KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÇELİK YAPILARIN AŞAMALI GÖÇME ETKİSİNDE OPTİMUM BOYUTLANDIRILMASI

DOKTORA TEZİ

Bilal TAYFUR

OCAK 2023
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÇELİK YAPILARIN AŞAMALI GÖÇME ETKİSİNDE OPTİMUM BOYUTLANDIRILMASI

Bilal TAYFUR

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 16 / 12 /2022
Tezin Savunma Tarihi : 19 / 01 /2023

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ayşe DALOĞLU
ORCID : - - -

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak hazırlanmıştır.

Varılacak yerin, yolculuğun kendisine kıyasla hiçbir önemi yoktur insan için. Ancak insan, bunu bir yerlere vardıkça fark eder. Bu yolculukta yolumu aydınlatan, öğrencisi olmaktan gurur duyduğum kıymetli hocam Prof. Dr. Ayşe DALOĞLU'na teşekkür ederim. Ayrıca Prof. Dr. Korhan ÖZGAN ve Prof. Dr. Vasıf NABİYEV hocalarıma da bu yol boyunca sağladıkları değerli katkılar için teşekkürlerimi sunarım.

2016 yılından bu yana aralarında yer almaktan onur duyduğum Dr. Nurullah ÖKSÜZER, Dr. Öğr. Üyesi Hakan Alper KAMİLOĞLU, Doç. Dr. Erdal ÖNER, Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ, Doç. Dr. Alperen TOZLU, Doç. Dr. Hamid YILMAZ, Öğr. Gör. Uğur TURHAL ve Arş. Gör. Esma GAVGALI özelinde Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'ndeki tüm mesai arkadaşlarıma ve hocalarıma teşekkür ederim. Kıymetli bilgileri ve tecrübeleriyle her daim desteğini yanımda hissettiğim kıymetli yüksek lisans danışman hocam Doç. Dr. Ömer CAN'a da ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Hangi kelimeyle, kaç kere teşekkür etsem de eşim Tuğba TAYFUR'un hakkını ödeyebilmem mümkün değil ancak sabrı, desteği ve varlığı için tüm kalbimle teşekkür ederim. Olur da bir gün bu satırları okursa, hayatıma kattığı neşe için oğlum Aras TAYFUR'a teşekkür ederim.

Dualarıyla hep yanımda olan, beni yetiştiren, evlatları için daima ellerinden gelenin fazlasını yapan anneme, babama ve canım kadar kıymetli kardeşime her şey için teşekkür ederim.

Bilal TAYFUR

Trabzon – 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Çelik Yapıların Aşamalı Göçme Etkisinde Optimum Boyutlandırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ayşe DALOĞLU'nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 19.01.2023

Bilal TAYFUR

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ... III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ ... IV
İÇİNDEKİLER ... V
ÖZET ... VII
SUMMARY ... VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ ... IX
TABLOLAR DİZİNİ ... XI
SEMBOLLER DİZİNİ ... XII
1. GENEL BİLGİLER ... 1
1.1. Aşamalı Göçme ... 2
1.1.1. Aşamalı Göçme Kavramının Tarihsel Gelişimi ... 2
1.1.2. Yönetmeliklerin Aşamalı Göçme Açısından Gelişimi ... 8
1.1.3. Aşamalı Göçme ile İlgili Analitik ve Deneysel Çalışmalar ... 10
1.1.4. Vierendeel Etkisi ... 14
1.1.5. Alternatif Yol Metodu ... 16
1.2. Yapıların Optimum Boyutlandırılması ... 22
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı ... 25
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME ... 27
2.1. Yazılım Altyapısı ... 27
2.1.1. Giriş / Çıkış sınıfı ... 28
2.1.2. Analiz Sınıfı ... 30
2.1.3. Optimizasyon Operatörleri Sınıfı ... 32
2.1.4. Tavlama Benzetimi Algoritması Sınıfı ... 33
2.1.5. Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon Algoritması Sınıfı ... 33
2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Üç Boyutlu Çerçevelerin Analizi ... 35
2.3. SAP2000 Açık Uygulama Programlama Arayüzü ... 38
2.3.1. Plastik Mafsal Durumlarının İçeri Aktarılması ... 39
2.4. Yapısal Optimizasyon Probleminin Tanımlanması ... 40
2.4.1. Amaç Fonksiyonu ve Sınırlayıcıların Tanımlanması ... 41

2.5. Tavlama Benzetimi Algoritması 43
2.5.1. Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi Algoritması 46
2.6. Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon Algoritması 52
2.6.1. Seçkin Jenerasyonlu Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon Algoritması 56
2.7. Ackley Fonksiyonunun Optimizasyonu 57
2.8. 2 Boyutlu Çelik Çerçeve Modelinin Optimum Boyutlandırılması 59
2.8.1. Genel Değerlendirme 61
2.8.2. Tavlama Benzetimi Algoritması 63
2.8.3. Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi Algoritması 65
2.8.4. Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon Algoritması 67
2.8.5. Seçkin Jenerasyonlu Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon Algoritması 69
2.9. 3 Boyutlu Çelik Çerçeve Modelinin Optimum Boyutlandırılması 71
2.9.1. Genel Değerlendirme 74
2.9.2. Tavlama Benzetimi Algoritması 76
2.9.3. Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi Algoritması 78
2.9.4. Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon Algoritması 80
2.9.5. Seçkin Jenerasyonlu Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon Algoritması 81
2.10. Yeterli Analiz Süresi 83
2.11. Sismik ve Aşamalı Göçme Sınırlayıcılarının Ayrışması 86
3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 89
4. KAYNAKLAR 92
ÖZGEÇMİŞ 99

Doktora Tezi

ÖZET

ÇELİK YAPILARIN AŞAMALI GÖÇME ETKİSİNDE OPTİMUM BOYUTLANDIRILMASI

Bilal TAYFUR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ayşe DALOĞLU
2023, 98 Sayfa

Bu çalışmada, çelik yapıların aşamalı göçmeye karşı optimum boyutlandırılması ve aşamalı göçme sınırlayıcılarının çelik çerçeve üzerindeki etkileri incelenmiştir. Aşamalı göçmeye karşı tasarım için gerçekleştirilen kaldırma senaryosu analizlerinde alternatif yol metodu, doğrusal olmayan dinamik prosedür ile gerçekleştirilmiştir. Çerçevelerin optimum boyutlandırılması için Tavlama Benzetimi ve Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. Bu algoritmalar, yapısal optimizasyon bağlamında geliştirilmiş; Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi ve Seçkin Jenerasyonlu Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritmaları olarak adlandırılmıştır. Çalışma kapsamında C# dilinde bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım ile SAP2000 arasındaki bağlantı Açık Uygulama Programlama Arayüzü (OAPI) üzerinden gerçekleştirilmiştir. Ayrıca doğrusal olmayan dinamik prosedürün tatbiki için gerekli analiz süresi araştırılmış ve farklı sınırlayıcıların tasarım üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde, algoritmaların geliştirilmiş versiyonlarının orijinal algoritmalara kıyasla daha hafif çerçeve ağırlıkları ürettiği görülmüştür. Doğrusal olmayan dinamik prosedür için önerilen analiz süresinin spesifik şartlar altında yetersiz kalabildiği; aşamalı göçme sınırlayıcılarının tasarım üzerindeki etkilerinin, sismik sınırlayıcılardan önemli ölçüde ayrıştığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çelik Yapılar, Optimum Boyutlandırma, Aşamalı Göçme, Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz, Sonlu Elemanlar Yöntemi

PhD. Thesis

SUMMARY

OPTIMUM DESIGN OF STEEL STRUCTURES UNDER THE EFFECT OF PROGRESSIVE COLLAPSE

Bilal TAYFUR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Ayşe DALOĞLU
2023, 98 Pages

In this study, the optimum design of steel structures against progressive collapse and the effects of progressive collapse constraints on the steel frame were investigated. Alternative path method nonlinear dynamic procedure was used to analyze the removal scenarios for the design against progressive collapse. Simulated Annealing and Teaching-Learning Based Optimization algorithms are used for optimum design of frames. In addition, these algorithms were improved in the context of structural optimization; they are named Guided Simulated Annealing and Teaching-Learning Based Optimization with Elite Generation algorithms. A software in C# language was developed for the implementation of the algorithms. The communication between the developed software and SAP2000 is conducted via the Open Application Programming Interface (OAPI). In addition, the analysis duration suggested for the nonlinear dynamic procedure was investigated, and the effects of different constraints on the design were investigated.

As a result of the study, it has been seen that the improved versions of the algorithms produce lighter frame weights compared to the original algorithms. The analysis duration recommended for the nonlinear dynamic procedure may be insufficient under specific conditions. It has been observed that the effects of progressive collapse constraints on the design differ significantly from seismic constraints.

Key Words: Steel Structures, Optimum Sizing, Progressive Collapse, Nonlinear Dynamic Analysis, Finite Element Method

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Aşamalı göçme süreci 2
Şekil 1.2. Göçme sonrası Ronan Point [14] 4
Şekil 1.3. Skyline Tower [16] 4
Şekil 1.4. Beyrut Amerikan Üssü [18, 19] 5
Şekil 1.5. Patlama sonrası Grand Hotel [21] 5
Şekil 1.6. Alfred P. Murrah Federal Binası'na ait taşıyıcı sistemin görünümü [22] 6
Şekil 1.7. Alfred P. Murrah Federal Binası'nın saldırı sonrası görüntüsü [24] 7
Şekil 1.8. Aşamalı göçme sonrası yıkılan Sampoong Binası [26] 7
Şekil 1.9. Aşamalı göçmeye ilişkin yayınların WOS'a göre yıllar içindeki artışı 11
Şekil 1.10. Aşamalı göçme tipleri [5] 12
Şekil 1.11. Katener davranışın ortaya çıkışı [45] 15
Şekil 1.12. ASCE 41'e göre deformasyon ve kuvvet kontrollü davranış [53] 18
Şekil 1.13. ASCE 41'e göre genelleştirilmiş yük-deformasyon ilişkisi [53] 21
Şekil 1.14. Aşamalı göçme analizinde kullanılan yaygın sayısal yöntemler [5] 22
Şekil 2.1. Yazılımda yer alan yapılar ve sınıflar 29
Şekil 2.2. Genel analiz fonksiyonun akışı 31
Şekil 2.3. Global eksen takımıyla lokal eksen takımı arasındaki açıların gösterimi 37
Şekil 2.4. Mafsal durumlarının XML dosyasından çekilmesine ait akış şeması 40
Şekil 2.5. Tavlama Benzetimi algoritması akış şeması 45
Şekil 2.6. Klasik Tavlama Benzetimi algoritmasına göre kesit seçim olasılığının ve toplam yapı ağırlığının değişimi 50
Şekil 2.7. Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi algoritmasına göre kesit seçim olasılığının ve toplam yapı ağırlığının değişimi 51
Şekil 2.8. Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması akış şeması 55
Şekil 2.9. Ackley fonksiyonu 57
Şekil 2.10. Üç açıklıklı dokuz katlı düzlem çerçeve planı [33] 60
Şekil 2.11. İki Boyutlu model için tüm algoritmalara ait optimum ağırlıkların medyan ve çeyrek dağılım değerleri 63
Şekil 2.12. En iyi çözüme ait ağırlık değişimi (TB) 63

Şekil 2.13. En iyi çözüme ait talep kapasite oranları (TB) 64
Şekil 2.14. Gruba ait en büyük talep kapasite oranları (TB) 65
Şekil 2.15. En iyi çözüme ait ağırlık değişimi (YTB) 65
Şekil 2.16. En iyi çözüme ait talep kapasite oranları (YTB) 66
Şekil 2.17. Gruba ait en büyük talep kapasite oranları (YTB) 67
Şekil 2.18. En iyi çözüme ait ağırlık değişimi (ÖÖTO) 67
Şekil 2.19. En iyi çözüme ait talep kapasite oranları (ÖÖTO) 68
Şekil 2.20. Gruba ait en büyük talep kapasite oranları (ÖÖTO) 69
Şekil 2.21. En iyi çözüme ait ağırlık değişimi (SJ-ÖÖTO) 70
Şekil 2.22. En iyi çözüme ait talep kapasite oranları (SJ-ÖÖTO) 70
Şekil 2.23. Gruba ait en büyük talep kapasite oranları (SJ-ÖÖTO) 71
Şekil 2.24. Üç boyutlu 558 elemanlı çelik çerçeve modeline ait plan 73
Şekil 2.25. Üç Boyutlu model için tüm algoritmalara ait optimum ağırlıkların medyan ve çeyrek dağılım değerleri 76
Şekil 2.26. En iyi çözüme ait ağırlık değişimi (TB) 76
Şekil 2.27. En iyi çözüme ait talep kapasite oranları (TB) 77
Şekil 2.28. Gruba ait en büyük talep kapasite oranları (TB) 78
Şekil 2.29. En iyi çözüme ait ağırlık değişimi (YTB) 78
Şekil 2.30. En iyi çözüme ait talep kapasite oranları (YTB) 79
Şekil 2.31. Gruba ait en büyük talep kapasite oranları (YTB) 79
Şekil 2.32. En iyi çözüme ait ağırlık değişimi (ÖÖTO) 80
Şekil 2.33. En iyi çözüme ait talep kapasite oranları (ÖÖTO) 81
Şekil 2.34. Gruba ait en büyük talep kapasite oranları (ÖÖTO) 81
Şekil 2.35. En iyi çözüme ait ağırlık değişimi (SJ-ÖÖTO) 82
Şekil 2.36. En iyi çözüme ait talep kapasite oranları (SJ-ÖÖTO) 83
Şekil 2.37. Gruba ait en büyük talep kapasite oranları (SJ-ÖÖTO) 83
Şekil 2.38. Sismik sınırlayıcıların dahil olduğu analizlerin dağılımı 84
Şekil 2.39. Sismik sınırlayıcıların dahil olmadığı analizlerin dağılımı 85
Şekil 2.40. Örnek çerçeveye ait analiz süresi boyunca plastik mafsal oluşumu 86
Şekil 2.41. Farklı sınırlayıcıların etkisinde, kesit alanlarına bağlı olarak çerçeve gösterimi 87

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Farklı boyutlarda Ackley fonksiyonunun optimum değerleri 58
Tablo 2.2. İki boyutlu modeldeki yapısal elemanların grupları 59
Tablo 2.3. İki boyutlu modelde çerçeveye etkiyen yükler 61
Tablo 2.4. İki Boyutlu model için tüm algoritmalara ait optimum boyut bilgileri..... 62
Tablo 2.5. Üç boyutlu modeldeki yapısal elemanların grupları 71
Tablo 2.6. Üç boyutlu modelde çerçeveye etkiyen yükler 72
Tablo 2.7. Üç Boyutlu model için tüm algoritmalara ait optimum boyut bilgileri..... 75
Tablo 2.8. Farklı sınırlayıcılara bağlı optimum boyutlar..... 87

SEMBOLLER DİZİNİ

A	Taşıyıcı eleman kesit alanı
A_s	Etkin net enkesit alanı
AISC	Amerikan Çelik Yapı Enstitüsü (American Institute of Steel Construction)
ASCE	Amerika İnşaat Mühendisleri Topluluğu (American Society of Civil Engineers)
ASD	Emniyetli Dayanıma Göre Tasarım (Allowable Strength Design)
C_n	Sınırlayıcı
CP	Çökmenin Önlenmesi (Collapse Prevention)
δ	Göreli kat ötelenmesi
Δ	Deformasyon
D	Ölü yük
DCR	Talep kapasite oranı (Demand Capacity Ratio)
E	Elastisite modülü
ϕ_b	Eğilme momenti için dayanım katsayısı
ϕ_c	Basınç kuvveti için dayanım katsayısı
G	Kayma modülü
G_{ND}	Aşamalı göçme analizi için uygulanacak düşey yük kombinasyonu
GSA	Amerikan Savunma Bakanlığı Genel Hizmetler Yönetimi (General Services Administration)
I	Atalet momenti
I_c	Değişken seçim olasılığı rassallık koruma sabiti
IO	Hemen kullanım (Immediate occupancy)
k_B	Boltzman sabiti
L_L	Hareketli yük
L	Taşıyıcı elemanın uzunluğu
L_{LAT}	İlgili kata etkiyen yanal yük
LRFD	Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (Load and Resistance Factor Design)

LS	Can güvenliği (Life Safety)
M3	Yalnız kuvvetli ekseni esas alan plastik mafsal modeli
M_{nx}	Güçlü eksen etrafındaki karakteristik eğilme dayanımını
M_{ny}	Zayıf eksen etrafındaki karakteristik eğilme dayanımını
M_{PE}	Kesite ait plastik moment kapasitesi
M_{ux}	Güçlü eksen etrafındaki hesaplanan eğilme momenti
M_{uy}	Zayıf eksen etrafındaki hesaplanan eğilme momenti
n_f	Sınırlayıcıyı aşan eleman sayısı
N_e	Önceki iterasyonda sınırlayıcı şartlarını sağlamayan kesit sayısı
N_f	Çerçevedeki eleman sayısı
OAPI	Açık Uygulama Programlama Arayüzü (Open Application Programming Interface)
p_i	Ceza fonksiyonu
P	Eksenel yük
P-M2-M3	Her üç ekseni esas alan plastik mafsal modeli
P_n	Karakteristik eksenel dayanım
P_u	Hesaplanan eksenel gerilme
P_r	Daha iyi olmayan bir çözümün kabul edilme olasılığı
P_s	Orijinal yaklaşımdaki değişken seçilme olasılığı
P_{si}	Yönlendirilmiş yaklaşımdaki değişken seçilme olasılığı
P_{ye}	Kesite ait eksenel akma yük kapasitesi
Q	Yük
Q_y	Akmanın başladığı yük
S	Kar yükü
S_{DS}	%5 sönüm için kısa periyotlarda spektral ivme katsayısı
$\sum P$	İlgili kattaki yanal yük
ρ	Malzeme birim ağırlığını
θ_y	Akma dönmesi
t_Δ	Sıcaklık düşüş değeri
t_i	Başlangıç sıcaklığı
t_s	Bitiş sıcaklığı
T	Tavlama Benzetimi algoritması için sıcaklık değeri
T_f	Öğrenme faktörü

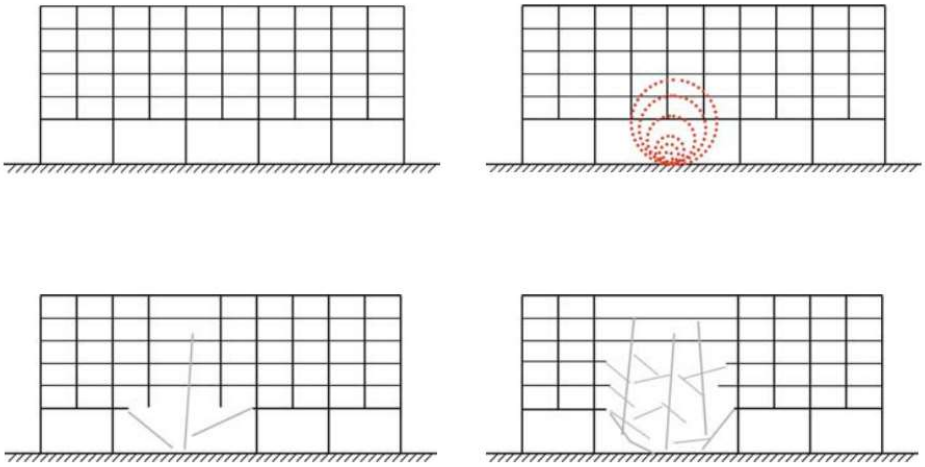
UFC	Tesisler için Birleştirilmiş Kriterler (Unified Facilities Criteria)
W	Yapı ağırlığı
XML	Genişletilebilir biçimlendirme dili (Extensible markup language)
$Z(T)$	Normalleştirme katsayısını

1. GENEL BİLGİLER

Günümüzde, yapıların kullanım ömrü boyunca karşılaşabileceği olası tehditler, o yapının tasarım sürecinin belirlenmesinde anahtar role sahiptir. Örneğin bir yapının inşa edileceği bölgenin depremselliği, tasarım sürecinde mutlaka göz önüne alınması gereken bir kriterdir. Bununla birlikte yapının kullanım amacı ve dolaylı olarak karşılaşabileceği olası riskler de alınacak önlemlerin ölçüsünü ve metodunu belirlemektedir [1].

Yapıların temel anlamda karşı koyması gereken yükler düşey ve yatay yükler başlıkları altında sınıflandırılabilir. Düşey yükler genellikle yapının kullanım ömrü boyunca sürekli olarak maruz kaldığı, kullanıma bağlı yükler baz alınarak hesaba katılır. Bu tip yüklerin güvenle karşılanabilmesi için genellikle yapının statik olarak analiz edilmesi yeterli görülmektedir. Ancak yanal yükler (deprem, rüzgâr vb.) çoğunlukla dinamik karakteristiğe sahip olduklarından statik analizler bu yüklere karşı yapının güvenli tasarlanabilmesi için yetersiz görülebilmektedir.

Yapıların tasarım sürecinin tüm bu kriterler göz önüne alınarak eksiksiz bir biçimde yapılması halinde bile, farklı mahiyetlerle inşa edilen bazı yapılar açısından tam anlamıyla güvenliğin sağlandığı söylenemez. Günümüzde stratejik öneme sahip yapılar terör saldırılarının hedefi olabilmekte ve/veya yapılarda ortaya çıkan beklenmeyen, olağanüstü, ani veya anormal yükler yapısal bütünlüğe zarar verebilmektedir. Bu durumda yapının taşıyıcı olarak değerlendirilen kısım veya kısımları kendisinden beklenen katkıyı sağlayamamakta, dolayısıyla geriye kalan yapısal elemanlara aktarılan yüklerin aniden ve düzensiz biçimde artmasına sebep olmaktadır. Bu artış zincirleme bir etki yaratarak birçok yapı elemanın, taşıyıcı özelliğini yitirmesine sebep olabilmekte ve yapının kısmen veya tamamen göçmesine sebep olabilmektedir. Bu göçme davranışı literatürde Aşamalı Göçme veya İlerlemeli Göçme olarak adlandırılmaktadır [2, 3]. Bir aşamalı göçme olayının aşamaları Şekil 1.1'de bir örnek çerçeve üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Aşamalı göçme süreci

1.1. Aşamalı Göçme

Aşamalı göçme kavramının tanımı tarihsel süreçte farklılıklar göstermiş olsa da günümüzde bir göçme olayını bu kapsamda incelemek için bazı ortak kabuller ortaya çıkmıştır. ASCE'ye [4] göre Aşamalı Göçme, başlangıçtaki lokal göçmenin genişleyerek yapının bütününün veya orantısızca büyük bir kısmının göçmesine sebep olması şeklinde tanımlanmıştır. Göçme olayının sebebinden bağımsız olarak, bir olayı aşamalı göçme olarak kabul etmek için şu üç şarta sahip olması gerekmektedir [5],

- Başlangıçtaki hasar lokal olmalıdır.
- Ortaya çıkan başlangıç hasarı diğer yapı elemanlarında hasara sebep olmalıdır.
- Lokal ve nihai göçme arasında orantısızlık olmalıdır.

Bu bakımdan incelendiğinde bir olayın aşamalı göçme olarak kabul edilmesi için yapının tümünün göçmüş olması gerekmemektedir. Göçen kısmın başlangıçtaki hasara kıyasla çok büyük olması, olayın bu kapsamda incelenmesi için yeterlidir ve çok sayıda örnek vaka da bu kriter bağlamında aşamalı göçme olarak incelenmektedir.

1.1.1. Aşamalı Göçme Kavramının Tarihsel Gelişimi

Tarihsel olarak bakıldığında, aşamalı göçmenin kaynağı olarak çok farklı tetikleyici sebepleri olduğu görülmektedir. Doğalgaz patlaması, erken kalıp sökme, aşırı yükleme, yangın, terör saldırıları ve hatta deprem gibi birçok etmen lokal göçmelere sebep olabilmektedir. Örnek olaylarda görüleceği üzere bahsi geçen sebeplerle ortaya çıkan lokal

göçmeler, komşu yapı elemanlarının aşırı yüklenmelerine ve taşıyıcı niteliğini kaybetmesine neden olmaktadır. Akabinde oluşan büyük yıkımlar ise bu olayların aşamalı göçme bağlamında incelenmesine sebep olmaktadır.

İkinci dünya savaşında bombalamalar neticesinde yıkıma uğrayan birtakım binalar, aşamalı göçmenin bilinen ilk örnekleri olarak kabul edilmektedir. Aşamalı göçme kavramı o dönem için henüz tanımlanmamış olsa da, Amerika Birleşik Devletleri'nde yazılan "Darbe ve Patlamaların Etkileri" [6] başlıklı rapor bu alandaki ilk doküman olarak görülmektedir. İngiltere'de de bu çalışmalara paralel araştırmalar gerçekleştirilmiştir [7]. Özellikle askeri kullanım amacıyla inşa edilecek sığınakların tasarımında pratiğe dökülmeye başlayan bu bilgi birikimi sonraki yıllarda gerçekleşen çalışmalarla daha da zenginleştirilmiştir [8, 9]. Bu dönemde gerçekleşen çalışmalar ekseriyetle taşıyıcı elemanların dayanım kapasitesinin, olası saldırılar neticesinde oluşacak yükleri absorbe edecek niteliğe sahip olması üzerine odaklanmaktadır [10]. Öte yandan bahsedildiği üzere, ikinci dünya savaşı esnasında önemli sayıda çok katlı yapı da patlama etkilerine maruz kalmıştır. Bazı aşamalı göçme örnekleri görülüyor olsa da, dönemin hakim taşıyıcı sistemi olan yığma yapılar aşamalı göçmeye karşı önemli ölçüde direnebilmiştir [11]. Bunlara ek olarak güncel bazı araştırmalar 19.yy başlarındaki bazı göçme olaylarının da aşamalı göçmeyle olan ilişkisini irdelemektedir [12].

Aşamalı göçmenin literatürde dikkat çeken bir konu haline gelmesi 1968 yılında Şekil 1.2'de göçme sonrası durumu görülen Ronan Point adlı yapıdaki doğal gaz patlamasının oluşturduğu zincirleme etki yüzünden kısmi göçmesiyle geçekleşmiştir. Bu döneme kadar birçok örnek vaka olmasına karşın, ilgili yapıların daha az dikkat çekmesi sebebiyle yeterli raporlamalar günümüze kadar ulaşmamıştır [5]. Fakat Ronan Point patlaması yapı mühendisliği açısından yeni bir problemin tanımlanması ve çözüm yolları üretilmesi gerekliliğini doğurmuştur. Bu olayın ardından bazı ülkeler de önlem alma yoluna gitmiş ve ilerleyen yıllarda yönetmeliklerinde aşamalı göçme kavramına yer vermeye başlamışlardır [13].



Şekil 1.2. Göçme sonrası Ronan Point [14]

Literatürde yer bulan bir diğer önemli olay ise 1973 yılında erken kalıp sökme sonucu kısmen yıkılan Skyline Tower binasıdır. 26 katlı olarak projelendirilen yapının 23. katına ait kalıpların erken sökülmesi, bu katta başlayan göçmenin zincirleme olarak Şekil 1.3'te görüldüğü gibi ilerlemesi sonucu yapının bir cephesinin tamamen yıkılmasına, 14 işçinin ölümüne ve 34 işçinin de yaralanmasına sebep olmuştur [15].



Şekil 1.3. Skyline Tower [16]

Terör saldırıları, yapılardaki aşamalı göçme olaylarının en yaygın tetikleyicilerden birisi olarak görülmektedir. Esasen bu tip saldırıların amacı da yapıdaki bu zincirleme etkinin tetiklenebilmesidir. 1982 yılında ilk kez saldırıya uğrayan Lübnan'ın Beyrut şehrindeki Amerikan askeri üssünün taşıyıcı sisteminde herhangi bir hasar ortaya çıkmamıştır. Ancak 1983 yılında gerçekleşen ikinci bombalı araç saldırısı aşamalı göçme

literatüründeki önemli kilometre taşlarından birisi olma özelliği taşımaktadır. 241 kişinin ölümüyle sonuçlanan saldırıda yapı neredeyse tamamen göçmüştür [17]. 1982 ve 1983 yıllarındaki saldırılar sonrasındaki yapının durumu Şekil 1.4'te verilmiştir.



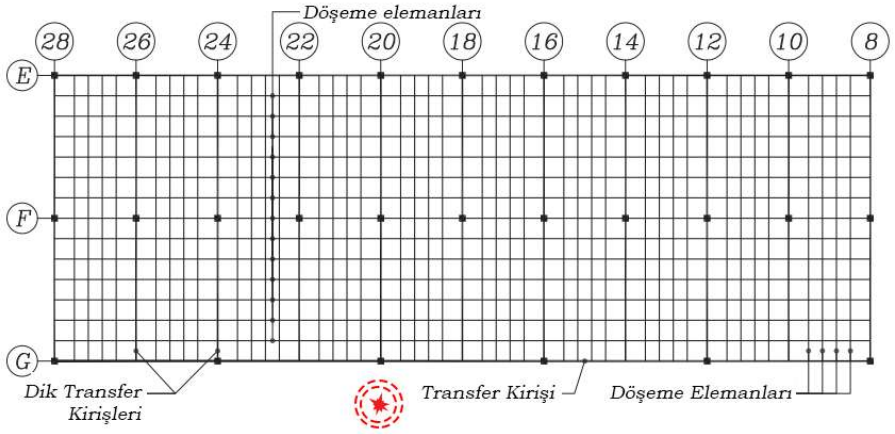
Şekil 1.4. Beyrut Amerikan Üssü [18, 19]

Aşamalı göçmenin farklı tipteki yapılara etkisini anlayabilmek açısından önemli bir örnek olan Grand Hotel saldırısı, Lübnan'daki saldırıdan yalnızca bir yıl sonra 1984 yılında gerçekleşmiş, İngiliz Başbakanı Margaret Thatcher ve kabinesini hedef almıştır. Yığma bir yapı olan binanın 6. katına yerleştirilen 9-14 kg'lık bombanın patlaması sonucu yapıda zincirleme bir etki oluşarak Şekil 1.5'te görüldüğü üzere ahşap malzeme kullanılan çatı ve alt katların kısmen göçmesine sebep olmuştur. Ancak yığma duvarlar patlama etkisini büyük ölçüde absorbe etmiş ve yan odada bulunan İngiliz Kabinesi zarar almadan patlamadan kurtulmuştur. Literatür açısından İkinci Dünya Savaşındaki yığma yapı örneklerinin de bu bağlamda incelenebileceği görülmüştür [20].



Şekil 1.5. Patlama sonrası Grand Hotel [21]

Aşamalı göçme literatürü açısından belki de en önemli örnek olarak, Oklahoma City'de 1995 yılında bombalı araç saldırısına uğrayan Alfred P. Murrah Federal Binası görülmektedir. Yapı, sismik tehdidin düşük olduğu düşünülen bir bölgede yer aldığından, aşamalı göçmeye direnç açısından da güçlü sayılamayacak bir taşıyıcı sisteme sahiptir. Yapının cam dış cepheye sahip olması sebebiyle, gerçekleştirilen bombalı saldırının ilk etkisi cam malzeme tarafından sönümlenemediği ve yapının taşıyıcı kolonlarından ikisinin güçlü bir şekilde kesme davranışına zorlandığı düşünülmektedir. Yapıda kayda değer nitelikte bir taşıyıcı duvarın bulunmayışı da zincirleme reaksiyonu durdurabilecek bir başka mekanizmayı devre dışı bırakmıştır. Literatürün gelişimi açısından bu olay etraflıca ve çok kere farklı araştırmacılarca incelenmiştir [15, 22, 23]. Bu olay aşamalı göçmeye karşı tasarım açısından; perde duvarların, birleşim noktalarının rijitliğinin, özellikle terör saldırıları bağlamında giriş kattaki kolonların önemi gibi birçok konuda araştırmacılara önemli bilgiler sağlamıştır. Saldırı neticesinde yapının neredeyse yarısı göçmüş ve 168 kişi hayatını kaybetmiştir [23]. Yapının taşıyıcı sistem planı Şekil 1.6'da saldırı sonrası yapının yıkılan kısımları ise Şekil 1.7'de verilmiştir.



Şekil 1.6. Alfred P. Murrah Federal Binası'na ait taşıyıcı sistemin görünümü [22]



Şekil 1.7. Alfred P. Murrah Federal Binası'nın saldırı sonrası görüntüsü [24]

Terör saldırıları dışında tasarım kaynaklı kusurlar da yapılarda aşamalı göçme mekanizmasını tetikleyebilmektedir. Bu durumun bilinen en acı örneklerinden birisi 1995 yılında Seul'da 502 kişinin ölümüyle sonuçlanan Sampoong binasının göçmesidir. Öncelikle konut olarak projelendirilen yapının kullanım amacı daha sonra bir yaşam merkezi olarak değiştirilmiştir. Yapının inşası esnasında projelerde birtakım değişiklikler yapılmış ve ihtiyaç duyulan geniş açıklıklar planlarda daha sonra oluşturulmuştur. Ancak, geniş alana sahip döşemeler zımbalama etkisi sonucu kolonlardan ayrılmaya başlamış ve yapının aşamalı göçme neticesinde Şekil 1.8'de görüleceği üzere orantısız biçimde yıkılmasına sebep olmuştur [25].



Şekil 1.8. Aşamalı göçme sonrası yıkılan Sampoong Binası [26]

2001 yılında küresel kamuoyunda büyük yankı uyandıran ve dünyanın birçok alanda önemli bir değişime gitmesine sebep olan Dünya Ticaret Merkezine (İkiz Kuleler) gerçekleştirilen uçaklı saldırı ise aşamalı göçmenin en bilinen ve çarpıcı örneği olarak kabul görmektedir. Yapının pek çok açıdan bir sembol niteliği taşıması ve yarattığı etki nedeniyle hem Amerikan Devleti tarafından hem de araştırmacılar tarafından çok kapsamlı değerlendirmeler yapılmıştır. Dünya Ticaret Merkezi, saldırının sonucunda her ne kadar göçmüş olsa da ilk çarpmanın ardından, yapısal eleman kaybı sebebiyle bir aşamalı göçme gerçekleşmemiştir. Bu durumun en temel sebebi olarak yüksek katlı yapının tasarım anlamında yedekli bir anlayışla inşa edilmiş olması görülmektedir. 107. ve 110. Katlar arasına çarpan ilk uçağın ardından yapının üstte kalan kısmının Vierendeel etkisi ile ayakta kalmayı bir süre daha sürdürdüğü düşünülmektedir [27]. Çarpma sonrasında yapıda meydana gelen yangın, dayanım kaybına buna bağlı olarak da biriken yükler bir süre sonra yapının tamamen göçmesine sebep olmuştur. Bu görüş dışında bazı iddialar da mevcuttur ancak birkaç kayda değer varsayıma rağmen yapının nihai olarak göçmesinin sebebi nitelikli biçimde kanıtlanarak ortaya konulamamıştır.

1.1.2. Yönetmeliklerin Aşamalı Göçme Açısından Gelişimi

Aşamalı göçmenin devletler tarafından dikkate alınması ve bu bağlamda sistematik risk tespiti ve önlem geliştirmesi, esas olarak örnek vakaların ortaya çıkışıyla paralel bir çizgi izlemektedir. Dolayısıyla her aşamalı göçme olayı bu olgunun yönetmelikler açısından daha doğru anlaşılması açısından önem taşımaktadır. Bunun yanında, UFC'de [28] (Tesisler için Birleştirilmiş Kriterler "Unified Facilities Criteria") aşamalı göçme olaylarının nadiren görünen olaylar olduğu ancak Alfred P. Murrah Federal Binasında görüldüğü üzere çok büyük can kayıplarına da yol açabileceği belirtilmiştir.

Bu alandaki ilk düzenlemeler kısmen gecikmeli olsa da literatürdeki örnek vakaları kavramaya vesile olmuştur. Ronan Point binasındaki patlama bu açıdan ilk önemli kilometre taşı olarak kabul edilebilir. Devletler tarafından ortaya konan ilk düzenlemeler temel anlamda yapısal bütünlüğü koruma felsefesine dayanmaktadır. Bu yaklaşımda, çok büyük ve güçlü kesitlerle dayanım sağlanmaya çalışıldığından ortaya çıkan maliyetler de doğal olarak yükselmiştir. Ancak Alfred P. Murrah Federal Binası ve Dünya Ticaret Merkezi olayları, daha spesifik bir yaklaşımın gerekliliğini göstermiş, aşamalı göçme riskinin tespiti ve önlenmesini esas alan bir düzenlemenin çıkmasına sebep olmuştur [29]. 2003 yılında

GSA (Amerikan Savunma Bakanlığı Genel Hizmetler Yönetimi "General Services Administration") tarafından yayınlanan düzenleme ile aşamalı göçmeye karşı tasarımı yapılacak yapının kritik elemanlarının ani kayıpları halinde yapının taşıyıcılığının test edilmesi önerilmiştir [30]. 2005 yılında Amerika'da yayınlanan ve daha sonra da güncellenen "Design of Buildings to Resist Progressive Collapse (Aşamalı göçmeye karşı yapıların tasarımı)" başlıklı yönetmelik [28, 31, 32] günümüzdeki haliyle aşamalı göçmeye karşı tasarımda yaygın biçimde kullanılmaktadır. Geçmişten günümüze dek literatürde ve yönetmeliklerde yer alan yöntemler birlikte değerlendirildiğinde aşamalı göçmeye karşı kabul görmüş üç temel yaklaşım bulunmaktadır [3]:

1) Spesifik lokal direnç
    a) Yapısal elemanların yüksek lokal direnci
    b) Harici koruyucu önlem
2) Lokal göçme durumunda tasarım (Direkt Tasarım)
    a) Alternatif yol metodu
    b) Göçen birimlerin izolasyonu
3) Önleyici tasarım kuralları (Dolaylı Tasarım)

Spesifik lokal direnç yaklaşımında, aşamalı göçmeye sebep olabilecek yapısal elemanlar "anahtar eleman" olarak tanımlanmaktadır. Yaklaşımın temelleri, bu elemanların aşamalı göçmeyi tetikleyecek ani yüklere karşı yüksek direnç gösterecek şekilde tasarlanmasına dayanmaktadır. Ancak bu yaklaşımın sakıncalı görülen yanı, kesin bir güvenlik sağlayamaması ve beklenen direnci umulan seviyede gösterememe ihtimalidir. Zira böyle bir tasarım için yapının gelecekte maruz kalabileceği tehditlerin ve dolayısıyla maruz kalabileceği anormal yüklerin sayısal olarak belirlenmesi elzemdir. Buna ek olarak, bu tehditlere maruz kalabilecek taşıyıcı elemanların da yüksek isabetle doğru belirlenmesi gerekmektedir. Ancak bu şartların tümünün sağlanması ile bu yöntemin verimli olması mümkündür.

Öte yandan bir yapıyı aşamalı göçmeye karşı tam olarak güvenli şekilde tasarlamak, maliyet anlamında altından kalkılması güç sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle olası bir aşamalı göçmeyi, yapının öngörülen kısımlarıyla sınırlı tutmak bir diğer tasarım yaklaşımı olarak kabul edilmektedir. Alternatif yol metodu olarak adlandırılan bu yöntemin farklı uygulama biçimleri bulunmaktadır [28]. Yöntemin temeli, anahtar eleman olarak tanımlanan yapısal elemanların tek tek sistemden çıkması halinde yapının davranışının analiz edilmesine dayanmaktadır. Sistemden çıkarılan elemanın taşıdığı yüklerin komşu yapı

elemanlarına transfer edilmesi halinde yapının geri kalanındaki hasarların kısıtlanması gerekmektedir.

Alternatif yol metodunun uygulamasında yönetmelikçe belirlenmiş üç farklı prosedür bulunmaktadır. Bu prosedürler;

- Doğrusal statik analiz,
- Doğrusal olmayan statik analiz,
- Doğrusal olmayan dinamik analiz olarak sıralanabilir [28].

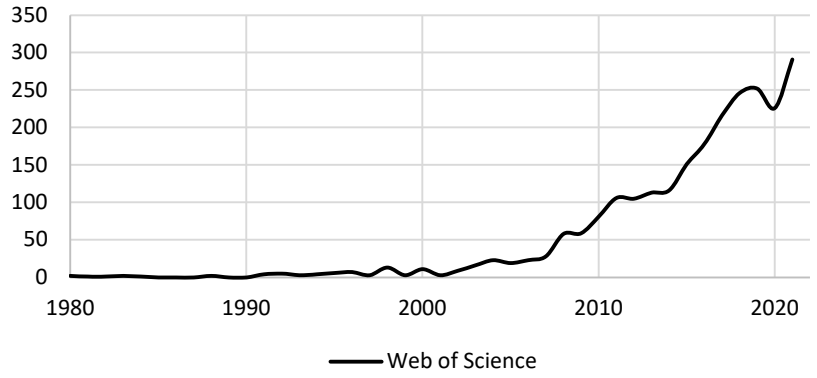
Doğrusal statik yaklaşım bu üç yöntem arasında en kolay ve bilgisayar yükü anlamında en hafif olanıdır. Fakat yaklaşımın yalınlığı sebebiyle çıkan sonuçlar fazlasıyla güvenli tarafta olmakta ve ekonomiklikten uzak kalmaktadır. Doğrusal olmayan dinamik yöntem ise en gerçekçi yaklaşım olmanın yanında; önemli ölçüde zaman, bilgisayar gücü ve çaba gerektirmektedir.

Doğrusal olmayan dinamik analiz prosedüründe yapı, herhangi bir taşıyıcı eleman eksiltmesi yapılmadan hesaplanan düşey ve yatay yükler altında doğrusal olmayan statik analize tabi tutulur. Uygulanan yükler altında yapının denge durumu halindeki anahtar eleman uç kuvvetleri kayıt altına alınır. Bir sonraki aşamada ilgili anahtar eleman yapısal modelden çıkarılarak daha önce elde edilen uç kuvvetler aynı noktalardan yapıya uygulanır. Dinamik analize tabi tutulan yapı stabil hale geldiğinde ilgili uç kuvvetleri aniden kaldırılır ve kaldırma senaryosuna konu olan kolonun uç noktasındaki yer değiştirmeler maksimum değerlerine ulaşacak şekilde en az bir çevrim yapması beklenir. Akabinde sistemin güvenli sayılabilmesi için; akmadaki dönme açısı, kabul edilebilir plastik dönme açısı gibi değerler sistemin tümü için tek tek incelenir [33]. Bu aşamada en önemli noktalardan birisi yapıdaki anahtar elemanların belirlenmesidir. Temel üstündeki ilk kattaki, çatının hemen altındaki ilk kattaki, yapı yüksekliğinin ortasına denk gelen kattaki ve kesit boyutlarında değişim olan katın hemen üstündeki kattaki köşe ve orta kolonların tümü anahtar eleman olarak kabul edilmelidir [28]. Bu gereksinim yönetmelikte minimum şart olarak belirlenmiştir, haliyle tasarımcı mühendisin değerlendirmesine bağlı olarak birtakım ek anahtar elemanlar da seçilebilir [33].

1.1.3. Aşamalı Göçme ile İlgili Analitik ve Deneysel Çalışmalar

Aşamalı göçmeye ilişkin akademik çalışmaların sayısı ve çalışmaların niteliğinin artışı da örnek vakaların yarattığı etkiyle paralel biçimde artmıştır. Şekil 1.9'da aşamalı göçmeyle

ilgili yıllar içinde Web of Science'ta (WOS) yer alan makalelerin artışı verilmiştir. Görülebileceği üzere özellikle ikiz kulelere gerçekleştirilen terör saldırısının ardından bu alandaki çalışmalar önemli bir ivme kazanmıştır.



Şekil 1.9. Aşamalı göçmeye ilişkin yayınların WOS'a göre yıllar içindeki artışı

Yapılarda aşamalı göçmenin gerçekleşmesi belli karakteristik biçimlerde kendini göstermektedir. Bu bakımdan aşamalı göçmenin genel hatlarıyla dört farklı biçimde ortaya çıktığı söylenebilir [5, 34],

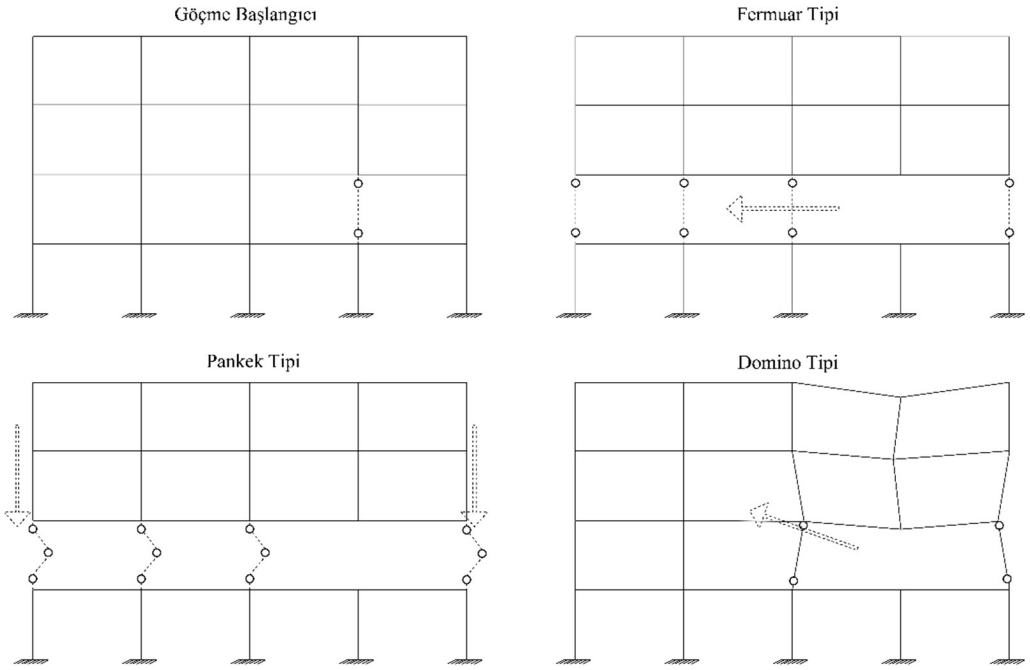
- Fermuar tipi aşamalı göçme
- Pankek tipi aşamalı göçme
- Domino tipi aşamalı göçme
- Karma aşamalı göçme

Fermuar tipi aşamalı göçme kesin bir kural olmamakla birlikte genellikle çekmeye çalışan yapısal elemanlarda ortaya çıkar. Şekil 1.10'da görülebileceği üzere başlangıçta kaybedilen taşıyıcı elemana paralel diğer elemanlar, biriken yüke direnemez ve aşamalı göçme meydana gelir. Bu tip göçmenin en meşhur örnekleri arasında rezonansa girerek taşıyıcı halatlarını kaybetmeye başlayan Tacoma Köprüsü ve zımbalamayla göçmesi başlayan Pipers Row Otoparkı vakaları gösterilebilir.

Yapıdaki başlangıç göçmesini takiben Şekil 1.10'da görüldüğü üzere, aynı düzeydeki basınca maruz kalan diğer taşıyıcı elemanların göçmesi sonucu ortaya çıkan göçme tipi pankek tipi aşamalı göçme olarak adlandırılmaktadır. Bu tipteki vakalarda göçme yayılımı ekseriyetle yatay doğrultuda gerçekleşir. En meşhur örneği olarak Dünya Ticaret Merkezinin göçmesi gösterilebilir.

Domino tipi aşamalı göçme, yapıdaki kirişlerin ortaya çıkan ekstra yüklere dayanamaması sonucu Şekil 1.10'da görüldüğü gibi dikey yönde zincirleme biçimde göçmesi sonucu ortaya çıkar. Bu tipteki göçmede yayılma hem dikey hem de çapraz yönde gerçekleşir.

Bu üç farklı göçme tipinden herhangi birisi genellikle tek başına ortaya çıkmamaktadır. Yapıların karmaşık yapısı, birçok göçme tipinin eşzamanlı veya birbirini takiben ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu tip göçme olayları ise karma aşamalı göçme olarak sınıflandırılabilir. Göçme olaylarının tipolojik olarak doğru sınıflandırılması ve davranış olarak doğru anlaşılması, ilgili göçme tipine karşı savunma mekanizmalarının geliştirilmesi açısından da önem taşımaktadır.



Şekil 1.10. Aşamalı göçme tipleri [5]

Literatürde aşamalı göçme konusunda yapılan deneysel çalışmalar önemli bir yer tutmaktadır. Deneysel çalışmaların önemli bir kısmında aşamalı göçmeye konu olan yapılardaki birleşim yerlerinin performansları incelemektedir. Deneysel çalışmaların diğer bir odak noktası ise ölçekli modeller üzerinden aşamalı göçme davranışını anlamaya yöneliktir.

Culache ve diğ. [35] çalışmalarında kolon plaka birleşimlerinde kullanılan bulon tiplerinin patlama veya benzeri ani ve yüksek şiddetli yüklemelere karşı etkisini incelemiştir. Yarı durağan yükleme altında birleşim bölgelerinde paslanmaz çelik bulonların, karbon çelik

bulonlara kıyasla enerji emme açısından daha olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu bulon tipi, süneklik ihtiyacı duyulan yapı türleri için önerilmiştir.

Çelik bir yapının kolon kiriş birleşimlerinin kullanım ömrü boyunca hesaplanan yüklere karşı kolaylıkla direnç göstermesi beklenir. Ancak aşamalı göçme vakalarında olduğu gibi bir taşıyıcı elemanın kaybedilmesi halinde bu hesaplamaların dışında birtakım önlemlerin de alınmış olması gerekmektedir. Dinu ve diğ. [36] çelik yapılardaki 4 farklı birleşim tipini aşamalı göçme açısından deneysel ve nümerik olarak değerlendirmiştir. Çalışma neticesinde olası bir kolon kaybının ardından yalnızca rijit davranış gösteren birleşimlerden ziyade artık yükleri taşımanın ötesinde deplasman kapasitesi yüksek ve kesitleri lokal burkulmaya zorlamayan birleşim tiplerinin daha arzu edilecek sonuçlar ortaya koyduğu görülmüştür.

Song ve Sezen [37] yıkılması planlanan eski bir çelik yapı üzerinde nümerik ve deneysel bir takım çalışmalar yürütmüşlerdir. Yapının kenar kolonlarını sırayla olmak üzere ani olarak yapıdan çekmiş ve elde ettikleri bulguları doğrusal statik ve doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Buna ek olarak aynı yapının iki boyutlu ve üç boyutlu modellerinin de tasarıma olan etkilerini incelemişlerdir. İki boyutlu modelin öngörü anlamında üç boyutlu modele kıyasla oldukça muhafazakâr kaldığını belirtmişlerdir. Üç boyutlu modelin düzleme dik eksenindeki yapı elemanlarının kolon kaybına karşı ortaya koyduğu reaksiyon bu duruma sebep olarak gösterilmiştir. Ayrıca doğrusal olmayan dinamik analizlerin, doğrusal statik analizlere kıyasla daha isabetli sonuçlar ortaya koyduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda doğrusal olmayan dinamik analizler sonucunda elde edilen deplasman değerlerinin de gerçek yapıdaki deplasmanlara oldukça yakın olduğu ve birleşim elemanlarının daha spesifik biçimde modellenmesi halinde bu yakınsamanın artırılabileceği belirtilmiştir.

Song ve diğ. [38] bir başka saha çalışmasında eski bir banka binasının yıkımını nümerik analizlerle karşılaştırarak aşamalı göçme açısından değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada özellikle iki boyutlu ve üç boyutlu modellemenin sahada gerçekleşen durumla mukayesesi yapılmaya çalışılmış ve iki boyutlu modelin ihtiyatlı sonuçlar ortaya çıkarttığı tespit edilmiştir. Üç boyutlu modelin ise gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Bu çalışmalara ek olarak önemli bir kısmı betonarme yapılarda olmak üzere kullanım ömrünü tamamlamış bazı yapılar üzerinde gerçekleştirilen aşamalı göçme çalışmaları da bulunmaktadır [39–42]. Çalışmalarda ekseriyetle taşıyıcı eleman kaybının ardından ortaya çıkan artık yüklerin dağıtılma mekanizmaları üzerine önemli veriler elde edilmiştir.

Chen ve diğ. [43] çalışmalarında deneysel amaçla üretilmiş iki katlı bir çelik yapıdaki betonarme döşemelerin aşamalı göçme açısından etkilerini incelemişlerdir. Döşeme bulunan çerçevelerin ilk eleman kaybının ardından kirişlerde ortaya çıkan aşırı yüklemelerin dağıtılması ve dolayısıyla aşamalı göçmenin ortaya çıkışını önlemede önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir.

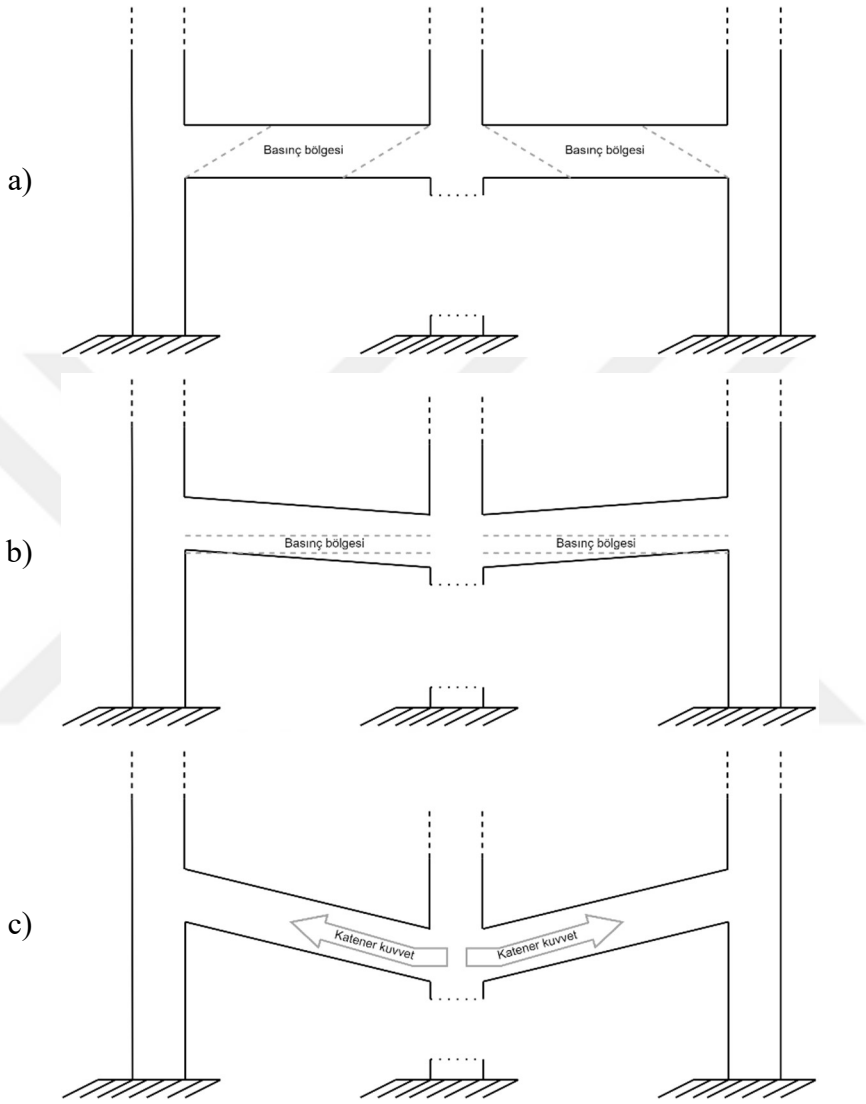
Bermejo ve diğ. [44] aşamalı göçme analizi için kullanılan sonlu elemanlar yöntemi ile sürekli elemanlar yöntemini kıyaslamak için yine laboratuvar ortamında üretilmiş iki katlı bir yapıyı aşamalı göçme açısından incelemişlerdir. Yazarlar, sürekli elemanlar yönteminin, yapısal sonlu elemanlar yöntemine kıyasla daha isabetli sonuçlar ortaya koymuş olmasına rağmen, harcanan modelleme ve analiz süresi göz önüne alındığında yapısal sonlu elemanlar yönteminin de yeterli seviyede isabetli sonuçlar ürettiğini belirtmişlerdir.

1.1.4. Vierendeel Etkisi

Yapılardaki ani taşıyıcı eleman kaybının ardından geriye kalan taşıyıcı elemanların sergilediği bazı yaygın şablonlar bulunmaktadır. Bunlardan belki de en öne çıkanı Katener davranış (Catenary Action) olarak görünmektedir. Katener davranış, Şekil 1.11'de görüldüğü üzere, genel olarak üç adımda ortaya çıkmaktadır [45]. Öncelikle kaybedilen kolona gelen düşey yük sebebiyle kiriş olağandışı bir eğilmeye zorlanır ve kemer davranışı gösterir. Bu noktada kesitin belli hatlarında basınç kuvvetlerinin ortaya çıktığı görülür. İkinci aşamada artan eğilmeye bağlı olarak plastik mafsal oluşumu gözlenir. Kesitte hala belli ölçüde basınç kuvvetleri görülür ancak ilk aşamaya göre daha kısıtlıdır. Üçüncü aşamada kiriş birleşim noktası başlangıçtaki kiriş derinliğinin de altına gidecek kadar eğilir ve kesitte basınç bölgesi kalmaz ve kiriş kesitinde tamamen çekme kuvveti hâkim olur. Bu noktada katener davranışı kontrol eden esasen kolon-kiriş birleşimlerinde ortaya çıkan plastik mafsallardır.

Uzun açıklıkların geçilmesi için kullanılan bir taşıyıcı sistem olan Vierendeel kirişleri şablon itibariyle kafes kirişlere benzer ancak temel farklılığı birleşim noktalarının rijit bağlantıyla sağlanmasıdır [46, 47]. İsmini Belçikalı mühendis Arthur Vierendeel'den [48] alan bu kiriş tipi genellikle dikdörtgen biçimindeki boşluklarla meydana getirilse de üçgen hücrelerden oluşan veya tümüyle kemer biçimindeki formlarına da yaygın olarak rastlanabilmektedir. Vierendeel kirişler kafes kirişlerin sahip olduğu avantajlara sahip olmanın ötesinde birleşim noktaları rijit olduğundan, çapraz elemanların kullanılmasına

ihtiyaç kalmadan büyük açıklıklarda yük aktarımına olanak sağlar [49]. Başlangıçta genellikle köprü tasarımlarda kullanılan bu kiriş tipinin davranış biçimi, günümüzde aşamalı göçmeye karşı yapıların gösterdiği direnç mekanizmalarında da ortaya çıkmıştır [22, 50, 51].



Şekil 1.11. Katener davranışın ortaya çıkışı [45]

Qiao ve diğ. [52] 2020 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada, çelik ve çelik çaprazlı çerçevelerin aşamalı göçmeye karşı oluşturduğu direnç mekanizmalarını incelemişlerdir. Sonlu elemanlarla modellenen dört açıklıklı üç katlı çelik çerçevenin birinci kat orta kolonu sistemden ani olarak çıkarılmıştır. Kaldırma senaryosunun ardından, ekstra yükün ortaya çıktığı kiriş aksının katener davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Ancak üst katlarda ise sistemin kaybedilen taşıma kapasitesini Vierendeel kafesler oluşturarak tolere ettiği gözlemlenmiştir. Çelik çaprazlı bir yapı modeliyle desteklenen çalışmadaki kaldırma

senaryolarında da katener davranışın ve Vierendeel etkisinin aşamalı göçmeye karşı direnç oluşturmaya devam ettiği görülürken, çelik çaprazların da Vierendeel etkisine katkı sağladığı görülmüştür.

1.1.5. Alternatif Yol Metodu

Daha önce genel hatlarıyla bahsedilen alternatif yol metodu, bir yapının olası kolon kaybının ardından, yapının geri kalan taşıyıcı elemanlarının ortaya çıkan transfer yüklerini önemli bir hasar almadan zemine aktarma kabiliyetini test etmeye çalışır. Bu bağlamda yapıdan varsayımsal biçimde çıkarılan yapısal elemanlar anahtar eleman olarak adlandırılır. Alternatif yol metodu için yapıdaki tüm taşıyıcı elemanların anahtar eleman olarak seçilmesi ve her birinin birer kaldırma senaryosu olarak kabul edilerek analiz edilmesi mümkün değildir. Bu sebeple yapıdaki risk potansiyeli yüksek veya belli bir grup içindeki en kritik elemanlar belirlenir. Bu taşıyıcı elemanlar, her seferinde yalnızca birisi olmak üzere aniden yapıdan kuramsal olarak eksiltilir. Bu noktada yapının geri kalanından, kaybedilen taşıyıcı eleman sebebiyle ortaya çıkan yükleri belirlenen hasar sınırları dahilinde aktarabilmesi beklenir. Her bir anahtar eleman için gerçekleştirilen bu analize, kaldırma senaryosu adı verilir. Kaldırma senaryoları için seçilecek anahtar elemanların belirlenmesi için de çizilmiş genel bir çerçeve bulunmaktadır. UFC'ye göre [28] aşağıda sıralanan kısımlardaki köşe ve orta kolonların anahtar eleman olarak seçilmesi önerilmiştir.

- İlk kat kolonları
- Çatının direkt altındaki kolonlar
- Çerçevenin orta katındaki kolonlar
- Dikeyde kesit değişikliği olan kolonlar

Bu kesitlere ek olarak, mühendislik yargısıyla seçilecek kolonlar da kaldırma senaryolarında kullanılmak üzere anahtar eleman olarak seçilebilir. Buna ek olarak, yapının simetrisi gibi bazı geometrik özelliklerinden faydalanılarak anahtar eleman sayısında azaltmaya da gidilebilir.

Aşamalı göçmeye karşı tasarım için gerçekleştirilecek analizlerde kullanılacak yük kombinasyonu (G_{ND}) UFC'de şöyle tanımlanmıştır;

$$G_{ND} = 1.2D + (0.5L_L \mid 0.2S) \tag{1.1}$$

burada D, L_L ve S sırasıyla ölü yükü, ASCE 7'ye [4] göre azaltılmış hareketli yükleri ve kar yükünü ifade etmektedir. Hareketli yük ve kar yükünün aynı anda bulunduğu alanlarda bu iki yükten yalnızca büyük olanı kullanabilir.

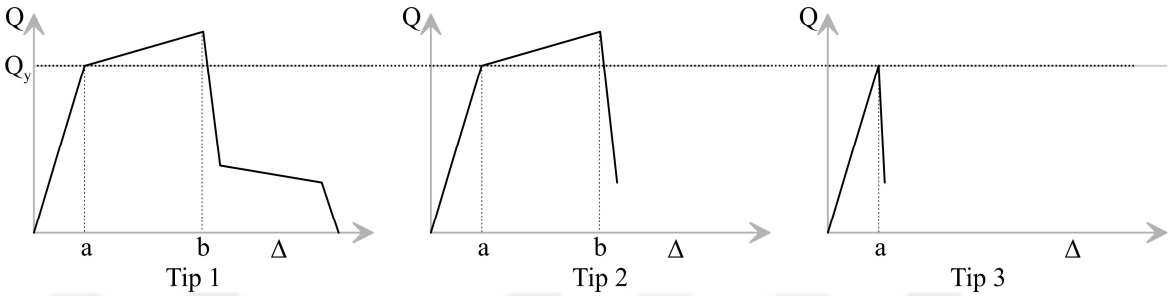
UFC'nin 2009 yılında yayınlanan versiyonunda [28] alternatif yol metodunun uygulanması için önerilen her üç prosedür için de yanal yüklerin uygulanmasında ASCE 7 [4] 'olağanüstü olaylar için yük kombinasyonları yaklaşımı' esas alınmıştır. Bu yaklaşıma göre yapının her bir yüzüne etkiyecek kuvvet, her seferinde bir doğrultu analiz edilmek üzere şu şekilde ifade edilmiştir;

$$L_{LAT} = 0.002\sum P \tag{1.2}$$

burada L_{LAT} ve $\sum P$ sırasıyla ilgili kata etkitilecek yanal yükü ve ilgili kattaki ölü ve hareketli yüklerin toplamını ifade etmektedir. UFC'nin 2016'da güncellenen versiyonunda [28] olağanüstü olaylar için yük kombinasyonları yaklaşımı uygulanmaya devam etmiş ancak yanal yükler istisna bırakılmıştır. Yapının bozulmamış halinin yanal yük direncinin, $0.002\sum P$ olarak belirlenen yanal yüke kıyasla çok daha büyük olduğu, yapının hasarlı halinin ise bu yanal yükten etkilenmesinin son derece olağandışı olduğu belirtilmiştir. Bu bağlamda, bu versiyonla birlikte alternatif yol metodunun uygulamasında yanal yük zorunluluğu ortadan kalkmıştır.

Bahsedildiği üzere, seçilen her bir anahtar eleman için bir kaldırma senaryosu oluşturulmalıdır. Kaldırma senaryolarında, anahtar elemanın sistemden çıkarılması için öncelikle sistemin denge durumuna ulaşması beklenir. Anahtar elemanın kaldırılmasının ardından yönetmeliğe göre her yapısal elemanın kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığını varsaymak için farklı beklentilere cevap vermesi istenir. Bu noktada sistemdeki yapısal elemanlar birincil ve ikincil elemanlar olarak ikiye ayrılır. Yapısal eleman kaybının ardından doğrudan taşıyıcı nitelik taşıyan elemanlar birincil eleman, bu kapsam dışında kalan tüm elemanlar ikincil elemanlar olarak sınıflandırılır. Buna ek olarak birincil elemanlar kendi içerisinde gösterdiği hakim davranışa göre deformasyon kontrollü veya kuvvet kontrollü olmak üzere ayrışmaktadır. Ancak bir taşıyıcı eleman hem deformasyon kontrollü hem de kuvvet kontrollü olarak da sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmanın yapılabilmesi için ASCE 41 [53] tarafından Şekil 1.12'de verilen genelleştirilmiş kuvvet – deformasyon ($Q - \Delta$) eğrilerinden faydalanılmaktadır. Bir yapısal elemanın Tip 1 veya Tip 2'de görülen davranışı sergilemesi ve $b \geq 2a$ şartını sağlaması halinde deformasyon kontrollü olarak sınıflandırılır.

Eğer yapısal eleman Tip 1 veya Tip 2'de görülen davranışı sergiliyor ve $b < 2a$ şartını sağlıyor ise veya Tip 3 davranış eğrisine sahipse kuvvet kontrollü olarak sınıflandırılır. Burada Q_y, a ve b sırasıyla ilgili kesitin akmaya başladığı yükü, akmanın başladığı yer değiştirmeyi ve taşıyıcılığın ciddi biçimde kaybedildiği noktayı ifade etmektedir.



Şekil 1.12. ASCE 41'e göre deformasyon ve kuvvet kontrollü davranış [53]

Alternatif yol metodu yapıyı genellikle ekstrem sınırlarda zorlamaktadır. Doğrusal modellerin kullanılması halinde bu tip analizlerin yapılması görece daha az zaman gerektirse de, ekonomik açıdan verimsiz bir tasarımın ortaya çıkmasına sebep olmaktadır [33]. Doğrusal olmayan analizler bu bakımdan daha ekonomik tasarımların ortaya çıkmasını sağlasa da hem daha yüksek analiz sürelerini hem de karmaşık modelleme zorunluluklarını beraberinde getirmektedir. Bunun ötesinde bir yapının tam anlamıyla birebir modellenmesi oldukça zordur [54]. Bu durum, doğrusal sınırın ötesindeki tasarımlar için hatalı sonuçların ortaya çıkabilme ihtimalini beraberinde getirmektedir. Kaldırma senaryosu analizleri doğası gereği dinamik bir süreci simüle etmeyi çalışır. Ancak statik analizlerde bu etkilerin doğrudan hesaba katılması mümkün olmadığından, dinamik artırım katsayıları gibi yaklaşımlar benimsenir. Doğrusal olmayan dinamik analizlerde ise zamana bağlı yükler doğrudan göz önüne alındığından, bu tip bir katsayıya ihtiyaç duyulmamaktadır. Kaldırma senaryolarında doğrusal olmayan dinamik analiz prosedürünün kullanılması halinde yapıda kayda değer ölçüde büyük deformasyonlar meydana gelmektedir. Bu deformasyonlar da yapıda bazı ekstra yüklerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla bu analizlerin doğru biçimde gerçekleştirilebilmesi için $P - \Delta$ etkilerinin de sonlu elemanlar modelinin oluşturulması ve analizlerin gerçekleştirilmesi esnasında hesaba katılması gerekmektedir.

Doğrusal olmayan dinamik analiz prosedürü kullanıldığında ilgili plastik mafsalların güvenlik durumunu belirlemek için, ASCE 41'e göre kirişlerde akma dönme değeri (θ_y) şu şekilde hesaplanır;

$$\theta_y = \frac{M_{PE} L(1+\eta)}{6EI} \tag{1.3}$$

Kolonlarda ise aşağıdaki bağıntı kullanılır;

$$\theta_y = \frac{M_{PE} L(1+\eta)}{6(\tau_b E)I} \tag{1.4}$$

burada M_{PE}, L, E ve I sırasıyla kesitin plastik moment kapasitesini, kiriş veya kolonun uzunluğunu, elastisite modülünü ve kesitin atalet momentini ifade etmektedir. Ayrıca η ve τ_b değerleri aşağıdaki bağıntılarla hesaplanır;

$$\eta = \frac{12EI}{L^2 G A_s} \tag{1.5}$$

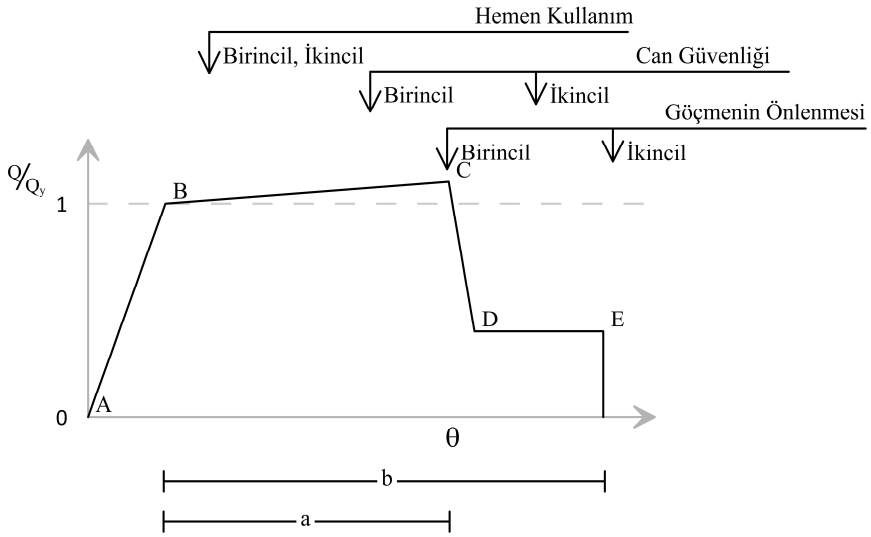
$$\tau_b = \begin{cases} \dfrac{|P|}{P_{ye}} \leq 0.5 \quad \Rightarrow \quad 1 \\ \dfrac{|P|}{P_{ye}} > 0.5 \quad \Rightarrow \quad 4\dfrac{|P|}{P_{ye}}\left(1 - \dfrac{|P|}{P_{ye}}\right) \end{cases} \tag{1.6}$$

burada G, A_s, P ve P_{ye} sırasıyla kayma modülü, etkin net enkesit alanı, kesite etkiyen eksenel yük ve kesitin eksenel akma yük kapasitesini ifade etmektedir.

Bir taşıyıcı eleman üzerinde tanımlanmış mafsalın performans düzeyi sınırları, o taşıyıcı elemanın geometrik ve malzeme özellikleri aracılığıyla ASCE 41'e göre belirlenir. Aşamalı göçme bağlamında ise bir yapısal elemanın kabul kriterlerini sağlayıp sağlamadığı ilgili yapısal elemanın birincil veya ikincil eleman olmasına veya deformasyon kontrollü veya kuvvet kontrollü davranış göstermesine bağlı olarak belirlenir. Doğrusal olmayan dinamik analiz sonrasında bir taşıyıcı elemanın yönetmeliğe göre sınırları aşıp aşmadığının kontrolü, ilgili elemana daha önce tanımlanan mafsalların durumlarına göre karar verilir. Bir mafsalın kondisyonunu tanımlamak için 3 farklı performans düzeyi belirlenmiştir. Bu üç performans düzeyi sırasıyla şöyle ifade edilir;

- Hemen kullanım (Immediate occupancy "IO")
- Can güvenliği (Life Safety "LS")
- Göçmenin önlenmesi (Collapse Prevention "CP")

Hemen kullanım düzeyi ilgili kesitte hiçbir hasarın ortaya çıkmadığı veya hasarın göz ardı edilebilecek ölçüde az olduğu durumlara karşılık gelmektedir. Bu aşamada ilgili noktada elastik sınırlar ya hiç aşılmamakta ya da ihmal edilebilecek ölçüde az miktarda aşılmaktadır. Can güvenliği seviyesi yapıda çok büyük olmamakla birlikte hasarın ortaya çıktığı ve genel anlamda onarımı mümkün olan bir hasarın ortaya çıktığı performans düzeyini tanımlamaktadır. Göçmenin önlenmesi ise taşıyıcı sistemin ciddi oranda hasar aldığı ancak yapının kısmen veya tamamen göçmesinin önlendiği düzeyi tanımlamaktadır. Alternatif yol metoduna göre gerçekleştirilecek doğrusal olmayan dinamik analizler neticesinde tüm birincil ve ikincil elemanların bazı istisnai durumlar dışında can güvenliği düzeyini sağlaması beklenir. Her yapı elemanı için ilgili şartı sağlamaması halinde ortaya çıkan plastik mafsallar, kabul edilemez seviyede plastik mafsal olarak sınıflandırılır. Bu bağlam esas alınarak çelik yapı elemanları için Şekil 1.13'te verilen genelleştirilmiş yük deformasyon davranışı esas alınmaktadır. Her bir kesit için kabul edilen performans düzeylerinin sınırları; ilgili kesitlerin narinlikleri, bağlantı noktası gibi birtakım nitelikleri esas alınarak belirlenir. İlgili davranış eğrisinde görülebileceği üzere kesitin malzeme ve geometrik özelliklerine bağlı olarak öncelikle akma noktasına ulaşana dek kesitte deformasyon ve yük arasında yaklaşık doğrusal bir ilişki görülmektedir. Elastik bölge olarak adlandırılan bu bölgede oluşan deformasyonlar yükün ortadan kalkması halinde kesitte kalıcı etki veya hasar bırakmamaktadır. Ancak akmanın ardından görülen plato bölgesinde davranış çizgisinin eğimi düşmekte ve yükteki küçük artışlar daha büyük deformasyonlara sebep olmaktadır. Plastik bölge olarak adlandırılan bu bölgede ortaya çıkan deformasyonların önemli bir kısmı kesitte kalıcı deformasyon bırakmaktadır. Taşıyıcı niteliğini belli ölçüde devam ettiren bu bölge, plastik mafsal olarak adlandırılmaktadır. [55].



Şekil 1.13. ASCE 41'e göre genelleştirilmiş yük-deformasyon ilişkisi [53]

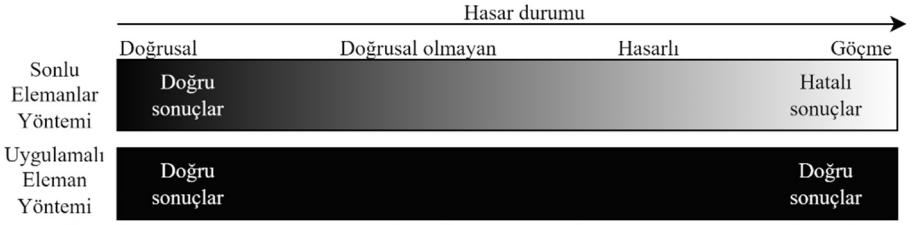
Alternatif yol metoduna göre yapılacak analizlerde modellemeyi kolaylaştırmak ve analiz süresini makul süreler içinde tutabilmek amacıyla kayda değer ölçüde eksenel yüke maruz kalmayacak kirişlerde yalnızca eğilme eksenindeki moment değerleri dikkate alınarak mafsal tanımlaması yapılabilir. Ancak kolonlar için hem eksenel kuvvetin hem de her iki doğrultudaki eğilmenin dikkate alınması gerekmektedir. Bu bağlamda kirişler için tanımlanan mafsallar M3 modeli, kolonlar için ise P-M2-M3 modeli mafsallar kullanılır.

Aşamalı göçme çalışmalarında yaygın biçimde kullanılan iki temel analiz yöntemi bulunmaktadır [5];

- Sonlu eleman yöntemi
- Uygulamalı eleman yöntemi

Sonlu eleman yöntemi yapısal analiz problemlerinin çok büyük kısmında kullanılan yaygın bir yöntemdir [56–58]. Bununla birlikte yapısal modelde veya malzemede doğrusal elastik davranıştan uzaklaşılması sonlu elemanlar yönteminin tatbikini zorlaştırmakta ve sonuçların doğruluğu konusunda şüpheye sebep olabilmektedir. Bu noktada doğruluğu artırabilmek için detaylı tasarım yapılması gerekliliği doğmaktadır. Ancak bu durum da analiz sürelerinin oldukça uzamasına sebep olabilmektedir. 2010 yılında gerçekleştirilen çalışmada bir yapının aşamalı göçmeye karşı son derece detaylı şekilde modellemesi ve analizi gerçekleştirilmiş ve analiz, 60 çekirdekli eşzamanlı işlem kapasitesine sahip sisteme rağmen 19 gün gibi uzun bir sürede tamamlanmıştır [59]. Bunun yanında uygulamalı eleman yöntemiyle gerçekleştirilen çalışmalar doğrusal olmayan sınırın ötesindeki davranışları öngörmede daha başarılı sonuçlar vermektedir [60]. Doğrusal sınırın ötesindeki davranışı

öngörebilme ve analiz yöntemleri arasındaki ilişki Şekil 1.14'te verilmiştir. Bu yöntemlerin yanında ayrık eleman yöntemi gibi bazı yöntemler de çok yaygın olmamakla birlikte aşamalı göçme analizi için kullanılmıştır [61, 62]. Yapılan çalışmalar bu analiz yönteminin de doğrusal olmayan sınırın ötesindeki davranışı zaman tanım alanında çok yüksek isabetle öngörebildiğini göstermiştir.



Şekil 1.14. Aşamalı göçme analizinde kullanılan yaygın sayısal yöntemler [5]

1.2. Yapıların Optimum Boyutlandırılması

Çelik yapı tasarımının temeli, belirli sınırlayıcıların etkisi altında güvenli kesitlerin seçilmesi olarak özetlenebilir. Bu, doğası gereği bir deneme-yanılma sürecidir. Tasarım neticesinde yapının, hesaplanan yüklere karşı güvenli bir yapısal davranış sergilemesi beklenir. Ancak yalnızca güvenlik kaygılarını esas alan bir tasarım yaklaşımı ekonomik olmaktan uzaktır [63]. Bu bakımdan güvenlikten feragat edilmeden ekonomiklik anlamında en uygun boyutların belirlenmesi "optimum boyutlandırma" olarak tanımlanabilir ve yapı mühendisliğinin önemli araştırma konuları arasındadır.

Çelik yapıların optimizasyonunda amaç, güvenlik ve kullanılabilirliği esas alan sınırlayıcılar altında yapı ağırlığını dolayısıyla yapı maliyetini mümkün olduğunca düşürmektir. Bu bağlamda yapısal optimizasyon problemleri iki temel başlık altında incelenebilir [64, 65];

- Şekil Optimizasyonu
- Boyut Optimizasyonu
- Topoloji Optimizasyonu

Şekil optimizasyonu esas olarak tasarımın düğüm noktalarının koordinatlarını tasarım değişkenleri olarak ele alan optimizasyon problemleridir. Boyut optimizasyonu ise yapısal elemanların kesit alanlarını tasarım parametreleri olarak kabul etmekte ve yapıyı bu açıdan ele alarak optimize etmeye çalışan problemlerdir. Topoloji optimizasyonu ise yapısal elemanların bağlantı tiplerini ve esas olarak yerleşim planını tasarım parametreleri kabul

ederek yapıyı optimum boyutlandırmaya çalışan optimizasyon problemlerine verilen addır. [66] Bu tipolojik sınıflandırma haricinde optimizasyon problemleri birden fazla amaçla da ortaya konabilmektedir. Ayrıca bu süreçte yapısal güvenliğin de temin edilmesi gerekmektedir. Yapı güvenliğini sağlamayı hedefleyen kuralların her birisi de optimizasyon probleminin sınırlayıcılarını ifade etmektedir.

Çelik yapıların optimum boyutlandırılması genellikle çok amaçlı ve çok parametreli problemlerdir [67]. Haliyle optimum sonucun arandığı çok geniş bir çözüm uzayı bulunmaktadır. Yapısal optimizasyon problemlerine konu olan yapıların ekseriyetle hiperstatik sistemler olması, kesin optimum çözümün bulunmasını oldukça zorlaştırmaktadır. Bu nedenle tasarım için genellikle sezgi üstü algoritmalar kullanılır [63, 68, 69]. Bu algoritmalar belirli veya rastgele bir başlangıç çözümünü iyileştirerek optimum sonucu bulmaya veya yakınsamaya çalışırlar. Sezgi üstü algoritmalar genellikle en iyinin ortaya çıkmasını sağlamayı hedefleyen doğal süreçleri taklit eden felsefelerden esinlenilerek ortaya çıkmıştır. Genetik algoritma [70, 71] gibi evrimsel süreci taklit ederek çözüm parametrelerini kromozomlara benzeten, olası çözümlerin genetik yapısına bağlı olarak hayatta kalmasını esas alan algoritmaların yanı sıra bir karınca kolonisinin [72] içgüdüsel davranışlarını inceleyerek, karınca yuvası ile yiyecek arasındaki en kısa mesafeyi bulmalarından esinlenen algoritmalar bulunmaktadır. Özellikle içinde bulunduğumuz yüzyılda ortaya çıkan çok sayıda algoritma da göz önüne alındığında bu tip algoritmaların sayısı yadsınmayacak ve bu kapsamda bahsedilemeyecek ölçüde artmıştır. Bu algoritmaların bir kısmı bahsedildiği gibi kalabalık bir popülasyonun gelişme [73], hayatta kalma [74] veya içgüdüsel davranışlarını [75] taklit etmektedir. Bunun yanında bazı algoritmalar [76–78] ise bir olası çözümü her bir adımda (iterasyon) iyileştirme felsefesini esas almaktadır. Bir popülasyonu esas alan optimizasyon algoritmaları popülasyon temelli algoritmalar, lokal optimumdan kaçınmak amacıyla görece daha kötü sonuçları da süreç içinde kabul eden algoritmalar ise tepe tırmanma olarak sınıflandırılmaktadır. Çelik yapıların optimizasyonunda, problemin özellikleri itibariyle farklı algoritmalar daha başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir. Bir problem için çok başarılı sonuçlar elde edilebilen bir algoritma, başka bir problemde verimsiz sonuçlar üretebilmektedir. Bu bağlamda farklı algoritmaların farklı problemler üzerinden kıyaslanmasını inceleyen çok değerli çalışmalar literatürde mevcuttur.

Optimizasyon yöntemlerinin önemli bir kısmı doğal birtakım süreçleri taklit ederek ilgili problemin sonucunu optimize etmeye çalışır. Bu yöntemlerden birisi olan Tavlama

Benzetimi algoritması, metallerin tavlanmasını esas alarak optimizasyon sürecini gerçekleştirmektedir [77]. Süreç metallerin erime sıcaklığına kadar ısıtılıp daha sonra da mümkün olan en düşük enerji düzeyine ulaşana kadar soğutulmasını esas almaktadır. Tavlama Benzetimi yöntemi daha önce çelik yapıların optimum boyutlandırılmasında kullanılmış ve kayda değer biçimde olumlu sonuçlar elde edilmiştir [79, 80].

Değertekin [68] çalışmasında genetik algoritma ile Tavlama Benzetimi algoritmasını üç farklı örnek çerçevenin optimum boyutlandırılması amacıyla, AISC-LRFD [81] ve AISC-ASD [82] yönetmeliklerine göre kıyaslamıştır. Her üç çerçevede de Tavlama Benzetimi algoritması ile Genetik algoritmaya kıyasla daha hafif yapı ağırlığı elde edilmiştir.

Hasançebi ve diğ. [80] gerçekleştirdikleri çalışmada; Tavlama Benzetimi, evrim stratejileri, tabu arama, karanca kolonisi optimizasyonu, parçacık sürü optimizasyonu, harmoni arama yöntemi ve genetik algoritma olmak üzere 7 farklı optimizasyon algoritmasını 3 farklı çelik yapı üzerinde test etmişlerdir. Bu yöntemlerden birisi olan Tavlama Benzetimi; ilk örnek problem olan 224 elemanlı çelik çerçevede en hafif yapı ağırlığını, ikinci problem olan 325 elemanlı problemde ikinci en hafif yapı ağırlığını, üçüncü ve son problem olan 568 elemanlı çelik yapıda ise üçüncü en hafif yapı ağırlığını üretmiştir.

Alberdi ve Khandelwal [79] sundukları çalışmada 9 farklı optimizasyon algoritmasını dört farklı yapısal optimizasyon problemi üzerinde test etmişlerdir. Bu çalışmada klasik Tavlama Benzetimi algoritması ve geliştirilmiş bir versiyonu aynı anda algoritmalar arasında yer bulmuş ve çok değişkenli problemlerde her iki algoritma da verimsiz sonuçlar üretmiştir. Daha az değişkenli problemlerde ise görece daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Toğan [83] gerçekleştirdiği çalışmada Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritmasını üç farklı düzlem çelik çerçevenin optimizasyonu için Harmoni Arama, Genetik algoritma ve Karınca Kolonisi Optimizasyonu algoritmalarıyla kıyaslamıştır. Popülasyon temelli olan bu algoritma ile her üç düzlem çerçeve probleminde de diğer yöntemlere kıyasla daha hafif çerçeve ağırlıkları elde edilmiştir. Çalışmada algoritmanın durdurma kriteri, önceden belirlenmiş bir iterasyon sayısına ulaşılması olarak belirlenmiştir.

Değertekin ve Hayaloğlu 2013 [84] yılında gerçekleştirdikleri çalışmada düzlem çelik çerçevelerin optimum boyutlandırılması için yine Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritmasını kullanmıştır. Çalışmada kullanılan algoritma, daha önce çok sayıda farklı algoritmayla çözülmüş dört farklı yapısal optimizasyon problemi üzerinde test edilmiştir. Algoritma tüm problemlerde en iyi veya en iyiye çok yakın sonuçlar üretebilmeyi

başarmıştır. Çalışmada durdurma kriteri, algoritmanın önceden belirlenmiş bir iterasyon sayısı boyunca çerçeve ağırlığının aynı kalması olarak belirlenmiştir.

Artar ve Çarbaş [73] 2021 yılında sundukları çalışmada düzlem çelik köprülerin optimum boyutlandırılması için Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon ve Biyocoğrafya Temelli Optimizasyon algoritmalarından faydalanmıştır. Dinamik sınırlayıcıların yer aldığı ve almadığı şartlar altında incelenen düzlem çelik köprü tasarımlarının önemli kısmında Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması incelenen diğer algoritmadan ve literatürde yer alan örnekten daha hafif ağırlık üretebilmiştir. Bu çalışmada da algoritmanın durdurma kriteri, önceden belirlenmiş bir iterasyon sayısına ulaşılması şeklinde belirlenmiştir.

1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Çelik yapıların aşamalı göçmeye karşı tasarımında optimizasyon yöntemlerinin kullanılması literatürde sınırlı bir karşılık bulmaktadır [33]. Kiakojouri ve diğ. [5] 2020 yılında yayınladıkları derleme makalede optimizasyon ve aşamalı göçme konularını bir araya getiren çalışmalar açısından literatürün geliştirilmeye ihtiyacı olduğunu vurgulamışlardır. Bu alandaki çalışmaların sınırlı olmasının önemli bir sebebi, daha sonra da bahsedileceği üzere, doğrusal olmayan dinamik prosedürle gerçekleştirilen aşamalı göçme analizlerinin çok yüksek bilgisayar gücü ve zaman gerektirmesi olarak görünmektedir.

Bu tezde çelik çerçevelerin aşamalı göçmeye karşı farklı algoritmalarla optimum boyutlandırılması gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda iki algoritma ve bu algoritmalar üzerinde bazı geliştirmeler yapılmış versiyonları kullanılmıştır. Bu algoritmalardan ilki tepe tırmanma algoritmaları içinde sınıflandırılan Tavlama Benzetimi algoritması, ikincisi ise popülasyon temelli bir çalışma felsefesi olan Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritmasıdır.

Çerçevelerin tasarımında esas olarak aşamalı göçmeye karşı tasarım yapılmış olsa da klasik sismik tasarım kriterleri de çerçeve tasarımlarında dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında literatür esas alınarak incelenen örnekteki [33] gerilme sınırlayıcıları sismik sınırlayıcılar olarak adlandırılmıştır. Bu çalışmada da ilgili sınırlayıcılar sismik sınırlayıcılar adı altında kullanılmıştır. Ayrıca bazı optimizasyon süreçlerinde yalnız aşamalı göçmeye karşı veya yalnız sismik tasarım kriterlerine göre tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Bu

bağlamda iki tasarım yönteminin yapı tasarımına olan etkileri arasındaki farklar araştırılmıştır. Aşamalı göçmeye karşı tasarım açısından Vierendeel etkisinin önemi incelenmiştir.

Çalışma kapsamında analizi yapılan bazı çerçevelerde aşamalı göçmeye karşı doğrusal olmayan dinamik analiz prosedürünün uygulanmasında önerilen yeterli analiz süresinin birtakım şartlar altında yetersiz kalabildiği gözlemlenmiştir. Bu durumu daha açık gözlemleyebilmek amacıyla Tavlama Benzetimi algoritmasında birtakım değişiklikler yapılarak alternatif yol metodu doğrusal olmayan dinamik analiz için yeterli analiz süresi araştırılmıştır.

Çelik çerçevelerin aşamalı göçmeye karşı tasarımı için literatürde yer alan bazı çalışmalarda iki boyutlu çerçeve modelleri kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında da aynı yapının iki boyutlu ve üç boyutlu modelleri optimizasyon sürecine tabi tutulmuştur. Aşamalı göçmeye karşı doğrusal olmayan dinamik analiz açısından iki ve üç boyutlu model kullanımının tasarıma etkileri gözlemlenmeye çalışılmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME

Bu bölümde çelik yapıların aşamalı göçmeye karşı optimum boyutlandırılması için C# yazılım diliyle geliştirilen yazılımın detayları, yazılım içerisinde yer alan algoritmaların arama mekanizmaları ve kullanılan yapısal modellere ve analizlerine ilişkin bilgiler verilmiştir. Geliştirilen algoritmaların tümü, geçerliliklerini test etmek amacıyla literatürde yer alan bir matematiksel fonksiyon ile optimizasyon sürecine tabi tutulmuştur. Kullanılan ve geliştirilen tüm algoritmalar ilgili yapısal modeller üzerinde optimum boyutlandırma sürecinde kullanılmıştır. Ayrıca aşamalı göçme analizi için bir yapısal modelin tabi tutulması gereken yeterli analiz süresine ilişkin bazı incelemeler gerçekleştirilmiş ve farklı sınırlayıcıların yapısal model tasarımı üzerindeki etkileri irdelenmiştir.

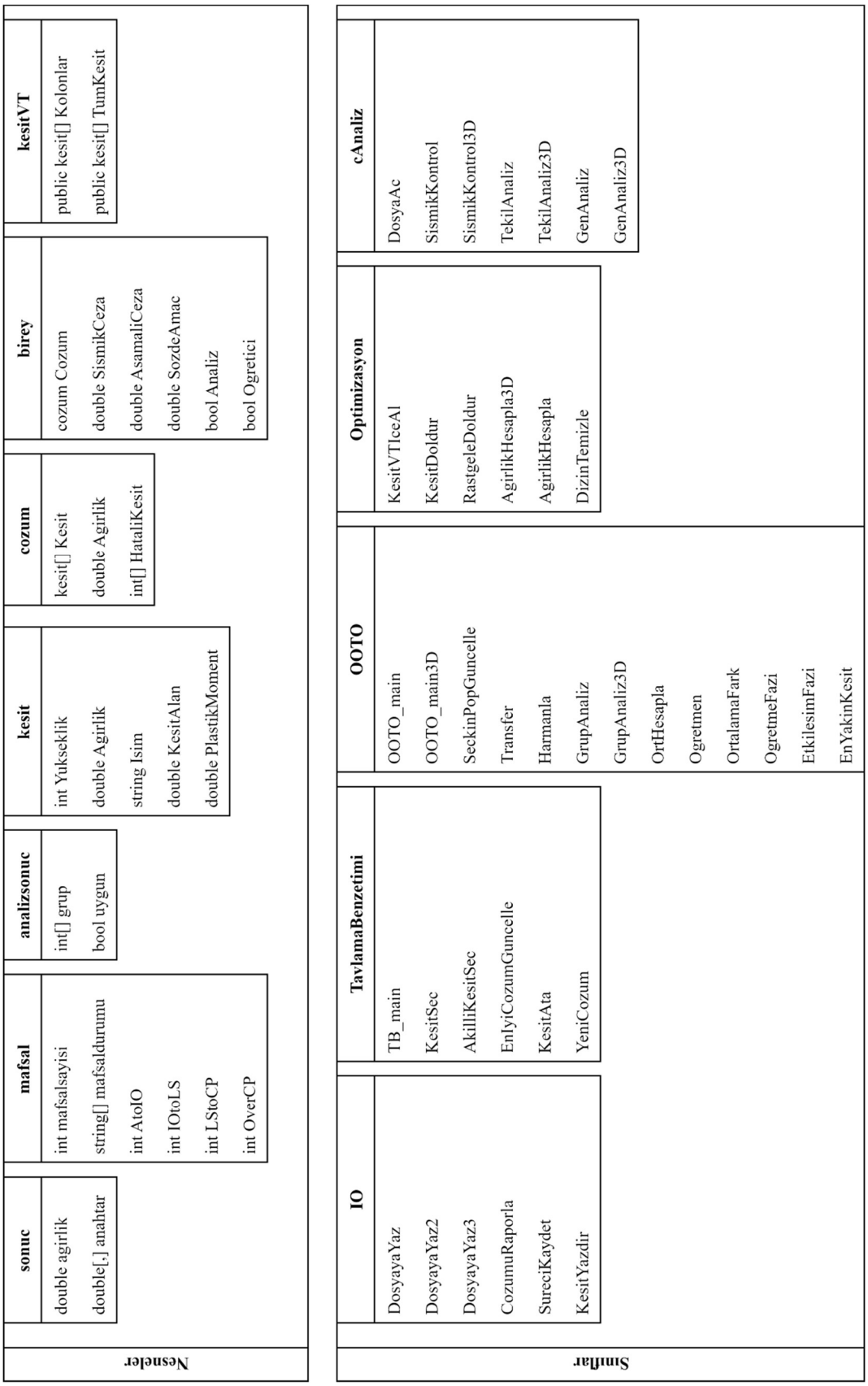
2.1. Yazılım Altyapısı

Bu çalışmada aşamalı göçmeye karşı çelik yapıların optimum boyutlandırılması için doğrusal olmayan dinamik prosedür kullanılmıştır. Bu yöntemde çok sayıda, ilgili kolonların anormal yükler altında taşıyıcılığını aniden kaybettiğini simüle eden kaldırma senaryosunun bulunması, gerçekleştirilen her bir kaldırma senaryosu analizinin de zaman tanım alanında gerçekleştirilecek olması önemli bir hesaplama gücü gerekliliğini de beraberinde getirmektedir. Bu açıdan optimizasyon sürecinin yönetileceği yazılımın geliştirileceği yazılım dilinin de esnek ve belli ihtiyaçları karşılayabilecek bir yazılım dili olması gerekmektedir. Kapsamı ve amacı belirtilen bu çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için geliştirilecek yazılımda nesne yönelimli bir dil olan C# yazılım dili kullanılmıştır. Kullanılan yazılım dili; kaynak yönetimi açısından efektif olması, tamamen nesne yönelimli olması, çalışma kapsamında önemli avantaj sağlayacak eşzamanlı işleme kabiliyetlerini kolayca yönetebilmesi gibi önemli özellikleri sebebiyle tercih edilmiştir. Analizler iki adet Intel Xeon E5-2640 10 çekirdekli işlemciye ve 64 GB geçici belleğe sahip yüksek performanslı bilgisayar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kullanım amaçları ve detayları daha sonra açıklanacak, çok sayıda nesne tipi ve optimizasyon algoritmalarının çalışma mekanizmalarını destekleyecek çok sayıda fonksiyon tanımlanmıştır. Bu bağlamda

oluşturulan tüm nesne tipleri, bu nesnelere ait diğer nesne ve değişkenler, sınıflar ve sınıflarda yer alan fonksiyonların tümü Şekil 2.1'de verilmiştir.

2.1.1. Giriş / Çıkış sınıfı

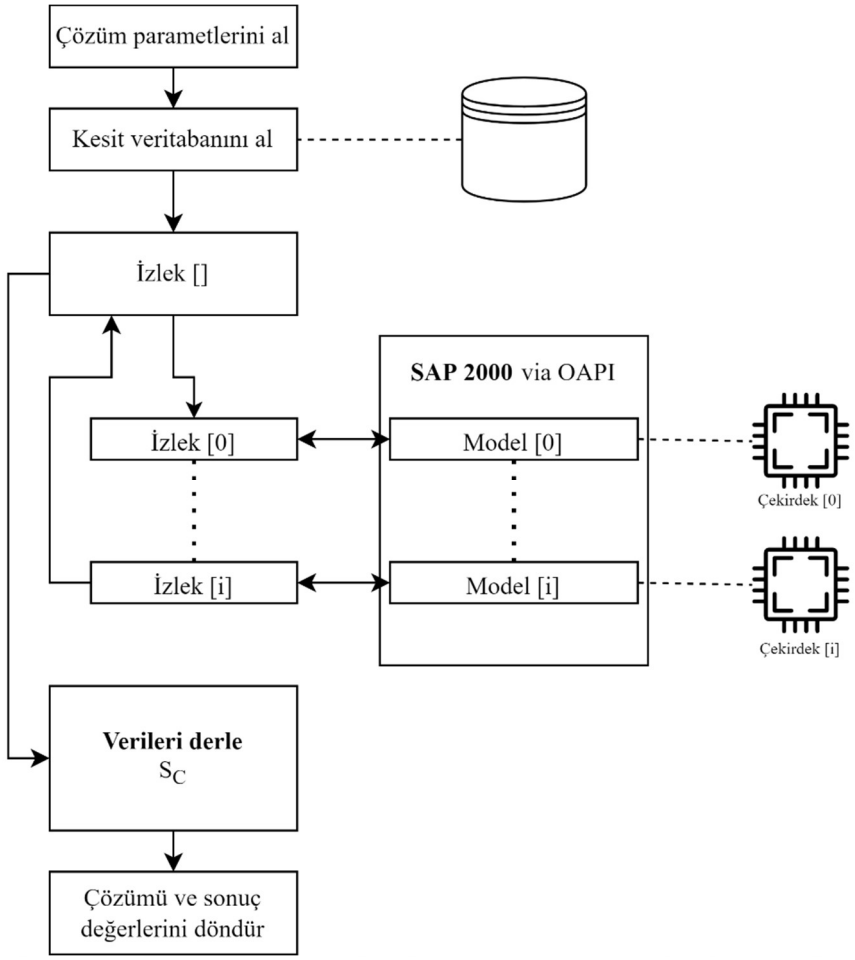
Yazılımın çalışma süresi boyunca hem optimizasyon sürecinin kaydını tutmak hem de yazılımın o anki çalışma performansını ölçen birtakım parametrelerin, değerlerin, hata raporlarının ve anlık analiz sonuçlarının konsol ekranına yansıtılması gerekliliği bulunmaktadır. Bu amaçla oluşturulan Giriş / Çıkış sınıfı (Input / Output "IO") içerisinde algoritmaların niteliklerine yönelik özelleştirilmiş bir takım yazdırma fonksiyonlarını barındırmaktadır. Tavlama Benzetimi algoritması için, sistemin sıcaklık bilgilerini ve her bir iterasyonda seçilen değişkeni belirleyen rassal değerlerin tümünü kayıt altında tutan bir fonksiyon bulunmaktadır. Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması için ise bireylerin ve toplu şekilde popülasyonların raporlanmasını sağlayan bir fonksiyon bulunmaktadır. Ayrıca yine Öğretme Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması içerisinde türetilen rassal değerler, doğrulama amacıyla bir başka raporlama süreciyle kayıt altına alınmıştır. Sınırlayıcıların kıyaslanması ve yeterli analiz süresinin araştırılması için gerçekleştirilen özelleştirilmiş analizlerde kendi bağlamına ait bir raporlama fonksiyonu oluşturulmuştur. Ayrıca tüm analiz süreçlerinde oluşabilecek olası bilgisayar hataları sonucundaki veri kayıplarını ortadan kaldırmak için sürece dair güncel çözüm, değişken değerleri ve parametreler gibi veriler de yine bu sınıf sayesinde kayıt altında tutularak yazılımın tekrar çalıştırılması halinde analizlerin kesintiye uğradığı noktadan itibaren başlatılması sağlanmıştır.



Şekil 2.1. Yazılımda yer alan yapılar ve sınıflar

2.1.2. Analiz Sınıfı

Analiz sınıfı; algoritmaların amaç fonksiyonlarını, sınırlayıcıların durumunu ana fonksiyona döndürebilmek amacıyla oluşturulmuştur. Bu sınıfın üç temel işlevi bulunmaktadır. Öncelikle analizlerin gerçekleştirilebilmesi için her biri yazılım tarafından tanımlanmış birer nesne olmak üzere SAP2000 yazılımıyla bağlantı kuracak biçimde model nesneleri oluşturulmaktadır. İkinci işlev ise çerçevenin, tekil olarak her bir kaldırma senaryosu için veya sismik sınırlayıcılar bağlamında analiz edilmesini sağlayacak tekil analizlerin çalıştırılmasını sağlamaktır. Bu fonksiyonlar gerçekleştirilen analize bağlı olarak farklı nesne tiplerini döndürmektedir. Örnek olarak, aşamalı göçme analizi için ilgili kaldırma senaryosu sonucunda her bir plastik mafsalın durumunu topluca barındıran "mafsal" tipindeki nesne olarak döndürür. Sismik analiz için ise ilgili tasarım sonucunda ortaya çıkan yönetmelik şartlarını sağlamayan taşıyıcı eleman sayısı döndürülür. Her model için birer adet olmak üzere sismik analiz ve aşamalı göçme analizi fonksiyonu oluşturulmuştur. Sınıfın, algoritmalarla etkileşim halinde olduğu fonksiyonu ise genel analiz sınıfıdır. Bu fonksiyon, tekil analiz fonksiyonlarının tümünün yönetildiği sınıftır. Yazılım dilinin sunduğu altyapı sayesinde her bir tekil analiz görevi işlemci çekirdeklerine dağıtılır. Şekil 2.2'de görülebileceği üzere öncelikle analizi gerçekleşecek kesite ait değişkenler ve daha önce içeri alınmış veri olarak saklanan kesit veri tabanı bilgileri fonksiyonun parametreleri olarak gönderilir.



Şekil 2.2. Genel analiz fonksiyonun akışı

Bu aşamada fonksiyon, o adımda önerilen çözümü ihtiva eden kesitler üzerinden oluşturulmuş her bir kaldırma senaryosunu birer analiz fonksiyonu olarak oluşturur ve sırasıyla birer izleğe (thread) atar. Daha sonra bu kaldırma senaryoları eşzamanlı olarak çalıştırılır ve her bir izleğe ait analiz fonksiyonu (kaldırma senaryosu ve/veya sismik analiz) bir bilgisayar çekirdeğine gönderilir. İzlekler eşzamanlı olarak başlamasına karşın, dönen verilerin topluca yorumlanması gerekliliğinden ötürü, son izlek tamamlanana kadar yazılım sonraki adıma geçmeden bekler. Ardından her bir analiz fonksiyonundan gelen veriler derlenerek bir sonuç nesnesine döndürülür. Bu sonuç nesnesi hem kaldırma senaryoları sonucunda ortaya çıkan mafsal durumlarını ve ilişkili oldukları kaldırma senaryolarını hem de sismik analiz sonucunda elde edilen çerçeve kesitlerinin talep kapasite oranlarını barındırmaktadır. Derlenmiş sonuç verileri ilgili optimizasyon sınıfına döndürülürler.

2.1.3. Optimizasyon Operatörleri Sınıfı

Geliştirilen yazılım hem Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritmasını hem de Tavlama Benzetimi algoritmasının tabanını oluşturmaktadır. Bu iki algoritmanın yansıra birçok yapısal optimizasyon problemi benzer bazı işlemlerin tekrarlanmasına ihtiyaç duyar. Bu bağlamda gerekli görülen işlemlerin tekrar kodlanmaması için temel bazı fonksiyonlar oluşturulmuş ve her iki optimizasyon algoritmasının akışı içinde kullanılmıştır. Yazılım işleyişi sürecinde oluşturulan her bir çözüm nesnesi ve içinde yer alan kesit nesneleri başlangıçta boş değerle oluşturulmaktadır. Ancak algoritmada kullanılan çözüm nesnelerinin üzerinde başlangıç işlemlerinin yapılabilmesi için nesneye bağlı değişkenlerin rastgele de olsa bir değere sahip olması gerekmektedir. Bu sebeple başlangıçta oluşturulan çözüm nesnelerinin değişkenlerini doldurmak için "RastgeleDoldur" ve "KesitDoldur" fonksiyonları oluşturulmuştur.

Algoritmalar, optimizasyon süresi boyunca bir çözümü veya bir popülasyonu farklı yöntemlerle amaç fonksiyonu bağlamında iyileştirmeye çalışmaktadır. Bu doğrultuda sürekli olarak çözüm nesnesine ait kesitlerin değiştirilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla tüm olası kesitlere ve kesitlerin özelliklerine yazılım düzenli olarak tekrarlı biçimde erişecektir. Çok sık tekrarlanacak bu işlemin bilgisayar zamanı açısından daha verimli yönetilebilmesi için ilgili kesit veri tabanı optimizasyon sürecinin başında geçici belleğe bir kez çok boyutlu bir dizi olarak alınmakta ve akabinde buradan kesit bilgilerine erişilmektedir. İçeri alınan kesit veri tabanında malzemeye bağlı olarak her kesite ait; kesit adı, birim ağırlık, plastik moment kapasitesi, kesit yüksekliği ve kesit alanı bilgileri yer almaktadır.

Çalışmada kullanılan her iki optimizasyon yöntemi için de amaç fonksiyonu minimum yapı ağırlığının elde edilmesi olarak tanımlanmıştır. Algoritma akışı içerisinde oluşturulan her bir çözümün amaç fonksiyon değerinin hesaplanması OAPI (Open Application Programming Interface "Açık Uygulama Programlama Arayüzü") üzerinden elde edilen dönütler sayesinde gerçekleştirilebilmektedir. Ancak bu yöntemin kullanılması görece yavaş kalmaktadır. Bu sebeple her bir çözüm nesnesine ait amaç fonksiyon değerini hesaplamak için bir fonksiyon oluşturulmuştur. Bu fonksiyon optimizasyon sürecinin başlangıcında içeri alınan kesit veri tabanındaki değerleri ve ilgili çözüme ait kesitlerin ilgili değerlerini eşleştirerek çerçeve ağırlığını hesaplamaktadır. Bu sayede OAPI üzerinden gerçekleştirilen iletişim miktarı azaltılmıştır.

2.1.4. Tavlama Benzetimi Algoritması Sınıfı

Tavlama Benzetimi algoritmasının efektif biçimde çalışabilmesi için optimizasyon operatörleri sınıfında yer alan fonksiyonlar haricinde birtakım tekrarlı işlemlerin kullanılması gerekmektedir. Bu sınıfta yer alan fonksiyonlar Tavlama Benzetimi algoritmasının ana fonksiyonunu ve yardımcı fonksiyonları barındırmaktadır. Ana Tavlama Benzetimi fonksiyonu; başlangıç sıcaklığı, final sıcaklık ve sıcaklık düşüş değeri olmak üzere algoritmanın temel parametrelerini fonksiyon parametreleri olarak alarak kolayca çalışmaktadır. Tavlama Benzetimi algoritması her bir iterasyonun başında değişiklik yapılacak çözüm parametresini rassal olarak belirlemektedir. İlgili süreç için yapısal optimizasyon özelinde rassallığın belli bir ölçüde bozulduğu yeni bir yaklaşım da geliştirilmiştir. Her iki yaklaşımın kolayca tekrarlanabilmesi için "KesitSec" ve "AkilliKesitSec" olmak üzere iki fonksiyon oluşturulmuştur. Bu fonksiyonlardan ilki klasik Tavlama Benzetimi algoritmasını esas alarak, tüm olası değişkenlerin eşit seçilme ihtimaline sahip olduğu bir yaklaşımla çalışmaktadır. Fonksiyonlardan ikincisi ve bu çalışma kapsamında geliştirilen yaklaşımda ise bir önceki iterasyondaki çözümde her bir kesit grubundaki hatalı kesit sayısı esas alınarak çözüme ait değişkenlerin seçilme olasılığı belli bir ölçüde revize edilmektedir. Bu yaklaşımla ilgili detaylara daha sonra algoritmanın akışı anlatılırken tekrar değinilecektir. Bunlara ek olarak klasik algoritmanın işleyişini yapısal optimizasyon özelinde uygulanabilir kılmak ve tekrarlı gerçekleştirilen işlemler için Şekil 2.1'de görülebileceği üzere farklı fonksiyonlar da oluşturulmuştur.

2.1.5. Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon Algoritması Sınıfı

Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması yapısı itibariyle akış süreci boyunca popülasyon üzerinde farklı işlemler yapmaktadır. Algoritmanın ilk aşaması olan öğretme kısmında optimizasyon sınıfı fonksiyonlarıyla rastgele bir popülasyon oluşturulmaktadır. Oluşturulan rastgele popülasyondaki bireylerin amaç fonksiyon değerleri, sözde amaç fonksiyon değerleri ve sınırlayıcı fonksiyon değerlerinin hesaplanması için "GrupAnaliz" fonksiyonu oluşturulmuştur. Bu fonksiyon aynı iterasyon içerisinde oluşturulan diğer popülasyonların ilgili değerlerini hesaplamak için de kullanılmaktadır.

Başlangıç popülasyonunun sözde amaç fonksiyonu değerlerine bağlı olarak öğretici bireyin seçilmesi için, ilgili bireyin dizideki indisini döndüren "Ogretmen" fonksiyonu,

öğretme kısmının gerçekleştirilmesi için ise “OgretmeFazi” fonksiyonu oluşturulmuştur. Bu aşamada bireyler arasında en iyi sözde amaç fonksiyonu değerine sahip olan birey, popülasyondaki diğer bireyleri rassal bir öğrenme değeri oranında etkileyerek kendisine yaklaştırmaya çalışmaktadır. Bu noktada bireylerin aynı değişkene ait kesitleri arasındaki farkları hesaplamak için “OrtalamaFark” fonksiyonu oluşturulmuştur.

Öğretme kısmının tamamlanmasının ardından, popülasyondaki bireylerin rastgele ve tekrarlanmayan biçimde eşleştirilmesi ile birbirlerini geliştirmesinin amaçlandığı öğrenme aşaması başlamaktadır. Algoritmanın bu kısmı “EtkilesimFazi” fonksiyonu ile gerçekleştirilmektedir. Bu fonksiyon ilk bireyden başlayarak her bir bireyi, bir başka bireyle birebir eşleştirerek daha iyi bir birey ortaya çıkarmaya çalışmaktadır. Ancak ortaya çıkan yeni bireylerin eski bireylerden daha iyi olmaması halinde eski bireyin popülasyondaki yerini koruması gerekmektedir. Bu kıyaslama ve seçme sürecini gerçekleştirmek için ise “Harmanla” fonksiyonu oluşturulmuştur. Oluşan yeni popülasyonla birlikte öğrenme aşaması ve algoritmanın bir iterasyonu tamamlanmış olur. Ortaya çıkan popülasyon bir sonraki iterasyonun başlangıç popülasyonu olarak kullanılmak üzere “Transfer” fonksiyonu sayesinde aktarılmasıyla bir sonraki iterasyonun başlamasına müsaade edilir.

Algoritmanın akışına daha sonra detaylı olarak değinilecektir. Ancak görülebileceği üzere popülasyondaki bireylerin niteliğinin, optimizasyonun başarasına doğrudan etki ettiği görülebilmektedir. Bu algoritmanın daha efektif sonuçlar üretebilmesi için seçkin bir öğrenci sınıfının oluşturulmasının sonuca olumlu yönde etki edeceği düşünülmüştür. Bu maksatla, “SeckinPopulasyon” adlı yeni bir popülasyon ve “SeckinPopulasyonGuncelle” adlı bir fonksiyon oluşturulmuştur. Bu fonksiyon, belirlenen bir iterasyon sayısı boyunca ortaya çıkan herhangi bir sonucun seçkin popülasyondaki herhangi bir bireyden daha iyi amaç fonksiyonu değeri üretmesi halinde çalışmaktadır. Belirlenen iterasyon sayısının sonunda ise seçkin popülasyon ilgili iterasyonun başlangıç popülasyonu olarak kullanılmaktadır.

Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritmasının bireyleri kıyaslama ve geliştirme aşamalarında daha sonra detaylı olarak açıklanacak rassal bir bağıntı kullanılmaktadır. Bu bağıntılarda kesitin belli bir özelliğinin kıstas olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan yapısal optimizasyon örnekleri bağlamında kirişler için plastik moment kapasiteleri bu bağıntıda kullanılmak üzere seçilmiştir. Kolonlarda ise kesit alanı değerleri seçilmiştir. Ancak buna rağmen ilgili yapısal optimizasyon problemleri için kullanılan değişkenler ön tanımlı kesitler olduğundan, ortaya çıkan yeni değerlerle kesin olarak eşleşmemektedir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için bağıntı sonunda hesaplanan yeni

değerlere en yakın kesit seçilerek, bireyin ilgili yeni değişkeni olarak atanmaktadır. Bu işlemin gerçekleştirilebilmesi için "EnYakinKesit" fonksiyonu oluşturulmuştur. Fonksiyonun doğru ve daha efektif bir şekilde çalışabilmesi için veri tabanında yer alan kesitler yönetmelikte [85] yer aldığı sırayla değil, ilgili seçim kriterine bağlı olarak kolonlar ve kirişler için ayrı ayrı olmak üzere iki farklı çok boyutlu diziden teşkil edilmek üzere tekrar düzenlenmiştir.

2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Üç Boyutlu Çerçevelerin Analizi

Taşıyıcı sistemlerin analizi, birçok yapısal problemin çözümündeki odak noktalarından biri olma niteliği taşımaktadır. İlgili sistemlerin matematiksel olarak ifade edilmesi ve çözülmesi için de geliştirilmiş ve geliştirilmekte olan çok sayıda yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden birisi olan ve 1960'ların başında önerilen Sonlu Elemanlar Yöntemi [86] bilgisayarların gelişmesiyle yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Yöntem, temel anlamda kendi lokal koordinatları üzerinde matrislerle ifade edilen taşıyıcı elemanların bir araya gelerek global koordinatlar üzerinde tek bir global matrisle ifade edilmesine dayanmaktadır. Bu yöntem bağlamında bir elemanın rijitlik bağıntısı aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\{F\} = [\bar{k}]\{\Delta\} \tag{2.1}$$

burada $\bar{k}$ elemanın rijitlik matrisini, F elemana etkiyen kuvvet vektörünü ve Δ elemanın yer değiştirme vektörünü ifade etmektedir. $\bar{k}$ matrisi temsil ettiği elemanın rijitlik sabiti değerleri olan k_{ij} değerlerini barındırmaktadır. Diğer tüm serbestlik derecelerinde çubuk eleman tutulur ve yalnız bu sabitin serbest olduğu doğrultuda eleman birim yer değiştirme yaparsa uygulanan kuvvet F_i değeri, k_{ij}'ye eşit olacaktır. Bu doğrultuda eleman rijitlik matrisi ve rijitlik bağıntısı [87] aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ F_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & \dots & \dots & k_{i1} \\ k_{21} & k_{22} & & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & & \ddots & \vdots \\ k_{1j} & \dots & \dots & \dots & \dots & k_{ij} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ u_i \end{Bmatrix} \tag{2.2}$$

$$\begin{array}{rccccccc} F_1 = & k_{11}u_1 & + & \dots & \dots & \dots & + & k_{i1}u_i \\ F_2 = & k_{21}u_1 & + & \dots & \dots & \dots & + & k_{i2}u_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ F_i = & k_{1j}u_1 & + & \dots & \dots & \dots & + & k_{ij}u_i \end{array} \tag{2.3}$$

Burada ifade edilen rijitlik matrisinin ve vektörlerin boyutu elemanın serbestlik derecesine bağlıdır. 6 serbestlik dereceli, 3 boyutlu bir eleman için rijitlik bağıntısı [88] aşağıdaki gibi gösterilir;

$$\begin{Bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ F_{z1} \\ M_{x1} \\ M_{y1} \\ M_{z1} \\ F_{x2} \\ F_{y2} \\ F_{z2} \\ M_{x2} \\ M_{y2} \\ M_{z2} \end{Bmatrix} = E \begin{bmatrix} \frac{A}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{A}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12I_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6I_z}{L^2} & 0 & -\frac{12I_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6I_z}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12I_y}{L^3} & 0 & -\frac{6I_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12I_y}{L^3} & 0 & -\frac{6I_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_x}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_x}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6I_y}{L^2} & 0 & \frac{4I_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6I_y}{L^2} & 0 & \frac{2I_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6I_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4I_z}{L} & 0 & -\frac{6I_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2I_z}{L} \\ -\frac{A}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{A}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12I_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6I_z}{L^2} & 0 & \frac{12I_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6I_z}{L^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12I_y}{L^3} & 0 & \frac{6I_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12I_y}{L^3} & 0 & \frac{6I_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_x}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GI_x}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6I_y}{L^2} & 0 & \frac{2I_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6I_y}{L^2} & 0 & \frac{4I_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6I_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2I_z}{L} & 0 & -\frac{6I_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4I_z}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \theta_{x1} \\ \theta_{y1} \\ \theta_{z1} \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ \theta_{x2} \\ \theta_{y2} \\ \theta_{z2} \end{Bmatrix} \tag{2.4}$$

Elemanın elastisite modülü (E), atalet momenti (I), kayma modülü (G) gibi malzeme; kesit alanı (A) ve uzunluğu (L) gibi geometri özelliklerine bağlı olarak oluşturulan bu matris kendi lokal ekseninde ifade edilmiştir. Elemanın bulunduğu sistemin tümünü ifade edecek olan global rijitlik matrisinde ilgili olduğu düğüm noktalarında kullanılabilmesi için öncelikle bu matrisin global eksen takımında ifade edilmesi gerekmektedir. Eleman rijitlik matrisinin global eksen takımına dönüştürülmesi için ise dönüştürme matrisinden

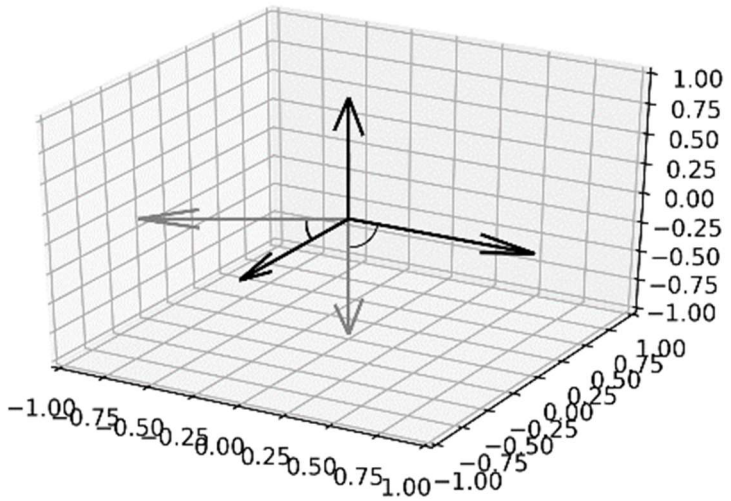
faydalanılır. 6 serbestlik dereceli, 3 boyutlu bir eleman için transformasyon matrisi (Γ) aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$[\Gamma] = \begin{bmatrix} [\gamma] & & & \\ & [\gamma] & & \\ & & [\gamma] & \\ & & & [\gamma] \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

Dönüşüm matrisi içerisinde yer alan γ matrisi ise doğrultuların kosinüsleri olmak üzere aşağıdaki biçimde gösterilebilir;

$$[\gamma] = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

burada l_1, m_1 ve n_1; sırasıyla lokal x ekseniyle global x, y ve z eksenleri arasındaki açının kosinüsünü ifade etmektedir. Aynı şekilde l_2, m_2 ve n_2; sırasıyla lokal y ekseniyle global x, y ve z eksenleri arasındaki açının kosinüsünü ve l_3, m_3 ve n_3; sırasıyla lokal z ekseniyle global x, y ve z eksenleri arasındaki açının kosinüsünü ifade etmektedir. Global ve lokal eksen takımı arasındaki fark örnek olarak Şekil 2.3'te görülebilir.



Şekil 2.3. Global eksen takımıyla lokal eksen takımı arasındaki açıların gösterimi

İlgili hesaplamalar yapıldıktan sonra elde edilen transformasyon matrisi sayesinde lokal eksen takımında ifade edilen eleman rijitlik matrisinin dönüştürme işlemi aşağıdaki gibi gerçekleştirilir;

$$[k] = [\Gamma]\left[\bar{k}\right][\Gamma]^T \tag{2.7}$$

Global eksen takımına uyarlanmış eleman rijitlik matrisinin elde edilmesinin ardından düğüm noktaları ve serbestliklere bağlı olarak eleman rijitlik matrisindeki değerler global matriste yerine konur, aynı düğüm noktasına denk gelen elemanlar toplanır ve aşağıdaki gibi genel rijitlik bağıntısı elde edilmiş olur;

$$\{F\} = [K]\{\Delta\} \tag{2.8}$$

Burada (K) global rijitlik matrisi, (F) global yük vektörü ve (Δ) global yer değiştirme vektörüdür. Sınır şartları uygulanarak denklem sisteminin çözülmesiyle düğüm noktalarında yer değiştirmeler elde edilebilir. Hesaplanan yer değiştirme değerlerine bağlı olarak şekil değiştirmeler (ϵ), gerilmeler (σ) ve iç kuvvetler hesaplanabilir.

Görülebileceği üzere sonlu elemanlar yöntemi çok karmaşık yapısal sistemlerin analizi için sistematik bir çözüm yöntemi sunmaktadır. Bu yöntem günümüzde birçok yapısal analiz yazılımının matematiksel temelini oluşturmaktadır. Zira yöntem, bilgisayar zamanı ve algoritmik olarak ifade edilebilirlik açısından çok büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemiyle geometri veya malzeme açısından doğrusal olmayan sistemlerin de ifade edilmesi mümkündür.

2.3. SAP2000 Açık Uygulama Programlama Arayüzü

Günümüzde farklı veya benzer amaçlarla geliştirilmiş birçok yazılım dili bulunmaktadır. Her dilin bir diğerine göre birtakım avantajları veya dezavantajları olsa da kapsamlı projelerin birçoğunda bu yazılım dillerinden bazılarının etkileşim içinde çalışabilmesi önemli bir ihtiyaçtır. Bunun ötesinde, bazı yazılımların barındırdığı altyapı, arayüzde sunulan işlevlerin kısıtlılığı sebebiyle potansiyeline ulaşmakta sorun yaşayabilmektedir. Dolayısıyla ilgili yazılım veya servisin harici bir yazılım tarafından kullanılmasını sağlamak için API (Application Programming Interface "Uygulama

Programlama Arayüzü") adı verilen bir arka kapı sunması son derece yaygın olarak görülmektedir.

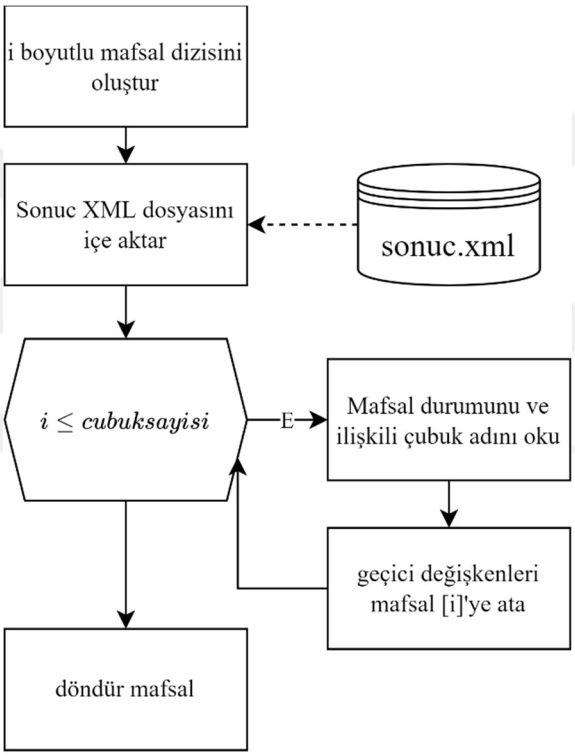
SAP2000 adlı yapısal modelleme ve analiz yazılımı da benzer bir amaçla kullanıcılarına bu imkânı sağlamaktadır. Yazılımın, harici başka bir yazılım tarafından yönetilmesi ve/veya yönlendirilmesine imkân sağlayan bu arayüz OAPI (Open Application Programming Interface "Açık Uygulama Programlama Arayüzü") olarak adlandırılmıştır ve bu çalışmada tercih edilen C# da dahil olmak üzere farklı yazılım dillerini desteklemektedir. Bir referans kütüphane olarak projelere dahil edilebilen bu arayüz sayesinde normal şartlarda SAP2000 kullanıcı arayüzünde pratiğe dökülen birçok işlem, geliştirilen yazılımlar tarafından gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmada geliştirilen yazılım da daha önce oluşturulmuş yapısal modellere, OAPI üzerinden erişim sağlayarak modelin ilgili tasarım parametrelerini değiştirmekte ve istenilen analizleri gerçekleştirmektedir. Analizlerin tamamlanmasının ardından optimizasyon sürecinin ihtiyaç duyduğu sınırlayıcıların bir kısmına ait sayısal değerler de OAPI'den döndürülen veriler sayesinde hesaplanabilmektedir. Aşamalı göçme sınırlayıcılarının kontrol edilebilmesi için gerekli olan veriler mevcut OAPI fonksiyonları tarafından döndürülemediğinden bu sınırlayıcılara ait bilgilere erişmek için ise farklı bir yaklaşım benimsenmiştir.

2.3.1. Plastik Mafsal Durumlarının İçeri Aktarılması

SAP2000 arayüzünde sunulan işlevlerin neredeyse tümü OAPI sayesinde erişilebilir kılınan fonksiyon kütüphanesinde yer almaktadır. Ancak bazı spesifik gereksinimlere ait fonksiyonlar OAPI'de henüz mevcut değildir. Bu işlevlerden birisi de dinamik analiz neticesinde yapıda yer alan plastik mafsalların durumlarının harici yazılıma çekilmesidir. UFC'nin tanımladığı doğrusal olmayan dinamik analiz için ise bu mutlak bir gereksinim olarak ortaya çıkmaktadır. Geliştirilen yazılım ile bu sorunun çözülmesi için ayrıca bir fonksiyon oluşturulmuştur. SAP2000, OAPI ile plastik mafsalların durumlarını harici yazılıma döndürmese de plastik mafsalların durumlarını harici bir dosyaya aktarabilmektedir. Bu noktada yazılımın harici bir dizine, plastik mafsalların durumunu XML formatında bir dosya olarak sağlanır. Bu işlemin ardından yazılım dilinin sunduğu bir kütüphanede yer alan "XMLReader" fonksiyonu kullanılır ve elde edilen verilen içeri aktarılır. Analiz sonuçlarının derlendiği kod bloğunda kullanılmak üzere geliştirilen

fonksiyon her bir plastik mafsala ait nihai mafsal durumunu bir nesne dizisine dönüştürmektedir. Bu fonksiyona ait akış şeması Şekil 2.4'te verilmiştir.

Her bir kaldırma senaryosuna ait oluşturulan mafsal durumu nesne dizileri genel analiz fonksiyonunda ilgili bağlamda tekrar derlenerek önerilen çözüm nesnesinin sonuç değişkenleri olarak döndürülmektedir. İlgili çubuğun plastik mafsal durumunun sınırlayıcıları aşıp aşmadığına dair kontrolü ve sınıflandırması da bu aşamada gerçekleşmektedir.



Şekil 2.4. Mafsal durumlarının XML dosyasından çekilmesine ait akış şeması

2.4. Yapısal Optimizasyon Probleminin Tanımlanması

Yapısal optimizasyon problemlerinin temel amacı genellikle yapının güvenli sınırlar dışına çıkmasına izin vermeksizin, mümkün olan en hafif yapı ağırlığını dolayısıyla, ekonomik tasarımı elde edebilmektir. Bu amaca ulaşmak için probleme ait parametreler değişkenlik gösterebilmektedir. Bu problem kapsamında incelenen çerçeveler için yapısal modeller ve yapı geometrisi sabit olmakla birlikte her bir taşıyıcı eleman için seçilecek kesitler yapısal optimizasyon probleminin değişkenlerini ifade etmektedir. Her bir taşıyıcı

eleman için seçilebilecek kesit tipleri Amerikan Çelik Yapı Enstitüsü (American Instute Steel Construction "AISC") tarafından sunulan ön tanımlı kesitler [85] arasından seçilmektedir ve bu veri tabanında yer alan her bir ön tanımlı kesitin kullanılan malzemeye de bağlı olarak geometrisi itibariyle belirli mekanik özellikleri bulunmaktadır. Bu mekanik özellikler, yapısal model bağlamındaki avantajları ve dezavantajları itibariyle yapısal optimizasyon sürecindeki değişkenlerin özellikleri olma niteliği taşımaktadır.

Her türlü yapısal sistemin kullanılabilirliği, ilgili sistemin davranışının kararlılığına bağlıdır. Bu durum sistemin maruz kaldığı yükler altında denge şartlarını sağlayabilmesi anlamına gelmektedir. Maruz kaldığı yükler altında kesit tesirleri ve mesnet tepkileri yalnızca denge şartları aracılığıyla hesaplanabilen sistemler İzostatik sistemler olarak adlandırılmaktadır. Mesnet tepkileri ve kesit tesirlerinin hesaplanması için denge denklemlerinin yeterli olmaması halinde sistem, statikçe belirsiz yani hiperstatik olarak adlandırılır. Denge şartlarının mesnet tepkilerini bulmak için yeterli olduğu ancak kesit tesirlerini bulmak için yeterli olmadığı halde ise sitem dıştan izostatik içten hiperstatik olarak nitelenir. [89, 90]. Bu çalışmada incelenenler de dahil olmak üzere birçok yapısal optimizasyon problemi hiperstatik sistemlerin optimizasyonunu amaçlamaktadır. Bu bakımdan hiperstatik bir sistem için mutlak optimum çözümünü bulmak neredeyse imkansızdır. Dolayısıyla bu tip sistemlerin sezgisel algoritmalarla çözümü en gerçekçi ve pratik olarak kabul edilebilir yaklaşımdır.

2.4.1. Amaç Fonksiyonu ve Sınırlayıcıların Tanımlanması

Bu çalışmadaki yapısal optimizasyon probleminin temel amacı, dolayısıyla amaç fonksiyonu yapıyı güvenli sınırlar içinde tutarak mümkün olan en düşük yapı ağırlığını (W) elde etmektir. Yapısal optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu şu şekilde ifade edilebilir;

$$W = \sum_{i=1}^{N_f} \rho_i A_i L_i \tag{2.9}$$

burada N_f çerçevedeki eleman sayısını, ρ_i malzeme birim ağırlığını, A_i ve L_i sırasıyla ilgili çerçeve elemanının kesit alanını ve uzunluğunu ifade etmektedir.

Problem kapsamında yapının güvenli tasarımının sağlanması için daha önce bahsedilen AISC-LRFD [81] ve UFC [28] yönetmelikleri esas alınmaktadır. Problemin sınırlayıcıları (C_n), kapsayıcı nitelik taşıyacak biçimde aşağıdaki gibi ifade edilmiştir;

$$C_n \leq 1 \tag{2.10}$$

Sismik sınırlayıcılara ait tanımlar Denklem 2.11, 2.12, 2.13 ve 2.14'te, aşamalı göçme sınırlayıcısı olan dönme sınırlayıcısının tanımı ise Denklem 2.15'te verilmiştir.

$$C_1 = \frac{\delta_n - \delta_{n-1}}{\delta_{ls}} \tag{2.11}$$

burada C_1 rölatif ötelenme sınırlayıcısını ifade etmektedir. δ_n ve δ_{n-1} ardışık iki katın ötelenmelerini, δ_{ls} ise izin verilen maksimum rölatif ötelenme değerini ifade etmektedir.

$$C_2 = \frac{\delta_t}{\delta_{lt}} \tag{2.12}$$

burada C_2, yapının tepe noktasına ait ötelenme sınırlayıcısını; δ_t ve δ_{lt} ise sırasıyla yapının tepe noktasına ait ötelenmeyi ve bu noktaya ait izin verilen maksimum ötelenme değerini ifade etmektedir.

$$C_3 = \begin{cases} \dfrac{P_u}{\phi_c P_n} \geq 0.2 & \Rightarrow \quad \dfrac{P_u}{\phi_c P_n} + \dfrac{8}{9}\left(\dfrac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \dfrac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}}\right) \\ \dfrac{P_u}{\phi_c P_n} < 0.2 & \Rightarrow \quad \dfrac{P_u}{2\phi_c P_n} + \left(\dfrac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \dfrac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}}\right) \end{cases} \tag{2.13}$$

burada tanımlanan C_3 sınırlayıcısı, bileşik etkiye maruz kalan yapısal elemanlara ait dayanımla ilişkilidir. P_u ve P_n, sırasıyla gerekli ve karakteristik eksenel kuvvet dayanımını; M_{ux} ve M_{nx}, sırasıyla güçlü eksen etrafındaki gerekli ve karakteristik eğilme momenti dayanımını; M_{uy} ve M_{ny}, sırasıyla zayıf eksen etrafındaki gerekli ve karakteristik eğilme momenti dayanımını ifade etmektedir. ϕ_C ve ϕ_b ise sırasıyla eksenel kuvvet için dayanım katsayısını ve eğilme momenti için dayanım katsayısını ifade etmektedir. C_3 sınırlayıcısı her

taşıyıcı eleman için ayrıca hesaplanır ve elde edilen değer bu kesitin Talep Kapasite Oranını (Demand Capacity Ratio "DCR") ifade eder.

$$C_4 = \frac{V_u}{\phi_S V_n} \tag{2.14}$$

Çerçeveye elemanlarına etkiyen kesme kuvveti C_4 sınırlayıcısı ile kontrol edilmektedir. Burada V_u, V_n ve ϕ_S sırasıyla yük kombinasyonları neticesinde hesaplanmış maksimum kesme kuvvetini, karakteristik kesme kuvveti dayanımını ve kesme kuvveti için dayanım katsayısını ifade etmektedir.

$$C_5 = \frac{\theta_c}{\theta_l} \tag{2.15}$$

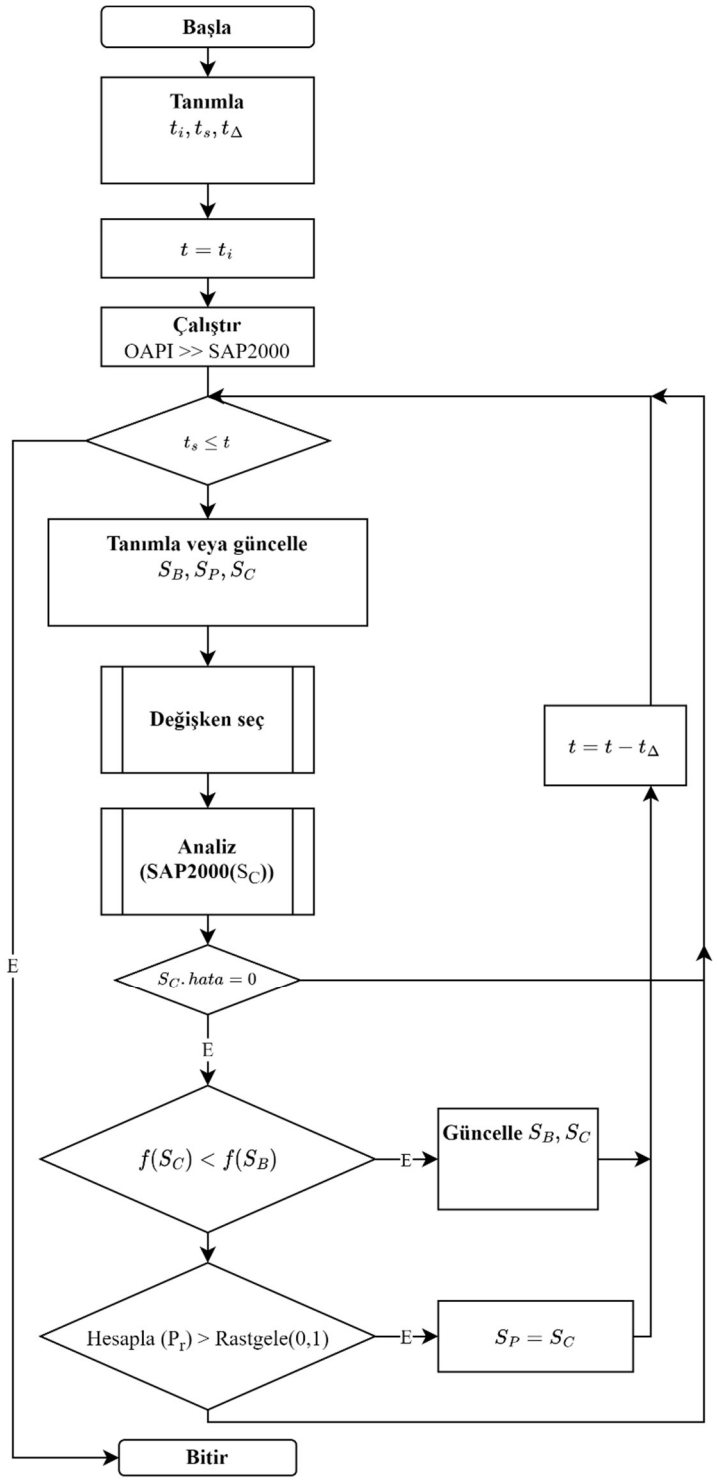
burada, C_5, UFC [28] yönetmeliğine göre her bir yapısal elemanın plastik dönme kapasitesiyle ilişkili sınırlayıcıyı ifade etmektedir. θ_c ve θ_l ise sırasıyla kaldırma senaryosu süresince ortaya çıkan maksimum dönmeyi ve izin verilen maksimum dönme değerini ifade etmektedir. Bu sınırlayıcıya konu olan dönme davranışı Bölüm 1.1.5'te açıklanmıştır.

2.5. Tavlama Benzetimi Algoritması

İlk kez 1983 yılında sunulan Tavlama Benzetimi algoritması [77], metallerin tavlanma sürecini taklit ederek, tavlanma esnasında minimum enerji düzeyine ulaşmayı hedefleyen bir optimizasyon algoritmasıdır. Süreç, metallerin erime sıcaklığına yükseltilmesi sayesinde moleküllerin birbirleri arasında serbestçe hareket etmesi prensibiyle başlamaktadır. Ardından soğuma süreci başlar ve moleküllerin hareket kabiliyeti bu süreç boyunca adım adım azalır. Bu aşamadaki amaç mümkün olan en düşük enerji düzeyine yaklaşabilmektir. Bu hareketlilik ısıl eşitliğe yaklaşma amacı gütmekle birlikte, yerel en iyilerden sakınma mekanizması oluşturmak amacıyla bir ihtimal hesabını da içinde barındırmaktadır. Optimizasyon sürecindeki iterasyon adımlarının herhangi birinde ortaya çıkan fakat amaç fonksiyonu açısından o ana dek elde edilen en iyi çözümden daha iyi olmayan bir çözümün lokal optimumdan kaçınma amacıyla kabul edilme olasılığı değeri olan (P_r) şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$P_r = \begin{cases} \Delta W \leq 0 & \Rightarrow \quad 1 \\ \Delta W > 0 & \Rightarrow \quad \dfrac{1}{Z(T)} e^{\left(-\frac{\Delta W}{k_B T}\right)} \end{cases} \tag{2.16}$$

burada ΔW, ilgili yapısal optimizasyon problemi bağlamında o ana kadar bulunmuş en iyi çözüm ile yeni çözüm arasındaki ağırlık farkını, $Z(T)$ normalleştirme katsayısını, k_B Boltzman sabitini, T ilgili iterasyon itibariyle mevcut sıcaklık değerini ifade etmektedir. İlgili bağıntıdan anlaşılacağı üzere süreç içerisinde ortaya çıkan daha iyi bir sonuç doğrudan en iyi çözüm olarak kabul edilmektedir. Ancak ortaya çıkan yeni sonucun, en iyi sonuçtan daha iyi olmaması halinde, aradaki ağırlık farkına bağlı olarak seçilme ihtimali artmakta veya azalmaktadır. Bağıntıdaki $e^{\left(-\frac{\Delta W}{k_B T}\right)}$ değeri; sıcaklık düştükçe 0'a daha fazla yaklaşmakta, ΔW azaldıkça 1'e daha fazla yaklaşmaktadır. Dolayısıyla iterasyon adımları ilerledikçe en iyi olmayan bir çözümün kabul edilme olasılığı azalmakta, iki çözüm arasındaki ağırlık farkı azaldıkça kabul edilme olasılığı artmaktadır. Normalleştirme katsayısı olarak tanımlanan $Z(T)$ değeri ise bu çalışmada "1" olarak alınmıştır. Algoritmaya ait akış şeması Şekil 2.5'te sunulmuştur.



Şekil 2.5. Tavlama Benzetimi algoritması akış şeması

Tavlama benzetimi algoritması rastgele bir çözümün üretilmesiyle başlar. Daha sonra önerilen bu ilk çözümün amaç fonksiyonu hesaplanır. Ardından çözümün değişkenlerinden birisi rastgele seçilir. Bu değişkene yine rastgele bir biçimde yeni değer, ilgili problem

bağlamında kesit atanır. Bu yeni kesite bağlı olarak ortaya çıkan tasarıma ait amaç fonksiyonu hesaplanır. Elde edilen yeni çözümün öncekinden daha iyi bir çözüm olması halinde bu çözüm saklanır. Aksi takdirde Denklem 2.16'da açıklandığı biçimde ilgili çözümün saklanıp saklanmayacağına karar verilir. Daha iyi bir çözümün bulunması veya yeni çözümün saklanması halinde sıcaklık daha önceden belirlenmiş bir değer kadar düşürülerek sonraki iterasyona geçilir. Algoritmanın efektif sonuçlar üretebilmesi için parametrelerinin doğru belirlenmesi önem taşımaktadır. Tavlama Benzetimi algoritması için çalışma parametreleri; başlangıç sıcaklığı (t_i), bitiş sıcaklığı (t_s) ve sıcaklık düşüş değeri (t_Δ) olarak sıralanabilir. Bu parametrelerden bitirme sıcaklığı aynı zamanda algoritmanın bitirme kriteri olarak da görülmektedir. Sıcaklık düşüş değeri, algoritmanın çalışma süresi boyunca yapacağı iterasyon sayısını doğrudan etkilemektedir. Seçilecek çok küçük bir değer daha katı bir arama sürecine olanak sağlarken, iterasyon sayısını da önemli ölçüde artırmakta dolayısıyla zaman verimliliği anlamında dezavantaj oluşturmaktadır. Seçilecek büyük bir değer ise optimizasyonun daha kısa sürede tamamlanmasını sağlarken, optimum değere yakınsama ihtimalinin düşmesine sebep olmaktadır. Başlangıç ve bitiş sıcaklıklarının makul aralıklarda belirlenmesi büyük ölçüde olası çözümlerin amaç fonksiyon değerleriyle ilişkilidir. Yaklaşık amaç fonksiyonu değerlerine kıyasla seçilecek çok büyük değerler, en iyi olmayan çözümlerin kabul edilme olasılığını artırırken, seçilecek çok küçük değerler ise lokal optimumlardan kaçınılmasını sağlayacak çözümlerin kabul edilme olasılığını önemli ölçüde düşürebilmektedir. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında incelenecek her iki yapısal modelin yaklaşık yapı ağırlıkları birbirinden oldukça farklı olduğundan, iki model için farklı algoritma parametreleri deneme yanılma yoluyla belirlenmiştir

2.5.1. Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi Algoritması

Yapısal optimizasyon problemleri, diğer optimizasyon problemlerinden belli yönleriyle farklılaşmaktadır. Her yapısal analiz neticesinde, amaç fonksiyonu ve sınırlayıcı değerlerine ek olarak yapıda ortaya çıkan yapısal birtakım bilgiler de elde edilmektedir. Ancak genellikle yapısal optimizasyon çalışmalarında bu dönütler göz ardı edilmekte ve algoritmanın çalışmasında etkin bir rol verilmemektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan Tavlama Benzetimi algoritmasında bu bağlamda bazı değişiklikler yapılmıştır.

Tavlama Benzetimi literatürde yer alan yalın ve etkin bir algoritma olmanın yanında bazı dezavantajlara da sahiptir. Lin ve diğ. [91] Tavlama Benzetimi ve Tabu Arama

algoritmasının hibrit versiyonuyla gerçekleştirdiği optimizasyon çalışmasında Tavlama Benzetimi algoritmasının dezavantajlarından da bahsetmiştir. Tavlama Benzetimi algoritmasının güvenilir bir sonuç üretebilmesi için kayda değer miktarda iterasyona ihtiyacı bulunmaktadır. Ayrıca algoritma yapısı itibariyle bir hafıza mekanizması barındırmadığından tekrarlanan aramaların gerçekleşmesinin kaçınılmaz olduğu ifade edilmiştir. İlgili çalışmada geliştirilen algoritma simetrik gezgin satıcı problemi üzerinde test edilmiş ve daha kısa sürelerde daha güvenilir sonuçların elde edildiği görülmüştür.

Lv ve diğ. [92] gerçekleştirdikleri çalışmalarında Tavlama Benzetimi algoritmasını kullanmıştır. Benzer şekilde bu çalışmada da Tavlama Benzetimi için düşük arama hızı ve lokal minimumlara takılabilmesi dezavantaj olarak gösterilmiştir. Lv ve diğ. bu problemin üstesinden gelmek için bulut teorisinden faydalanarak Tavlama Benzetimi algoritmasında geliştirmeler yapmış ve yöntemin elde ettiği sonuçların olumlu yönde geliştiğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmada ise Tavlama Benzetimi algoritması için literatürde de belirtilen dezavantajlar göz önüne alarak yapısal optimizasyon özelinde birtakım iyileştirmeler yapılmaya çalışılmıştır. Esasen yapısal optimizasyon problemleri diğer optimizasyon problemlerine kıyasla problemi çözmeye çalışan mühendise önemli ipuçları sunabilmektedir. Zira matematiksel bir fonksiyondan farklı olarak; sonlu elemanlar yöntemiyle analizi gerçekleştirilen bir yapı modelindeki gerilmeler, deplasmanlar, sınırlayıcıları aşan eleman sayıları gibi değerler aranan çözümü bulmak adına yol gösterici olabilecektir. Ancak üzerinde çalışılan modellerin hiperstatik modeller olması itibariyle doğrudan bu yönlendirmelerin kullanılması da lokal optimumlara takılmaya sebep olabilecektir. Bu değerlendirmeler ışığında, bu çalışma kapsamında kullanılacak Tavlama Benzetimi algoritmasına ek olarak bir de algoritmanın yapısal optimizasyon bağlamında değiştirilmiş bir versiyonu kullanılmıştır. Algoritmada temel anlamda iki değişiklik yapılmıştır. Bunlardan ilki her bir iterasyon başında gerçekleştirilen değişken seçim aşamasında, ikincisi ise seçilen değişkene atanacak yeni kesitlerin seçim biçimi üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Geleneksel Tavlama Benzetimi algoritmasının her bir iterasyonunda değişkenlerden birisi rastgele seçilerek farklı kesit atanmakta ve amaç fonksiyonu tekrar hesaplanmaktadır. Burada n adet değişkenin bulunduğu bir optimizasyon probleminde her bir değişkenin seçilme olasılığı (P_s) şu şekilde ifade edilebilir;

$$P_s = \frac{1}{n} \tag{2.17}$$

İteratif birçok algoritmada görülen bu yaklaşım, bir bakıma sezgisel algoritmanın rassallığını koruyan ilkelerden birisidir. Ancak Tavlama Benzetimi algoritması için ortaya konan eleştirilerden birisi olan yüksek sayıdaki iterasyon ihtiyacının sebeplerinden birisi olarak bu durum görülmüştür. Zira burada seçilen değişken, bariz biçimde problemli bir kesite sahip uygun olmayan bir çözümde dahi rastgele seçilmekte ve çözümü geliştirmeyen bir bakıma gereksiz olarak nitelendirilebilecek iterasyonların sayısını artırmaktadır. Bu çalışmada algoritmanın bu bakımdan daha etkin çalışmasını sağlamak amacıyla, bir önceki iterasyondaki çözüme ait bilgilerden faydalanarak değişken seçim olasılıkları algoritma tarafından yönlendirilmiştir. Ancak buradaki amaç algoritmayı doğrudan belli bir değişkene yönlendirmek değil, önceki iterasyonda her bir değişkene ait hatalı kesit sayısına bağlı olarak, ilgili değişkenin seçilme olasılığını belirlemektedir. n değişkenli bir optimizasyon problemi için ilgili değişkenin seçilme olasılığına (P_{si}) ilişkin önerilen bağıntı şu şekilde ifade edilebilir;

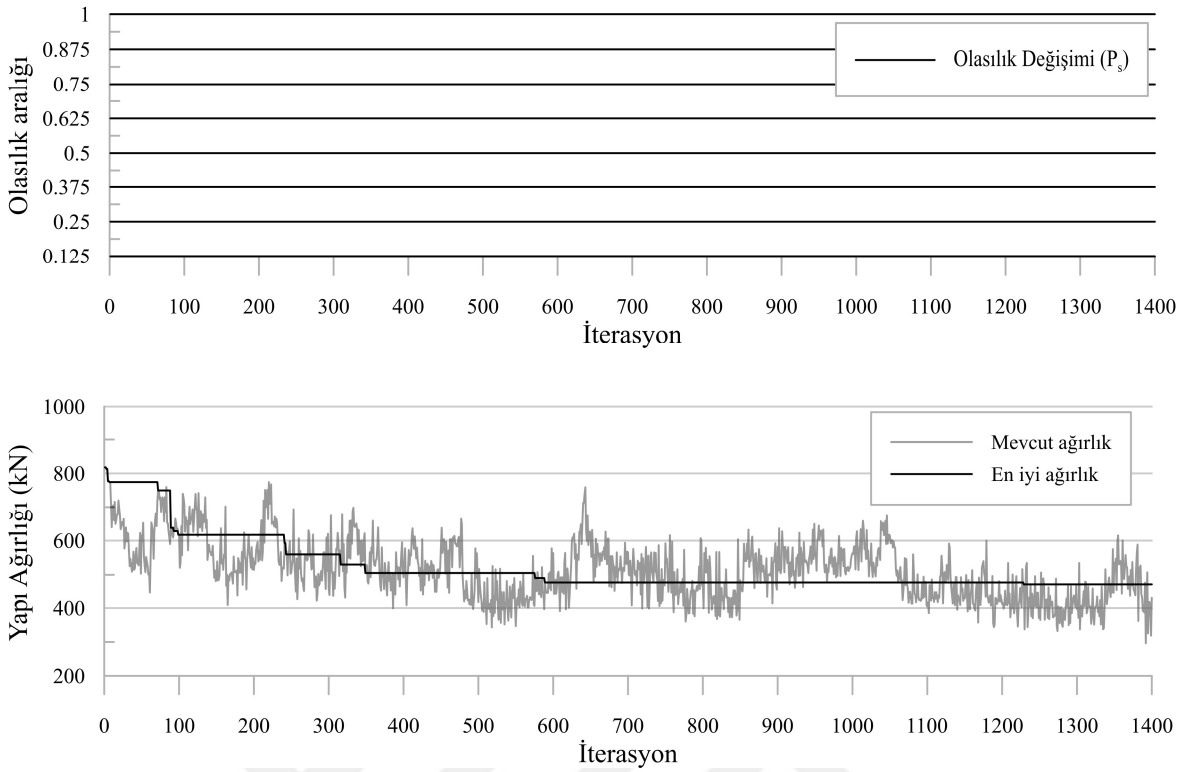
$$P_{si} = \frac{N_{ei} + I_c}{\sum_{j=0}^{n}(N_{ej} + I_c)} \tag{2.18}$$

burada N_e ilgili kesite ait bir önceki iterasyonda ortaya çıkan sınırlayıcı şartlarını sağlamayan kesit sayısını, I_c ise değişken seçim olasılığının rassallık koruma sabiti olarak ifade edilebilir. Ayrıca indislerde yer alan i ve n sırasıyla olasılık hesabına konu olan değişken grubunu ve toplam değişken grubu sayısını ifade etmektedir. I_c değeri ile değişken seçimi aşamasındaki rassallık arasında doğru orantı bulunmaktadır. Bu değer deneme yanılma ile efektif etki sağlanacak biçimde belirlenebilir. Dolayısıyla bu aşamada her bir değişkene ait kesit sayısının da göz önünde bulundurulmasında fayda görülmüştür.

Algoritmada yapılan diğer değişiklik ise iterasyon başlangıcında seçilen değişkenin ardından o değişkene atanacak yeni kesitin belirlenmesiyle ilgilidir. Klasik Tavlama Benzetimi esas alındığında, algoritma AISC tarafından önerilen 283 kesitten [85] birisini seçme olasılığına sahiptir. Değiştirilen yaklaşımla birlikte algoritma, bariz biçimde gerçekçi olmaktan uzak olan kesitleri ilgili iterasyonda çözüm için seçilemez olarak işaretlemektedir. Örneğin bir önceki iterasyonda bir kolon grubundaki kesitlerden sayıca önemli bir kısmı

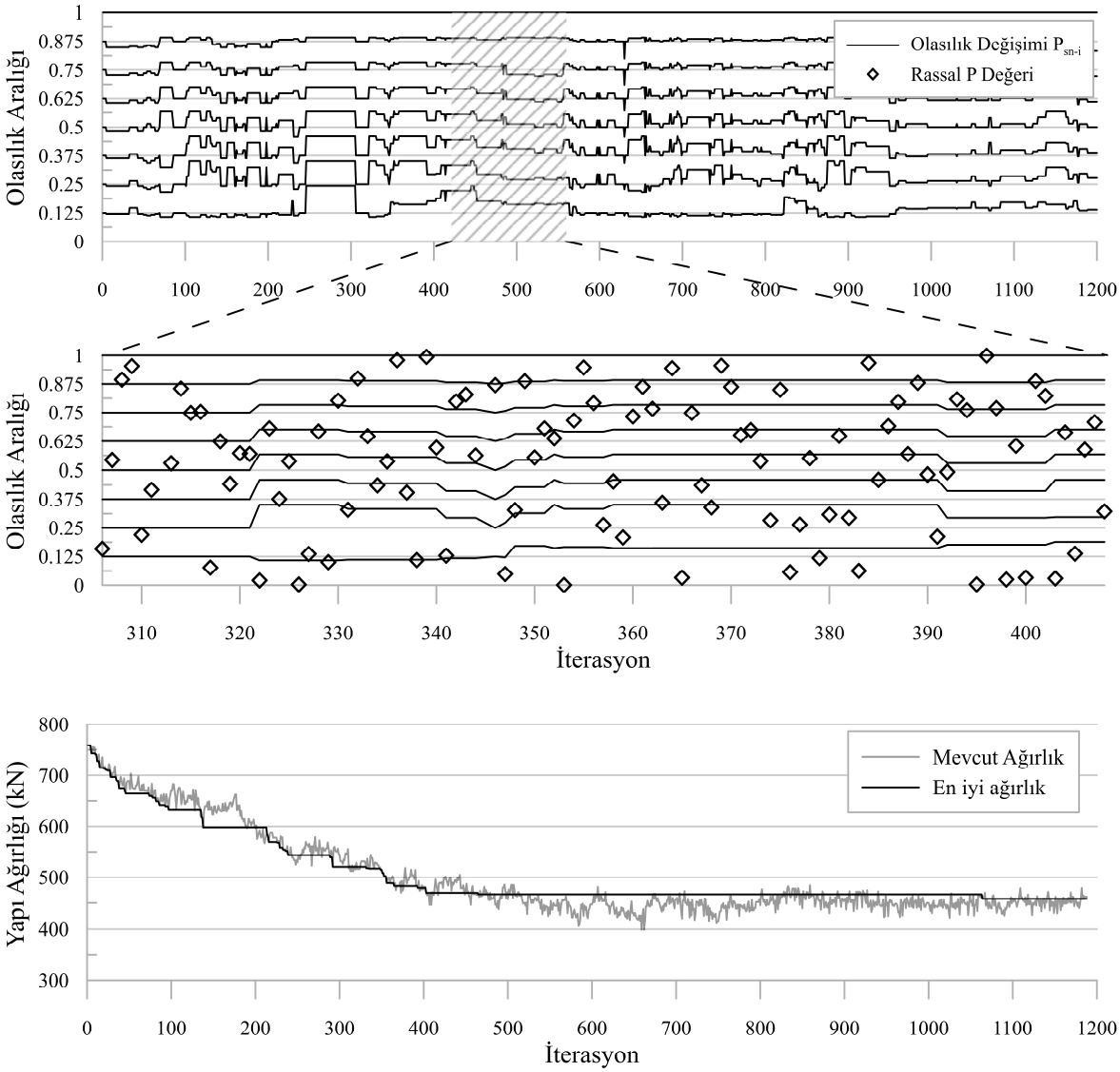
sınırlayıcıları aşmış ise, daha düşük kesit alanına sahip bir kesitin, ilgili gruptaki kolonların eksenel yük ihtiyacını karşılama ihtimali bulunmamaktadır. Dolayısıyla böyle bir durumda bu tip bir kesitin seçilmesi optimizasyon sürecine olumlu hiçbir katkı sağlamayacaktır. Aynı yaklaşım kirişlerde ise plastik moment kapasitesi değeri esas alınarak uygulanmıştır. Yapılan diğer kesit seçim kısıtlamasında ise algoritmanın lokalden uzaklaşma çabasının, optimum çözümden fazlaca uzaklaşmasını engellemeye çalışmaktadır. Örneğin bir önceki iterasyonda "W18x158" olarak seçilmiş ve sınırlayıcıları aşmamış bir kesit için bir sonraki iterasyonda seçilebilecek kesitler; kesitin kolon olması halinde eksenel yük kapasitesi, kiriş olması halinde plastik moment kapasitesi esas alınarak belli bir marj arasında seçilebilmektedir.

Bahsedilen bu iki değişikliğin uygulanmadığı durumda örnek bir optimizasyon sürecinde algoritmanın kesit seçim olasılığının ve buna bağlı olarak yapı ağırlığının iterasyonlar boyunca değişimi Şekil 2.6'da verilmiştir. İncelenen modellerden birine ait olan bu grafikte görülebileceği üzere optimizasyon süreci boyunca herhangi bir kesitin seçilme olasılığı hiç değişmemektedir. Ayrıca arama uzayında gezen mevcut yapı ağırlığı zaman zaman en iyi yapı ağırlığından fazla veya az olmak üzere çok fazla uzaklaşmış olmasına ve çok sayıda iterasyona rağmen yapı ağırlığını geliştirememektedir.



Şekil 2.6. Klasik Tavlama Benzetimi algoritmasına göre kesit seçim olasılığının ve toplam yapı ağırlığının değişimi

Klasik algoritmada kullanılan eşit ihtimalli değişken seçme yaklaşımı yerine Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi algoritması kullanıldığında ortaya çıkan kesit seçim ihtimallerinin iterasyonlar boyunca değişimi Şekil 2.7'de verilmiştir. Görülebileceği üzere değişkenlerin seçilme olasılıklarının aralıkları optimizasyon süreci boyunca değişkenlik göstermektedir. Önceki iterasyonda, sınırlayıcıları aşan kesit sayısına göre revize edilen değerler ve daha makul sınırlar içinde seçilen kesitler sayesinde; daha az sayıda iterasyonla süreç tamamlanmış, daha hafif bir yapı ağırlığı elde edilmiş ve mevcut ağırlığın çözüm uzayı içindeki değişimi en iyi ağırlık çizgisine daha yakın bir aralıkta seyretmiştir.



Şekil 2.7. Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi algoritmasına göre kesit seçim olasılığının ve toplam yapı ağırlığının değişimi

Uzak bir olasılık olsa da yapısal optimizasyon özelinde yapılan bu değişiklikler optimizasyon sürecinde çıkabilecek ani ağırlık düşüşlerinin de önüne geçebilmektedir. Ancak modeller üzerinde yapılan tekrarlı optimizasyon süreçlerinde daha sonra detaylı olarak değinileceği üzere, gerçekleştirilen bu iki değişiklik optimizasyon sürecinin daha istikrarlı sonuçlar vermesini sağlamaktadır. Dolayısıyla ortaya çıkabilecek ani düşüş ihtimalinden daha istikrarlı sonuçlar üretebilmek adına feragat edilmiştir. Buna ek olarak Tavlama Benzetimi algoritması için literatürde yer alan eleştirilerden birisi olan iterasyon sayısının dolayısıyla optimizasyon süresinin uzunluğu açısından da avantaj oluşturulmuştur.

2.6. Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon Algoritması

Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon (Teaching Learning Based Optimization "TLBO-ÖÖTO") algoritması ilk kez 2011 yılında Rao ve diğ. [93] tarafından sunulmuştur. Popülasyon temelli bir algoritma olan Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması; popülasyonu bir sınıf, içindeki bireyleri ise birer öğrenci olarak kabul eder. Algoritma, sınıftaki bireylerin birbirini geliştirmesi prensibiyle optimum çözüme yakınsamaya çalışır. Algoritma, Rao ve diğ. [93] tarafından diğer popülasyon temelli algoritmalarla kıyaslanmış ve en iyi sonuç, ortalama sonuç, yakınsama oranı ve bilgisayar zamanı gibi parametreler bakımından başarılı sonuçlar elde etmiştir. Aynı zamanda yazarlar popülasyon temelli algoritmaların çoğunun efektif sonuçlar oluşturabilmesi için algoritma kontrol parametrelerinin de optimize edilmesi gerektiğini ancak Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritmasının bu bakımdan bir parametre girişine ihtiyaç duymadığını belirtmişlerdir.

Crepinšek ve diğ. [94] 2012 yılında sundukları çalışmada Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması hakkında birtakım eleştiriler ortaya koymuştur. Çalışmada algoritma hakkındaki en önemli eleştiri, kontrol parametrelerine ihtiyaç duymadığı iddiasının doğru bir yaklaşım olmadığı üzerinedir. Popülasyon büyüklüğünün ve maksimum jenerasyon sayısının problem özelinde efektif değerlere sahip olmadığı sürece algoritmanın optimumdan uzak sonuçlar ürettiği belirtilmiştir. Ayrıca sınırlayıcıların yer almadığı problemlerde görece daha iyi sonuçlar üretmesine karşın sınırlayıcılı problemlerde Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritmasının daha verimsiz sonuçlar ürettiği sayısal örneklerle desteklenmiştir. Ancak tüm bunlara ek olarak algoritmanın çalışma mekanizması üzerine yapılacak daha derin araştırmaların literatüre katkı sağlayacağı da ayrıca belirtilmiştir.

Waghmare [95] ise 2013 yılında yaptığı çalışmada ilgili algoritma üzerine ortaya çıkan eleştirileri değerlendirmek üzere ilgili sayısal örnekleri tekrar test etmiştir. Ortaya çıkan değerlerinin ekseriyetle, Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması lehine olmak üzere Crepinšek'in çalışmasıyla [94] uyuşmadığını belirtmiştir. Ayrıca algoritmada kullanılan kontrol parametrelerinin algoritmaya özel parametreler olmadığını ve genel kontrol parametreleri olması sebebiyle bu algoritmanın genel anlamda kontrol parametresi gerektirmeyen bir algoritma olduğu fikrini savunmuştur. Daha sonra bu minvalde birtakım

çalışmalar [96–98] yayınlanmış olsa da sunulan değerlendirmeler, yazarlara göre aynı çerçevede kalmıştır.

Bu algoritma temelde iki kısımdan oluşmaktadır. Öğretme adı verilen ilk aşamada, rastgele oluşturulan bir popülasyonun tüm bireyleri sınırlayıcılar göz önüne alınarak analiz edilir. Her bir çözüm için sınırlayıcıları aşma değerine bağlı olarak bir ceza fonksiyonu hesaplanır. Kullanılan ceza fonksiyonu (p_i) şu şekildedir;

$$p_i = 10 \times \left(n_f\right)^2 \tag{2.19}$$

burada n_f ilgili analizde, ilgili sınırlayıcıyı aşan eleman sayısını ifade etmekte ve her bir sınırlayıcı için ayrıca hesaplanmaktadır.

Hesaplanan ceza fonksiyonlarına bağlı olarak, yine popülasyondaki her birey için bir sözde amaç fonksiyonu hesaplanır. Sözde amaç fonksiyonu;

$$f'(x) = f(x) + \sum_{i=1}^{n} p_i \tag{2.20}$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada $f(x)$, orijinal amaç fonksiyonunu ifade etmekte ve bu çalışmada yapı ağırlığına karşılık gelmektedir.

Popülasyon içinde analiz edilen tüm bireyler arasında sözde amaç fonksiyonu en küçük olan çerçeve öğretmen olarak kabul edilir ve diğer bireyleri dolayısıyla çözümleri iyileştirmesi beklenir. Bu amaçla diğer bireylerin ilgili kesitlerini değiştirmek için aşağıdaki bağıntı kullanılır;

$$D_{m-i} = r(X_{b-i} - T_F X_{i-i}) \tag{2.21}$$

burada D_{m-i}, ilgili kesit grubu için anlamlı fark değerini; r, 0 ile 1 arasında rastgele bir sayıyı; X_b, öğretici bireyin ilgili değişkeninin kesit alanını veya plastik moment kapasitesini; X_i, öğrenci bireyin ilgili kesitinin ağırlığını ve T_f, 1 ile 2 arasında rastgele bir sayı olmak üzere öğrenme faktörünü ifade etmektedir.

Yeni popülasyon için bireylerin her kesiti aşağıdaki denkleme göre hesaplanır.

$$X'_{i-i} = X_{i-i} + D_{m-i} \tag{2.22}$$

Yukarıdaki ifade, değişkenlere atanabilecek değerlerin sürekli olduğu optimizasyon problemlerinde doğrudan kullanılabilmektedir ancak değişkene atanabilecek değerlerin ayrık olması halinde burada belirlenen değere en yakın değerin seçilmesi makul görünmektedir. Bu bağlamda Bölüm 2.1.5'te açıklanan "EnYakinKesit" fonksiyonu bu sürecin gerçekleştirilmesi için kullanılır.

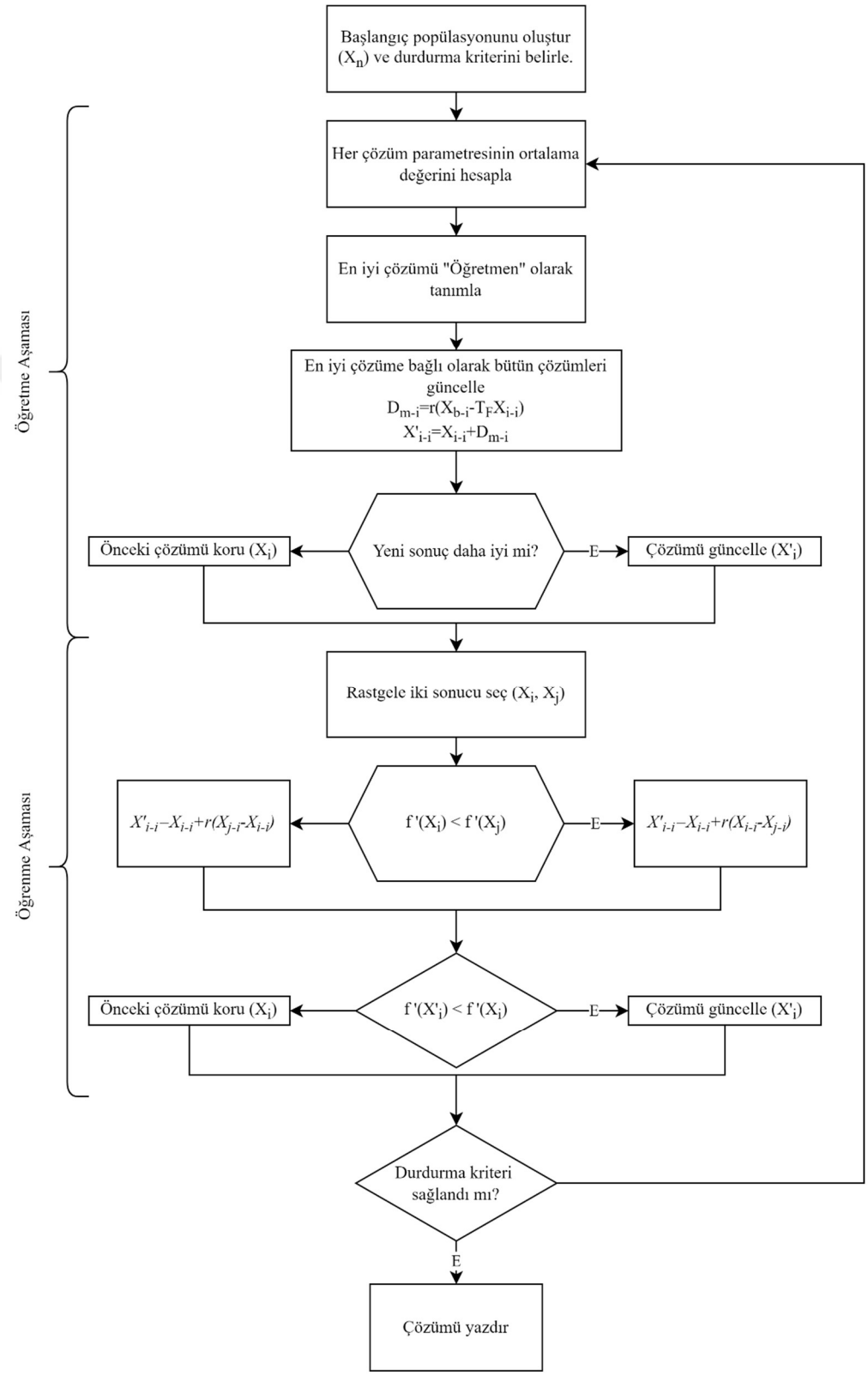
Öğretme aşamasında oluşturulan yeni bireyler için de amaç fonksiyonları ve sözde amaç fonksiyonları hesaplanır ve yeni bireylerin ilgili önceki bireyden daha düşük sözde amaç fonksiyonu değerine sahip olması halinde popülasyonda güncel hali (X'_i) yer alır. Aksi takdirde önceki birey (X_i) korunur. Ortaya çıkan yeni popülasyonla birlikte öğretme aşaması tamamlanmış olur.

Algoritmanın ikinci aşaması olan öğrenme aşamasında yeni popülasyondaki bireylerin kendi aralarında rastgele etkileşime girerek birbirlerini iyileştirmesi amaçlanır. Oluşturulacak popülasyondaki çeşitliliği mümkün olan en üst seviyede tutabilmek amacıyla her eşleşmenin diğerlerinden farklı olması sağlanır. Etkileşime giren her bireyin ilgili kesitine atanacak değeri belirlemek için aşağıdaki ifade esas alınarak yeni kesit değeri hesaplanır;

$$X'_{i-i} = \begin{cases} f'(X_i) < f'(X_j) & \Rightarrow \quad X_{i-i} + r(X_{i-i} - X_{j-i}) \\ f'(X_i) \geq f'(X_j) & \Rightarrow \quad X_{i-i} + r(X_{j-i} - X_{i-i}) \end{cases} \tag{2.23}$$

Ortaya çıkan yeni popülasyondaki bireyler için de amaç fonksiyonları ve sözde amaç fonksiyonları hesaplanmak üzere her çerçeve ilgili analizlere tabi tutulur. Öğretme aşamasında olduğu gibi bu aşamada da ortaya çıkan yeni bireyler eski bireylerle kıyaslanır. Önceki bireyin (X_i), ortaya çıkan yeni bireye (X'_i) kıyasla daha düşük sözde amaç fonksiyonu değerine sahip olması halinde önceki çözüm korunur. Aksi takdirde yeni çözüm popülasyonun yeni bireyi olarak kaydedilir. Bu adımla birlikte öğrenme fazı, dolayısıyla bir iterasyon tamamlanmış olur. Sonraki iterasyonlarda, öğrenme aşamasının sonunda ortaya çıkan popülasyon yeni bir öğrenci sınıfı olarak kabul edilir ve öğrenme aşamasına tekrar tâbi tutulur. Durdurma kriteri sağlanana kadar bu süreç tekrarlanır. Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması için durdurma kriteri olarak benimsenmiş farklı yaklaşımlar bulunmaktadır [93]. Bu çalışmada durdurma kriteri, belli bir iterasyon sayısı boyunca en iyi

sonucun değişmeyip, aynı kalması olarak kabul edilmiştir. Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritmasına ait akış şeması Şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.8. Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması akış şeması

2.6.1. Seçkin Jenerasyonlu Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon Algoritması

Önceki başlıkta belirtildiği üzere Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması üzerine ortaya konan birtakım eleştirilere rağmen, algoritma yapısal optimizasyon bağlamında da kayda değer ölçüde başarılı sonuçlar elde etmiştir. Bu çalışma kapsamında bu algoritmanın daha efektif sonuçlar üretebilmesi amacıyla algoritma akışı içerisinde belirli periyotlarla ortaya çıkmak üzere, seçkin birey hafıza mekanizması oluşturulmuştur. Buradaki amaç, bir sınıf içerisindeki eğitim sürecini simüle ederken bireylerin birbirini geliştirme potansiyeline güvenen algoritmanın bu felsefesini rekabet ortamı yaratarak desteklemeye çalışmaktır. Eğitim sürecinde sınıftaki bireylerin niteliği ne derece yüksek olursa bireylerin öğretme sürecinde daha iyi bir sonuca yaklaşma olasılığı ve öğrenme sürecinde etkileşime girerek daha nitelikli bireyler oluşturma ihtimallerinin o kadar artacağı düşünülmüştür.

Çalışma kapsamında Seçkin Jenerasyonlu Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon olarak adlandırılan bu geliştirilmiş algoritma, klasik algoritmadan farklı olarak, optimizasyon süresi boyunca hafızada tutulan bir seçkin öğrenci dizisi oluşturmaktadır. Algoritmanın başlangıcında, rastgele oluşturulan başlangıç popülasyonuyla birebir aynı olan bu birey grubu, ortaya çıkan her yeni popülasyondaki bireylerden, seçkin popülasyonda yer alanlardan iyi olanlarını seçkin popülasyona yerleştiren bir fonksiyonla birlikte güncellenmektedir. Seçkin popülasyona eklenen birey sayısı kadar birey ise her güncellemeyle seçkin popülasyondan çıkartılmaktadır. Burada bir sıralama fonksiyonu kullanılmakta ve sözde amaç fonksiyonu esas alınarak niteliği en düşük bireyler popülasyondan çıkartılmaktadır.

Belirli bir sayıda jenerasyonun tamamlanmasının ardından hafızada tutulan seçkin popülasyon, öğretme sürecinin başlangıcında kullanılacak popülasyonla yer değiştirmektedir. Bu noktada seçkin popülasyonun hâkim jenerasyon haline gelmesi için belirlenecek iterasyon sayısının önemli olduğu değerlendirilmiştir. Zira sıkça ortaya çıkacak seçkin jenerasyon, normal popülasyonun gelişmesinin önüne geçebilme potansiyeline sahiptir. Buna ters olarak seçkin popülasyonun hâkim jenerasyon yerine geçmesi çok seyrek gerçekleştiğinde ise yaklaşımın efektif sonuç verme ihtimalinin de azaldığı gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, çalışmada gerçekleştirilen optimizasyon süreçlerinde her 10 iterasyonda bir seçkin popülasyon, iterasyonun başlangıç popülasyonu yerine geçmektedir. İlgili süreçte bilgisayar zamanını boşa harcamamak için seçkin popülasyona giren bireylerin ilgili

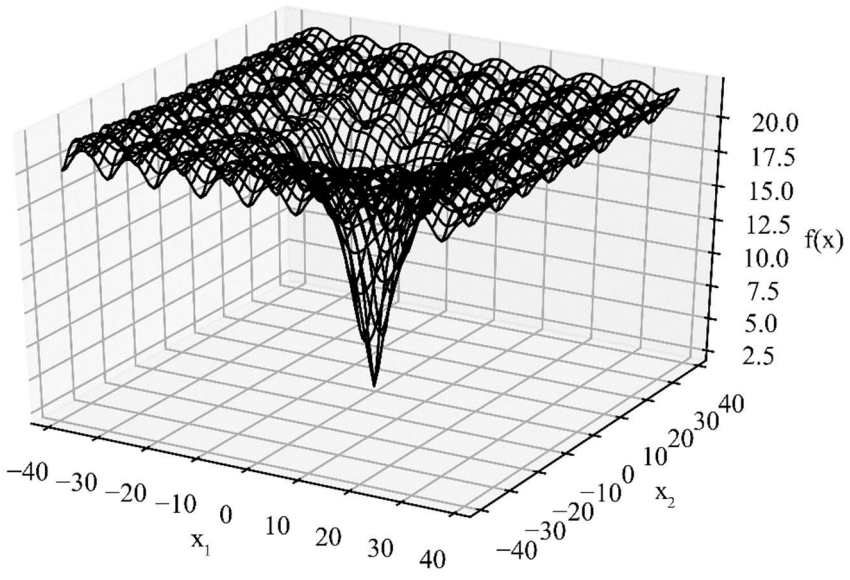
iterasyondaki analiz sonuçları da popülasyon hafızasında tutularak seçkin jenerasyonun devreye girdiği iterasyonda tekrar analiz edilmeden doğrudan öğretme süreci başlatılmıştır.

2.7. Ackley Fonksiyonunun Optimizasyonu

Çalışmadaki orijinal algoritmaların kalibrasyon kontrolü için literatürde yer alan [96] çok değişkenli Ackley Fonksiyonu farklı boyutlu değişkenlere çok kere optimizasyon sürecinde kullanılmıştır. Fonksiyona ait denklem aşağıdaki gibidir;

$$f(x_n) = -ae^{\left(-b\sqrt{\frac{1}{d}\sum_{i=1}^{d} x_i^2}\right)} - e^{\left(\frac{1}{d}\sum_{i=1}^{d}\cos(cx_i)\right)} + a + e^1 \tag{2.24}$$

Fonksiyon sabitleri için literatürde sıkça kullanılan değerler olan $a = 20, b = 0.2, c = 2\pi$ kullanılmıştır. Değişkenler için değer aralığı ise $x_i \in [-32.768, 32.768]$ şeklinde belirlenmiştir. Problemin boyutu ise $i = 1, \ldots, d$ olarak ifade edilmiştir. İlgili fonksiyonun iki değişkenli ($d = 2$) grafiği Şekil 2.9'da verilmiştir. Fonksiyonun global optimum değeri tüm boyut değerleri için 0'dır. Kullanılan fonksiyonun Python yazılım dili aracılığıyla 0.9 hassasiyet değeriyle çizdirilen grafiğinde de görülebileceği üzere çok sayıda lokal optimum bölgeye sahiptir. Bu nedenle çalışmadaki test fonksiyonu olarak kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 2.9. Ackley fonksiyonu

Çalışmada kullanılan orijinal algoritmalar $d = 2$, $d = 5$, $d = 10$ ve $d = 20$ olmak üzere 4 farklı boyut değeri ile optimum değer arama sürecine tabi tutulmuştur. Her bir boyut ve algoritma için algoritma 30'ar kez çalıştırılmıştır. Bu bağlamda tüm algoritmalara ait elde edilen ilgili değerler Tablo 2.1'de sunulmuştur. Yazılımda kullanılan ondalık değerler virgülden sonra 15 hane hassasiyete sahiptir.

Tablo 2.1. Farklı boyutlarda Ackley fonksiyonunun optimum değerleri

		Minimum	Maksimum	Ortalama	Std. Sapma
$d = 2$	TB	7.34E-03	1.48E-01	7.24E-02	3.83E-02
	ÖÖTO	4.44E-16	4.88E+00	4.56E-01	1.21E+00
$d = 5$	TB	1.38E-03	1.60E-01	5.48E-02	4.91E-02
	ÖÖTO	4.44E-16	3.58E-02	3.75E-03	7.89E-03
$d = 10$	TB	4.59E-03	1.39E-01	4.18E-02	2.91E-02
	ÖÖTO	4.00E-15	4.27E-03	2.26E-04	8.02E-04
$d = 20$	TB	2.23E-04	1.07E-01	2.58E-02	2.85E-02
	ÖÖTO	4.00E-15	1.67E+00	1.33E-01	4.06E-01

Elde edilen sonuçlardan görülebileceği üzere Tavlama Benzetimi algoritmasının özellikle yakınsama konusunda sürekli değişken değerlerine sahip bir problemde sorun yaşadığı görünmektedir. Ancak problem boyutunun büyümesi halinde dahi lokal optimumlara takılmadığı görülmektedir. Ortalama değerler bakımından ise boyut değişiminin algoritmayı önemli ölçüde etkilemediği görülmektedir. Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması ise ondalık değer hassasiyeti göz önüne alındığında global optimuma her dört boyutta da yakınsamayı başarmıştır. Ancak iki boyutlu problemde 4 kez, 20 boyutlu problemde 3 kez lokal optimuma takılmıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde Tavlama Benzetimi algoritmasının global optimumun etrafında her seferinde dolaştığı fakat algoritmanın bir yakınsama mekanizması barındırmaması sebebiyle yakınsamada problem yaşadığı görülmektedir. Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritmasının yakınsama mekanizmasının ise oldukça efektif şekilde çalıştığı ancak popülasyonun bir lokal optimum etrafında toplanması halinde buradan çıkmasını sağlayacak bir iç mekanizma barındırmaması algoritma açısından handikap oluşturabilmektedir. Bu çalışmada incelenen yapısal optimizasyon problemlerindeki değişkenlerin ayrık değerlere sahip olması da göz önünde bulundurularak ilgili algoritmaların dezavantajları üzerinde iyileştirmelere gidilmeye çalışılmıştır.

2.8. 2 Boyutlu Çelik Çerçeve Modelinin Optimum Boyutlandırılması

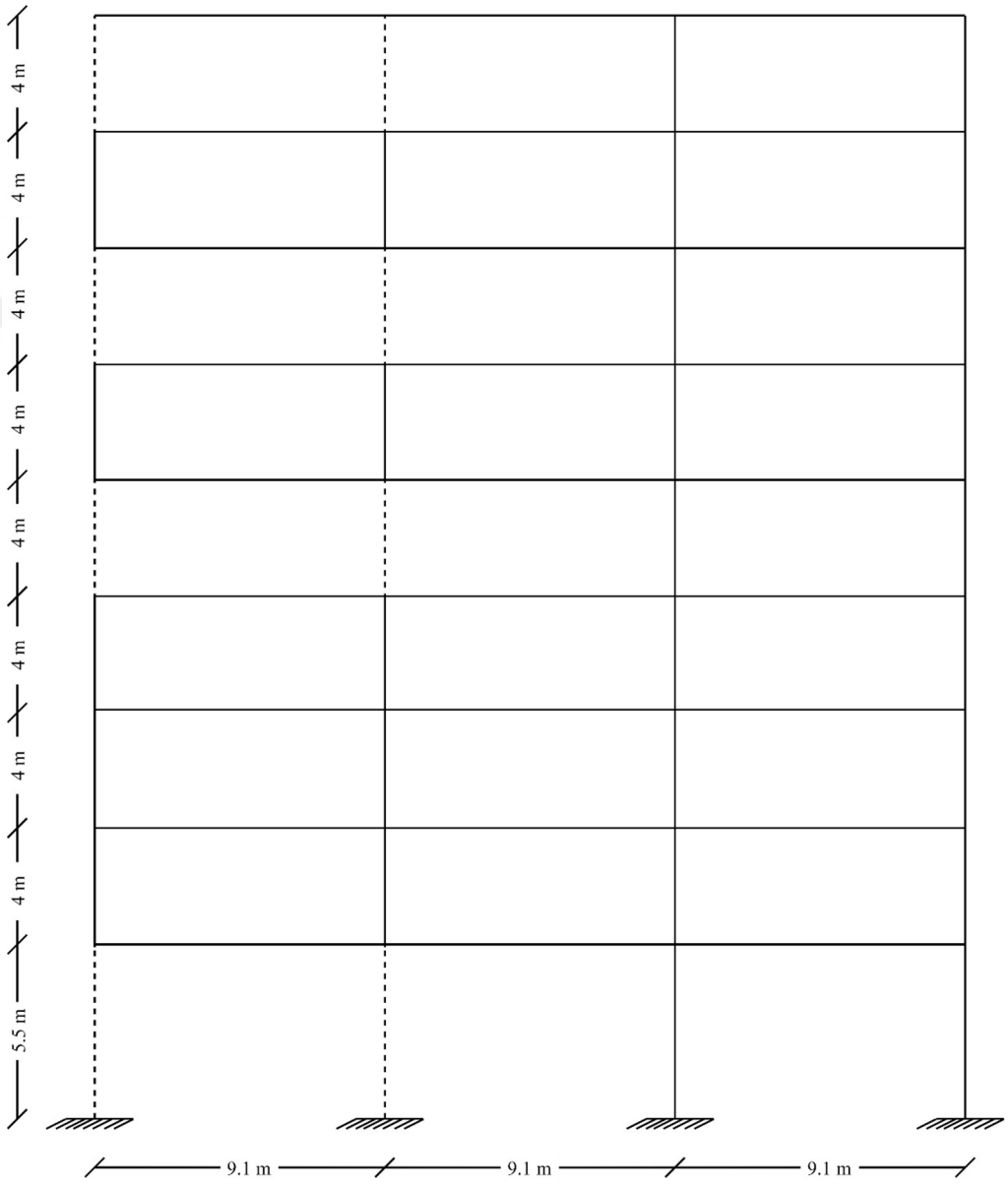
Daha önce belirtildiği üzere çelik yapıların aşamalı göçmeye karşı optimum boyutlandırılması bağlamında literatürde yer alan çalışmalar son derece kısıtlıdır [5]. Çalışmada kullanılan ve geliştirilen algoritmaları test etmek amacıyla optimum boyutlandırma süreci için yapısal model olarak literatürde bu bağlamda yer alan bir düzlem çerçeve kullanılmıştır. UFC'ye göre bir yapının doğrusal olmayan dinamik prosedürle aşamalı göçme analizi için iki boyutlu modelinin kullanılmasına izin verilmemektedir. Ancak kısıtlı literatür sebebiyle aşamalı göçmeye karşı çelik bir yapının optimum boyutlandırılmasını inceleyen örnek [33] bu çalışma kapsamında da kullanılan algoritmalarca optimum boyutlandırma sürecine tabi tutulmuştur. Ardından aynı düzlem çerçevenin üç boyutlu modeli de optimizasyon sürecine tabi tutulacaktır. İlgili düzlem çerçeve modelin geometrisine ait bilgiler, Şekil 2.10'da sunulmuştur. Modeldeki kolon ve kirişler her biri optimizasyon probleminin birer değişkeni olmak üzere 8 ayrı grup olarak tanımlanmıştır. Çerçevedeki taşıyıcı elemanların üyesi olduğu gruplara ait bilgiler Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. İki boyutlu modeldeki yapısal elemanların grupları

	1-3. Kat	4-5. Kat	6-7. Kat	8-9. Kat
Kolonlar	1	2	3	4
Kirişler	5	6	7	8

Yine literatürde yer alan örnekle tutarlı olmak adına çerçevedeki kaldırma senaryolarında bir değişiklik yapılmadan sekiz farklı kaldırma senaryosu oluşturulmuştur. Çerçevenin simetrisinden faydalanılarak; birinci, beşinci, yedinci ve dokuzuncu katlardaki köşe ve orta kolonlar kaldırma senaryolarını oluşturmak üzere seçilmiştir. İlgili kaldırma senaryolarını temsil eden kolonlar Şekil 2.10'da kesikli çizgiyle belirtilmiştir. 9 kat 3 açıklıklı, zemine ankastre olarak bağlanmış çerçeveye etkiyen yükler Tablo 2.3'te verilmiştir. Ek olarak sismik yüklerin rüzgâr yüküne baskın olduğu kabul edilerek katlara dağıtılmak üzere 650 kN taban tasarım kesme kuvveti tanımlanmıştır. Çerçevenin optimum boyutlandırılması için geometrik sınırlayıcılara yer verilmemiştir. Kolon ve kirişlerin tümünde I Profil kesitler kullanılmaktadır. Kolon kesitleri için yalnızca başlıklar arası net

uzaklığı 18 inç (0.46 m) olan kesitlerin kullanılmasına müsaade edilmiştir. Bu kesitler, ilgili veri tabanındaki [99] W18x__ ön adıyla başlayan kesitleri temsil etmektedir. Kirişlerin seçimi için ise herhangi bir boyut kısıtlaması bulunmamaktadır. Çerçevedeki kolon kiriş birleşimleri moment aktarabilen birleşimler olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2.10. Üç açıklıklı dokuz katlı düzlem çerçeve planı [33]

Çerçeve elemanları için 1.10 büyütme katsayısıyla, malzeme özellikleri olarak 345 MPa akma dayanımı 450 MPa nihai çekme dayanımı değerine sahip ASTM A992 [100] tipi yapısal çelik kullanılmıştır. Tasarım parametreleri, detayları ASCE 7'ye [4] göre

belirlenmek üzere; C Sismik Dizayn Kategorisi, $S_{DS} = 0.232$, Orta Sismik Seviyesi ve azaltma katsayısı (ρ) 1 olarak tanımlanmıştır.

Tablo 2.3. İki boyutlu modelde çerçeveye etkiyen yükler

Yük	Kaynak	Ara katlar	Çatı
Ölü yükler	Döşeme	3.83 kPa	2.87 kPa
	Kaplama	0.96 kPa	0.97 kPa
	Çerçeve Ağırlığı	-	-
Hareketli yük	Hareketli yük	2.39 kPa	
	Bölme yükü	0.96 kPa	0.96 kPa
Kar yükü			1.44 kPa

Doğrusal olmayan dinamik analizler için sönüm oranı %5 olarak belirlenmiştir. Çerçevenin aşamalı göçmeye karşı tasarımı için oluşturulan kaldırma senaryolarında SAP2000 yazılımında öncelikle bir doğrusal olmayan statik analiz oluşturulur. Oluşturulan bu yükleme çerçevenin dinamik analizden önce denge durumundayken maruz kalacağı yükler içindir. Daha sonra bu model özelinde her bir kaldırma senaryosu için birer tane olmak üzere, zaman tanım alanında yapıyı dinamik olarak sınayacak yükleme oluşturulur. Bu analiz, sıfır başlangıç koşullarıyla değil, daha önce oluşturulan doğrusal olmayan statik yüklemenin nihai durumu üzerine başlatılır. UFC'ye göre bir yapının aşamalı göçmeye karşı güvenliğinin tetkikini kabul edilebilir ölçüde gerçekleştirmek için, ilgili kaldırma senaryosu kapsamında sistemden çıkartılan kolonun üst noktasındaki birleşim noktasının bir tam çevrim yapması veya ilgili birleşim noktasının maksimum deplasmanının ortaya çıkması yeterlidir. Gerçekleştirilecek analizlerdeki zaman adımı değerinin belirlenmesi de analizin isabetli sonuçlar üretebilmesi noktasında önem taşımaktadır. Bu bakımdan zaman tanım alanında gerçekleştirilecek analizler için zaman adımı büyüklüğü 0.005 saniye olarak belirlenmiştir. Bu adım büyüklüğüne bağlı olarak toplam adım sayısı ise 600 olarak belirlenmiştir.

2.8.1. Genel Değerlendirme

Çalışma kapsamında incelenen ilk örnek olan düzlem çelik çerçevenin tasarımı için literatürde yer alan birisi tepe tırmanma, birisi popülasyon temelli olarak sınıflandırılan iki

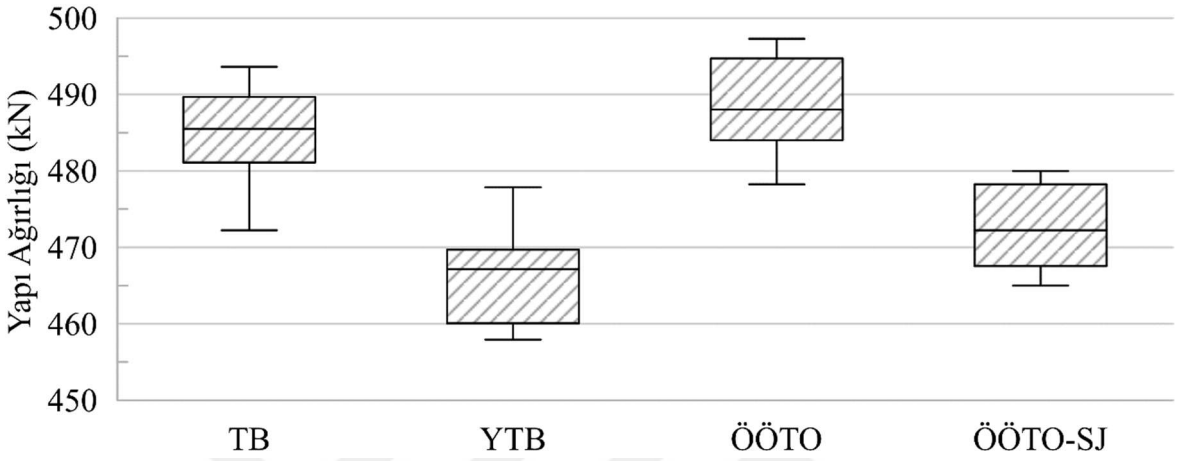
algoritma kullanılmıştır. Ayrıca bu iki algoritmanın yine çalışma kapsamında birtakım değişikliklere tabi tutulmuş birer farklı versiyonları da olmak üzere toplamda 4 farklı optimizasyon algoritması incelenmiştir. Aynı düzlem çerçeve daha önce Genetik Algoritma kullanılarak Liu [33] tarafından optimum boyutlandırma sürecine tabi tutulmuştur. Bu çalışma kapsamında ise Tavlama Benzetimi (TB), Yönlendirilmiş Tavlamam Benzetimi (YTB), Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon (ÖÖTO) ve Seçkin Jenerasyonlu Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon (SJ-ÖÖTO) algoritmaları kullanılmıştır. Çalışma kapsamında düzlem çerçeve örneği için elde edilen optimum çerçevelere ait bilgiler Tablo 2.4'te sunulmuştur. Algoritmaların ürettikleri sonuçların tutarlılığını da sınayabilmek amacıyla her birisi 5'er kez çalıştırılmıştır. Literatürde yer alan örnek de dahil olmak üzere en hafif çerçeve ağırlığı 457.94 kN olmak üzere Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi algoritmasıyla elde edilmiştir. Bu algoritmayı takiben en hafif çerçeve ağırlıkları sırasıyla; 1.5% daha ağır olmak üzere Seçkin Jenerasyonlu Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritmasıyla, 3.1% daha ağır olmak üzere Tavlama Benzetimi algoritmasıyla ve 4.4% daha ağır olmak üzere Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritmasıyla elde edilmiştir. Aynı sıralama algoritmaların elde ettiği ortalama optimum ağırlıklar için de geçerliliğini korumaktadır. Buna ek olarak tüm algoritmalar yakın standart sapma değerleriyle sonuçlar üretmiştir.

Tablo 2.4. İki Boyutlu model için tüm algoritmalara ait optimum boyut bilgileri

		1.-3. Katlar	4.-5. Katlar	6.-7. Katlar	8.-9. Katlar	En iyi ağırlık (kN)	Ort. ± Std. (kN)
GA [33]	Kolonlar	W18x158	W18x106	W18x76	W18x50	476.80	
	Kirişler	W24x76	W24x76	W24x55	W24x62		
TB	Kolonlar	W18x143	W18x97	W18x106	W18x86	472.24	484.43 ± 8.26
	Kirişler	W24x68	W24x55	W21x50	W24x76		
YTB	Kolonlar	W18x143	W18x97	W18x97	W18x71	457.94	466.54 ± 7.97
	Kirişler	W24x62	W21x57	W16x67	W24x62		
ÖÖTO	Kolonlar	W18x143	W18x97	W18x119	W18x86	478.25	488.46 ± 7.77
	Kirişler	W24x68	W24x55	W21x50	W24x76		
SJ-ÖÖTO	Kolonlar	W18x143	W18x86	W18x106	W18x71	465.02	472.6 ± 6.51
	Kirişler	W24x62	W24x55	W21x48	W21x93		

Algoritmaların ürettiği değerlerin medyan ve çeyrek dağılım değerleri Şekil 2.11'de verilmiştir. Görülebileceği üzere Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi algoritması en hafif yapı ağırlığını elde etmiş olmanın yanında, diğer optimizasyon süreçlerinde elde ettiği

sonuçlarda da dağılım olarak daha hafif tarafta yığılmıştır. Ancak Tavlama Benzetimi algoritması ile elde edilen sonuçlar dağılım olarak ağır tarafta yığılmaktadır. Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon ve Seçkin Jenerasyonlu Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritmalarıyla üretilen sonuçlar ise daha dengeli bir dağılım sergilemiştir.

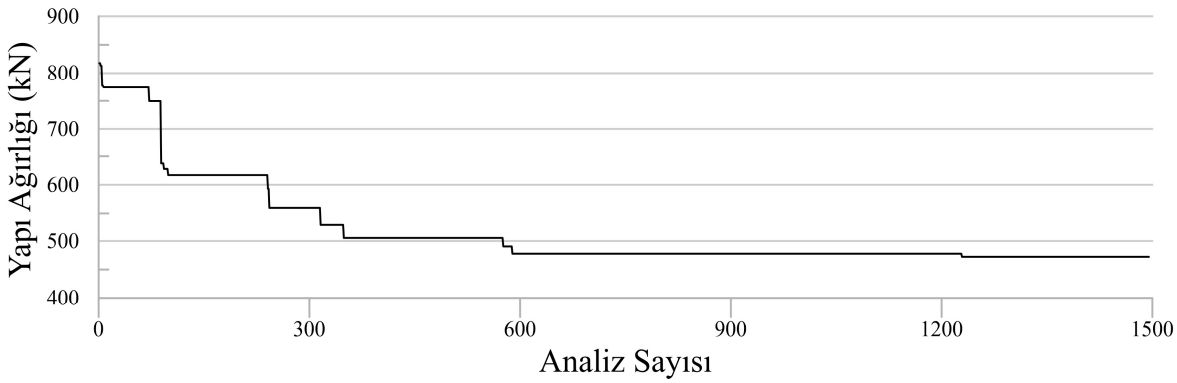


Şekil 2.11. İki Boyutlu model için tüm algoritmalara ait optimum ağırlıkların medyan ve çeyrek dağılım değerleri

2.8.2. Tavlama Benzetimi Algoritması

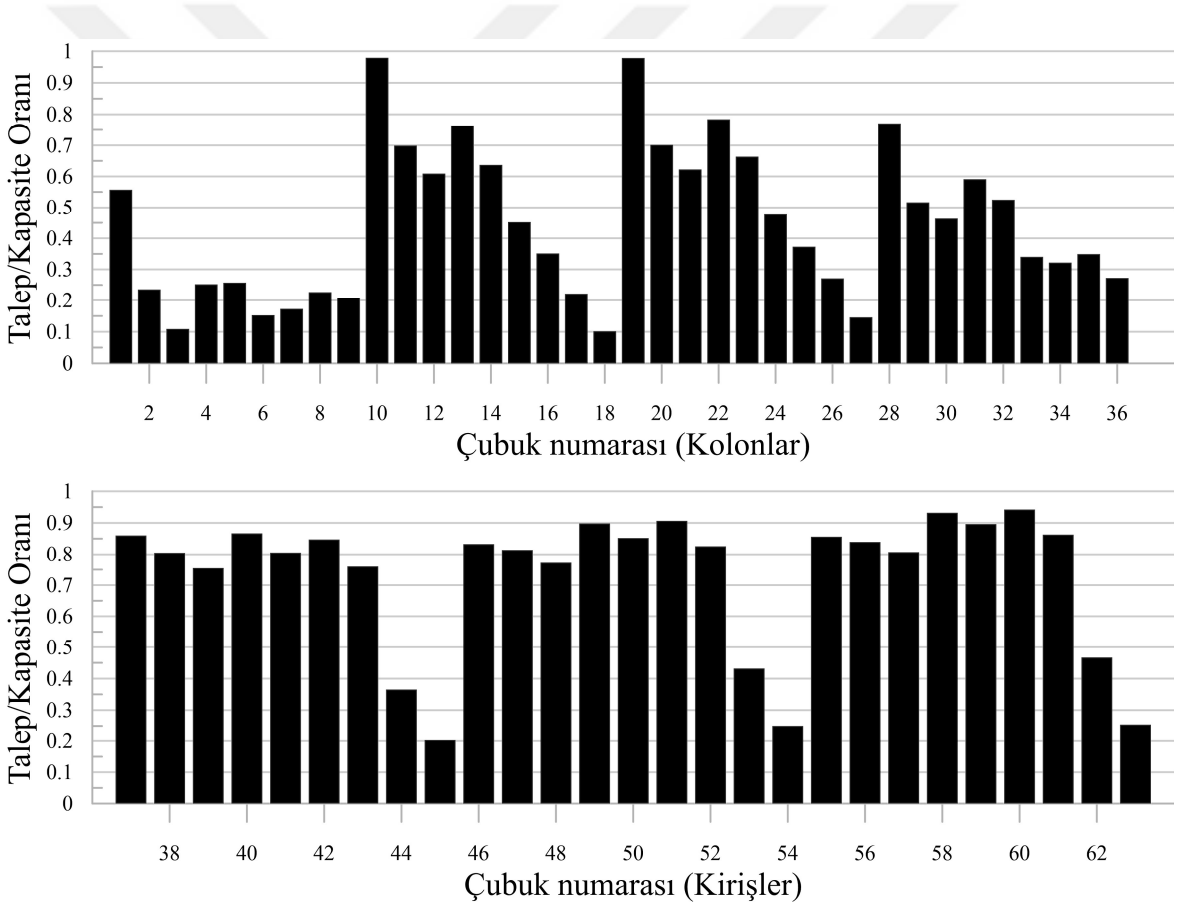
Çalışma kapsamında incelenen 4 algoritma arasında üçüncü en hafif çerçeve ağırlığını üreten Tavlama Benzetimi algoritmasının en hafif çerçeve ağırlığını ürettiği optimizasyon sürecine ait ağırlık değişimi Şekil 2.12'de sunulmuştur. Algoritmanın kontrol parametre değerleri aşağıdaki gibidir;

$$t_i = 400℃ \quad t_s = 200℃ \quad t_\Delta = 0.5℃ \tag{2.25}$$

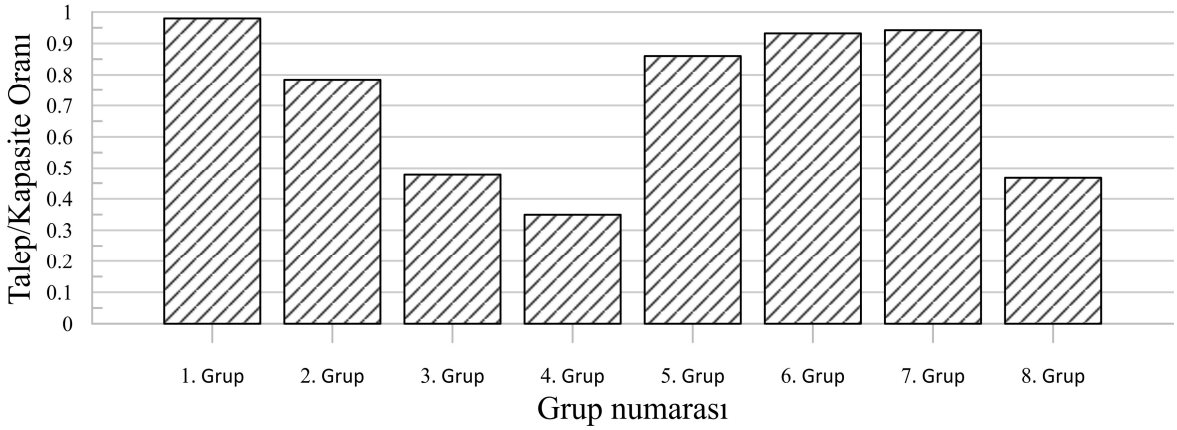


Şekil 2.12. En iyi çözüme ait ağırlık değişimi (TB)

63 elemanlı düzlem çerçeve için bu algoritmayla elde edilen en hafif çerçevenin kolon ve kirişlerinin kesitlerine ait talep kapasite oranları Şekil 2.13'te sunulmuştur. Ayrıca her kesit grubunun en yüksek talep kapasite oranı da Şekil 2.14'te verilmiştir. Görülebileceği üzere 5., 6. ve 7. kiriş grubu ile 1. kolon grubunda talep kapasite oranları sınıra oldukça yakın değerlere sahiptir. Bu bağlamda ilgili gruplara üye kesitlerin tasarımında sismik sınırlayıcıların davranışı kontrol ettiği söylenebilir. Ancak geriye kalan kesit gruplarının talep kapasite oranları oldukça düşük değerlere sahip olmasına rağmen algoritmanın bu gruplarda daha hafif kesit ağırlıkları seçemediği görülmüştür. Dolayısıyla bu kesitlerde davranışı, aşamalı göçmeye karşı tasarım sınırlayıcılarının kontrol ettiği düşünülmüştür.



Şekil 2.13. En iyi çözüme ait talep kapasite oranları (TB)

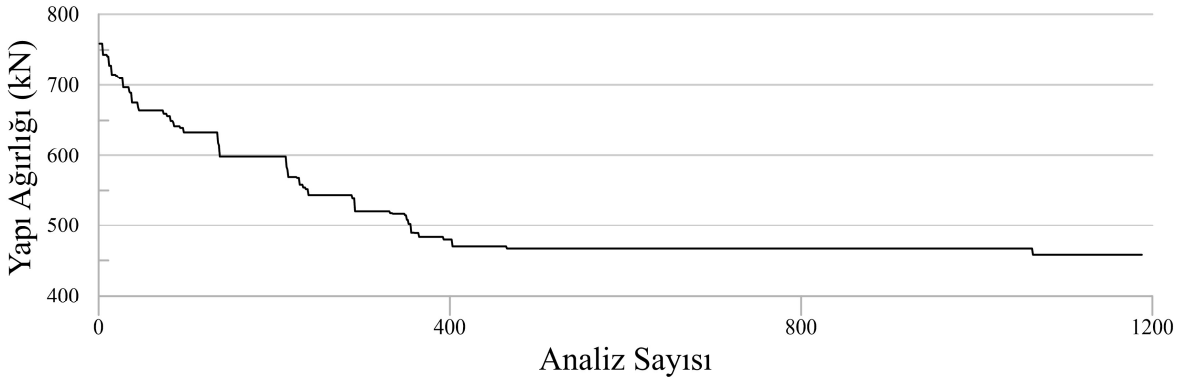


Şekil 2.14. Gruba ait en büyük talep kapasite oranları (TB)

2.8.3. Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi Algoritması

Kullanılan 4 algoritma arasında en hafif yapı ağırlığını elde eden Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi algoritmasının en hafif çerçeve ağırlığını ürettiği optimizasyon sürecine ait ağırlık değişimi Şekil 2.15'te sunulmuştur. Süreç boyunca çerçevenin ağırlık değişimi incelendiğinde klasik Tavlama Benzetimi algoritmasına kıyasla daha istikrarlı bir gelişme sıklığı olduğu görülebilmektedir. Öngörüldüğü üzere, ani ve büyük düşüşlerden ziyade sık ve istikrarlı bir ağırlık düşüşü sağlanabilmiştir. Algoritmanın kontrol parametreleri aşağıda verildiği gibidir;

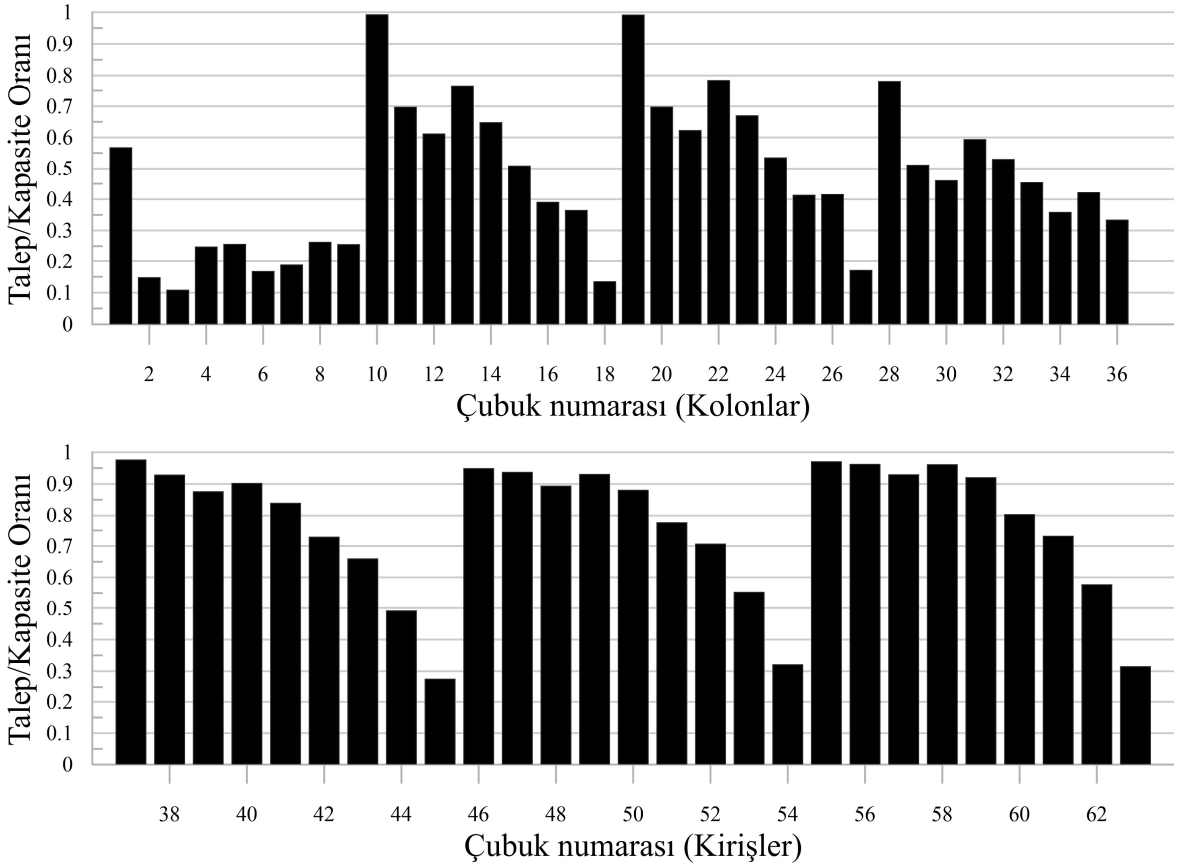
$$t_i = 400℃ \quad t_s = 200℃ \quad t_\Delta = 0.5℃ \tag{2.26}$$



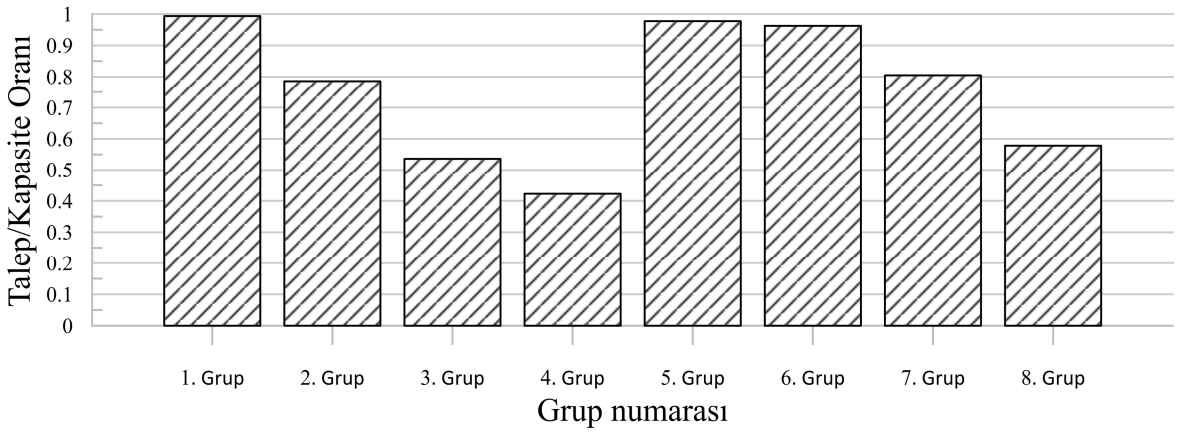
Şekil 2.15. En iyi çözüme ait ağırlık değişimi (YTB)

Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi ile elde edilen en hafif çerçevenin kolon ve kiriş kesitlerine ait talep kapasite oranları Şekil 2.16'da sunulmuştur. Ayrıca her kesit grubunun

en yüksek talep kapasite oranı da Şekil 2.17'de verilmiştir. Tavlama Benzetimi algoritmasıyla elde edilen çerçeveye kıyasla benzer talep kapasite oranları üretilmiş olsa da 7. ve 8. grup kirişleriyle daha güçlü bir kafes oluşturarak alt katlardaki kesitlerdeki gerilmeleri azalttığı görülmektedir. Genel anlamda ortaya çıkan tasarımın daha hafif olmasına rağmen seçilen kesitlerin aşamalı göçmeye karşı gösterdiği direnç, sismik sınırlayıcıların sınıra daha yakın değerler gösterebilmesini sağlamıştır.



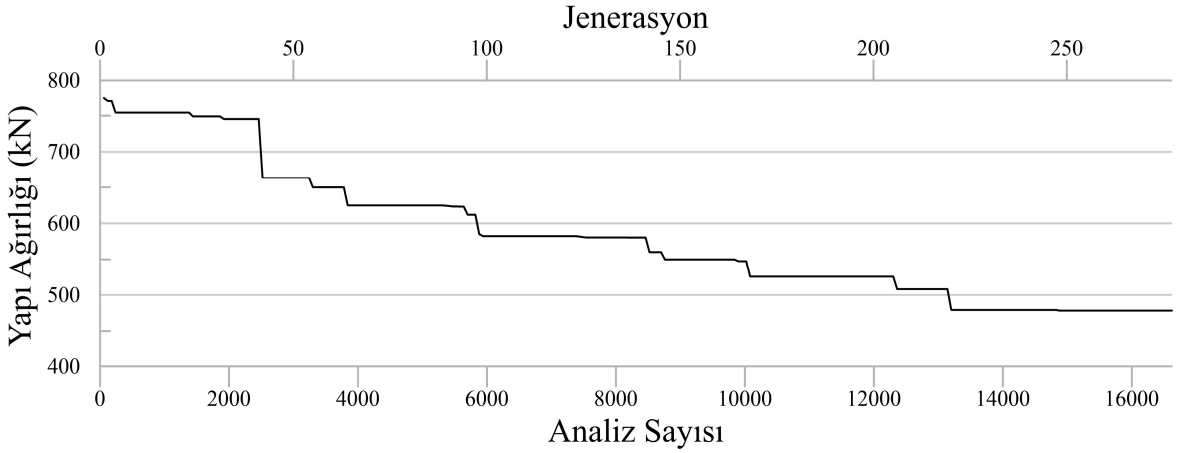
Şekil 2.16. En iyi çözüme ait talep kapasite oranları (YTB)



Şekil 2.17. Gruba ait en büyük talep kapasite oranları (YTB)

2.8.4. Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon Algoritması

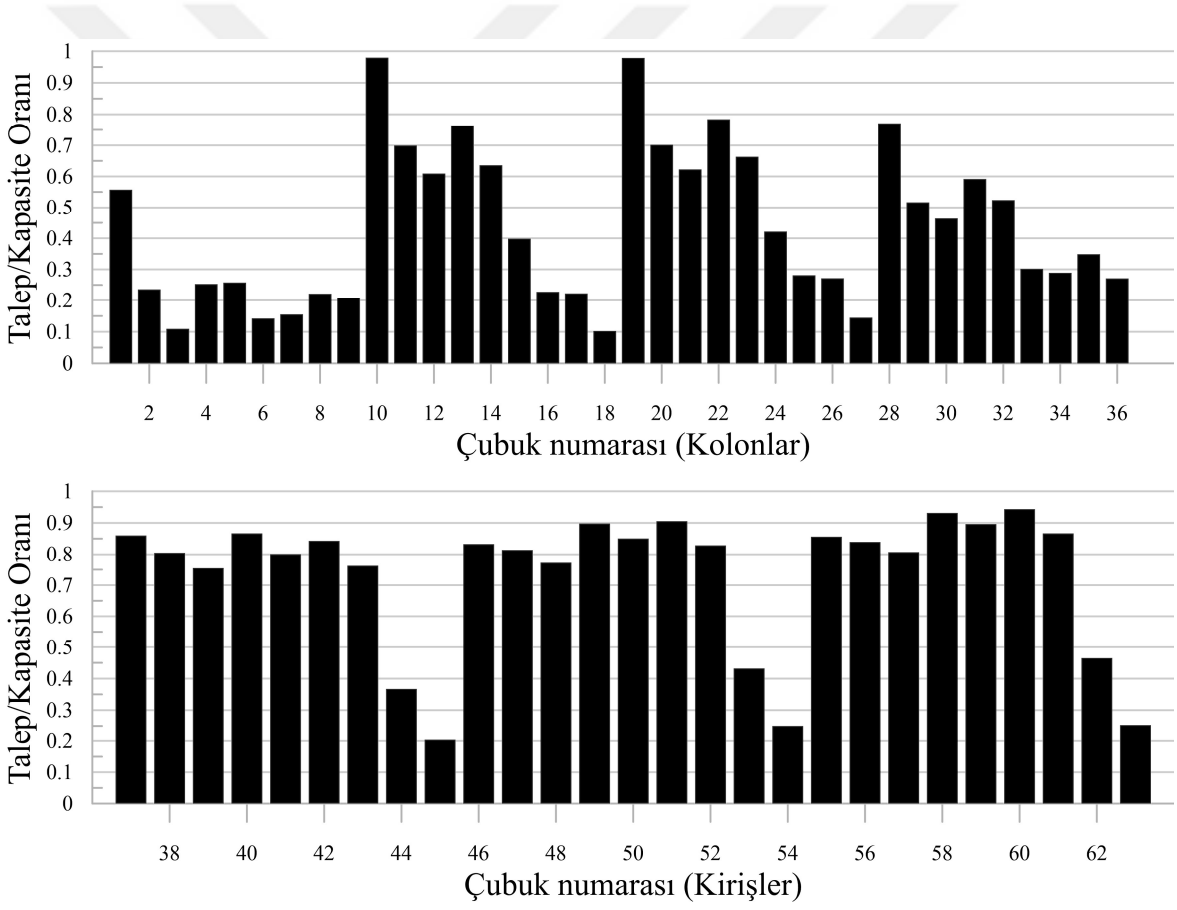
Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması, literatürde yer alan örnek de dahil olmak üzere en ağır çerçeve ağırlığını oluşturmuştur. İlgili algoritma popülasyon temelli bir algoritma olduğundan, kıyaslanabilir olabilmesi için optimizasyon süreci boyunca en hafif çerçeve ağırlığı değişimi Şekil 2.18'de jenerasyon ve analiz sayısına bağlı olarak sunulmuştur. Bu algoritmada popülasyon boyutu denemeler sonucunda 20 olarak belirlenmiştir. Algoritmanın durdurma kriteri ise 30 jenerasyon boyunca çerçeve ağırlığında değişim görülmemesi olarak belirlenmiştir.



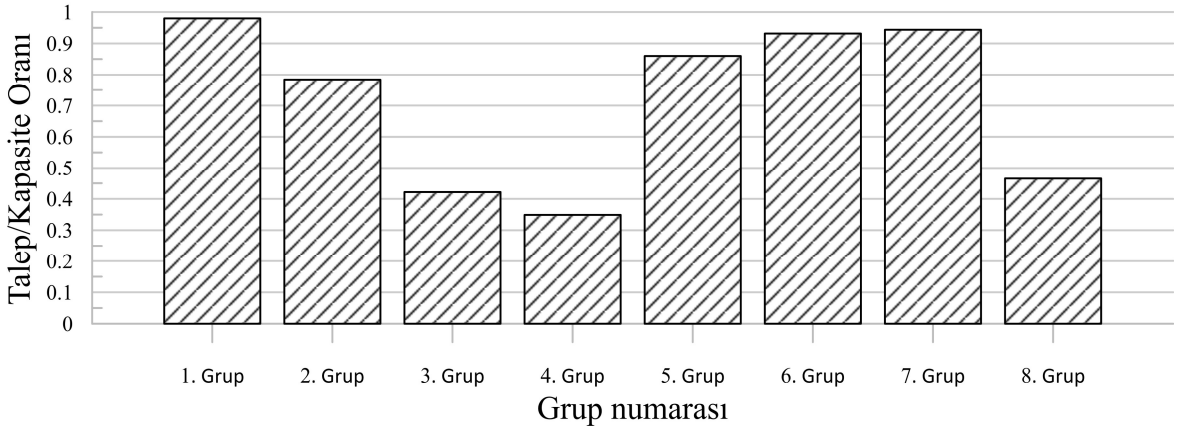
Şekil 2.18. En iyi çözüme ait ağırlık değişimi (ÖÖTO)

Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması kullanılarak elde edilen en hafif çerçevenin kesitlerine ait talep kapasite oranları Şekil 2.19'da verilmiştir. Bu değerlere bağlı

olarak her gruptaki en yüksek talep kapasite oranına ait değerler ise Şekil 2.20'de sunulmuştur. Görülebileceği üzere bu algoritmayla elde edilen en hafif çerçeve tasarımı, Tavlama Benzetimi algoritmasıyla elde edilen çerçeve tasarımıyla büyük ölçüde benzeşmektedir. Ancak spesifik bazı kesitlerde algoritmanın çerçeveyi optimum çözüme yaklaştıramadığı görülmüştür. Ortaya çıkan tasarımın talep kapasite oranları incelendiğinde, 1. kolon grubu ile 5., 6. ve 7. kiriş grubunun sınır değerlere oldukça yaklaştığı görülmektedir. Bu açıdan ilgili kesit grupları için tasarımı kontrol eden sınırlayıcının sismik sınırlayıcılar olduğu söylenebilir. Bu grupların dışında kalan kesitlerin önemli bir kısmında kayda değer ölçüde düşük talep kapasite oranları gözlenmektedir. Dolayısıyla bu kesitlerde ise tasarımı kontrol eden sınırlayıcıların daha ziyade aşamalı göçme sınırlayıcıları olduğu görülmektedir.



Şekil 2.19. En iyi çözüme ait talep kapasite oranları (ÖÖTO)

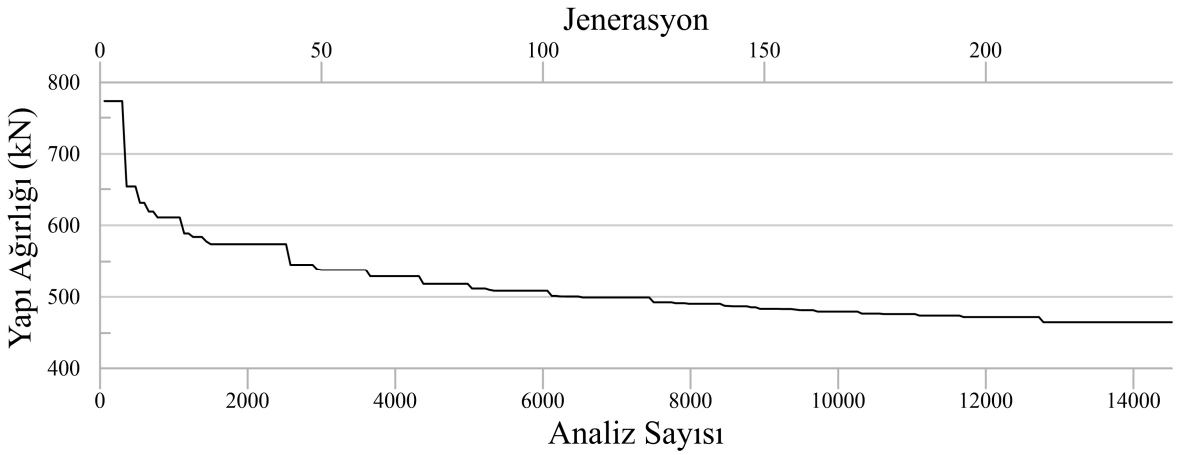


Şekil 2.20. Gruba ait en büyük talep kapasite oranları (ÖÖTO)

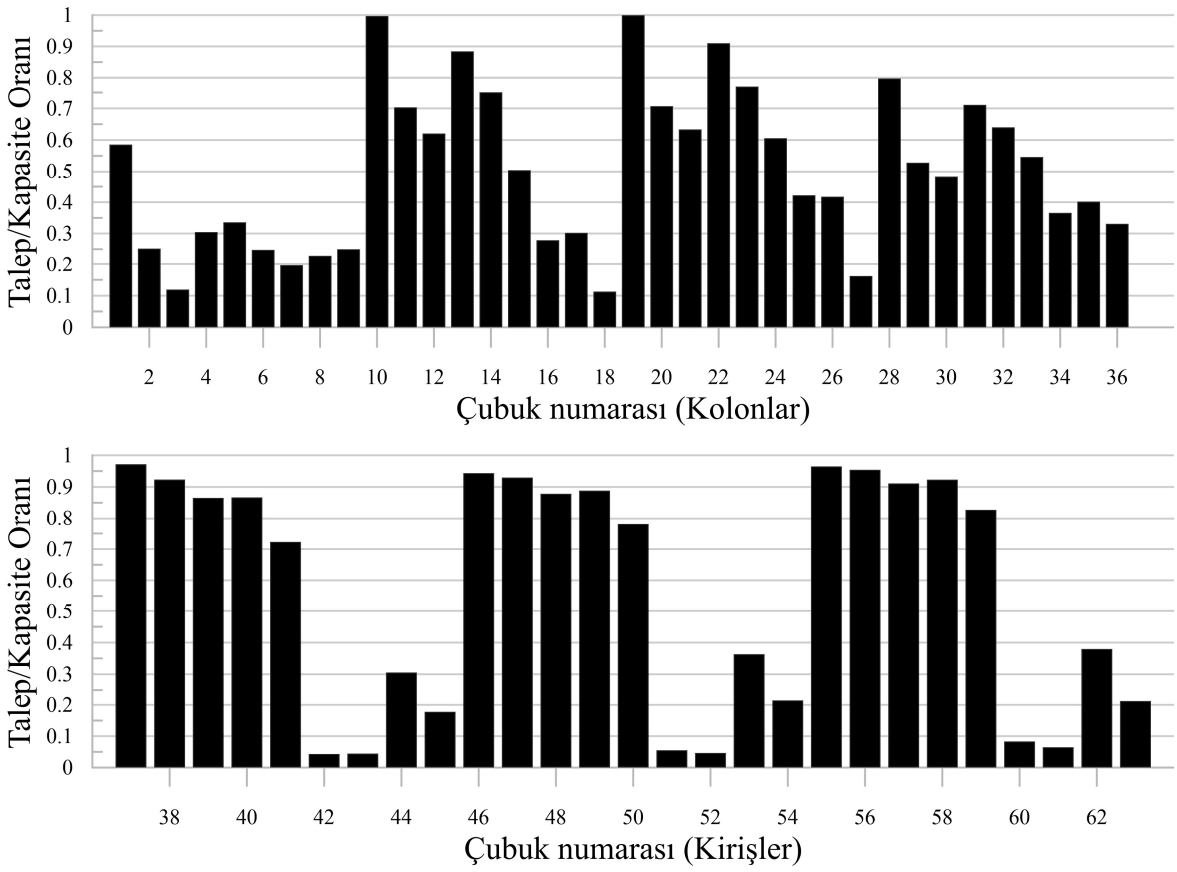
2.8.5. Seçkin Jenerasyonlu Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon Algoritması

Bu çalışma kapsamında geliştirilen Seçkin Jenerasyonlu Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması kullanılan algoritmalar arasında ikinci en hafif çerçeve ağırlığını elde etmiştir. İlgili sürece ait çerçevenin ağırlık değişimi Şekil 2.21'de verilmiştir. Algoritmada seçkin jenerasyon 10 jenerasyonda bir ortaya çıkarak hakim jenerasyon haline gelmektedir. Ağırlık değişiminden görülebileceği orijinal algoritmaya kıyasla ağırlık düşüşü çok daha sık ortaya çıkmaktadır. Özellikle seçkin jenerasyon yaklaşımının karşılığı olarak, 10 ve katlarına denk gelen jenerasyonlarda çerçeve tasarımındaki ağırlık düşüşleri gözlemlenebilmektedir. Algoritmanın kontrol parametreleri olarak, orijinal algoritmayla tutarlı olarak popülasyon genişliği 20 birey, durdurma kriteri Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritmasında olduğu gibi 30 jenerasyon boyunca çerçeve ağırlığının değişmemesi olarak belirlenmiştir.

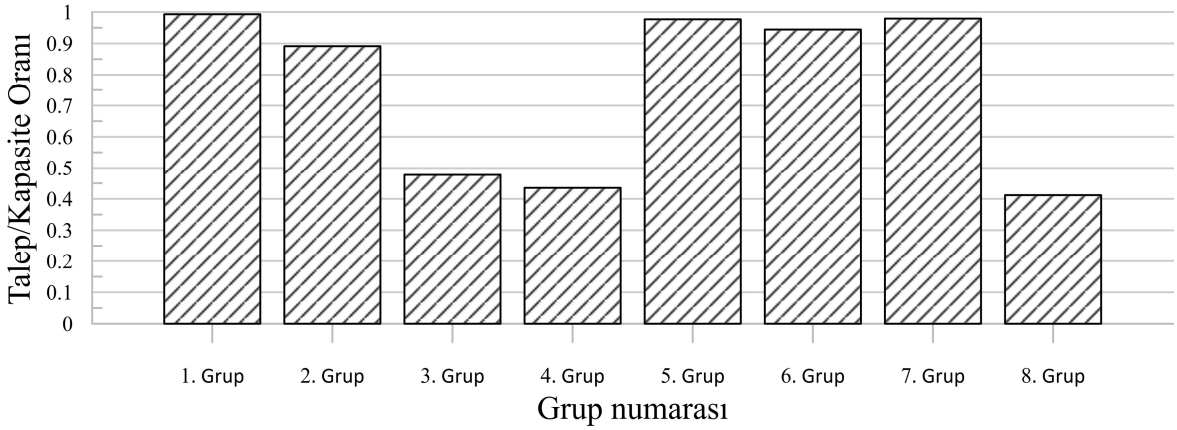
Seçkin Jenerasyonlu Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması kullanılarak elde edilen en hafif çerçeve ağırlığına ait tasarımın talep kapasite oranları Şekil 2.22'de sunulmuştur. Her bir gruba ait taşıyıcı elemanların ortaya çıkardığı en yüksek talep kapasite oranları ise Şekil 2.23'te verilmiştir. Görülebileceği üzere 1. ve 2. kolon grupları ile 5., 6., ve 7. kiriş grupları talep kapasite oranı bakımından sınıra oldukça yakın bir değere sahiptir. Bu bakımdan tasarımın bu gruplar bazında sismik sınırlayıcılar tarafından kontrol edildiği görülmektedir. Bu gruplar dışında kalan kesitler içinse tasarımın aşamalı göçme sınırlayıcıları tarafından kontrol edildiği söylenebilir.



Şekil 2.21. En iyi çözüme ait ağırlık değişimi (SJ-ÖÖTO)



Şekil 2.22. En iyi çözüme ait talep kapasite oranları (SJ-ÖÖTO)



Şekil 2.23. Gruba ait en büyük talep kapasite oranları (SJ-ÖÖTO)

2.9. 3 Boyutlu Çelik Çerçeve Modelinin Optimum Boyutlandırılması

Bir çelik yapının aşamalı göçme açısından UFC'ye göre alternatif yol metoduna göre analizinin gerçekleştirebilmesi için üç boyutlu modelinin kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle literatürde yer alan düzlem çerçeve modelinin üç boyutlu hali de bu çalışma kapsamında incelenen algoritmalarla aşamalı göçmeye karşı optimum boyutlandırma sürecine tabi tutulmuştur. Oluşturulan çelik çerçeve modeline ait bilgiler Şekil 2.24'te verilmiştir. Yapıdaki taşıyıcı elemanların optimizasyon amacıyla 4 kiriş grubu ve 4 kolon grubu olmak üzere 8 gruba ayrılmıştır. Katlara bağlı olarak taşıyıcı eleman gruplandırmaları Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5. Üç boyutlu modeldeki yapısal elemanların grupları

	1-3. Kat	4-5. Kat	6-7. Kat	8-9. Kat
Kolonlar	1	2	3	4
Kirişler	5	6	7	8

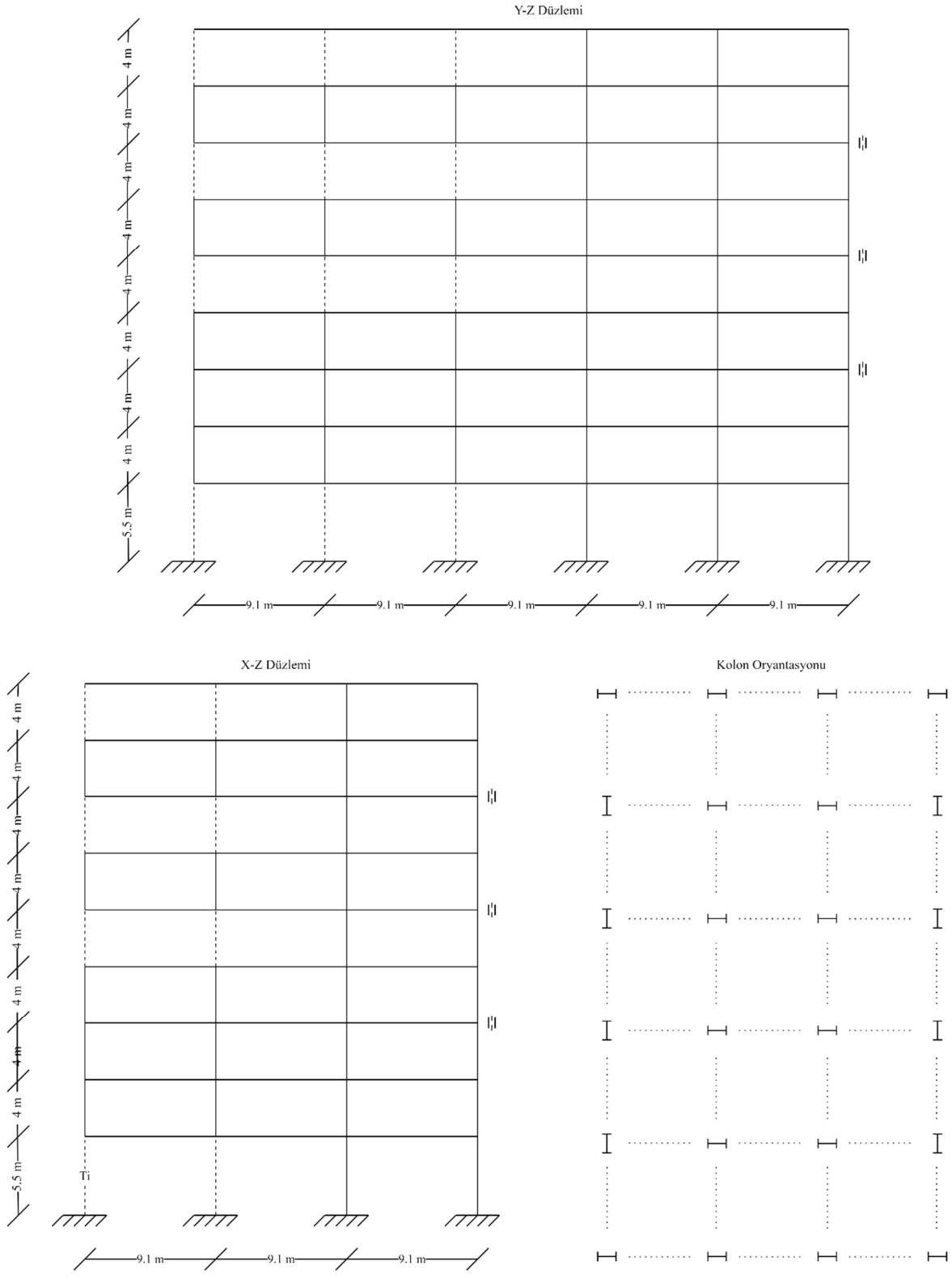
Bu modelde düzlem çerçeve modelinde kullanılan 8 kaldırma senaryosuna ek olarak 8 kaldırma senaryosu daha oluşturulmuştur. Çerçevenin simetrisinden faydalanılarak; birinci, beşinci, yedinci ve dokuzuncu katlardaki köşe ve orta kolonlar kaldırma senaryolarını oluşturmak üzere seçilmiştir. İlgili kaldırma senaryolarını temsil eden kolonlar Şekil 2.24'te kesikli çizgiyle belirtilmiştir. X düzleminde 3 açıklıklı, Y düzleminde 5 açıklıklı ve 9 katlı model zemine ankastre olarak bağlanmış ve çerçeveye etkiyen yükler Tablo 2.6'da verilmiştir. Ek olarak sismik yüklerin rüzgâr yüküne baskın olduğu kabul edilmiştir. Çerçevenin optimum boyutlandırılması için geometrik sınırlayıcılara yer verilmemiştir.

Kolon ve kirişlerin tümünde I Profil kesitler kullanılmaktadır. Kolon kesitleri için yalnızca başlıklar arası net uzaklığı 18 inç (0.46 m) olan kesitlerin kullanılmasına müsaade edilmiştir. Bu kesitler, ilgili veri tabanındaki [99] W18x__ ön adıyla başlayan kesitleri temsil etmektedir. Kirişlerin seçimi için ise herhangi bir boyut kısıtlaması bulunmamaktadır. Çerçevedeki kolon kiriş birleşimleri moment aktarabilen birleşimler olarak tanımlanmıştır.

Tablo 2.6. Üç boyutlu modelde çerçeveye etkiyen yükler

Yük	Kaynak	Ara katlar	Çatı
Ölü yükler	Döşeme	3.83 kPa	2.87 kPa
	Kaplama	0.96 kPa	0.97 kPa
	Çerçeve Ağırlığı	-	-
Hareketli yük	Hareketli yük	2.39 kPa	
	Bölme yükü	0.96 kPa	0.96 kPa
Kar yükü			1.44 kPa

Çerçeve elemanları için 1.10 büyütme katsayısıyla, malzeme özellikleri olarak 345 MPa akma dayanımı 450 MPa nihai çekme dayanımı değerine sahip ASTM A992 [100] tipi yapısal çelik kullanılmıştır. Tasarım parametreleri, detayları ASCE 7'ye [4] göre belirlenmek üzere; C Sismik Dizayn Kategorisi, $S_{DS} = 0.232$, Orta Sismik Seviyesi ve azaltma katsayısı (ρ) 1 olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2.24. Üç boyutlu 558 elemanlı çelik çerçeve modeline ait plan

Doğrusal olmayan dinamik analizler için sönüm oranı %5 olarak belirlenmiştir. Çerçevenin aşamalı göçmeye karşı tasarımı için oluşturulan kaldırma senaryolarında SAP2000 yazılımında öncelikle bir doğrusal olmayan statik analiz oluşturulur. Oluşturulan bu yükleme çerçevenin dinamik analizden önce denge durumundayken maruz kalacağı yükler içindir. Daha sonra bu model özelinde her bir kaldırma senaryosu için birer tane olmak üzere, zaman tanım alanında yapıyı dinamik olarak sınayacak yükleme oluşturulur. Bu analiz, sıfır başlangıç koşullarıyla değil, daha önce oluşturulan doğrusal olmayan statik yüklemenin nihai durumu üzerine başlatılır. UFC'ye göre bir yapının aşamalı göçmeye karşı güvenliğinin tetkikini kabul edilebilir ölçüde gerçekleştirmek için, ilgili kaldırma senaryosu kapsamında sistemden çıkartılan kolonun üst noktasındaki birleşim noktasının bir tam çevrim yapması veya ilgili birleşim noktasının maksimum deplasmanının ortaya çıkması yeterlidir. Gerçekleştirilecek analizlerdeki zaman adımı değerinin belirlenmesi de analizin isabetli sonuçlar üretebilmesi noktasında önem taşımaktadır. Bu bakımdan zaman tanım alanında gerçekleştirilecek analizler için zaman adımı büyüklüğü 0.005 saniye olarak belirlenmiştir. Bu adım büyüklüğüne bağlı olarak toplam adım sayısı ise 600 olarak belirlenmiştir.

2.9.1. Genel Değerlendirme

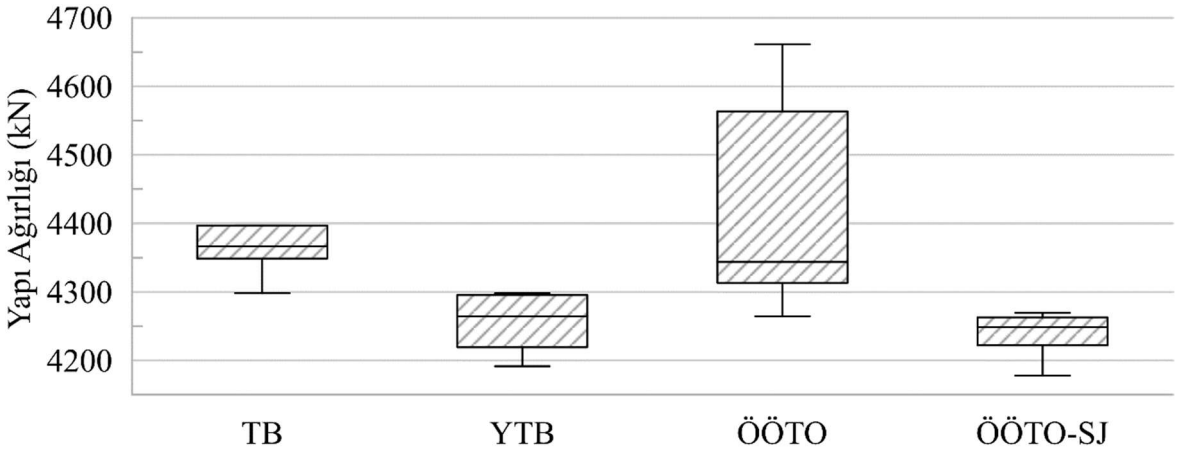
Çalışma kapsamında incelenen ikinci model olan üç boyutlu çelik çerçevenin tasarımı için literatürde yer alan birisi tepe tırmanma algoritması, birisi popülasyon temelli olmak üzere iki algoritma kullanılmıştır. Ayrıca bu iki algoritmanın yine çalışma kapsamında birtakım değişikliklere tabi tutulmuş birer farklı versiyonları da olmak üzere toplamda 4 farklı optimizasyon algoritması incelenmiştir. Dolayısıyla bu modelin optimum boyutlandırma süreci için; Tavlama Benzetimi (TB), Yönlendirilmiş Tavlamam Benzetimi (YTB), Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon (ÖÖTO) ve Seçkin Jenerasyonlu Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon (SJ-ÖÖTO) algoritmaları kullanılmıştır. Çalışma kapsamında üç boyutlu çelik çerçeve örneği için dört farklı algoritmanın optimum boyutlandırma süreçleri sonucunda elde ettiği bilgiler Tablo 2.7'de sunulmuştur. Algoritmaların ürettikleri sonuçların tutarlılığını test edebilmek amacıyla her biri rastgele oluşturulmuş farklı başlangıç değerleriyle 5'er kez çalıştırılmıştır. En hafif çerçeve ağırlığı 4177.73 kN olmak üzere Seçkin Jenerasyonlu Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritmasıyla elde edilmiştir. Bu algoritmayı takiben en hafif çerçeve ağırlıkları sırasıyla;

0.33% daha ağır olmak üzere Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi algoritmasıyla, 2.08% daha ağır olmak üzere Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritmasıyla ve 2.88% daha ağır olmak üzere Tavlama Benzetimi algoritmasıyla elde edilmiştir. Ancak bu sıralama ortalama değerlerde geçerliliğini yitirmektedir. Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması en hafif çerçeve ağırlığında üçüncü sıradayken ortalama ağırlıklar esas alındığında dördüncü sırada yer almaktadır. Buna ek olarak Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması dışındaki algoritmalar görece yakın standart sapma değerleri üretmiştir.

Tablo 2.7. Üç Boyutlu model için tüm algoritmalara ait optimum boyut bilgileri

		1.-3. Katlar	4.-5. Katlar	6.-7. Katlar	8.-9. Katlar	En iyi ağırlık (kN)	Ort. ± Std. (kN)
TB	Kolonlar	W18x234	W18x130	W18x86	W18x76	4298.08	4361.41 ± 40.96
	Kirişler	W16x57	W18x50	W18x50	W21x50		
YTB	Kolonlar	W18x234	W18x130	W18x86	W18x76	4191.59	4253.79 ± 47.07
	Kirişler	W21x50	W18x50	W18x50	W21x50		
ÖÖTO	Kolonlar	W18x234	W18X143	W18X86	W18X71	4264.51	4429.24 ± 173.02
	Kirişler	W21X50	W21X50	W21X50	W24X55		
SJ-ÖÖTO	Kolonlar	W18x234	W18x130	W18x86	W18x71	4177.73	4236.09 ± 37.3
	Kirişler	W21x50	W21x50	W21x50	W21x50		

Algoritmaların ürettiği değerlerin medyan ve çeyrek dağılım değerleri Şekil 2.25'te verilmiştir. Görülebileceği üzere Seçkin Jenerasyonlu Öğretme Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması, en hafif yapı ağırlığını elde etmiş ve bununla birlikte diğer değerleri de yığılı biçimde hafif değerler ortaya çıkarmıştır. İkinci en hafif tasarımı ortaya çıkaran Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi algoritmasının ürettiği optimum değerler de birbirine oldukça yakın bir dağılım sergilemiştir. Benzer bir durum Tavlama Benzetimi algoritmasında da görülebilmektedir. Ancak Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritmasının ortaya çıkardığı değerlerin birbirinden oldukça geniş bir aralıkla ayrıştığı görülmektedir. Standart sapma değerleriyle birlikte bu değerler de göz önüne alındığında bu algoritmanın istikrarlı sonuçlar üretme anlamında diğer algoritmalara kıyasla yetersiz kaldığı veya lokal optimumlara takılma olasılığının Ackley Fonksiyonu örneğinde de görüldüğü üzere yüksek olduğu söylenebilir.

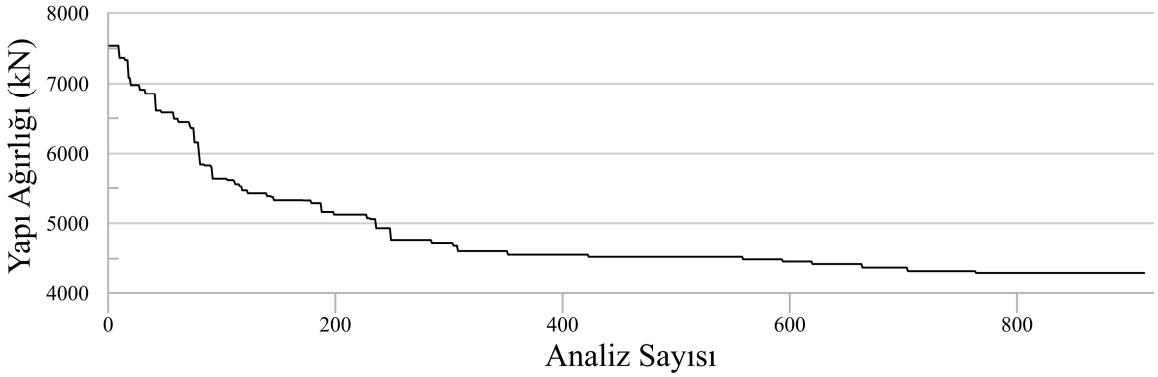


Şekil 2.25. Üç Boyutlu model için tüm algoritmalara ait optimum ağırlıkların medyan ve çeyrek dağılım değerleri

2.9.2. Tavlama Benzetimi Algoritması

Çalışma kapsamında incelenen 4 algoritma arasında en hafif değer bazında dördüncü, ortalama en hafif değer bazında üçüncü çerçeve ağırlığını üreten Tavlama Benzetimi algoritmasının en hafif çerçeve ağırlığını ürettiği optimizasyon sürecine ait ağırlık değişimi Şekil 2.26'da sunulmuştur. Algoritmanın kontrol parametre değerleri ise aşağıdaki gibidir;

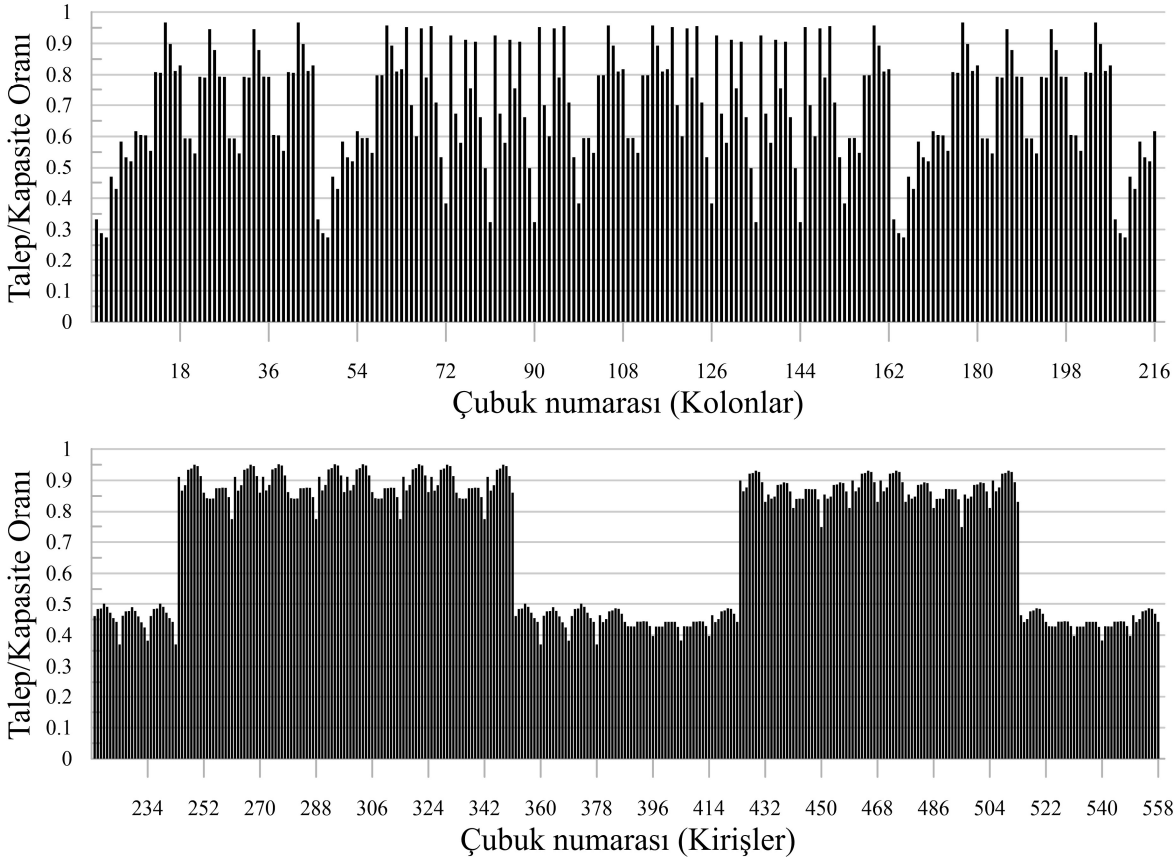
$$t_i = 900℃ \quad t_s = 450℃ \quad t_\Delta = 1.5℃ \tag{2.27}$$



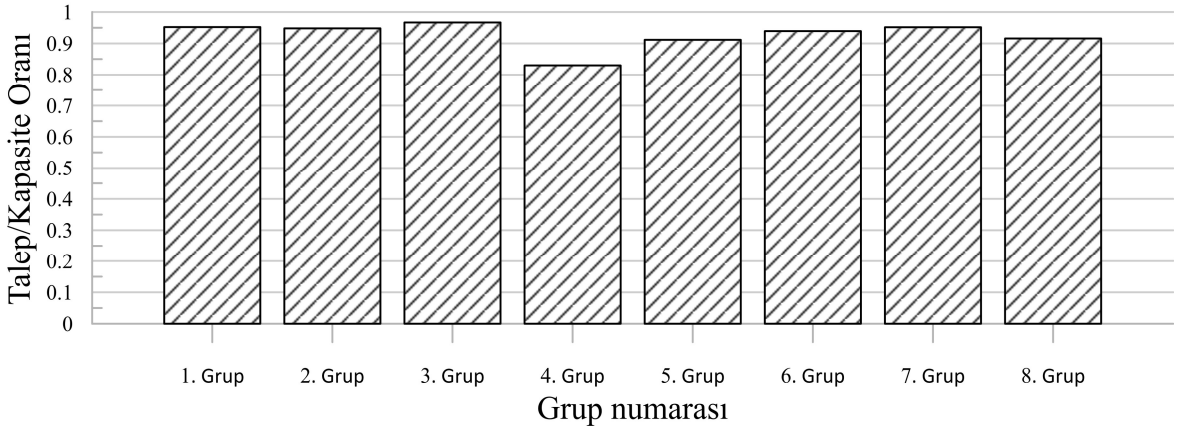
Şekil 2.26. En iyi çözüme ait ağırlık değişimi (TB)

558 elemanlı üç boyutlu çelik çerçeve için bu algoritmayla elde edilen en hafif çerçevenin kolon ve kiriş kesitlerine ait talep kapasite oranları Şekil 2.27'de sunulmuştur. Ayrıca her kesit grubuna ait en yüksek talep kapasite oranı ise Şekil 2.28'de verilmiştir.

Görülebileceği üzere tüm kesit gruplarında en az bir taşıyıcı elemanın talep kapasite oranının sınır değere yaklaştığı görülmektedir. Bu bakımdan tasarımda sismik sınırlayıcıların oldukça etkin olduğu görülmektedir. Aşamalı göçme sınırlayıcılarının da tasarımda etkinliği olmakla birlikte iki boyutlu modele kıyasla sismik sınırlayıcılar üç boyutlu modelde davranışı daha kuvvetli biçimde kontrol etmektedir. Bunula birlikte sismik sınırlayıcıların etkileri sayesinde geometrik olarak daha düzenli bir tasarımın ortaya çıktığı da açık biçimde görülmektedir.



Şekil 2.27. En iyi çözüme ait talep kapasite oranları (TB)

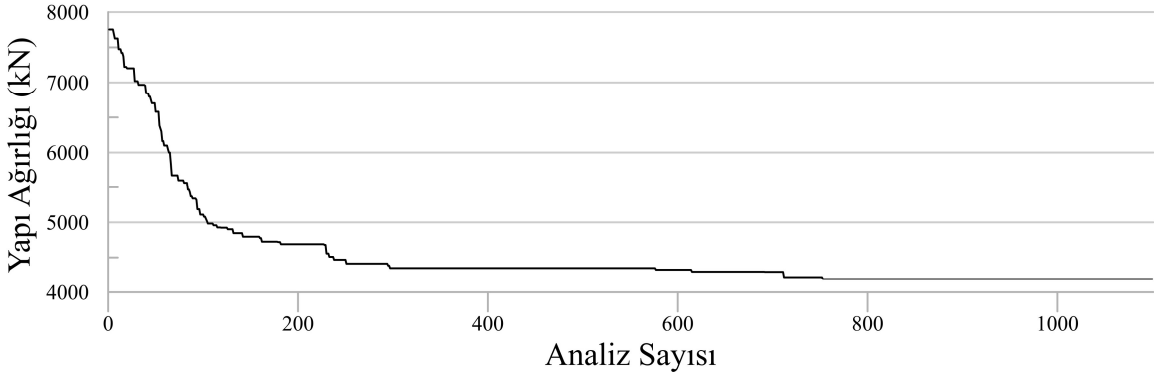


Şekil 2.28. Gruba ait en büyük talep kapasite oranları (TB)

2.9.3. Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi Algoritması

Kullanılan 4 algoritma arasında minimum ve ortalama değer olarak ikinci en hafif yapı ağırlığını elde eden Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi algoritmasının en hafif çerçeve ağırlığını ürettiği optimizasyon sürecine ait ağırlık değişimi Şekil 2.29'da sunulmuştur. Algoritmanın kontrol parametreleri aşağıda verildiği gibidir;

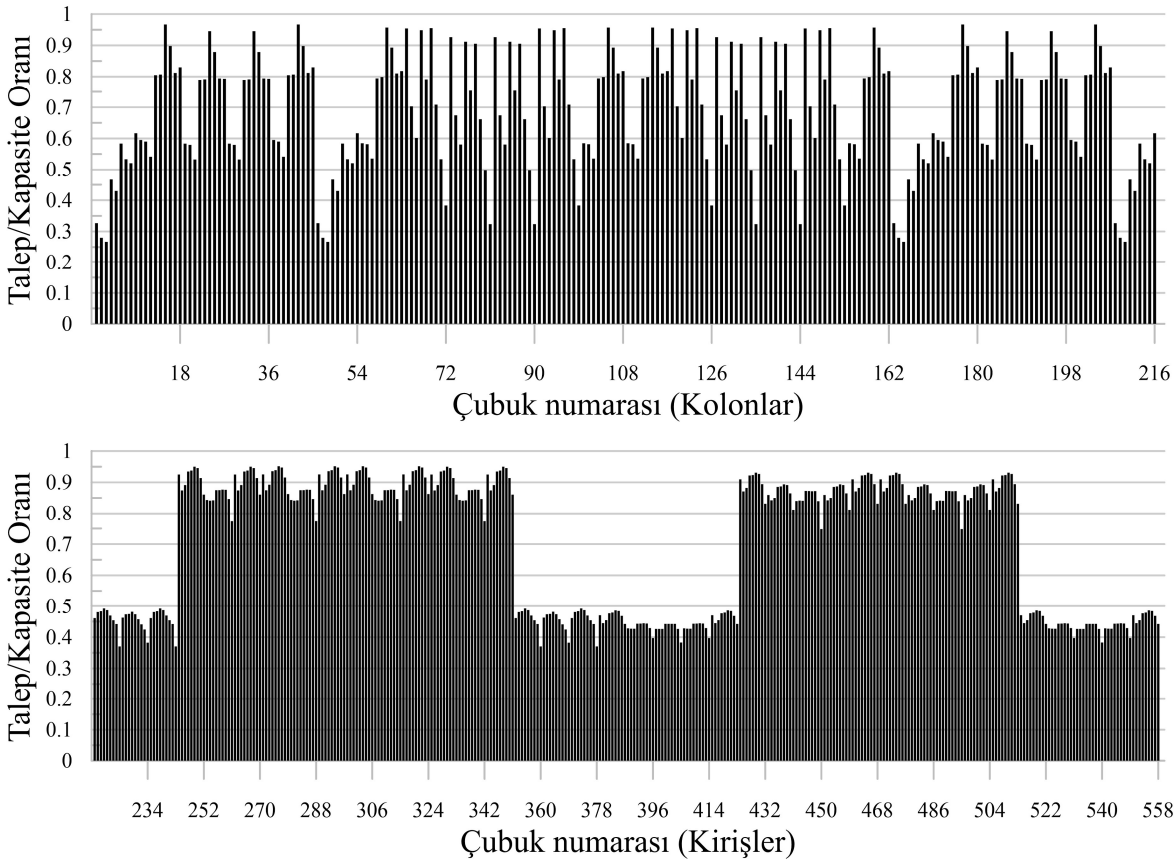
$$t_i = 900℃ \quad t_s = 450℃ \quad t_\Delta = 1.5℃ \tag{2.28}$$



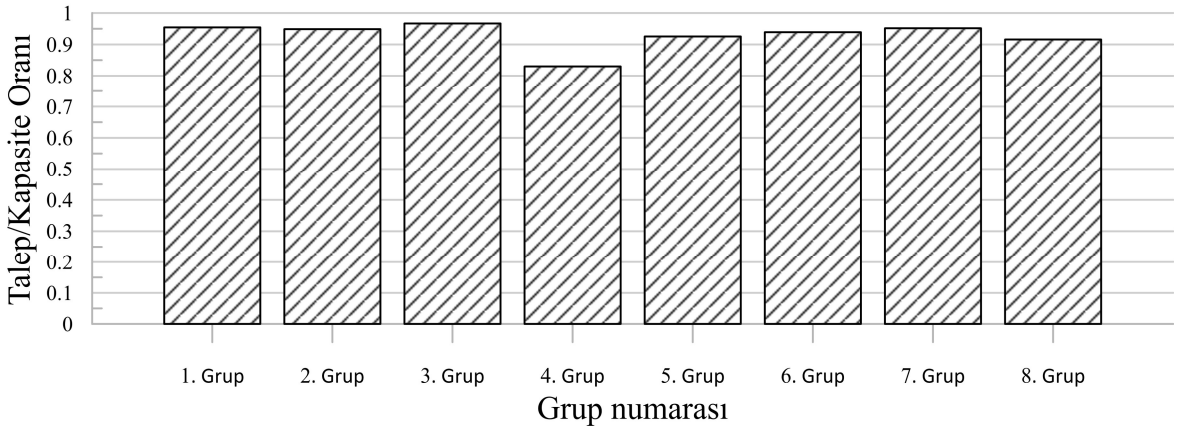
Şekil 2.29. En iyi çözüme ait ağırlık değişimi (YTB)

Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi ile elde edilen en hafif çerçevenin kolon ve kirişlerinin kesitlerine ait talep kapasite oranları Şekil 2.30'da sunulmuştur. Ayrıca her kesit grubunun en yüksek talep kapasite oranı da Şekil 2.31'de verilmiştir. Tasarım için seçilen kesitler Tavlama Benzetimi algoritması için seçilen kesitlerle oldukça benzeşmesine rağmen bu algoritma, birinci grupta daha hafif bir kesitle tasarımı meydana getirmiştir. Bu tasarımda

da sismik sınırlayıcıların genel anlamda tasarım üzerinde, aşamalı göçmeye kıyasla daha fazla kontrole sahip olduğu görülmektedir.



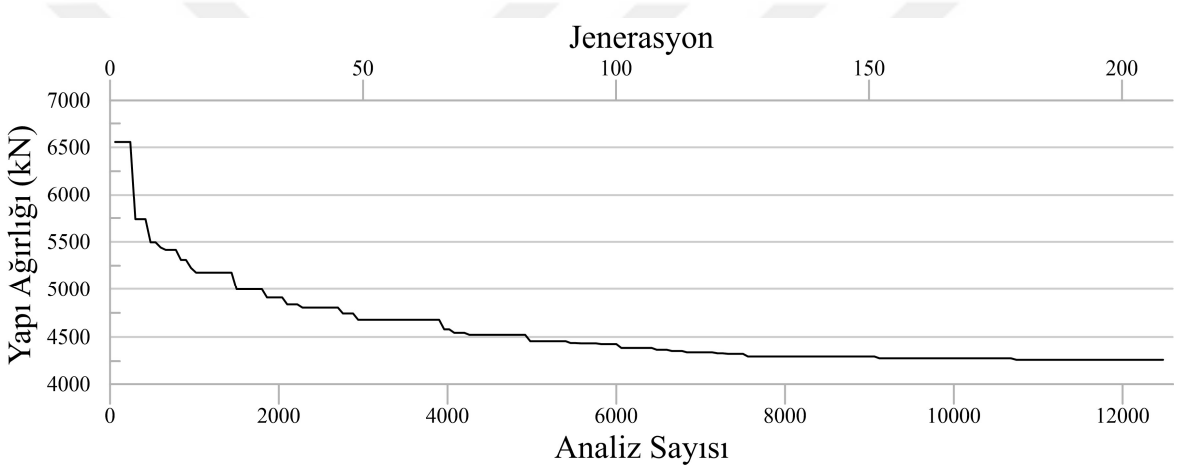
Şekil 2.30. En iyi çözüme ait talep kapasite oranları (YTB)



Şekil 2.31. Gruba ait en büyük talep kapasite oranları (YTB)

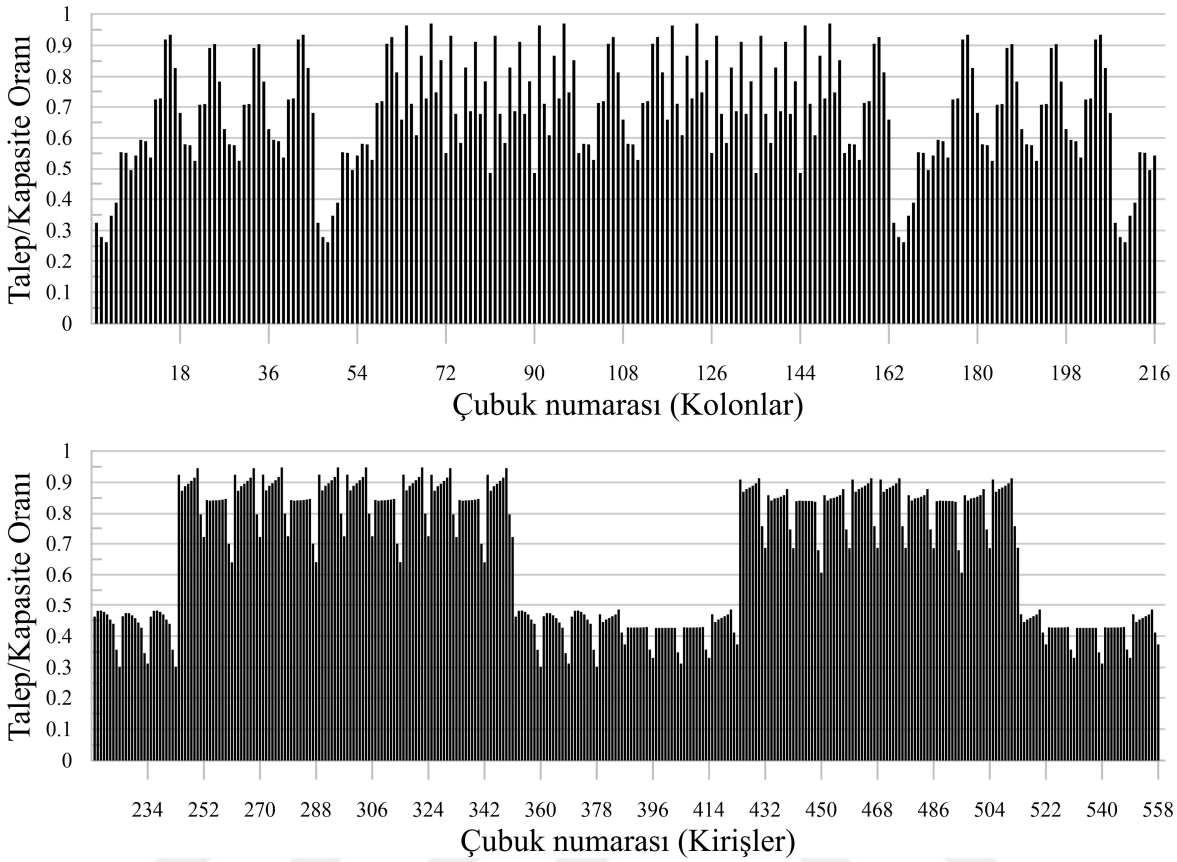
2.9.4. Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon Algoritması

Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması, göz önüne alınan yöntemler arasında en hafif çerçeve ağırlığı olarak üçüncü, ortalama ağırlık olarak ise en ağır çerçeve ağırlığını oluşturmuştur. İlgili algoritma popülasyon temelli bir algoritma olduğundan, kıyaslanabilir olabilmesi için optimizasyon süreci boyunca en hafif çerçeveye ait ağırlığı değişimi Şekil 2.32'de hem jenerasyon hem de gerçekleştirilen toplam analiz sayısına bağlı olarak sunulmuştur. Bu algoritmada popülasyon boyutu, 8 değişkenli optimizasyon problemi için 20 olarak belirlenmiştir. Algoritmanın durdurma kriteri ise 30 jenerasyon boyunca çerçeve ağırlığında değişim görülmemesi olarak belirlenmiştir.

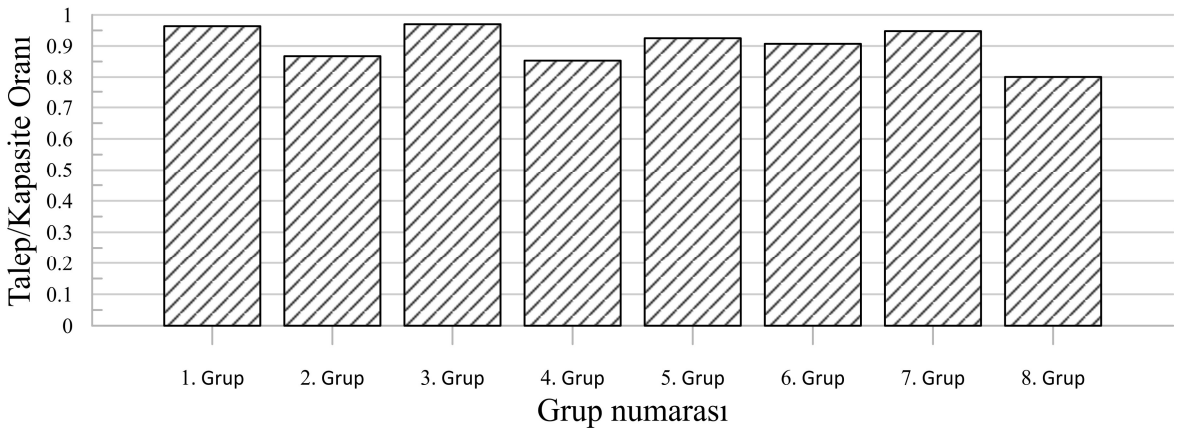


Şekil 2.32. En iyi çözüme ait ağırlık değişimi (ÖÖTO)

Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması kullanılarak elde edilen en hafif çerçevenin kesitlerine ait talep kapasite oranları Şekil 2.33'te verilmiştir. Bu değerlere bağlı olarak her gruptaki en yüksek talep kapasite oranına ait değerler ise Şekil 2.34'te sunulmuştur. Bu algoritma kullanılarak ortaya çıkan tasarım ile Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi algoritmasıyla oluşturulan algoritma arasındaki farklılık en üst katlardaki kiriş ve kolonların kesitlerinde kendini göstermektedir. Gruplara ait maksimum talep kapasite oranları incelendiğinde tasarımın büyük ölçüde sismik sınırlayıcılar tarafından kontrol edildiği görülebilmektedir. Ancak diğer algoritmaların oluşturduğu tasarımlara kıyasla genel olarak daha küçük talep kapasite oranları oluşmuştur. Bu durum, ortalama değer olarak da algoritmanın optimumdan en uzak tasarımları üretmesiyle birlikte göz önüne alındığında, süreç içerisinde algoritmanın lokal bir optimuma takılması olarak değerlendirilebilir.



Şekil 2.33. En iyi çözüme ait talep kapasite oranları (ÖÖTO)

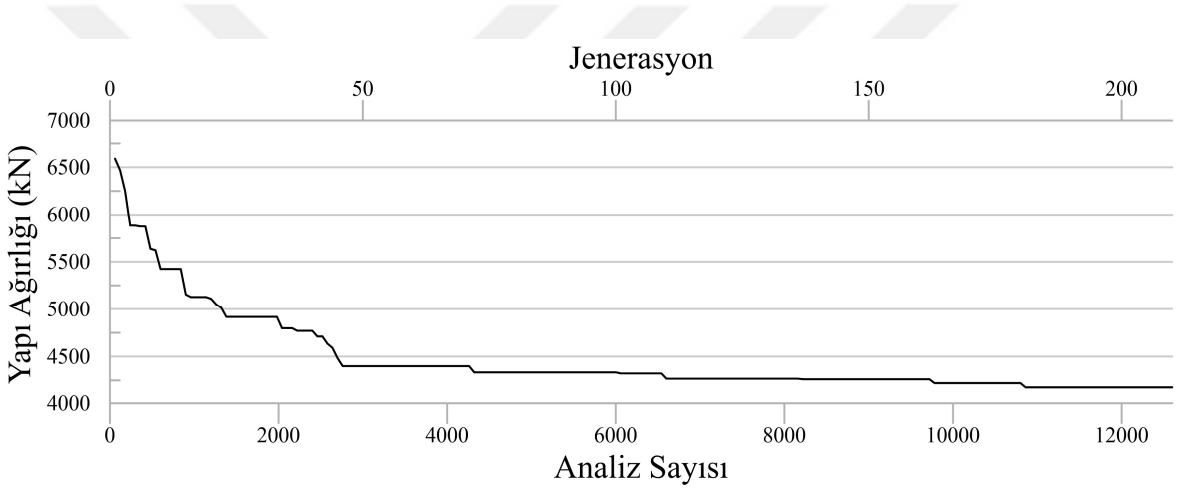


Şekil 2.34. Gruba ait en büyük talep kapasite oranları (ÖÖTO)

2.9.5. Seçkin Jenerasyonlu Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon Algoritması

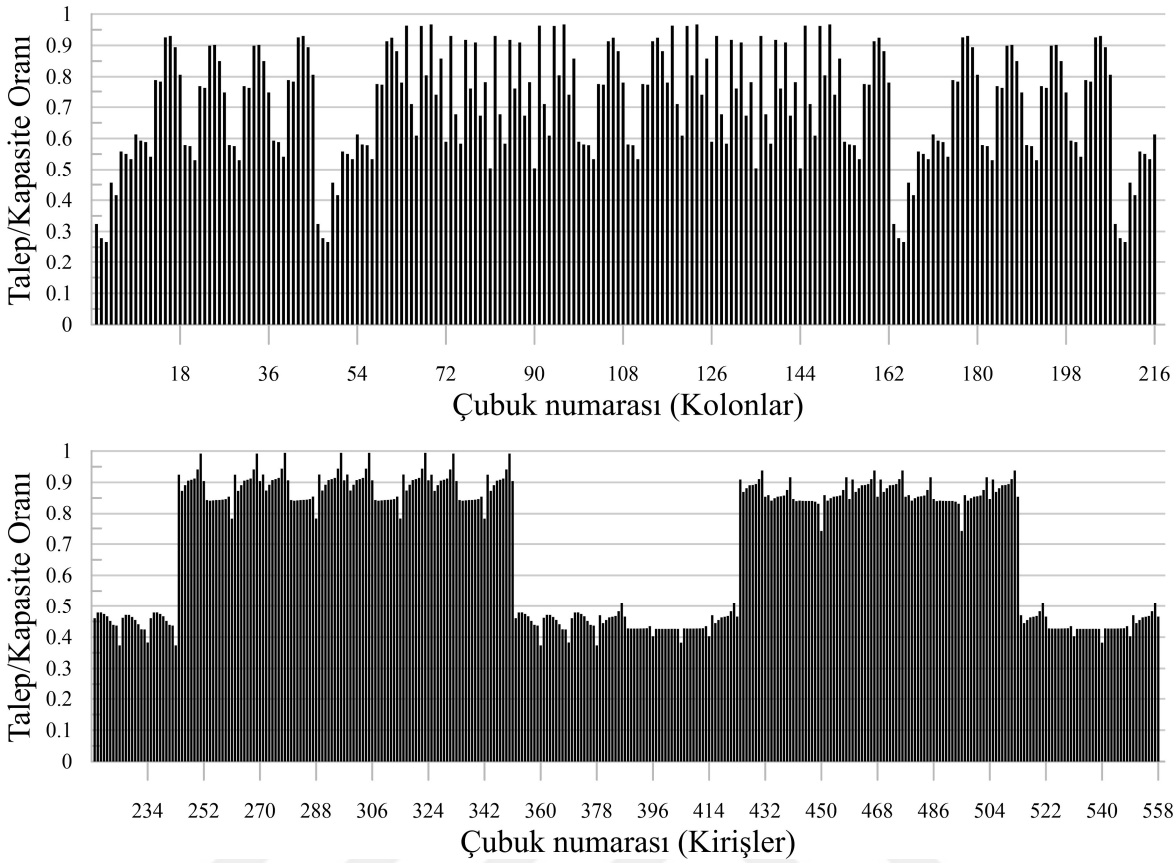
Bu çalışma kapsamında geliştirilen Seçkin Jenerasyonlu Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması, kullanılan algoritmalar arasında hem en düşük ağırlık hem de ortalama ağırlık bakımından en hafif çerçeve ağırlığını elde etmiştir. İlgili sürece ait

çerçevenin ağırlık değişimi Şekil 2.35'te verilmiştir. Algoritmada, seçkin jenerasyon yaklaşımı 10 jenerasyonda bir ortaya çıkarak mevcut popülasyonun yerine geçmektedir. Orijinal algoritmayla kıyaslandığında benzer jenerasyon sayısına sahip olmasına rağmen Seçkin Jenerasyonlu yaklaşımın kullanılması en hafif çerçeve ağırlığı olarak 86 kN daha hafif bir tasarım elde edilmesini sağlamıştır. Bu yaklaşımının karşılığı olarak, 10 ve katlarına denk gelen jenerasyonlarda çerçeve tasarımındaki ağırlık düşüşleri gözlemlenebilmektedir. Algoritmanın kontrol parametreleri olarak, orijinal algoritmayla tutarlı olarak popülasyon genişliği 20 birey, durdurma kriteri Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritmasında olduğu gibi 30 jenerasyon boyunca çerçeve ağırlığının değişmemesi olarak belirlenmiştir.

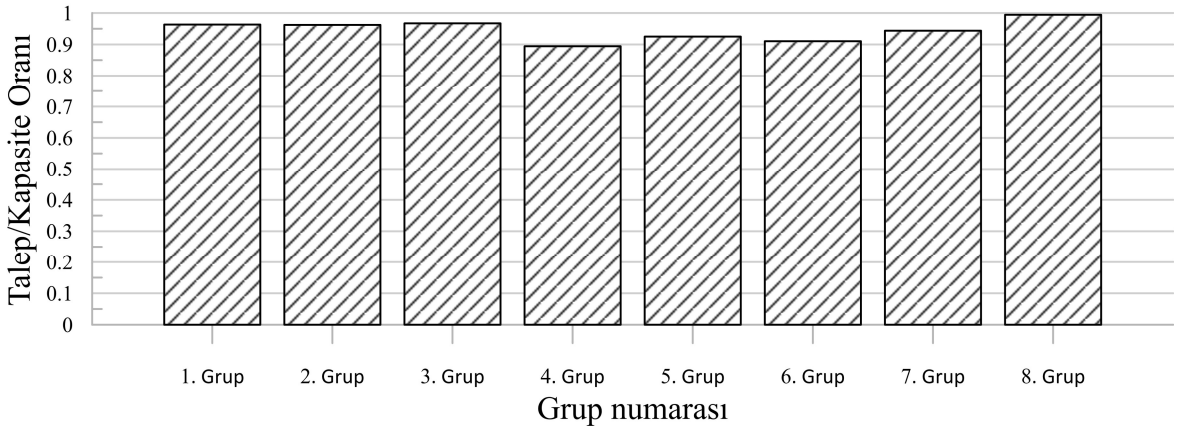


Şekil 2.35. En iyi çözüme ait ağırlık değişimi (SJ-ÖÖTO)

Seçkin Jenerasyonlu Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması kullanılarak elde edilen en hafif çerçeve ağırlığına sahip tasarımın talep kapasite oranları Şekil 2.36'da sunulmuştur. Her bir gruba ait en yüksek talep kapasite oranları ise Şekil 2.37'de verilmiştir. Optimizasyon sürecinin değişkenlerini teşkil eden taşıyıcı eleman gruplarına ait maksimum talep kapasite oranlarının tümünün sınır değere yaklaştığı görülmektedir. Aşamalı göçmenin bu tasarımda da etkili olmasının rağmen tasarımın önemli ölçüde sismik sınırlayıcılar tarafından kontrol edildiği görülmektedir.



Şekil 2.36. En iyi çözüme ait talep kapasite oranları (SJ-ÖÖTO)

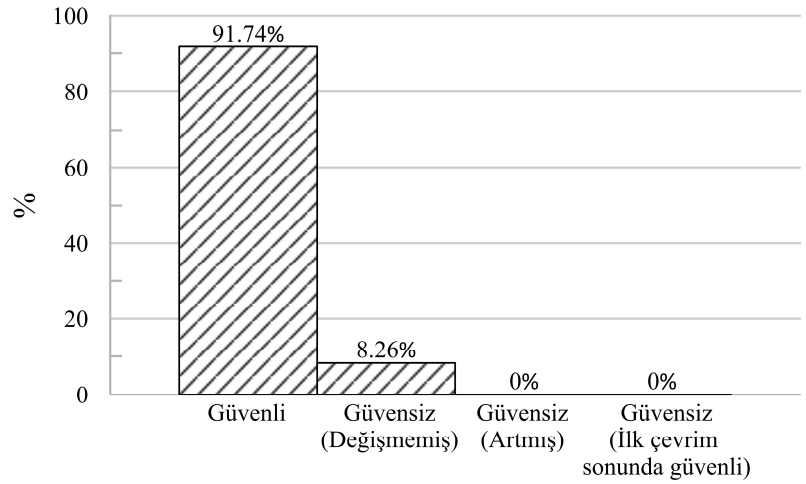


Şekil 2.37. Gruba ait en büyük talep kapasite oranları (SJ-ÖÖTO)

2.10. Yeterli Analiz Süresi

Gerçekleştirilen çalışmalar kapsamında bazı aşamalı göçme analizlerinde çerçevede UFC'de önerilen analiz süresinin tamamlanmasının ardından yönetmelik açısından kabul edilemez seviyede plastik mafsal oluşumları gözlenmiştir. UFC bu noktada yapısal elemanları birincil ve ikincil elemanlar olarak sınıflandırmakta yapısal elemanın davranış

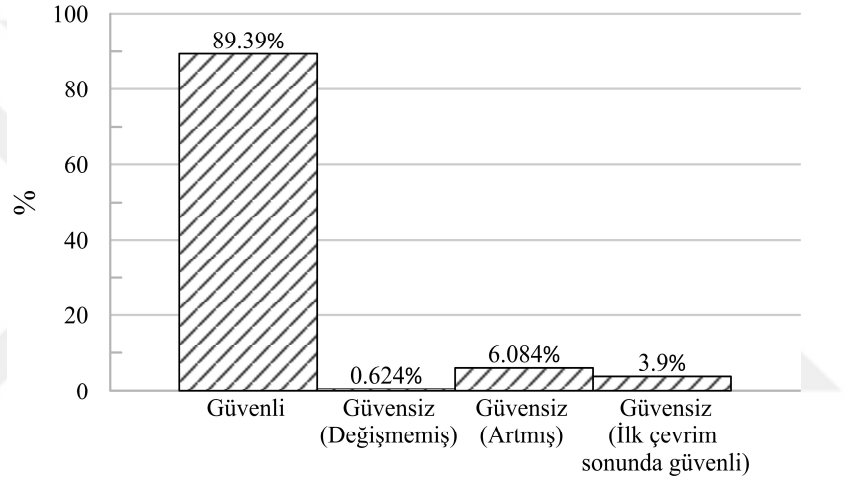
biçimine bağlı olarak farklı sınır şartlarının üstünde plastik dönme gösteren plastik mafsalları kabul edilebilir seviyenin üstünde sınıflandırmaktadır. UFC kısım 3-2.13.4.2'ye [28] göre bir tasarımın alternatif yol metodu doğrusal olmayan prosedür ile aşamalı göçmeye karşı güvenli kabul edilebilmesi için önerilen analiz süresi, kaldırılan kolonun uç noktasındaki deplasmanın bir tam çevrimi tamamlaması veya maksimum deplasmanın ortaya çıkması olarak tanımlanmıştır. Bu durumu daha detaylı olarak incelemek için, optimizasyon sürecinde kullanılan Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi algoritmasında bazı değişiklikler yapılarak farklı çerçeve tasarımlarında, kabul edilemez plastik mafsalların ortaya çıkış anları gözlemlenmeye çalışılmıştır. Değiştirilmiş algoritmanın ürettiği her çerçeve tasarımı bir kez UFC'de önerilen süre boyunca analize tabi tutulurken, bir kez de UFC'de önerilen süreden daha uzun bir sürede aşamalı göçme açısından analiz edilmiştir. Aynı bağlamda sınırlayıcıların da bu durumun ortaya çıkmasındaki etkileri irdelenmeye çalışılmıştır. Değiştirilen algoritma iki kez farklı sınırlayıcı şartlarıyla birlikte çalıştırılmıştır. İlk iteratif süreçte sınırlayıcı olarak yalnızca aşamalı göçme esas alınmıştır. İkinci süreçte ise aşamalı göçmeye ek olarak sismik sınırlayıcılar da tasarım sınırlayıcısı olarak kabul edilmiştir. Sismik sınırlayıcıların dahil olduğu iteratif süreçte üretilen çerçevelerin yeterli analiz süresi bakımından sınıflandırılması Şekil 2.38'de verilmiştir. Görülebileceği üzere tamamen birbirinden farklı 1356 tasarımın hiçbirisinde UFC'de önerilen analiz süresinin ardından plastik mafsal oluşumu ortaya çıkmamıştır.



Şekil 2.38. Sismik sınırlayıcıların dahil olduğu analizlerin dağılımı

Yalnızca aşamalı göçme sınırlayıcılarının dahil olduğu iteratif süreçte ise durum farklılaşmaktadır. Birbiriyle aynı olmayan 641 tasarımın %89'unda UFC'nin önerdiği analiz

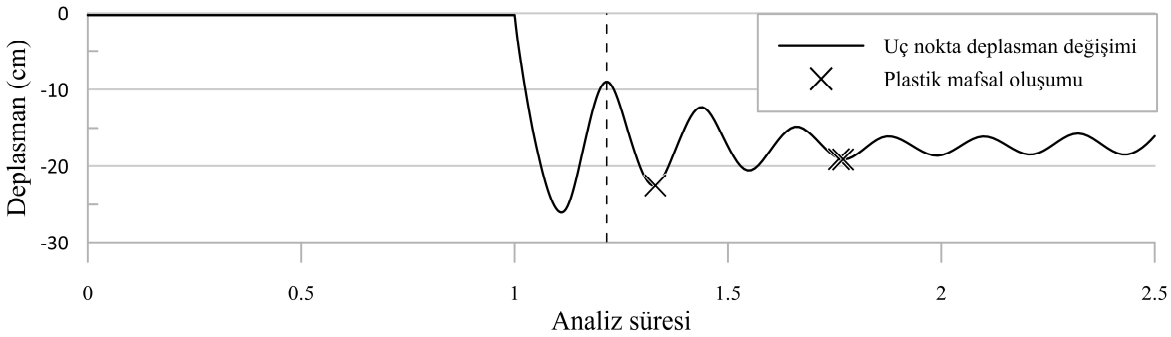
süresince veya sonrasında kabul edilemez seviyede plastik mafsal oluşumu ortaya çıkmamıştır. Çerçevelerin geriye kalan kısmı toplam analiz süresinin sonunda güvensiz olarak sınıflandırılmıştır. Ancak bu çerçevelerin %3.9'lük kısmı UFC'de önerilen sürenin sonunda güvenli olarak kabul edilirken sonraki çevrimlerde taşıyıcı elemanlar üzerinde kabul edilemez seviyede plastik mafsal oluşumları görülmüştür. Buna ek olarak Çerçevelerin %6'sı ilk çevrim sonunda güvensiz olarak sınıflandırılmışken sonraki çevrimlerde de plastik mafsal sayısında artış görülmüştür. Bu kapsamda incelenen çerçevelerin iteratif süreç boyunca güvenlik açısından sınıflandırılması Şekil 2.39'da sunulmuştur.



Şekil 2.39. Sismik sınırlayıcıların dahil olmadığı analizlerin dağılımı

UFC'ye göre ilk çevrim sonunda güvenli olarak kabul edilen ancak daha sonraki çevrimlerde plastik mafsal oluşumları gözlemlenen 25 çerçeve tasarımı, UFC'de önerilen süre sonunda güvenli olarak kabul edilen 598 çerçeve tasarımının ise %4.1'lik kısmını teşkil etmektedir. Bu 25 çerçeveden 1'ine ait analiz süresi boyunca kolon kaldırma noktasındaki deplasman değişimi ve bu süre zarfında çerçevenin farklı noktalarında plastik mafsalların ortaya çıkış anları Şekil 2.40'ta verilmiştir. İlgili analizlerde genel olarak gözlemlenen durum, ilk çevrimden sonra ortaya çıkan plastik mafsalların çoğunlukla kaldırma senaryosuna konu olan kolona uzak bölgelerdeki kolon veya kirişlerde görülmesidir. Dolayısıyla aşamalı göçme analizi açısından üç boyutlu bir model için ilk çevrimin ardından da yapıdaki yük dağılımının devam ettiği söylenebilir. Buna ek olarak bu tasarımların sismik sınırlayıcıların dahil olmaması sebebiyle, önemli bir kısmının geometrik açıdan düzensiz

yapılar olduğu da göz ardı edilmemelidir. Sismik sınırlayıcıların dahil olduğu tasarımlarda böyle bir durumla karşılaşılmamıştır.



Şekil 2.40. Örnek çerçeveye ait analiz süresi boyunca plastik mafsal oluşumu

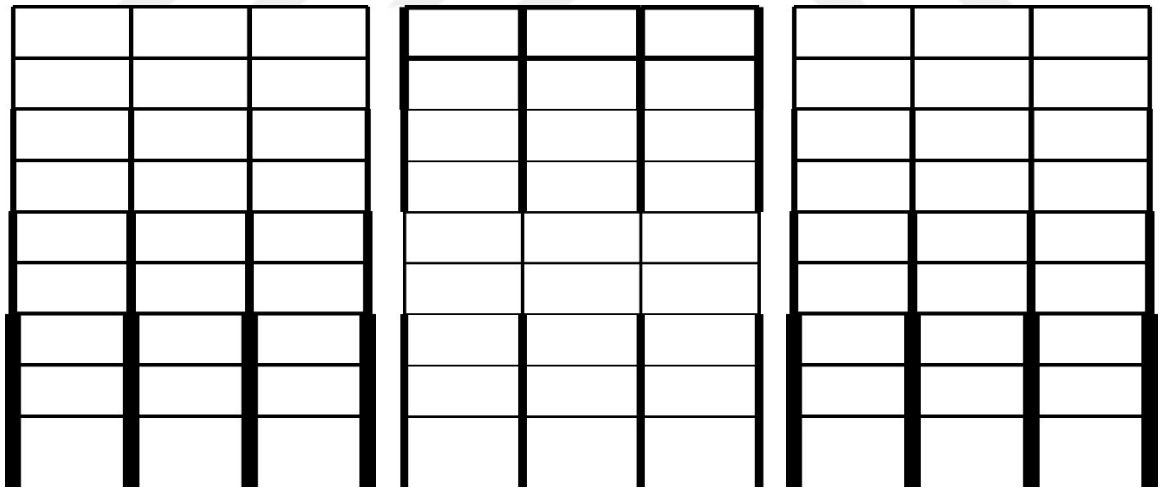
2.11. Sismik ve Aşamalı Göçme Sınırlayıcılarının Ayrışması

Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarında farklı sınırlayıcıların tasarımı farklı biçimde yönlendirdiği görülmüştür. Farklı sınırlayıcıların tasarım üzerindeki etkilerini görmek amacıyla yine Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi algoritması kullanılarak optimum boyutlandırma süreçleri tekrarlanmıştır. UFC ve LRFD'nin bir arada yer aldığı süreç için orijinal optimizasyon sürecindeki en hafif tasarım esas alınmıştır. Buna ek olarak bir kez yalnız UFC bir kez de yalnız LRFD sınırlayıcı olarak esas alınarak iki kez daha optimum boyutlandırma süreci tekrarlanmıştır. Üç boyutlu model kullanılarak gerçekleştirilen süreçler sonucunda elde edilen çerçeve tasarımları Tablo 2.8'de verilmiştir. Bölüm 2.9.3'te Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi algoritmasıyla elde edilen sonuçlar daha detaylı olarak incelenmiştir. Tasarımda görülebileceği üzere her iki sınırlayıcının da aktif olduğu durumda sismik sınırlayıcıların tasarım üzerinde daha yüksek oranda kontrol sahibi olduğu görülmektedir. Bu kısımda yalnızca sismik sınırlayıcıların aktif olduğu tasarımda da hem kesitler bazında hem de çerçeve ağırlığı anlamında bu tasarıma yakın bir tasarım ortaya çıkmıştır. Ancak yalnızca aşamalı göçme sınırlayıcılarının sürece dahil edilmesi halinde ortaya çıkan tasarımın büyük ölçüde farklılaştığı görülmektedir. Özellikle çerçevenin üst katlarındaki kolon ve kiriş kesitlerinin daha yüksek kesit alanına ve plastik moment kapasitesine sahip kesitler olduğu dikkat çekmektedir.

Tablo 2.8. Farklı sınırlayıcılara bağlı optimum boyutlar

		1.-3. Katlar	4.-5. Katlar	6.-7. Katlar	8.-9. Katlar	En iyi ağırlık (kN)
UFC ve LRFD	Kolonlar	W18x234	W18x130	W18x86	W18x76	4191.59
	Kirişler	W21x50	W18x50	W18x50	W21x50	
UFC	Kolonlar	W18x119	W18x46	W18x119	W18x130	3147.56
	Kirişler	W16x31	W14x26	W14x26	W24x76	
LRFD	Kolonlar	W18x234	W18X130	W18X86	W18X65	4161.05
	Kirişler	W18X50	W18X50	W21X50	W21X50	

Üç boyutlu model için, her üç tasarıma ait kesitlerin kesit alanları esas alınarak tasvir edilen iki boyutlu çerçeve görünümleri Şekil 2.41'de verilmiştir. LRFD'nin dahil olduğu süreçlerde görülebileceği üzere sınırlayıcı olarak geometrik sınırlayıcılar kullanılmamış olmasına rağmen ortaya çıkan tasarım geometrik olarak düzenlidir. Bunun aksine yