakika süren optimizasyon işlemi, analizlerin yardımcı bilgisayarlara eş zamanlı dağıtıldığı PHSMJA yöntemi ile 4 saat 18 dakika sürmüştür. Hazırlanan paralel hesaplamalı yöntem sayesinde analiz süresi JA'ya göre %82.4, SMA'ya göre %80.7 oranında azalmıştır. Elde edilen optimum tasarımların taşıyıcı elemanlarına ait dayanım oranları ve katlar arası göreli ötelenme oranları Şekil 4.21 ve 4.22'de verilmiştir. Şekillerden anlaşıldığı gibi, JA, SMA ve PHSMJA ile elde edilen tasarımların sınırlayıcıları sağladığı görülmektedir.


JA
Dayanım oranı
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
20
40
60
80
100
120
140
Eleman no

(a)

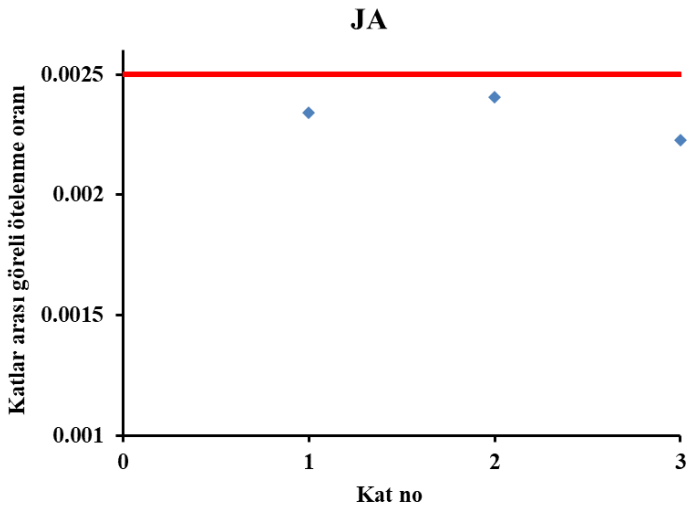

SMA
Dayanım oranı
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
20
40
60
80
100
120
140
Eleman no

(b)

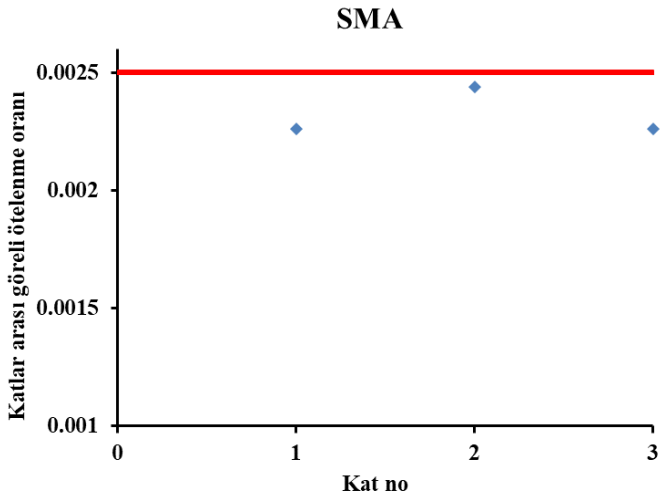


(c)

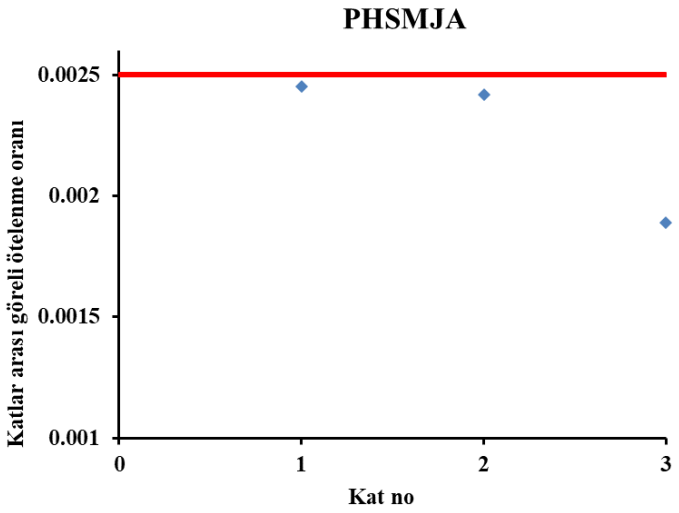
Şekil 4.21 135 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) PHSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait dayanım oranları



(a)



(b)

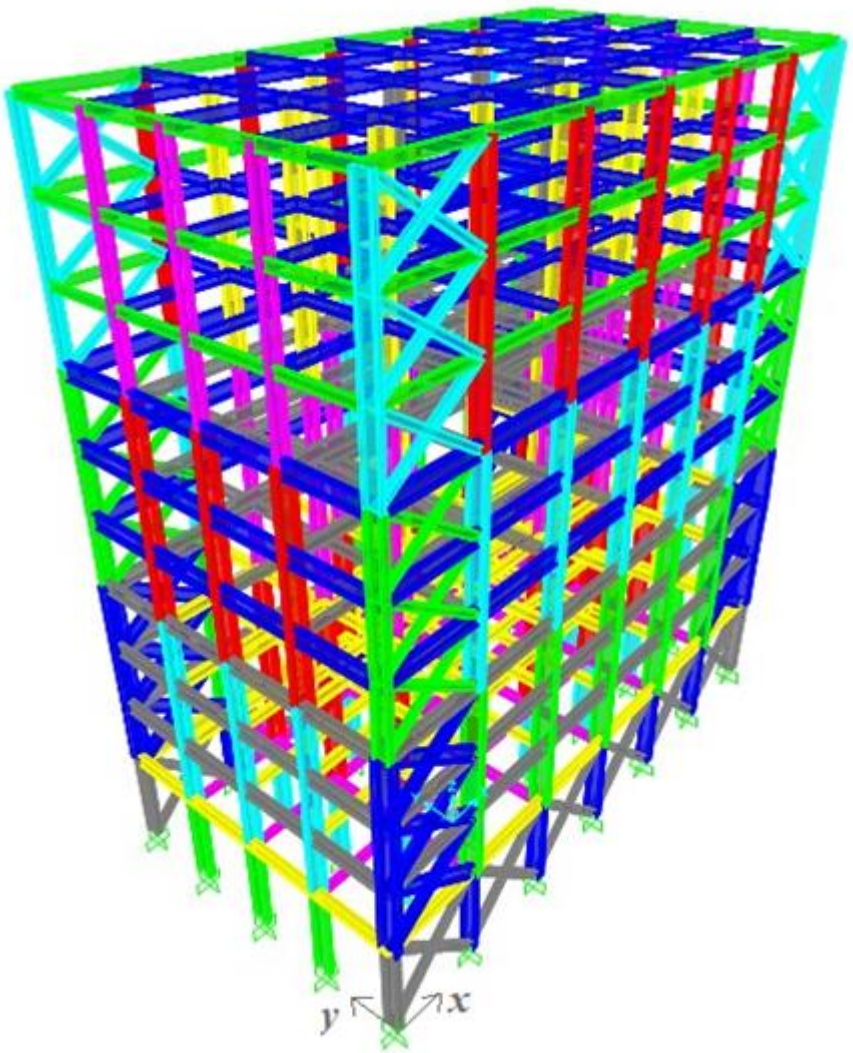


(c)

Şekil 4.22 135 elemanlı çaprazlı düzlem çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) PHSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait katlar arası göreli ötelenme oranları

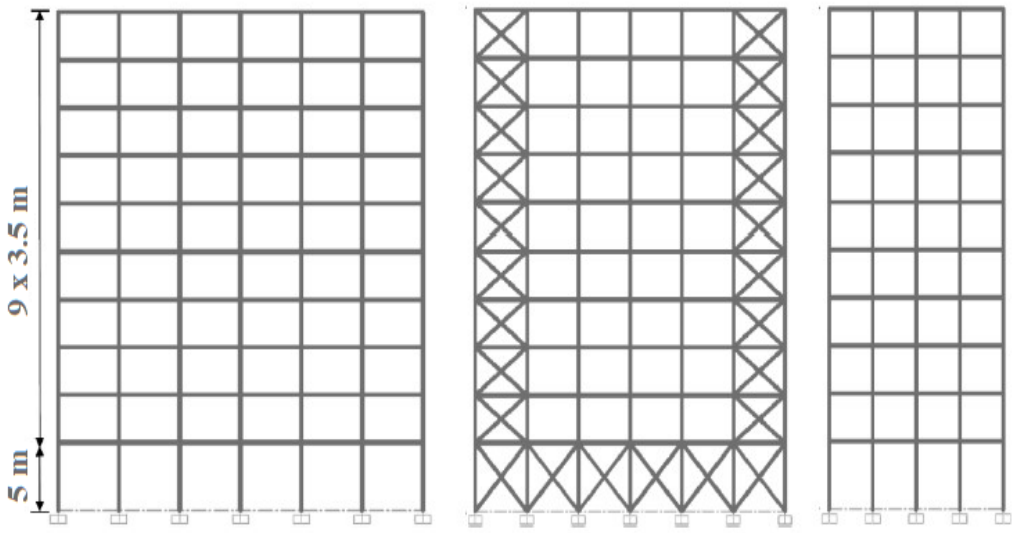
4.2.2 1026 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçeve

Azad vd. (2013) tarafından oluşturulan 10 katlı, 36.5 m yüksekliğindeki 1026 elemanlı çaprazlı çelik çerçeve örneği, uzay çerçeve sistemlerin optimum tasarımı için ikinci karşılaştırma örneği olarak ele alınmıştır. Sistemin geometrisi, cephe görünüşleri ve kolon yerleşimi Şekil 4.23'te verilmiştir.



(a)

.



(b) (c) (d)



(e)

Şekil 4.23 1026 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçeve (a) Üç boyutlu görünüş (b) İç aksların önden görünüşü (c) Dış aksların önden görünüşü (d) Yan görünüş (e) Kolon yerleşimi (Azad, 2021)

İlk katın kolonları hariç ikinci kattan itibaren her üç katın köşe kolonları, *xz* eksenindeki kenar kolonları, *xy* eksenindeki kenar kolonları ve iç kolonlar, dış kirişler ve iç kirişler ile çaprazlar Şekil 4.23(e)'de gösterildiği gibi ayrı ayrı gruplandırılmıştır. Toplamda 20 kolon, 8 kiriş ve 4 çapraz grubu olmak üzere taşıyıcı elemanlar 32 farklı gruba ayrılmıştır. Yanal rjitliğin sağlanması açısından *x* doğrultusundaki dış akslarda X tipi çaprazlar kullanılmıştır.

Sisteme etki eden yükler, önceki örnekte olduğu gibi, ASCE7-98 (2000)'de belirtilen 10 farklı yük birleşimine göre tanımlanmıştır. Normal ve çatı katı kirişlerine etki eden zati yükler sırasıyla 20 kN/m ve 15 kN/m, hareketli yükler ise sırasıyla 12 kN/m ve 7 kN/m olarak belirlenmiştir. Ayrıca, sistemin kendi ağırlığı da hesaba katılmıştır. Deprem yükleri, ASCE 7-98 (2000)'de belirtilen eşdeğer deprem yükü yöntemine göre önceki örnekte açıklandığı gibi hesaplanmıştır. Buna göre C_T, 0.0853 olarak alınmış, h_n=36.5 m olup sistemin yaklaşık sismik periyodu *T,* denklem (4.2) yardımıyla 1.267 saniye olarak hesaplanmıştır. Bu periyot değerine bağlı olarak lineer enterpolasyon ile *k* parametresi 1.38 olarak elde edilmiştir. Toplam deprem yükünün hesabı için denklem (4.1)'de kullanılan sismik tasarım katsayısı *cs*, bu tasarım örneği için 0.1 olarak belirlenmiştir.

Çerçeve kirişlerinin yanal ötelenmesi önlenmemiş uzunlukları, kiriş uzunluklarının 1/5'i olarak belirlenmiştir. Kolon ve çaprazlar da uzunlukları boyunca yanal ötelenmeleri engellenmemiş olarak tanımlanmıştır. Efektif uzunluk faktörü (*K*) kiriş ve çaprazlar için 1 olarak alınmıştır. Kolonlar için eğilmede zayıf yöndeki *K* faktörü 1 olarak alınırken, eğilmede kuvvetli yöndeki *K* faktörü, Bölüm 3.5.1'deki bağıntılara göre hesaplanmıştır. En üst kat için müsaade edilen en büyük deplasman değeri 0.1 m olup katlar arası göreli ötelenme değeri kat yüksekliğinin 400'de biri (h/400) olarak tanımlanmıştır. Döşemeler, rijit diyafram varsayımı yapılarak modellendiğinden her bir katın döşeme seviyesindeki düğüm noktalarının yatay doğrultuda yaptıkları deplasman aynıdır.

Normalde rastgele üretilen başlangıç popülasyonu çoğunlukla uygulanabilir olmayan ve optimum değer bakımından zayıf tasarımlar meydana getirmektedir. Azad (2014), başlangıç popülasyonunun sınırlayıcıları sağlayan uygulanabilir tasarımlardan oluşmasını sağlamak amacıyla başlangıç enkesitlerinin rastgele seçilmesi yerine büyük enkesitlerden seçilmesinin daha etkili bir optimizasyon süreci ortaya koyacağını ileri sürmüştür. Buna göre başlangıç popülasyonu, enkesit yüksekliğine göre büyükten küçüğe doğru sıralanmış enkesitlerden birden başlayıp beşerli atlanarak seçilmiştir. Seçilen enkesitler, tasarımın tüm elemanlarına atanarak uygulanabilirliği muhtemel tasarımlar oluşturulmuştur. Burada amaç, optimizasyon işlemini daha uygun bir başlangıç noktasından başlatıp daha iyi sonuçlar alabilmektir (Azad, 2014).

Daha önce geleneksel boyutlandırma ve QDSO (Talatahari ve Azizi, 2020a), Tribe-ISA (Talatahari ve Azizi, 2020b), ACSS (Kaveh vd., 2020), VPS ve Hybrid VPS-MBLS III (Talatahari vd., 2021) yöntemleri kullanılarak elde edilen optimum tasarım sonuçları ile bu çalışmada kapsamında JA, SMA ve PHSMJA yöntemlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve Tablo 4.10'da sunulmuştur. Tablo 4.10 incelendiğinde, en hafif tasarımın 37278 yapı analizi sonunda 508.43 ton olarak PHSMJA yöntemiyle elde edildiği görülmektedir. SMA ve JA ile sırasıyla 34413 ve 39946 yapı analizi sonunda 520.74 ton ve 528.72 ton ağırlığında tasarımlar bulunmuştur. Geleneksel yöntem, Tribe-ISA, ACSS, VPS, Hybrid VPS-MBLS III yöntemlerinden elde edilen tasarımlar, dayanım sınırlayıcılarını ihlal ettiğinden SMA ve JA yöntemleriyle elde edilen tasarımların diğer bütün yöntemlerden daha iyi olduğu

sonucuna varılabilir. Ortalama ağırlık ve standart sapma değerleri açısından JA ve PHSMJA'nın SMA'ya göre daha iyi bir performans gösterdiği belirlenmiştir.

Tablo 4.10 1026 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçeve sistemin optimum tasarım sonuçlarının karşılaştırılması

			Geleneksel yöntem (Talatahari ve Azizi, 2020a)	QDSO (Talatahari ve Azizi, 2020a)	Tribe-ISA (Talatahari ve Azizi, 2020b)	ACSS (Kaveh vd., 2020)	VPS (Talatahari vd., 2021)	Hybrid VPS-MBLS III (Talatahari vd., 2021)	JA	SMA	**PHSMJA**
1	1. kat	KL1	W18×258	W36×359	W40×466	W40×431	W40×466	W36×245	W44×262	W44×262	**W36×439**
2		KL2	W14×283	W36×182	W33×169	W44×230	W40×215	W24×117	W14×99	W40×149	**W33×130**
3		KL3	W12×336	W33×221	W40×149	W40×211	W24×131	W24×176	W21×101	W44×262	**W30×211**
4		KL4	W44×290	W36×182	W40×149	W27×194	W27×146	W40×174	W33×152	W40×211	**W18×119**
5		KL5	W14×145	W33×221	W12×120	W36×230	W21×147	W21×132	W36×150	W27×178	**W40×235**
6		IK	W24×103	W14×26	W18×50	W21×44	W8×21	W8×18	W24×55	W12×22	**W18×40**
7		DK	W12×35	W18×46	W10×39	W8×24	W18×40	W33×152	W18×46	W14×22	**W10×45**
8		ÇR	W14×68	W10×54	W8×28	W8×24	W14×82	W8×31	W12×65	W12×53	**W18×76**
9	2.-4. kat	KL1	W12×152	W33×241	W40×297	W12×230	W33×263	W36×245	W40×278	W40×249	**W33×291**
10		KL2	W36×230	W24×162	W24×146	W30×235	W40×167	W36×160	W33×130	W27×146	**W30×173**
11		KL3	W24×84	W30×173	W27×94	W33×241	W14×99	W30×124	W14×99	W27×114	**W36×182**
12		KL4	W33×152	W33×130	W24×117	W30×116	W33×130	W21×111	W30×173	W40×149	**W30×99**
13		KL5	W18×283	W44×230	W24×117	W21×132	W14×120	W18×130	W14×176	W27×146	**W30×173**
14		IK	W21×44	W21×83	W24×76	W14×22	W27×94	W24×68	W30×90	W27×84	**W16×31**
15		DK	W24×94	W18×50	W16×50	W33×118	W18×46	W24×62	W14×22	W16×31	**W33×118**
16		ÇR	W24×68	W12×53	W14×68	W10×49	W8×58	W10×77	W12×45	W8×48	**W10×54**
17	5.-7. Kat	KL1	W14×120	W14×159	W30×124	W33×263	W21×166	W40×167	W36×160	W36×194	**W33×118**
18		KL2	W14×193	W33×201	W18×119	W18×143	W14×120	W14×145	W18×76	W14×99	**W14×99**
19		KL3	W44×230	W40×149	W14×109	W27×94	W36×160	W30×116	W36×160	W40×174	**W36×170**
20		KL4	W12×106	W14×74	W14×145	W10×77	W14×193	W16×77	W27×161	W12×72	**W30×90**
21		KL5	W27×448	W21×93	W27×178	W24×103	W18×71	W16×100	W14×99	W40×149	**W24×131**
22		IK	W16×26	W16×31	W30×99	W21×44	W24×62	W18×40	W18×40	W16×31	**W21×44**
23		DK	W40×149	W33×118	W16×36	W33×130	W21×68	W33×130	W33×118	W40×149	**W30×90**

Tablo 4.10 (Devam)

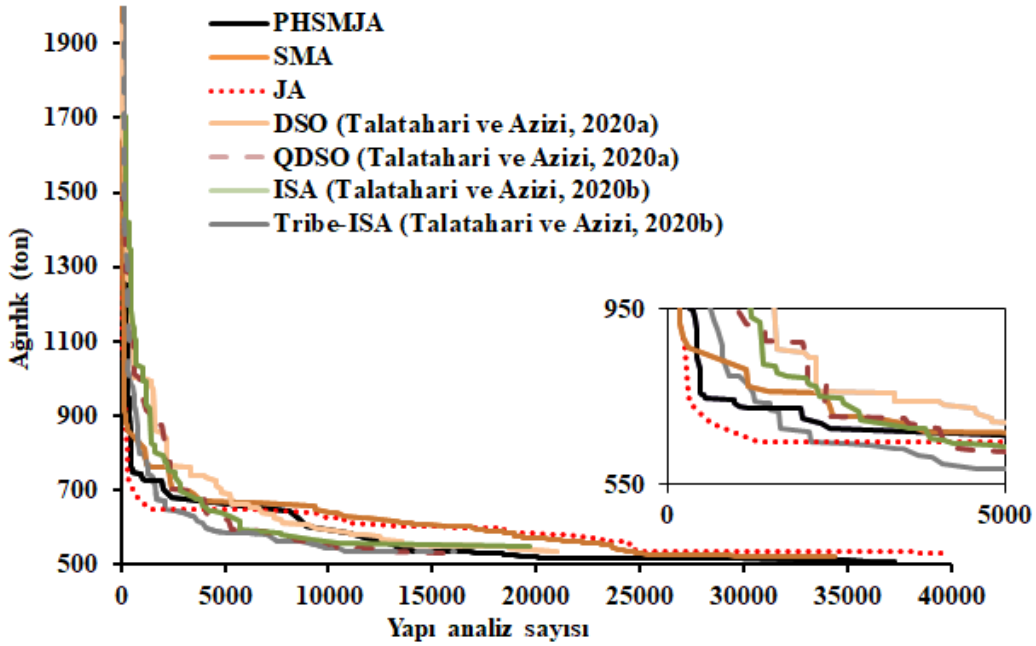
24	8.-10. kat	ÇR	W12×120	W10×45	W8×40	W12×53	W8×40	W18×60	W18×71	W12×58	**W12×58**
25		KL1	W14×38	W18×97	W12×96	W18×86	W18×40	W27×102	W24×68	W12×30	**W30×173**
26		KL2	W18×71	W12×53	W14×176	W14×74	W12×58	W14×109	W14×132	W14×109	**W14×132**
27		KL3	W33×291	W36×160	W27×84	W18×76	W16×57	W24×94	W33×118	W30×90	**W27×84**
28		KL4	W16×67	W8×35	W16×77	W21×93	W21×122	W33×141	W14×90	W24×68	**W14×109**
29		KL5	W40×149	W14×132	W33×130	W12×170	W16×77	W16×45	W12×87	W12×79	**W10×45**
30		IK	W24×55	W16×31	W16×26	W14×30	W18×55	W21×50	W18×35	W21×50	**W16×26**
31		DK	W18×71	W24×62	W18×55	W21×62	W16×36	W12×30	W24×55	W21×44	**W21×44**
32		ÇR	W12×120	W14×68	W18×55	W16×77	W14×90	W12×65	W14×38	W16×57	**W14×34**
En iyi ağırlık (ton)			668.22	530.33	532.44	540.38	555.64	534.11	528.7175	520.74	**508.43**
Yapı analiz sayısı			-	16000	16000	21000	25000	11000	39946	34413	**37278**
Ortalama ağırlık (ton)			-	*	579.36	581.746	581.4	543.65	546.75	542.68	**533.51**
En kötü ağırlık (ton)			-	*	*	*	619.27	556.05	574.53	590.52	**562.75**
Standart sapma (ton)			-	*	22.26	21.75	20.41	6.57	18.01	25.69	**20.46**
Dayanım sınırlayıcıları ihlal yüzdesi (%)			28	0	22	35	24	21	0	0	**0**

*Mevcut değil.

** KL1,2,3,4,5: Kolon grupları (Bkz. Şekil 4.23(e)), IK: İç kiriş grupları, DK: Dış aks kiriş grupları, ÇR: Çapraz grupları

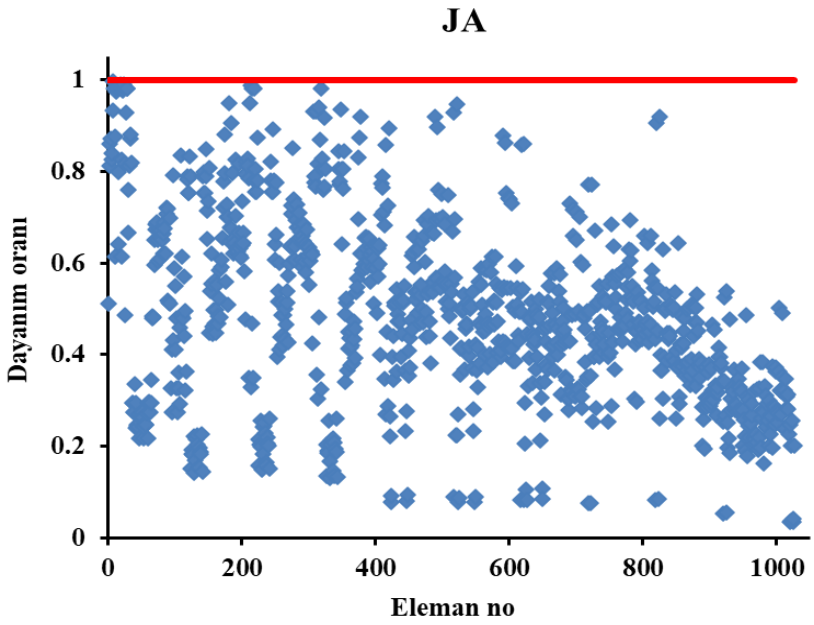
Tablo 4.10‘da sunulan yöntemlerin sonuçları tasarım sınırlayıcıları açısından değerlendirilmiş ve sınırlayıcı ihlal durumunun tespiti için gerekli kontroller yapılmıştır. Buna göre Talatahari ve Azizi (2020) tarafından yapılan çalışmada, tasarımcının mesleki tecrübesine dayanarak yaptığı boyutlandırma işlemini “geleneksel yöntem” olarak adlandırmış ve 1026 elemanlı uzay çerçeve sistemini boyutlandırmıştır. Elde edilen 668.22 ton ağırlığındaki tasarımın sınırlayıcı kontrolü yapıldığında dayanım sınırlayıcılarını %28 oranında aşan taşıyıcı elemanların bulunması, tasarımın uygulanabilir olmadığını göstermektedir. Tribe-ISA yöntemi ile elde edilen tasarım için yapılan kontrollerde 1. kat çapraz elemanların maruz kaldığı basınç kuvvetini karşılayamadığı ve maruz kalınan basınç kuvvetinin elemanın dayanım kapasitesini %22 oranında aştığı görülmüştür. ACSS ile elde edilen optimum tasarımda birinci katta basınç etkisindeki çapraz elemanların da dayanım kapasitelerini %35 oranında aştığı belirlenmiştir. VPS yöntemindeki optimum tasarım sonuçları incelendiğinde dayanım sınırlayıcılarının %24’e varan oranlarda aşıldığı görülmüştür.

Literatürdeki yöntemlerin optimum tasarıma yakınsama eğrileri Şekil 4.24’te gösterilmiştir. Buna göre, JA’nın başlangıçta hızlı bir yakınsama gösterdiği sonrasında ise yakınsama hızının düştüğü görülmektedir. SMA’nın ise ortalama bir yakınsama davranışı gösterdiği, optimum tasarıma tam olarak 25000 yapı analizinden sonra yakınsadığı söylenebilir. Öte yandan PHSMJA yönteminin hızlı bir yakınsama ile en iyi nihai optimum tasarıma sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, grafikten de görüleceği üzere 25000 analizden önce optimizasyon işlemi tamamlanan yöntemlerin elde ettiği tasarımların daha ağır olmasıdır.

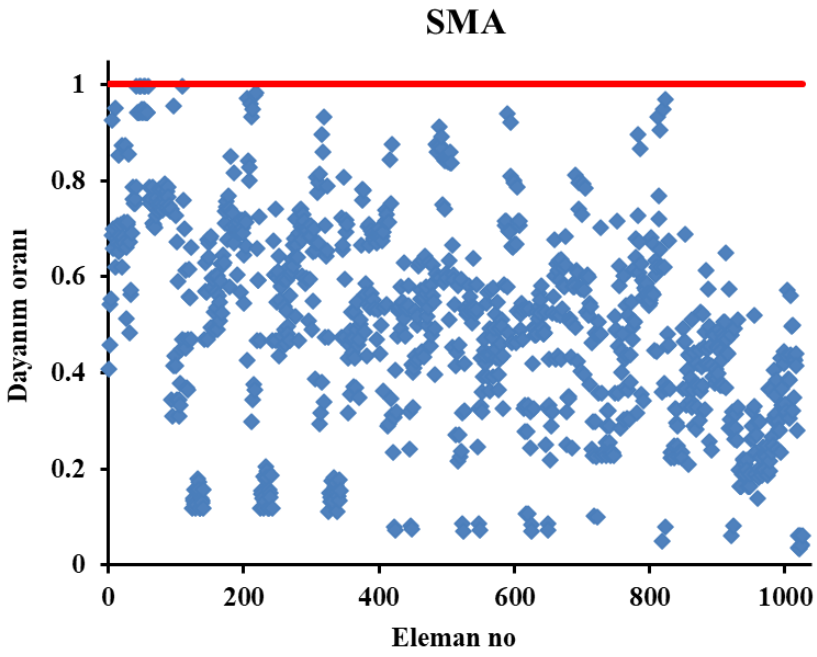


Şekil 4.24 1026 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin farklı optimizasyon yöntemleri için yakınsama eğrilerinin karşılaştırılması

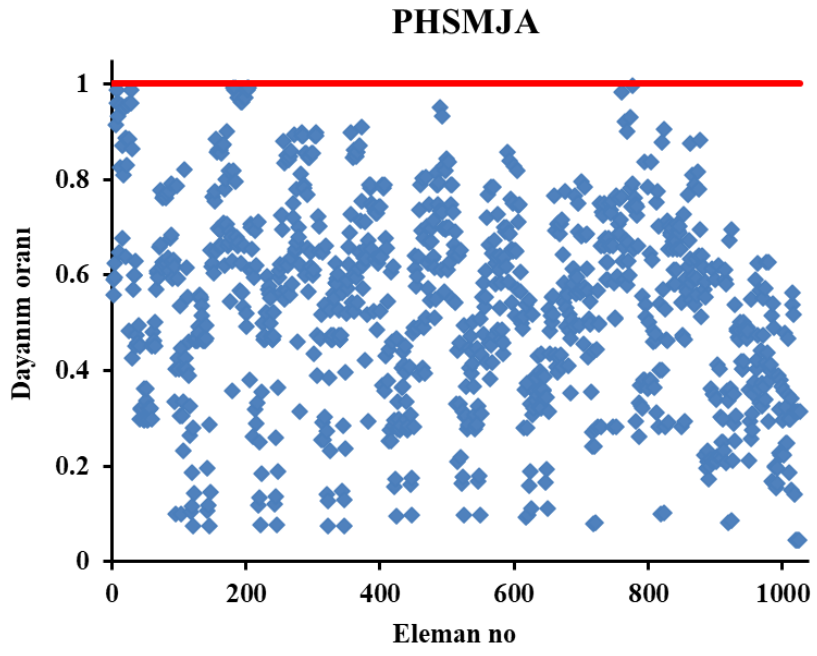
JA, SMA ve HSMJA ile elde edilen optimum tasarımların elemanlarına ait dayanım oranları ve her bir kat için katlar arası göreli ötelenme oranları Şekil 4.25 ve 4.26'da verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, her iki tasarım sınırlayıcısı için de sınır değerlere ulaşıldığı görülmüş ve herhangi bir ihlalin söz konusu olmadığı belirlenmiştir.



(a)

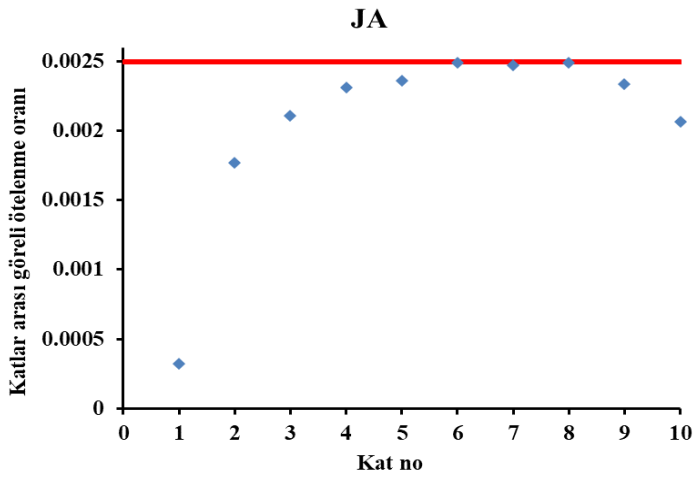


(b)

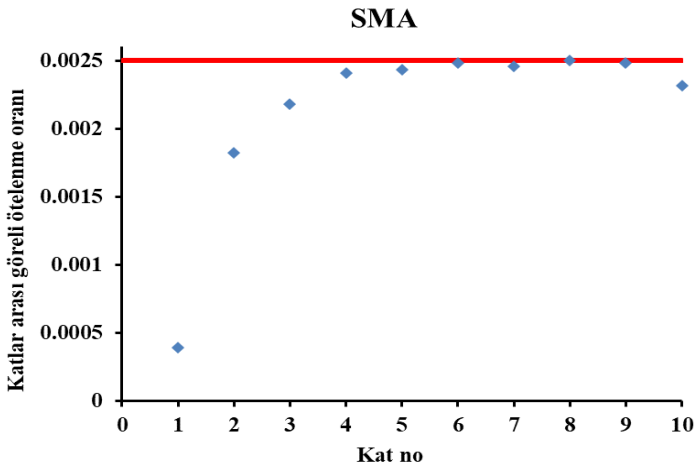


(c)

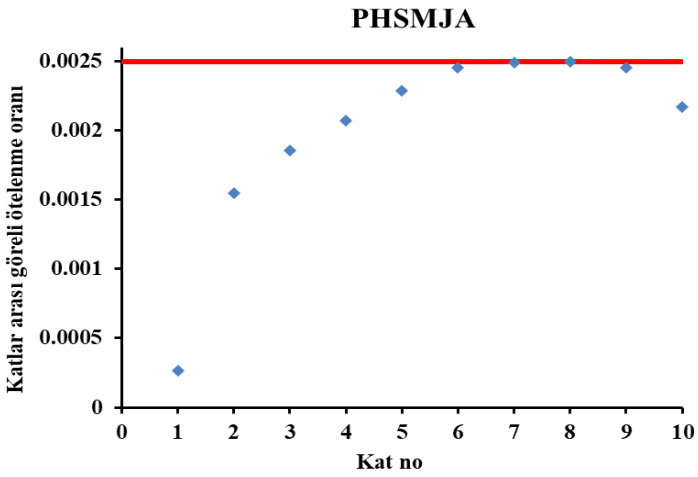
Şekil 4.25 1026 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) PHSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait eleman dayanım oranları



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.26 1026 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) PHSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait katlar arası göreli ötelenme oranları

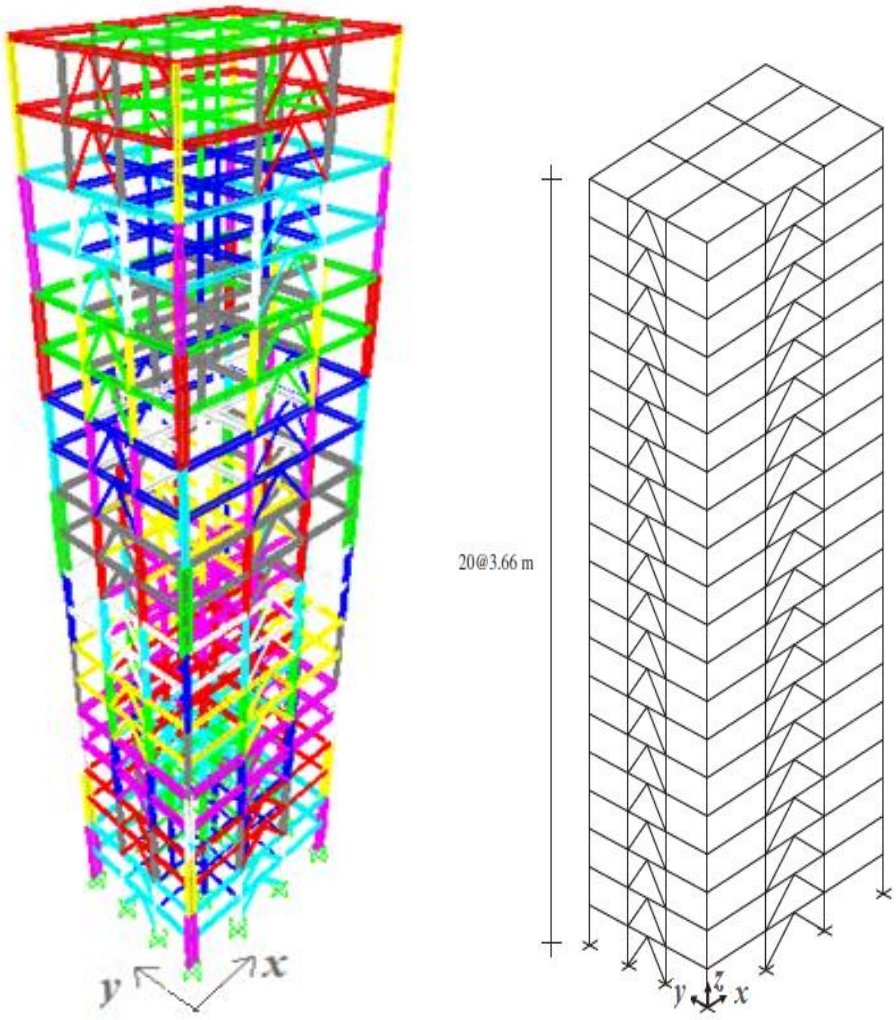
JA, SMA ve PHSMJA yöntemleri ile yapılan optimizasyon işlemlerinde 40000 yapı analizi icra edilmiştir. Optimizasyon süreleri değerlendirildiğinde, JA ile 110 saat 14 dakika, SMA ile 110 saat 50 dakika süren optimizasyon işlemi, analizlerin yardımcı bilgisayarlara eş zamanlı dağıtıldığı PHSMJA yöntemi ile 15 saat 24 dakika sürmüştür. Hazırlanan paralel hesaplamalı yöntem sayesinde yapı analiz süresi JA'ya göre %86.35, SMA'ya göre %86.43 oranında azalmıştır

4.2.3 1040 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçeve

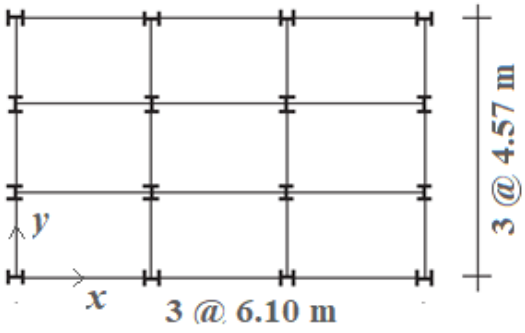
Uzay çelik çerçevelerin optimum tasarımında kullanılan üçüncü karşılaştırma örneği olarak Hasançebi vd. (2011) tarafından ileri sürülen 20 katlı, 1040 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçeve sistem kullanışmıştır. Sistemin geometrisi Şekil 4.27'de verilmiştir. Yanal yüklere karşı rijitliği arttırmak için yapının dış akslarının orta açıklıklarında K tipi çaprazlar kullanılmıştır. Ardışık iki katın köşe kolonları, iç kolonları, dış kolonları, iç kirişleri, dış kirişleri ve çaprazları ayrı ayrı gruplandırılmak üzere toplamda 60 farklı eleman grubu (tasarım değişkeni) tanımlanmıştır. Kolon, kiriş ve çapraz elemanlarına sırasıyla 297, 171 ve 147 adet geniş başlıklı W enkesitin olduğu üç farklı listeden enkesit ataması yapılmıştır. Tasarım yükleri, düşey doğrultuda normal katlar için zati yük 2.88 kN/m^2 ve hareketli yük 2.39 kN/m^2, çatı katı için ise zati yük 2.88 kN/m^2 ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanan kar yükü olarak belirlenmiştir:

$$p_s = 0.7 C_s C_e C_t I p_g \tag{4.4}$$

bu bağıntıda, "p_s" kar yükü, "C_s" çatı eğim faktörü, "C_e" kar maruz kalma faktörü, "C_t" sıcaklık faktörü, "I" yapı önem katsayısı, "p_g" ise yer yüzeyi kar yüküdür. Bu parametreler yapının yapıldığı bölgeye, yapının çatı eğimine ve yapı türüne bağlı olarak değişir ve ASCE7-05'in 7. bölümünde sunulan Tablo 7.1-3'ten seçilir. Bu çerçeve sistem için C_s=1, C_e=0.9, C_t=1, I=1 ve $p_g = 1.20\ kN/m^2$ alınmış ve bu yükler, kirişlere düzgün yayılı yük olarak etki edecek şekilde dağıtılmıştır (Hasançebi vd., 2011).



(a) (b)



(c)

Şekil 4.27 1040 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçeve (a) Üç boyutlu görünüş (b) Yapı geometrisi (c)Plan ve kolon yerleşimi (Hasançebi vd., 2010)

Yatay doğrultuda etki eden rüzgâr yüklemelerinin hesabı yine ASCE7-05 yönetmeliğinde verilen bağıntıya göre aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$p_w = 0.613 K_z K_{zt} K_d V^2 I \cdot (G C_p) \quad (4.5)$$

bu bağıntıda, "p_w" SI birim sisteminde hesaplanan rüzgâr yükünü, "K_z" rüzgâr hızı maruziyet faktörünü, "K_{zt}" topografik katsayıyı, "K_d" rüzgâr yönü faktörünü, "V" rüzgâr hızını, "G" ani rüzgâr faktörünü, "C_p" ise dış basınç katsayısını temsil etmektedir. Bu örnekte, $K_{zt} = 1$, $K_d = 0.85$, V= 46.94 m/s I=1, G=0.85, C_p ise basınç yönünde 0.8, emme yönünde ise 0.5 olarak ASCE7-05 Bölüm 6.5'teki tablo ve grafiklerden belirlenmiştir (Hasançebi vd., 2011). Belirlenen parametrelerle hesaplanan rüzgâr yükleri, kirişlere düzgün yayılı yük olarak etki edecek şekilde hesaplanmıştır. Rüzgârın *x* veya *y* doğrultularında etki etmesi durumlarına göre:

1. Zati yük + hareketli yük veya kar yükü + *x* doğrultusundaki rüzgâr yükü
2. Zati yük + hareketli yük veya kar yükü + *y* doğrultusundaki rüzgâr yükü

olarak iki farklı yük kombinasyonu oluşturulmuştur. Düğüm noktası deplasmanlarının en büyük değeri 7.2 in (18.29 cm), katlar arası göreli ötelenmelerinin en büyük değeri ise 0.36 in (0.91 cm) olarak belirlenmiştir. Çerçeve sistemin dayanım sınırlayıcıları ise AISC-ASD yönetmeliğine göre tanımlanmıştır.

Daha önce ES (Hasançebi vd., 2011), MPSO (Gholizadeh ve Fattahi, 2014), MFO ve EMFO (Gholizadeh vd., 2017) yöntemleriyle optimize edilen 1040 elemanlı çaprazlı çelik çerçeve örneğinin optimum tasarım sonuçları; JA, SMA ve PHSMJA ile elde edilen optimum tasarım sonuçları ile karşılaştırılmış ve Tablo 4.11'de verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, PHSMJA ile 21490 yapı analizi sonunda elde edilen 381.7 ton değerindeki tasarım, literatürdeki en hafif tasarım olmaktadır. SMA ile 24941 yapı analizi sonunda 387.4 ton bulunurken JA ile 23390 yapı analizi sonunda 397.7 ton bulunmuştur. PHSMJA ile elde edilen tasarım, daha önceki yöntemler arasında en iyi tasarıma sahip olan EMFO'nun optimum tasarımından %3.6 daha hafif olurken, SMA ile bulunan tasarımdan ise %2.2 daha hafif olmuştur. JA'nın performansı ise diğer iki yönteme göre daha geride kalmıştır.

Tablo 4.11 1040 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçeve sistemin optimum tasarım sonuçlarının karşılaştırılması

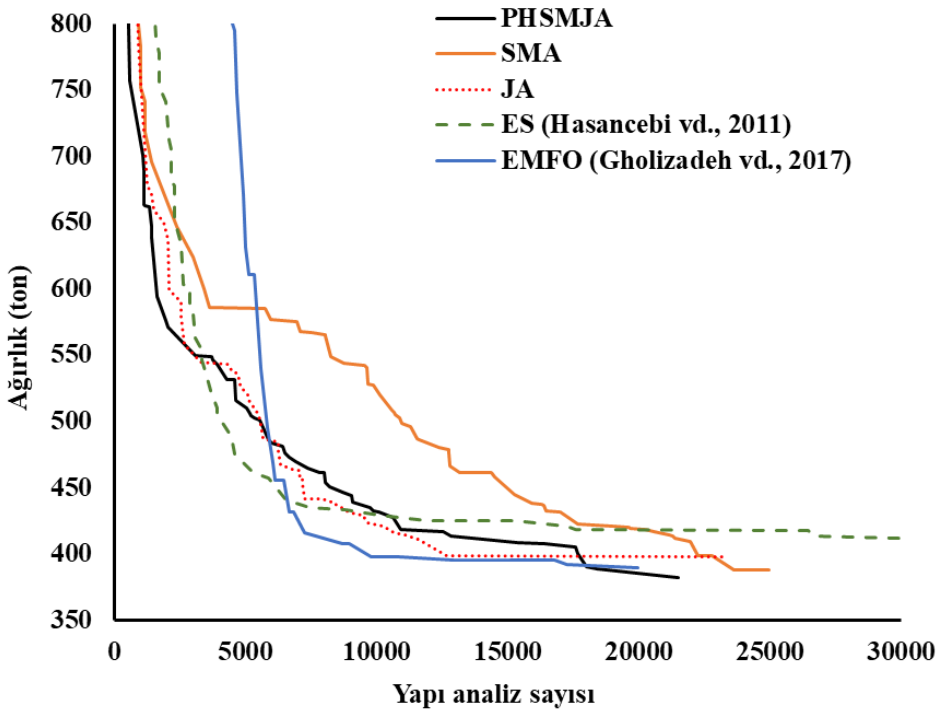
Tasarım değişkeni		ES (Hasançebi vd., 2011)	PSO (Gholizadeh ve Fattahi, 2014)	MPSO (Gholizadeh ve Fattahi, 2014)	MFO (Gholizadeh vd., 2017)	EMFO (Gholizadeh vd., 2017)	JA	SMA	**PHSMJA**
1	DK_{1-2}	W8×18	W8×35	W10×22	W14×22	W10×22	W12×35	W16×40	**W10×22**
2	DK_{3-4}	W10×22	W12×16	W10×19	W6×20	W10×22	W16×26	W14×34	**W10×26**
3	DK_{5-6}	W12×26	W14×48	W10×19	W6×20	W10×22	W16×31	W18×46	**W16×31**
4	DK_{7-8}	W18×35	W21×50	W21×50	W18×50	W18×35	W10×30	W24×76	**W14×34**
5	DK_{9-10}	W21×44	W30×90	W21×68	W16×67	W21×68	W14×30	W18×35	**W14×26**
6	DK_{11-12}	W12×26	W33×118	W21×68	W16×67	W21×68	W18×50	W21×57	**W21×50**
7	DK_{13-14}	W18×35	W16×26	W16×31	W16×31	W18×35	W21×57	W18×35	**W16×45**
8	DK_{15-16}	W16×36	W12×16	W14×30	W12×30	W14×30	W18×50	W21×73	**W18×40**
9	DK_{17-18}	W16×36	W18×50	W16×57	W16×57	W16×57	W10×33	W16×40	**W14×34**
10	DK_{19-20}	W10×33	W10×19	W12×22	W10×22	W16×31	W12×26	W18×46	**W16×40**
11	IK_{1-2}	W24×62	W16×40	W16×77	W16×77	W24×68	W10×26	W18×35	**W14×26**
12	IK_{3-4}	W16×40	W33×118	W24×62	W21×62	W24×62	W14×34	W16×26	**W24×55**
13	IK_{5-6}	W30×108	W24×84	W18×60	W18×60	W18×60	W16×31	W6×9	**W10×12**
14	IK_{7-8}	W16×50	W24×62	W24×62	W21×62	W24×62	W21×62	W10×17	**W16×36**
15	IK_{9-10}	W16×50	W14×43	W21×62	W24×62	W21×62	W12×16	W14×43	**W24×94**
16	IK_{11-12}	W18×60	W10×30	W16×40	W18×40	W18×35	W10×22	W12×22	**W10×30**
17	IK_{13-14}	W21×44	W21×73	W16×36	W16×36	W18×35	W8×13	W10×12	**W6×9**
18	IK_{15-16}	W16×36	W21×44	W16×26	W16×26	W16×31	W24×55	W8×21	**W12×19**
19	IK_{17-18}	W14×34	W16×36	W12×22	W10×22	W12×22	W10×15	W6×20	**W10×22**
20	IK_{19-20}	W14×30	W16×26	W12×22	W10×22	W14×22	W16×26	W6×15	**W14×26**
21	$KL1_{1-2}$	W12×106	W44×290	W30×261	W44×262	W33×201	W27×194	W30×173	**W40×235**
22	$KL1_{3-4}$	W30×90	W40×211	W33×221	W33×221	W33×201	W21×201	W12×210	**W36×194**
23	$KL1_{5-6}$	W18×97	W14×176	W27×129	W27×129	W27×146	W12×152	W24×117	**W14×176**
24	$KL1_{7-8}$	W14×90	W24×162	W24×104	W18×106	W24×104	W24×192	W30×148	**W14×145**
25	$KL1_{9-10}$	W14×109	W21×111	W14×145	W24×146	W24×104	W27×94	W14×90	**W24×192**
26	$KL1_{11-12}$	W12×72	W21×166	W14×145	W24×146	W21×132	W14×68	W16×89	**W21×166**
27	$KL1_{13-14}$	W14×90	W21×111	W18×97	W18×97	W12×96	W27×217	W12×106	**W16×67**
28	$KL1_{15-16}$	W14×90	W16×89	W18×97	W18×97	W12×96	W24×117	W10×68	**W14×53**
29	$KL1_{17-18}$	W10×39	W30×132	W12×72	W14×74	W12×65	W33×118	W14×90	**W14×61**
30	$KL1_{19-20}$	W10×33	W8×24	W8×31	W8×31	W10×33	W24×62	W10×100	**W24×279**
31	$KL2_{1-2}$	W14×233	W33×201	W27×217	W33×221	W27×194	W14×233	W30×211	**W21×248**
32	$KL2_{3-4}$	W14×211	W40×199	W27×178	W27×178	W27×161	W44×198	W12×170	**W27×178**
33	$KL2_{5-6}$	W14×211	W27×178	W27×161	W24×162	W27×146	W18×158	W10×112	**W14×109**
34	$KL2_{7-8}$	W21×166	W24×146	W18×175	W18×175	W24×162	W24×162	W18×86	**W18×119**
35	$KL2_{9-10}$	W14×132	W30×148	W14×145	W24×146	W24×162	W12×152	W10×88	**W12×170**
36	$KL2_{11-12}$	W14×120	W21×93	W27×94	W27×102	W18×97	W14×74	W18×71	**W30×124**
37	$KL2_{13-14}$	W12×106	W14×90	W14×74	W14×74	W14×74	W18×86	W30×99	**W10×68**
38	$KL2_{15-16}$	W14×74	W12×87	W14×68	W21×68	W14×68	W14×120	W30×90	**W14×43**
39	$KL2_{17-18}$	W12×58	W14×74	W14×53	W14×53	W14×53	W14×48	W21×132	**W16×50**
40	$KL2_{19-20}$	W10×49	W10×17	W6×20	W6×25	W8×31	W21×68	W12×53	**W24×55**

Tablo 4.11 (Devam)

41	$KL3_{1-2}$	W40×362	W40×215	W30×235	W27×235	W33×221	W16×100	W24×117	**W10×88**
42	$KL3_{3-4}$	W40×268	W40×199	W33×221	W33×221	W33×221	W21×83	W24×131	**W10×60**
43	$KL3_{5-6}$	W44×244	W36×194	W27×217	W33×221	W27×217	W36×232	W18×119	**W27×102**
44	$KL3_{7-8}$	W44×244	W21×111	W27×129	W27×129	W27×178	W24×94	W14×211	**W14×132**
45	$KL3_{9-10}$	W40×221	W12×152	W30×99	W30×99	W27×161	W14×109	W40×167	**W12×65**
46	$KL3_{11-12}$	W40×149	W30×124	W24×104	W24×104	W21×101	W18×106	W40×199	**W36×135**
47	$KL3_{3-14}$	W18×106	W21×93	W18×106	W18×106	W21×101	W36×135	W27×129	**W16×67**
48	$KL3_{15-16}$	W30×99	W16×77	W18×106	W18×106	W21×83	W12×79	W24×104	**W16×77**
49	$KL3_{17-18}$	W24×62	W18×76	W21×50	W21×50	W21×50	W27×94	W30×211	**W21×50**
50	$KL3_{19-20}$	W16×36	W14×30	W6×20	W6×25	W6×20	W24×68	W10×100	**W27×102**
51	$ÇR_{1-2}$	W12×40	W10×45	W8×31	W8×31	W8×31	W14×68	W14×61	**W8×48**
52	$ÇR_{3-4}$	W8×40	W18×50	W8×31	W8×31	W8×31	W10×49	W8×40	**W14×68**
53	$ÇR_{5-6}$	W8×31	W21×44	W12×26	W8×31	W12×26	W8×31	W10×39	**W8×48**
54	$ÇR_{7-8}$	W12×26	W14×34	W8×24	W8×24	W6×25	W8×28	W12×40	**W8×48**
55	$ÇR_{9-10}$	W6×20	W16×26	W8×24	W8×24	W6×25	W14×99	W12×65	**W12×58**
56	$ÇR_{11-12}$	W10×22	W14×30	W8×18	W8×18	W8×18	W14×61	W12×26	**W5×16**
57	$ÇR_{13-14}$	W6×15	W8×24	W8×18	W5×19	W5×19	W10×22	W8×21	**W12×45**
58	$ÇR_{15-16}$	W6×15	W12×26	W8×18	W5×19	W8×18	W12×30	W8×24	**W12×40**
59	$ÇR_{17-18}$	W4×13	W8×21	W4×13	W5×19	W4×13	W8×21	W12×30	**W6×15**
60	$ÇR_{19-20}$	W4×13	W8×13	W4×13	W4×13	W4×13	W8×31	W8×24	**W6×25**
En iyi Ağırlık (ton)		412.91	456.24	402.2	406.13	396.03	397.7	387.4	**381.7**
Yapı analiz sayısı		60000	20000	20000	20000	20000	23390	24941	**21490**
Ortalama ağırlık (ton)		*	*	*	*	*	396.4	393	**390.58**
En kötü ağırlık (ton)		*	*	*	*	*	417.96	415.61	**395.18**
STD (ton)		*	*	*	*	*	17.91	15.77	**11.79**
Sınırlayıcı ihlal yüzdesi (%)		-	-	-	-	-	-	-	-

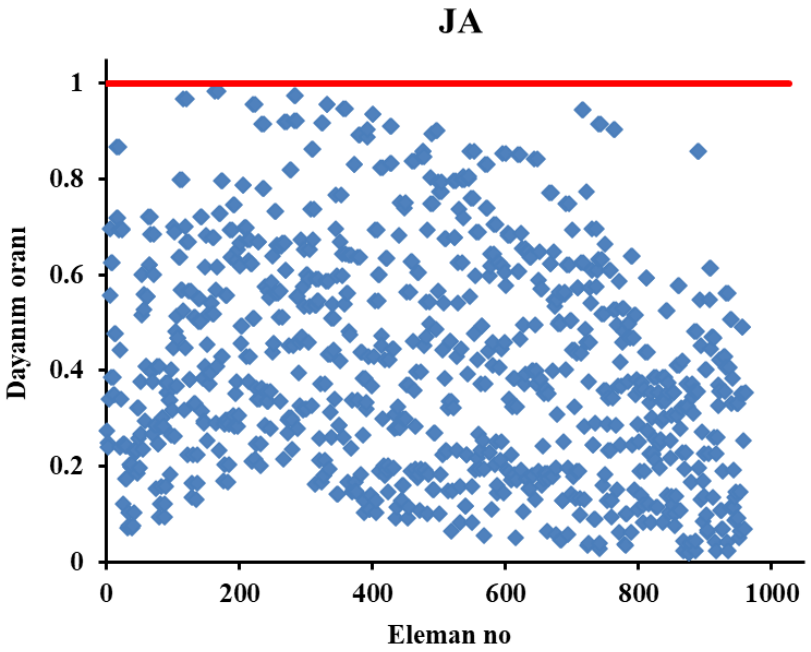
*Mevcut değil, DK: Dış aks kirişleri grubu, IK: İç kiriş grubu, KL1: İç kolon grubu, KL2: Dış aks kenar kolon grubu, KL3: Köşe kolon grubu, ÇR: Çapraz grubu

1040 elemanlı çerçeve sisteminin optimizasyonunda kullanılan yöntemlerin optimum tasarıma yakınsama eğrileri Şekil 4.28'de verilmiştir. Buna göre, EMFO yöntemi ile optimum tasarımların 5000 analize kadar hiç optimum tasarım elde edilmediği görülmektedir. ES yöntemi ile yapılan optimizasyonda hızlı bir yakınsama saptanırken nihai optimum tasarım ve analiz sayısı konusunda yeterli performansı göstermediği söylenebilir. PHSMJA ile diğer yöntemlere kıyasla daha az analiz sayısında daha hızlı bir yakınsama ile en iyi sonucun elde edildiği belirlenmiştir. Ayrıca, SMA'nın diğer yöntemlere göre daha yavaş bir yakınsama davranışına sahip olduğu belirlenmiştir.

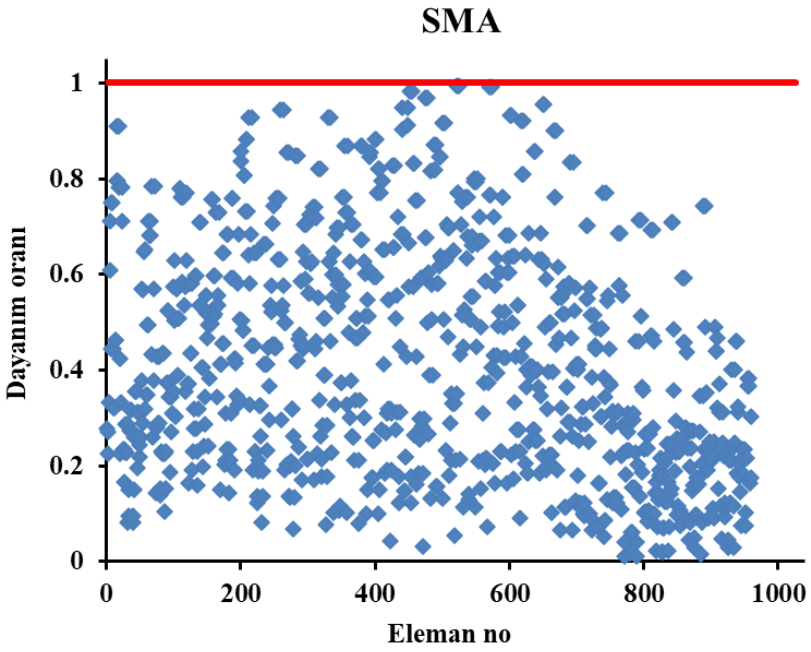


Şekil 4.28 1040 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin farklı optimizasyon yöntemleri için yakınsama eğrilerinin karşılaştırılması

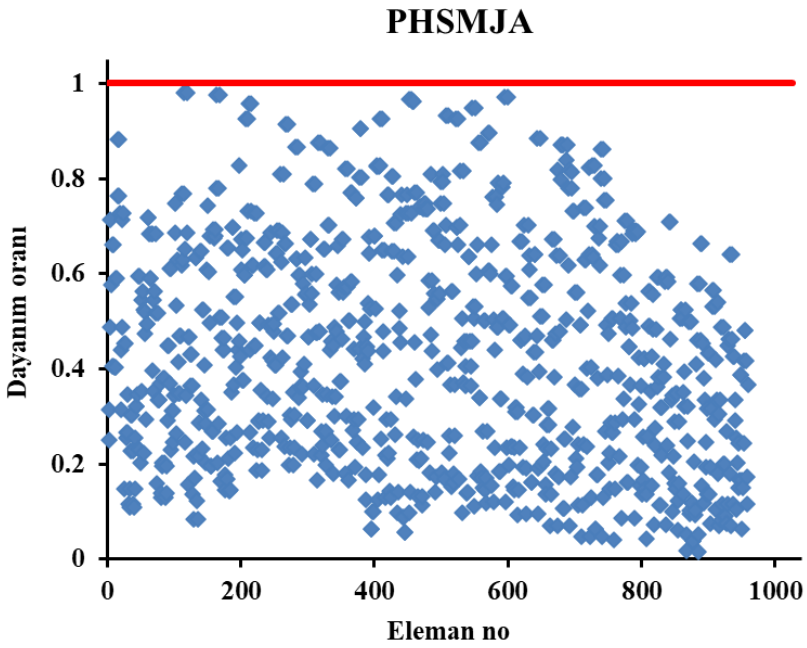
Optimum tasarımların dayanım ve deplasman sınırlayıcılarının kontrolü için taşıyıcı elemanların dayanım oranları ve katlar arası göreli ötelenme oranları, sınır değerlerle karşılaştırmalı bir şekilde Şekil 4.29 ve 4.30'da verilmiştir. Buna göre, elde edilen tasarımların sınırlayıcıları sağladığı belirlenmiştir.


JA
Dayanım oranı
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
200
400
600
800
1000
Eleman no

(a)

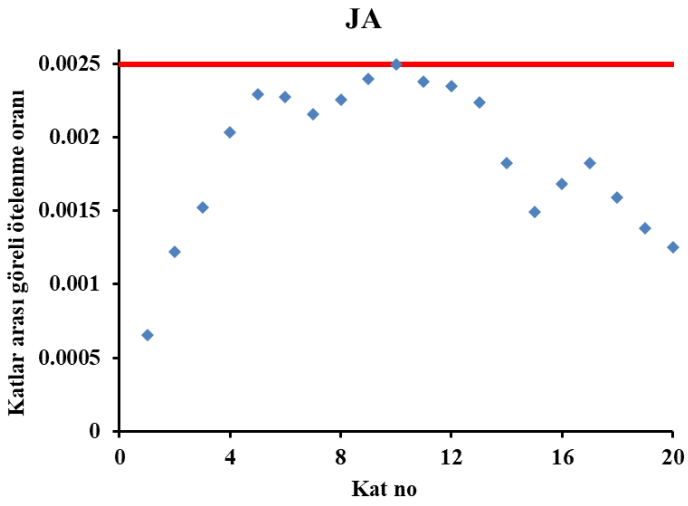

SMA
Dayanım oranı
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
200
400
600
800
1000
Eleman no

(b)

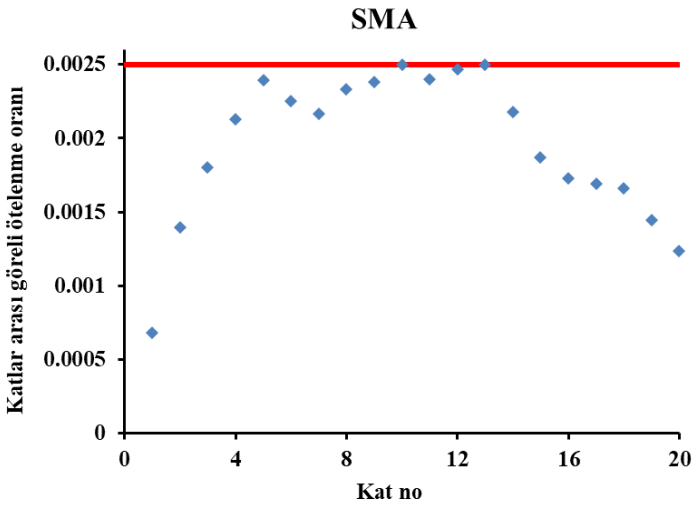


(c)

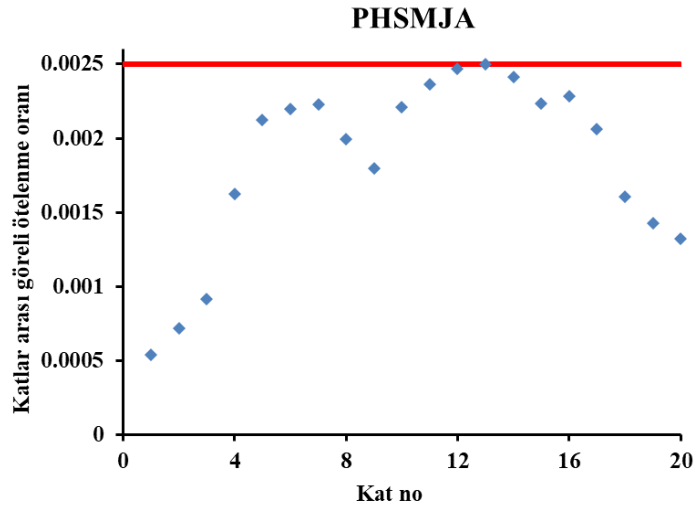
Şekil 4.29 1040 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) PHSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait eleman dayanım oranları



(a)



(b)



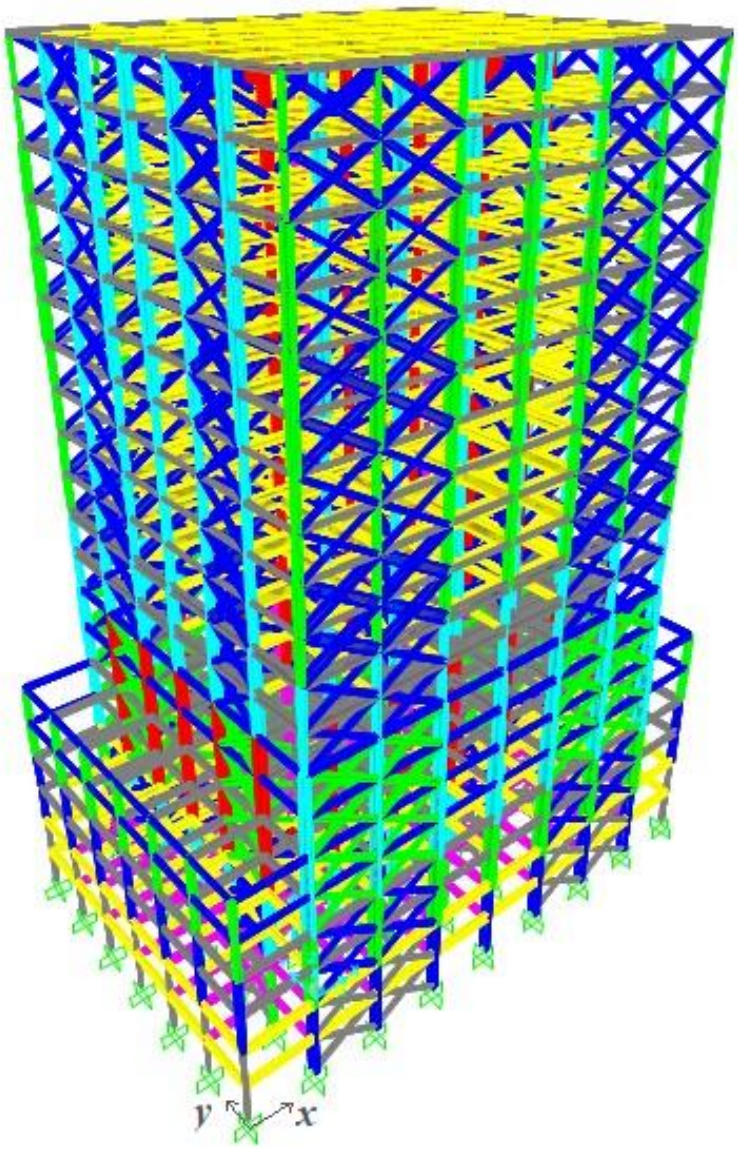
(c)

Şekil 4.30 1040 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) PHSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait katlar arası göreli ötelenme oranları

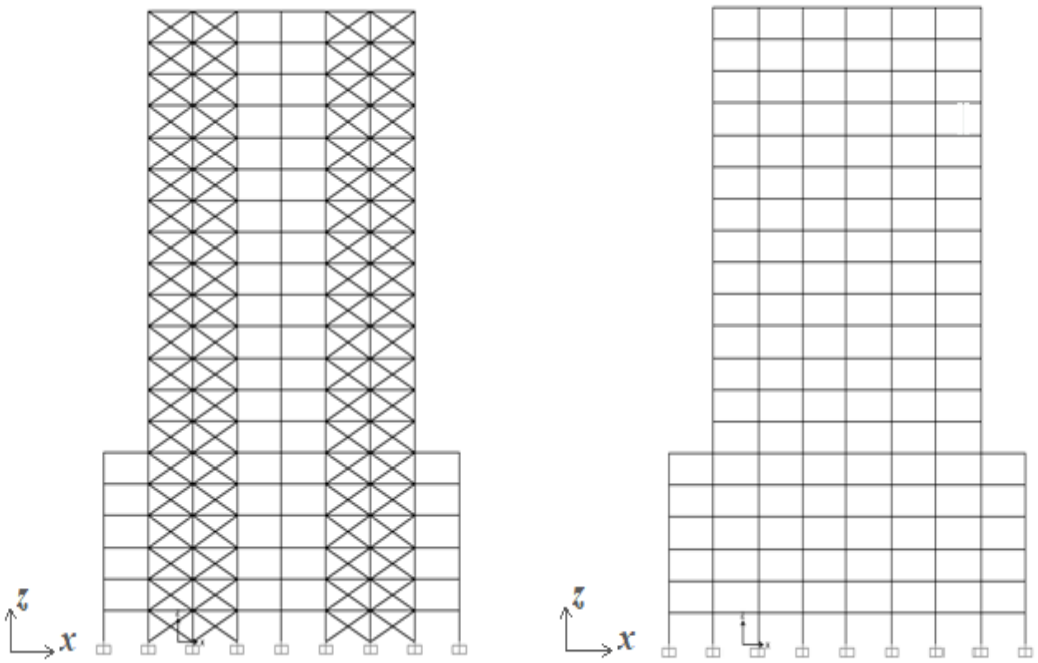
1040 elemanlı çerçeve için JA, SMA ve PHSMJA yöntemleri kullanılarak yapılan optimizasyon işlemlerinde 25000 yapısal analiz icra edilmiştir. Optimizasyon işlem süreleri incelendiğinde, JA ile 76 saat 46 dakika, SMA ile 73 saat 8 dakika süren optimizasyon işlemi, analizlerin yardımcı bilgisayarlara eş zamanlı dağıtıldığı PHSMJA yöntemi ile 8 saat 41 dakika sürmüştür. Hazırlanan paralel hesaplamalı yöntem sayesinde analiz süresinde JA'ya göre %88.7, SMA'ya göre %88.1 oranında tasarruf sağlanmıştır.

4.2.4 3860 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçeve

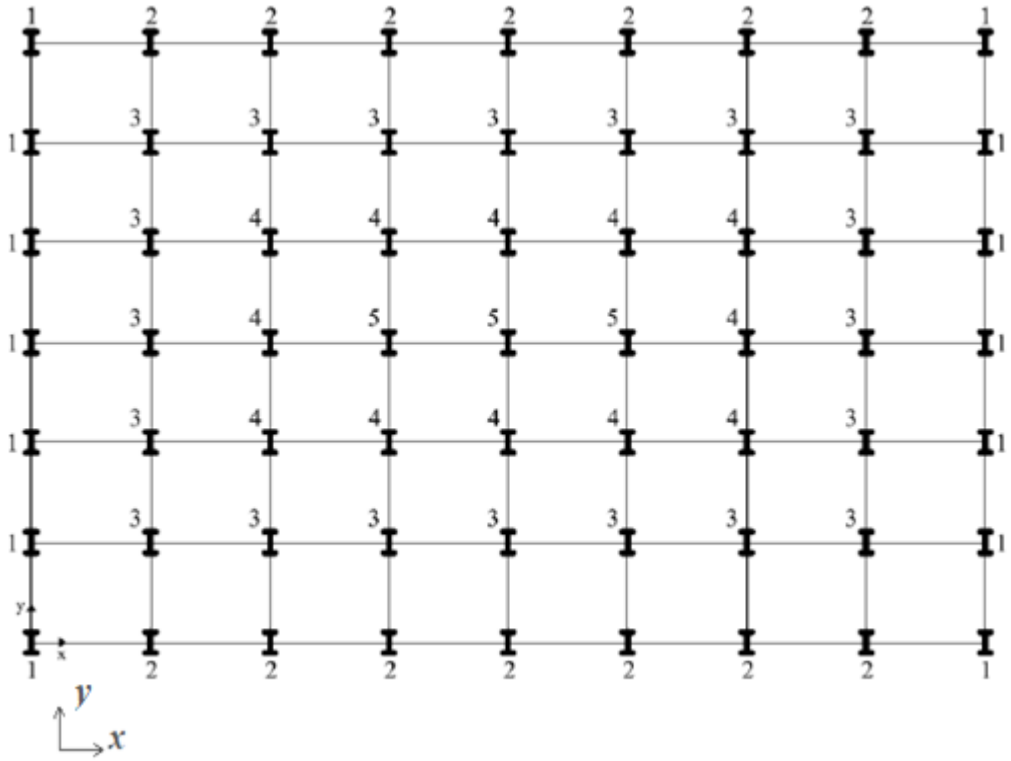
Azad (2014) tarafından oluşturulan 20 katlı, çaprazlı 3860 elemanlı uzay çerçeve, bu doktora tez çalışmasının son tasarım örneği olarak kullanılmıştır. Çerçeve sistemin plan, geometri ve kolon yerleşim planı Şekil 4.31'de verilmiştir.



(a)



(b) (c)



(d)

Şekil 4.31 3860 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçeve (a) Üç boyutlu görünüş (b) Dış aks kesit görünüşü (c) İç aks kesit görünüşü (d) Kolon yerleşimi (Azad, 2021)

70 m yüksekliğindeki sistemin rijitliğini arttırmak için eleman birleşimleri rijit olarak tanımlanmış, *x* ve *y* doğrultusunda dış akslarda X tipi çaprazlar kullanılmıştır. Çerçeve sistemin 1836 kiriş, 960 çapraz ve 1064 kolon olmak üzere toplamda 3860 taşıyıcı elemanı bulunmaktadır. Bu taşıyıcı elemanlar, ardışık iki katın kolonları kolon yerleşim planına göre (Şekil 4.31(d)) 5 farklı gruba, kirişleri iç ve dış kirişler olmak üzere iki farklı gruba, çaprazlar ise bir gruba ayrılmış ve toplamda çerçeve sistemin taşıyıcı elemanlarının grup sayısı 73 olarak belirlenmiştir.

Sisteme etki eden yükler, bölüm 4.2.1'deki örnekte olduğu gibi, ASCE7-98 (2000)'de belirtilen 10 farklı yük birleşimine göre tanımlanmıştır. Normal ve çatı katı kirişlerine düzgün yayılı olarak etki eden zati yükler sırasıyla 14 kN/m ve 12 kN/m, hareketli yükler ise sırasıyla 10 kN/m ve 7 kN/m olarak belirlenmiştir. Zati yüklere, sistemin kendi ağırlığı ayrıca eklenmiştir. Deprem yükleri, ASCE 7-98 (2000)'de belirtilen eşdeğer deprem yükü yöntemine göre hesaplanmıştır. Bu kapsamda C_T, 0.0488 olarak alınmış, h_n=70 m olup sistemin yaklaşık sismik periyodu *T*, denklem (4.2) yardımıyla 1.181 saniye olarak hesaplanmıştır. Bu periyot değerine karşılık gelen *k* parametresi 1.341 olarak elde edilmiştir. Toplam deprem yükünün hesabı için denklem (4.1)'de kullanılan sismik tasarım katsayısı c_s, bu tasarım örneği için 0.1 olarak belirlenmiştir.

Çerçeve kirişleri, uzunlukları boyunca döşeme sistemi tarafından desteklendiği için yanal ötelenmesi önlenmiş olarak modellenmiştir. Kolon ve çaprazlar da uzunlukları boyunca yanal ötelenmeleri engellenmemiş olarak tanımlanmıştır. Efektif uzunluk faktörü (*K*) kiriş, kolon ve çaprazlar için 1 olarak alınmıştır. En üst kat müsaade edilen en büyük deplasman değeri 0.18 m olarak tanımlanmıştır.

Daha önce VPS ve BBO (Talatahari vd., 2021) yöntemleri kullanılarak elde edilen optimum tasarım sonuçları ile JA, SMA ve PHSMJA yöntemleriyle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve Tablo 4.12'de verilmiştir. Sonuçlara göre sınırlayıcıları sağlayan en hafif tasarımın 48622 yapı analizi sonunda 3013.1 ton ile PHSMJA yöntemiyle elde edildiği görülmektedir. JA ve SMA ile sırasıyla 48247 ve 49319 yapı analizleri sonunda 3400.9 ton ve 3219 ton ağırlığında tasarımlar bulunmuştur. Ortalama ve en kötü ağırlık değerlerine bakıldığında PHSMJA'nın diğer yöntemlere

göre daha iyi sonuçlar verdiğini ancak standart sapma açısından SMA'nın performansını geçemediği görülmektedir.

Tablo 4.12 3860 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçeve sistemin optimum tasarım sonuçlarının karşılaştırılması

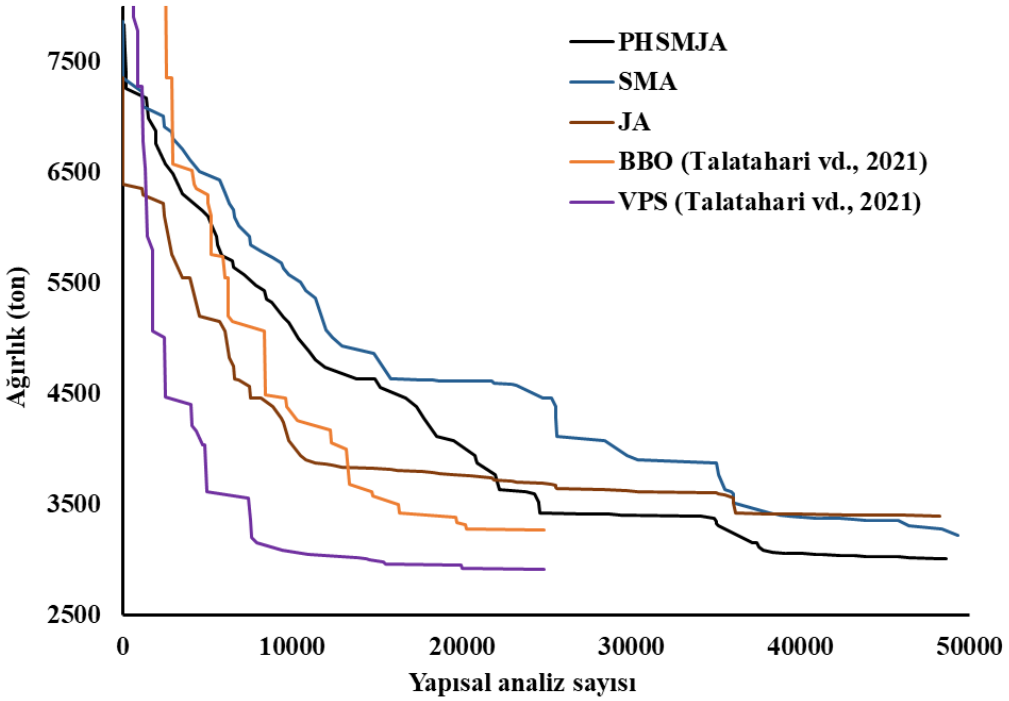
			VPS (Talatahari vd., 2021)	BBO (Talatahari vd., 2021)	JA	SMA	**PHSMJA**
1	1.-2. kat	KL1	W14×48	W27×217	W40×149	W40×167	**W40×167**
2		KL2	W36×230	W36×280	W44×290	W44×290	**W44×290**
3		KL3	W40×321	W33×241	W44×262	W40×277	**W44×290**
4		KL4	W14×455	W14×730	W40×215	W40×215	**W40×249**
5		KL5	W24×117	W36×160	W40×235	W40×235	**W44×290**
6		IK	W14×61	W14×99	W30×90	W30×90	**W30×90**
7		DK	W12×72	W16×57	W40×149	W40×149	**W33×130**
8		ÇR	W27×102	W24×94	W33×118	W30×108	**W30×90**
9	3.-4. kat	KL1	W16×89	W18×71	W36×182	W36×232	**W36×194**
10		KL2	W18×234	W10×112	W40×277	W36×300	**W40×278**
11		KL3	W33×201	W33×318	W36×230	W40×249	**W44×230**
12		KL4	W27×307	W27×258	W40×199	W36×182	**W40×183**
13		KL5	W24×131	W36×135	W40×211	W40×211	**W36×232**
14		IK	W12×65	W24×68	W33×118	W30×99	**W24×84**
15		DK	W30×99	W30×292	W33×118	W33×130	**W33×141**
16		ÇR	W12×72	W10×45	W30×90	W30×90	**W30×90**
17	5.-6. kat	KL1	W14×74	W36×245	W40×211	W40×167	**W40×149**
18		KL2	W33×221	W21×101	W40×264	W40×264	**W40×249**
19		KL3	W40×278	W36×170	W33×221	W40×249	**W33×221**
20		KL4	W40×211	W40×215	W40×167	W40×199	**W40×183**
21		KL5	W21×101	W27×84	W44×262	W44×262	**W36×210**
22		IK	W27×94	W12×96	W30×90	W30×90	**W30×90**
23		DK	W14×53	W27×178	W40×149	W40×149	**W33×141**
24		ÇR	W24×76	W14×74	W33×118	W30×108	**W24×84**
25	7.-8. kat	KL1	W27×94	W27×114	W36×194	W40×211	**W36×194**
26		KL3	W24×162	W30×211	W40×174	W40×211	**W40×249**
27		KL4	W44×262	W27×161	W40×149	W40×167	**W36×150**
28		KL5	W10×77	W21×73	W40×249	W40×321	**W40×249**
29		IK	W12×72	W33×118	W40×149	W40×167	**W40×149**
30		DK	W18×65	W40×211	W36×135	W33×141	**W36×150**
31		ÇR	W8×48	W14×82	W40×149	W12×65	**W12×65**
32	9.-10. kat	KL1	W12×79	W10×88	W36×160	W36×160	**W36×160**
33		KL3	W40×199	W40×249	W40×211	W40×211	**W44×230**
34		KL4	W40×593	W40×593	W44×230	W33×221	**W44×230**
35		KL5	W18×71	W14×68	W40×174	W40×174	**W40×149**
36		IK	W30×99	W10×49	W30×90	W30×90	**W30×90**
37		DK	W16×67	W14×53	W33×118	W33×141	**W33×118**

Tablo 4.12 (Devam)

38		ÇR	W16×100	W12×45	W36×135	W12×65	**W12×65**
39		KL1	W16×77	W18×192	W40×149	W40×149	**W40×149**
40		KL3	W40×331	W40×183	W40×149	W40×167	**W40×149**
41	11.-12. kat	KL4	W40×264	W14×550	W44×230	W44×230	**W44×230**
42		KL5	W8×48	W18×71	W40×149	W40×215	**W40×167**
43		IK	W21×68	W30×116	W27×84	W24×62	**W24×55**
44		DK	W24×94	W8×67	W24×62	W40×183	**W40×149**
45		ÇR	W10×39	W8×40	W40×149	W10×60	**W10×60**
46		KL1	W12×96	W14×120	W44×230	W36×210	**W44×230**
47		KL3	W40×167	W24×146	W40×174	W40×199	**W40×174**
48	13.-14. kat	KL4	W33×291	W40×235	W44×230	W44×230	**W44×230**
49		KL5	W24×94	W24×117	W44×230	W44×230	**W44×230**
50		IK	W30×99	W40×199	W30×90	W30×90	**W30×90**
51		DK	W12×190	W14×68	W36×135	W40×167	**W36×150**
52		ÇR	W8×31	W12×40	W10×60	W30×99	**W10×60**
53		KL1	W40×149	W24×62	W44×230	W44×230	**W44×230**
54		KL3	W16×100	W18×211	W30×173	W16×100	**W14×99**
55	15.-16. kat	KL4	W18×143	W24×68	W36×135	W16×100	**W14×99**
56		KL5	W12×152	W27×94	W44×230	W14×99	**W14×99**
57		IK	W18×86	W30×99	W14×48	W24×62	**W14×53**
58		DK	W10×49	W40×277	W14×53	W14×53	**W24×62**
59		ÇR	W10×39	W12×45	W10×60	W10×60	**W10×60**
60		KL1	W8×31	W14×38	W40×149	W40×149	**W36×135**
61		KL3	W21×83	W18×119	W40×149	W14×68	**W14×68**
62	17..-18. kat	KL4	W24×279	W14×99	W36×135	W36×135	**W14×48**
63		KL5	W30×326	W10×112	W40×149	W14×99	**W14×99**
64		IK	W21×111	W10×88	W14×53	W24×62	**W14×48**
65		DK	W30×124	W21×132	W24×84	W24×62	**W24×62**
66		ÇR	W8×31	W8×35	W10×60	W10×60	**W10×60**
67		KL1	W24×131	W12×79	W14×68	W14×109	**W14×99**
68		KL3	W30×116	W18×65	W36×135	W14×99	**W30×108**
69	19.20. kat	KL4	W12×35	W36×393	W27×84	W27×84	**W12×65**
70		KL5	W24×84	W14×176	W14×99	W14×109	**W14×99**
71		IK	W30×116	W16×77	W14×48	W14×43	**W14×53**
72		DK	W12×87	W27×94	W14×68	W27×84	**W24×62**
73		ÇR	W24×76	W6×20	W10×60	W8×28	**W8×28**
En iyi ağırlık (ton)			2917.42	3276.96	3400.9	3219	**3013.1**
Yapı analiz sayısı			25000	25000	48247	49319	**48622**
Ortalama ağırlık (ton)			3193.66	3584.89	3729.1	3416.48	**3229.1**
En kötü ağırlık (ton)			3535.83	3878.14	4078.65	3635.4	**3510.5**
STD (ton)			206.96	203	272.5	164.2	**220**
Dayanım sınırlayıcıları ihlal yüzdesi (%)			54	50.5	0	0	**0**

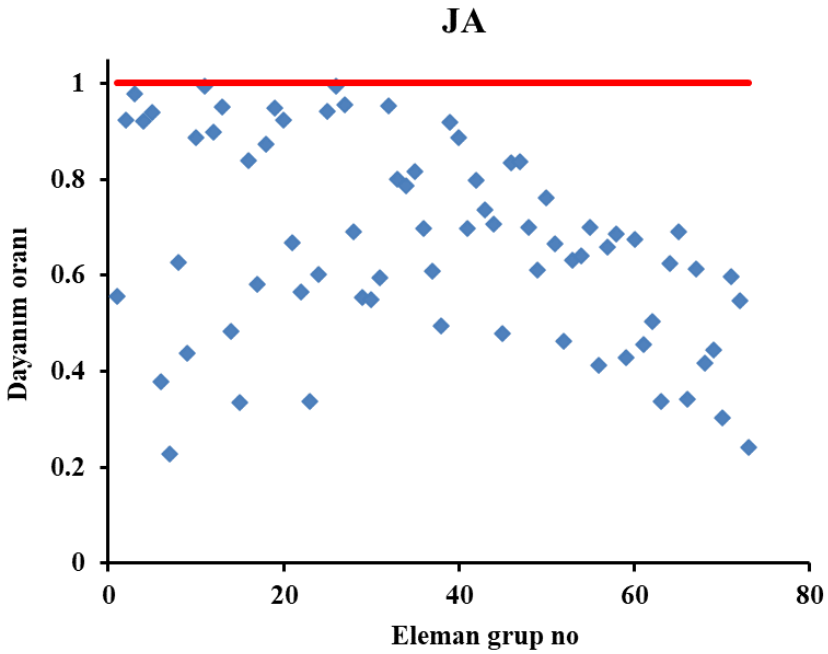
Tablo 4.12'de sunulan yöntemler ile bulunan sonuçların tasarım sınırlayıcılarını sağlayıp sağlamadığının kontrolü yapılmış ve sınırlayıcı ihlal eden tasarımlar tespit edilmiş ve ihlal oranları belirlenmiştir. Buna göre VPS ve BBO ile elde edilen tasarımların hiçbir sınırlayıcı şartını yerine getirmediği, dayanım sınırlayıcılarını sırasıyla %54 ve %50.5, katlar arası göreli ötelenme sınırlayıcılarını %34 ve %25 oranında ihlal ettiği belirlenmiştir.

Optimizasyon yöntemlerinin analiz sayısına göre optimum tasarıma yakınsama eğrileri Şekil 4.32'de gösterilmiştir. Buna göre, JA'nın hızlı bir yakınsama ile başlamasına rağmen devam eden süreçte hızının azaldığı görülmektedir. SMA yönteminin diğer yöntemlere göre daha yavaş bir yakınsama davranışına sahip olduğu, PHSMJA'nın ise SMA ile benzer bir performans göstermesine rağmen nihai sonuç bakımından en iyi sonuca ulaştığı söylenebilir.

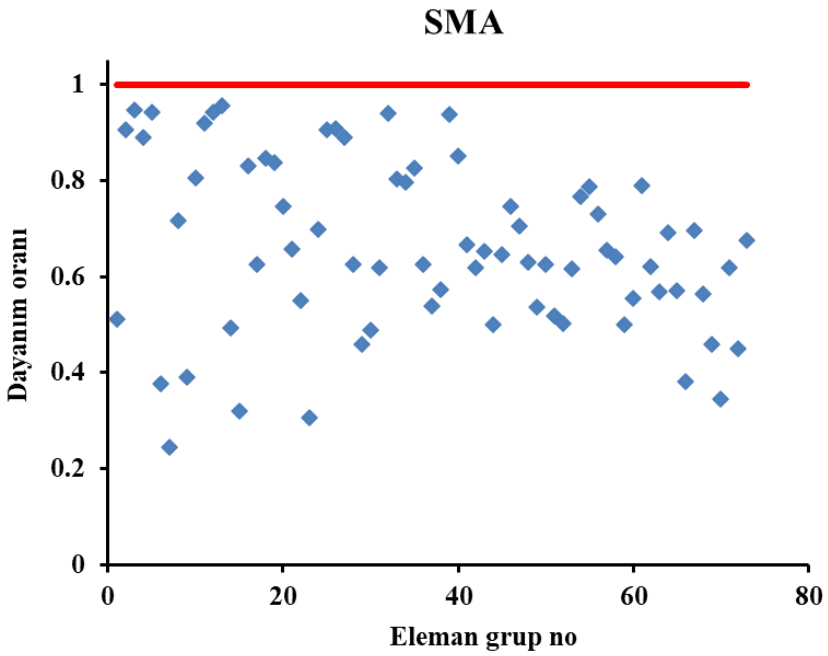


Şekil 4.32 3860 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin farklı optimizasyon yöntemleri için yakınsama eğrilerinin karşılaştırılması

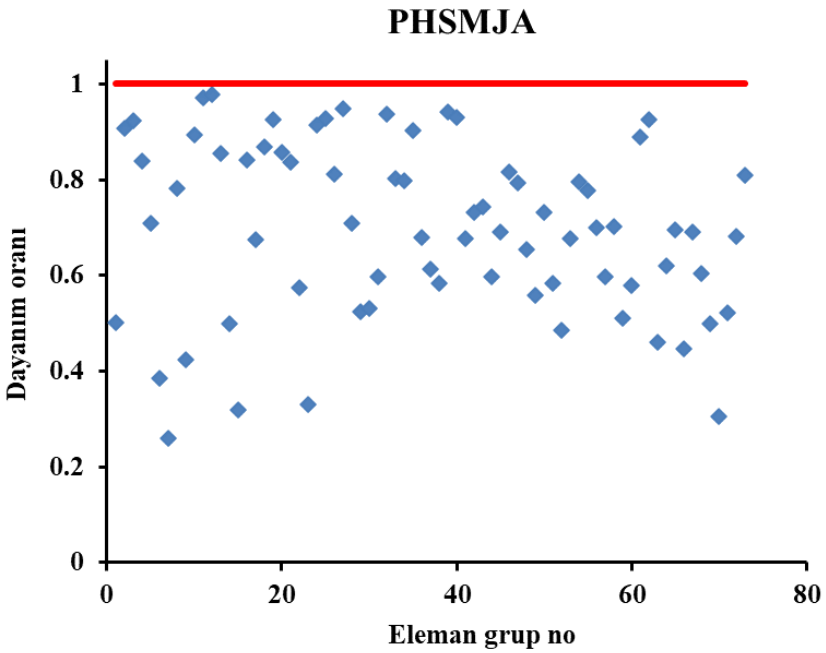
JA, SMA ve PHSMJA ile elde edilen optimum tasarımların eleman dayanım oranları ve katlar arası göreli ötelenme oranları Şekil 4.33 ve 4.34'teki grafiklerde sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde SMA ile elde edilen tasarımın diğerlerine göre sınır değerlerin daha aşağısında kaldığı görülmektedir. Her üç yöntem için de herhangi bir ihlal söz konusu değildir.



(a)

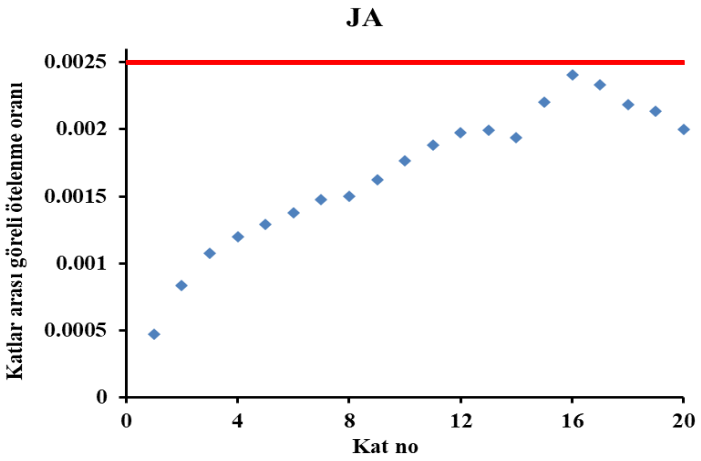


(b)

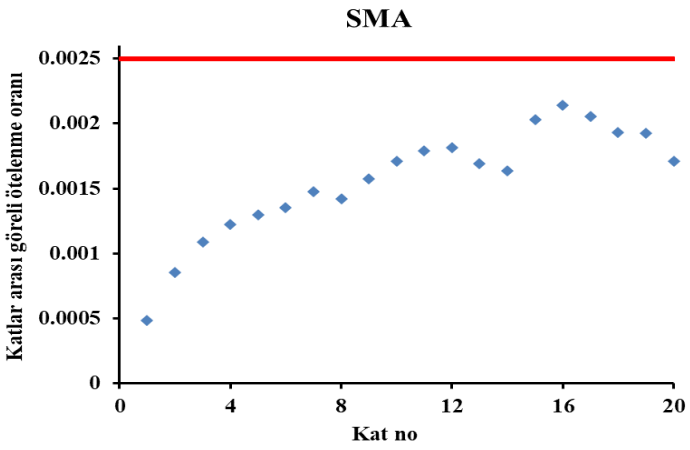


(c)

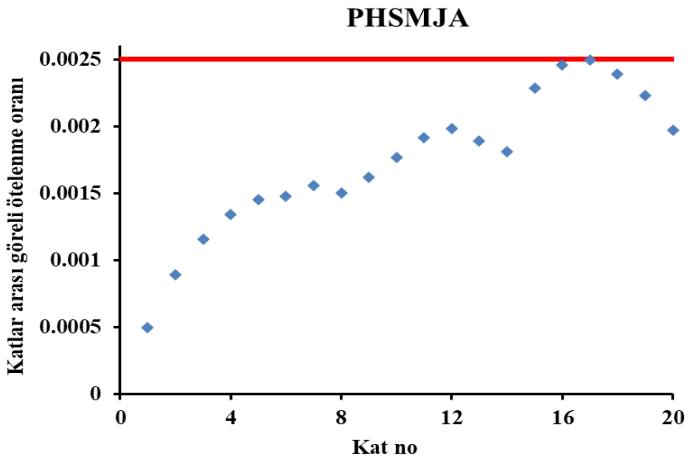
Şekil 4.33 3860 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) PHSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait eleman dayanım oranları



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.34 3860 elemanlı çaprazlı uzay çelik çerçevenin (a) JA (b) SMA (c) PHSMJA ile elde edilen optimum tasarımlarına ait katlar arası göreli ötelenme oranları

3860 elemanlı çerçeve için JA, SMA ve PHSMJA yöntemleri kullanılarak yapılan optimizasyon işlemlerinde 50000 yapısal analiz icra edilmiştir. Optimum tasarımı elde etmek için gereken işlem süreleri değerlendirildiğinde, JA ile 430 saat 19 dakika, SMA ile 430 saat 36 dakika süren optimizasyon işlemi, analizlerin yardımcı bilgisayarlara eş zamanlı dağıtıldığı PHSMJA yöntemi ile 71 saat 40 dakika sürmüştür. Bu çalışmada hazırlanan paralel hesaplamalı yöntem sayesinde analiz süresi JA'ya göre %83.3, SMA'ya göre %83.4 oranında azaltılmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu doktora tez çalışmasıyla, düzlem ve uzay çelik çerçeve sistemlerinin dayanım, deplasman ve enkesit-boyut sınırlayıcıları altında Jaya (JA), Cıvık Mantar Algoritması (SMA) ve bu iki yöntemin birleştirilmesiyle oluşturulan Hibrit Cıvık Mantar ve Jaya Algoritması (HSMJA) yöntemleri kullanılarak optimum tasarımı yapılmıştır. Hazırlanan yeni yöntem ile hem JA'nın hem de SMA'nın modifiye denklemleri kullanılarak daha güçlü bir optimizasyon yöntemi elde edilmesi amaçlanmıştır. Kullanılan optimizasyon yöntemlerinin geçerliliğini test etmek üzere literatürde bulunan dört düzlem ve dört uzay çelik çerçeve tasarım örneği kullanılmıştır. Ayrıca, literatürdeki tüm yöntemlerden elde edilen sonuçlar kontrol edilerek sınırlayıcıları ihlal eden tasarımlar tespit edilmiş ve ihlal oranları tablolarda sunulmuştur. Uzay çerçeve sistemlerde optimizasyon süresini kısaltmak için çevrimiçi bir paralel hesaplama yöntemi geliştirilmiş ve HSMJA yöntemine entegre edilmiştir. Bu yöntemde, optimizasyon sürecinin en uzun süren adımı olan yapısal analiz işlemleri, internet vasıtasıyla yardımcı bilgisayarlara dağıtılarak işlem yoğunluğu azaltılmıştır. Tez çalışmasından elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

i. Düzlem çelik çerçevelerin optimizasyonunda tek açıklıklı-on katlı çerçeve örneği için en hafif tasarım SMA ile elde edilirken diğer tüm düzlem çerçeve örneklerinde en hafif tasarım HSMJA yöntemi ile elde edilmiştir. Yapısal analiz sayısı, standart sapma, ortalama ağırlık gibi parametreler açısından bakıldığında HSMJA'nın diğer yöntemlere göre daha iyi olduğu saptanmıştır. JA yönteminin optimizasyon gücünün ise SMA ve HSMJA'ya kıyasla daha zayıf olduğu tespit edilmiştir.

ii. Uzay çelik çerçevelerin optimizasyonunda, paralel yöntemle entegre edilmiş hibrit yöntem (PHSMJA) ile tüm tasarım örnekleri için literatürdeki en hafif tasarımlar elde edilmiştir. Özellikle optimum ağırlık ve ortalama ağırlık değerleri açısından en iyi performansa sahip olan PHSMJA yöntemi, yapısal analiz sayısı ve standart sapma açısından da oldukça güçlü bir performans göstermiştir.

iii. 10 farklı yardımcı bilgisayar ile çevrimiçi bir veri tabanı üzerinden bağlantı kurularak oluşturulan paralel yöntem ile her iterasyonda üretilen tasarımların yapısal analizleri eş zamanlı olarak icra edilmiştir. Böylelikle optimizasyon süresi JA ve SMA'ya kıyasla %83 ile %88 arasında kısaltılmıştır. Paralel yöntem ile hesaplama süresinde yapılan bu tasarruf özellikle performansa dayalı optimum sismik tasarım gibi daha uzun süren yapısal optimizasyon problemlerinin çözümünün de kısa zamanda elde edilmesini sağlayacaktır.

iv. Çalışmada sunulan yöntemlerin farklı icraları sonucunda elde edilen standart sapmasının, ortalama ağırlığa kıyasla oldukça küçük olması bu yöntemlerin başlangıç popülasyonlarından bağımsız olarak optimum veya optimuma yakın değerlere ulaşabildiğini göstermektedir. Dolayısıyla çelik çerçevelerin optimum tasarımda oldukça güçlü bir yakınsama davranışına sahip SMA ve HSMJA yöntemleri, farklı yapı sistemlerinin optimizasyonunda da kullanılabilir.

KAYNAKLAR

Ad Hoc Committee on Serviceability, (1986), Structural Serviceability: A critical Appraisal and Research Needs, Journal of Structural Engineering, ASCE, 112 2646-2664.

American Institute of Steel Construction (AISC), (1989). Manual of steel construction-allowable stress design, 9th ed., Chicago, Illinois, USA.

American Institute of Steel Construction (AISC), (1994). Manual of steel construction, load & resistance factor design. 2nd ed. Chicago, Illinois, USA.

Andrew Bogaard (2021). Matlab to Google Sheets (matlab2sheets) (https://github.com/abogaard/matlab2gsheets), GitHub. (Erişim tarihi: 1 Ekim 2021)

Anter, A. M., Oliva, D., Thakare, A. ve Zhang, Z. (2021). AFCM-LSMA: New intelligent model based on Lévy slime mould algorithm and adaptive fuzzy C-means for identification of COVID-19 infection from chest X-ray images. *Advanced Engineering Informatics*, *49*, 101317.

ASCE 7-05 (2005) Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers.

ASCE 7-98, Minimum design loads for buildings and other structures: Revision of ANSI/ASCE 7-95, American Society of Civil Engineers; 2000.

Aydoğdu, İ. (2010). *Optimum design of 3d irregular steel frames using ant colony optimization and harmony search algorithms*. (Yayınlanmamış doktora tezi). ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Aydoğdu, İ., Akın, A. ve Saka, M. P. (2016). Design optimization of real world steel space frames using artificial bee colony algorithm with Levy flight distribution. *Advances in engineering software*, 92, 1-14.

Azad, S. K. (2014) *Computationally enhanced techniques for practical optimum design of steel structures.* (Yayınlanmamış doktora tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Azad, S. K. (2021). Design optimization of real-size steel frames using monitored convergence curve. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, *63*(1), 267-288.

Azad, S. K. ve Hasançebi, O. (2013). Upper bound strategy for metaheuristic based design optimization of steel frames. *Advances in Engineering Software*, *57*, 19-32.

Camp, C. V., Bichon, B. J. ve Stovall, S. P. (2005). Design of steel frames using ant colony optimization. *Journal of structural engineering*, *131*(3), 369-379.

Carbas, S. (2016). Design optimization of steel frames using an enhanced firefly algorithm. *Engineering Optimization*, *48*(12), 2007-2025.

Carraro, F., Lopez, R. H. ve Miguel, L. F. F. (2017). Optimum design of planar steel frames using the Search Group Algorithm. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, *39*(4), 1405-1418.

Chong, K. L., Lai, S. H., Ahmed, A. N., Jaafar, W. Z. W. ve El-Shafie, A. (2021). Optimization of hydropower reservoir operation based on hedging policy using Jaya algorithm. *Applied Soft Computing*, *106*, 107325.

Computer and Structures Inc., SAP2000 v.21 (2019). Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual. Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA.

Daniel (2021). GetGoogleSpreadsheet (https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/39915-getgooglespreadsheet), MATLAB Central File Exchange. (Erişim tarihi: 1 Ekim 2021)

Davison, J.H., Adams, P.F., Stability of Braced and Unbraced Frames, *J Struct Div* ASCE, 100(2), 319-34, 1974.

Değertekin, S. O. (2008). Optimum design of steel frames using harmony search algorithm. *Structural and multidisciplinary optimization*, *36*(4), 393-401.

Degertekin, S. O., Bayar, G. Y. ve Lamberti, L. (2021). Parameter free Jaya algorithm for truss sizing-layout optimization under natural frequency constraints. *Computers & Structures*, *245*, 106461.

Degertekin, S. O., Lamberti, L. ve Ugur, I. B. (2018). Sizing, layout and topology design optimization of truss structures using the Jaya algorithm. *Applied Soft Computing*, 70, 903-928.

Degertekin, S. O., Lamberti, L. ve Ugur, I. B. (2019). Discrete sizing/layout/topology optimization of truss structures with an advanced Jaya algorithm. *Applied Soft Computing*, 79, 363-390.

Doğan, E. ve Saka, M. P. (2012). Optimum design of unbraced steel frames to LRFD–AISC using particle swarm optimization. *Advances in Engineering Software*, *46*(1), 27-34.

Dorigo, M. ve Di Caro, G. (1999). "Ant colony optimization: a new meta-heuristic". In *Proceedings of the 1999 congress on evolutionary computation-CEC99* (Cat. No. 99TH8406) (Vol. 2, pp. 1470-1477). IEEE.

Dumonteil P, Moore, W. (1993) Simple Equations for Effective Length Factors-Discussion. *Eng J-Am Inst Steel Constr* INC; 30:37–37.

Eberhart, R. ve Kennedy, J. (1995). "A new optimizer using particle swarm theory. In MHS'95". *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science* (pp. 39-43). Ieee.

Farshchin, M., Maniat, M., Camp, C. V. ve Pezeshk, S. (2018). School based optimization algorithm for design of steel frames. *Engineering Structures*, *171*, 326-335.

Gao, K., Zhang, Y., Sadollah, A. ve Su, R. (2016, November). Jaya algorithm for solving urban traffic signal control problem. In *2016 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)* (pp. 1-6). IEEE.

Geem, Z. W., Kim, J. H. ve Loganathan, G. V. (2001). A new heuristic optimization algorithm: harmony search. S*imulation*, *76*(2), 60-68.

Ghatte, H. F. (2021). A hybrid of firefly and biogeography-based optimization algorithms for optimal design of steel frames. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *46*(5), 4703-4717.

Gholizadeh, S., Davoudi, H. ve Fattahi, F. (2017). Design of steel frames by an enhanced moth-flame optimization algorithm. *Steel Compos Struct*, *24*(1), 129-140.

Gholizadeh, S. ve Fattahi, F. (2014). Design optimization of tall steel buildings by a modified particle swarm algorithm. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, *23*(4), 285-301.

Gholizadeh, S. ve Poorhoseini, H. (2015). Optimum design of steel frame structures by a modified dolphin echolocation algorithm. *Struct Eng Mech*, *55*(3), 535-554.

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

Hasançebi, O., Bahçecioğlu, T., Kurç, Ö. ve Saka, M. P. (2011). Optimum design of high-rise steel buildings using an evolution strategy integrated parallel algorithm. *Computers & structures*, 89(21-22), 2037-2051.

Hasançebi, O., Çarbaş, S., Doğan, E., Erdal, F. ve Saka, M. P. (2010). Comparison of non-deterministic search techniques in the optimum design of real size steel frames. *Computers & structures*, *88*(17-18), 1033-1048.

Hasançebi, O., Erdal, F. ve Saka, M. P. (2010). Adaptive harmony search method for structural optimization. *Journal of structural engineering*, *136*(4), 419-431.

Hasançebi, O. ve Kazemzadeh Azad, S. (2019). Discrete Sizing of Steel Frames Using Adaptive Dimensional Search Algorithm. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 63(4), 1062–1079.

Holland, J. H. 1975. Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press.

Karaboga, D. (2005). *An idea based on honey bee swarm for numerical optimization* (Vol. 200, pp. 1-10). Technical report-tr06, Erciyes university, engineering faculty, computer engineering department.

Kareiva, P. ve Odell, G. (1987). Swarms of predators exhibit" preytaxis" if individual predators use area-restricted search. *The American Naturalist*, *130*(2), 233-270.

Kaveh, A., Bakhshpoori, T. ve Azimi, M. (2015). Seismic optimal design of 3D steel frames using cuckoo search algorithm. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, *24*(3), 210-227.

Kaveh, A. ve Bakhshpoori, T. (2019). Metaheuristics: outlines, MATLAB codes and examples. Springer.

Kaveh, A. ve BolandGerami, A. (2017). Optimal design of large-scale space steel frames using cascade enhanced colliding body optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, *55*(1), 237-256.

Kaveh, A. ve Ghazaan, M. I. (2017). Enhanced whale optimization algorithm for sizing optimization of skeletal structures. *Mechanics Based design of structures and Machines*, *45*(3), 345-362.

Kaveh, A., Hamedani, K. B., Hosseini, S. M. ve Bakhshpoori, T. (2020). Optimal design of planar steel frame structures utilizing meta-heuristic optimization algorithms. *Structures* 25, 335-346.

Kaveh, A., Kamalinejad, M. ve Hamedani, K. B. (2021). Enhanced versions of the shuffled shepherd optimization algorithm for the optimal design of skeletal structures. In *Structures*, 29, 1463-1495.

Kaveh, A., Khodadadi, N. ve Talatahari, S. (2021). A comparative study for the optimal design of steel structures using CSS and ACSS algorithms. *Iran Science and Technology University* 11 (1): 31-54

Kaveh, A. ve Zaerreza, A. (2020), Shuffled shepherd optimization method: a new Meta-heuristic algorithm, *Engineering Computations*, 37 (7), 2357-2389.

Kessler, D. (1982). Plasmodial structure and motility. *Cell biology of Physarum and Didymium/edited by Henry C. Aldrich, John W. Daniel*.

Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. ve Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671-680.

Lamberti, L. ve Pappalettere, C. (2009). "An improved harmony-search algorithm for truss structure optimization". In: *(B.H.V. Topping. L.F.C. Neves and R.C. Barros. Eds.) Proceedings of the Twelfth International Conference Civil. Structural and Environmental Engineering Computing*. Civil-Comp Press. Stirlingshire (UK).

Latty, T. ve Beekman, M. (2009). Food quality affects search strategy in the acellular slime mould, Physarum polycephalum. *Behavioral Ecology*, *20*(6), 1160-1167.

Li, S., Chen, H., Wang, M., Heidari, A. A. ve Mirjalili, S. (2020). Slime mould algorithm: A new method for stochastic optimization. *Future Generation Computer Systems*, *111*, 300-323.

Maheri, M. R., Shokrian, H. ve Narimani, M. M. (2017). An enhanced honey bee mating optimization algorithm for design of side sway steel frames. *Advances in Engineering Software*, 109, 62-72.

Mathworks, I. (2017). MATLAB: R2017b. Mathworks Inc, Natick.

Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H. ve Fenves, G. L. (2006) , OpenSees command language manual, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, 264.

McGuire, W., Gallagher, R. H. ve Ziemian, R. D. (2000). Matrix structural analysis, John Wiley&Sons

Nakagaki, T., Yamada, H. ve Ueda, T. (2000). Interaction between cell shape and contraction pattern in the Physarum plasmodium. *Biophysical chemistry*, *84*(3), 195-204.

Nguyen, T. T., Wang, H. J., Dao, T. K., Pan, J. S., Liu, J. H. ve Weng, S. (2020). An improved slime mold algorithm and its application for optimal operation of cascade hydropower stations. *IEEE Access*, *8*, 226754-226772.

Ocłoń, P., Cisek, P., Rerak, M., Taler, D., Rao, R. V., Vallati, A. ve Pilarczyk, M. (2018). Thermal performance optimization of the underground power cable system by using a modified Jaya algorithm. *International Journal of Thermal Sciences*, *123*, 162-180.

Park, H. S., Kwon, Y. H., Seo, J. H. ve Woo, B. H. (2006). Distributed hybrid genetic algorithms for structural optimization on a PC cluster. *Journal of Structural Engineering*, *132*(12), 1890-1897.

Park, H. S. ve Sung, C. W. (2002). Optimization of steel structures using distributed simulated annealing algorithm on a cluster of personal computers. *Computers & structures*, *80*(14-15), 1305-1316.

Pezeshk, S., Camp, C. V. ve Chen, D. (2000). Design of nonlinear framed structures using genetic optimization. *Journal of structural engineering*, *126*(3), 382-388.

Rajan, S. D. ve Nguyen, D. T. (2004). Design optimization of discrete structural systems using MPI-enabled genetic algorithm. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, *28*(5), 340-348.

Rao, R. (2016). Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, *7*(1), 19-34.

Rao, S. S. (2019). Engineering optimization: theory and practice. John Wiley & Sons.

Saka, M. P. (2007). Optimum design of steel frames using stochastic search techniques based on natural phenomena: a review. *Civil engineering computations: tools and techniques, Saxe-Coburg Publications, Stirlingshire, UK*, 105-147.

Sextos, A. G. ve Balafas, G. K. (2011). "Using the new SAP2000 open application programming interface to develop an interactive front-end for the modal pushover

analysis of bridges". *In 3rd International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, COMPDYN 2011.

Talatahari, S. ve Azizi, M. (2020). Optimal design of real-size building structures using quantum-behaved developed swarm optimizer. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, *29*(11), e1747.

Talatahari, S., Jalili, S. ve Azizi, M. (2021). Optimum design of steel building structures using migration-based vibrating particles system. *Structures* 33, 1394-1413.

Tezcan, S. 1970. Çubuk sistemlerin elektronik hesap makinaları ile çözümü. İTÜ yayını, Sayı:12 İstanbul.

Wang, L., Zhang, Z., Huang, C. ve Tsui, K. L. (2018). A GPU-accelerated parallel Jaya algorithm for efficiently estimating Li-ion battery model parameters. *Applied Soft Computing*, *65*, 12-20.

Wei, Y., Zhou, Y., Luo, Q. ve Bi, J. (2021, August). "Using Simplified Slime Mould Algorithm for Wireless Sensor Network Coverage Problem". In *International Conference on Intelligent Computing* (pp. 186-200). Springer, Cham.

Wilde, D. J. ve Beightler, C. S. (1967). Foundations of optimization.

Zhao, S., Wang, P., Heidari, A. A., Chen, H., Turabieh, H., Mafarja, M. ve Li, C. (2021). Multilevel threshold image segmentation with diffusion association slime mould algorithm and Renyi's entropy for chronic obstructive pulmonary disease. *Computers in Biology and Medicine*, *134*, 104427.

Zubaidi, S. L., Abdulkareem, I. H., Hashim, K. S., Al-Bugharbee, H., Ridha, H. M., Gharghan, S. K. ve Al-Khaddar, R. (2020). Hybridised artificial neural network model with slime mould algorithm: a novel methodology for prediction of urban stochastic water demand. *Water*, *12*(10), 2692.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyad, Ad	UĞUR, İbrahim Behram
Web sayfası (Research Gate, Academia, etc.)	https://www.researchgate.net/profile/Ibrahim-Ugur-2

Eğitim Bilgileri

Derece	Kurum	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Dicle Üniversitesi	2017
Lisans	Dokuz Eylül Üniversitesi	2013
Lise	Şırnak Y.D.A.L	2008

İş Deneyimi

Dönem (Yıl)	Şirket, Kurum	Görev
2013/2018	Şırnak Üniversitesi	Arş. Gör.
2018/2021	Dicle Üniversitesi	Arş. Gör.
2021/Halen	Şırnak Üniversitesi	Arş. Gör.

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Uğur, İ.B ve Değertekin, S. Ö. (2021). Jaya algorithm for design optimization of planar steel frames. *Dicle University Journal of Engineering,* (Basım aşamasında)

2. Değertekin, S. Ö., Lamberti, L. ve Uğur, İ. B. (2018). Sizing, layout and topology design optimization of truss structures using the Jaya algorithm. *Applied Soft Computing,* 70, 903-928.

3. Değertekin, S. Ö., Lamberti, L. ve Uğur, İ. B. (2019). Discrete sizing/layout/topology optimization of truss structures with an advanced Jaya algorithm. *Applied Soft Computing,* 79, 363-390.

4. Değertekin, S. Ö., Lamberti, L. ve Uğur, İ. B. (2017). Discrete and continuous design optimization of tower structures using the Jaya algorithm. *Technological Applied Sciences,* 13(2), 134-144.

5. Değertekin, S. Ö. ve Uğur, İ. B. (2017). "Sizing Optimization of Dome Truss Structures Using Jaya Algorithm", *Digital Proceeding of ICOCEE-CAPPADOCIA2017*

6. Değertekin, S. Ö. ve Uğur, İ. B. (2017). "A Very Fast and Efficient Algorithm for Optimum Design of Space Steel Pyramid Structures", *8th International Advanced Technologies Symposium (IATS'17),* Elazığ.

Özel İlgiler

Bilgisayar bilimleri, sinema

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ BENZERLİK BİLDİRİMİ FORMU

Öğrencinin Adı, Soyadı	İbrahim Behram UĞUR		
Öğrenci No	17806506		
Ana Bilim Dalı	İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		
Program Türü	Proje ☐	Yüksek Lisans ☐	Doktora ☒
Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)	Prof. Dr. Sadık Özgür DEĞERTEKİN		
(Varsa) II. Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)			
Tez Başlığı	Büyük Ölçekli Çelik Yapıların Sezgisel Optimizasyon Yöntemleriyle Optimum Tasarımı		
RAPOR BİLGİLERİ			
Raporlama Aşaması	Tez Savunma Sınavı Sonrası		
Sayfa Sayısı	155		
Raporlama Tarihi	06.12.2021		
Benzerlik Oranı (%)	17		

Yukarıda bilgileri verilen tez çalışmamın toplam 155 sayfalık kısmına ilişkin, 06/12/2021 tarihinde tez danışmanım tarafından *Turnitin* isimli intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %17 olarak tespit edilmiştir.

Uygulanan filtrelemeler:

☐Başlangıç Bölümleri (Kabul ve Onay sayfası, Teşekkür sayfası, Özet/Abstract) hariç

☐Kaynaklar hariç

☐Alıntılar hariç/dâhil

☐Diğer (Açıklayınız)

Tezimin benzerlik oranı, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İntihal Raporu Uygulama Esaslarında belirtilen üst sınır benzerlik oranını aşmamaktadır. Benzerlik oranım üst sınır benzerlik oranının altında olsa dahi aksinin tespit edilmesi durumunda her türlü yasal sorumluğu kabul ettiğimi ve hukuki sonuçlarına razı olduğumu bildirir,
gereğini arz ederim.

Öğrencinin Adı, Soyadı: İbrahim Behram UĞUR
Tarih: 06.12.2021

Danışman Prof. Dr. Sadık Özgür DEĞERTEKİN Tarih: 06/12/2021	İmza:
Ana Bilim Dalı Başkanı Prof. Dr. Zeynel Fuat TOPRAK Tarih: 07/12/2021	İmza: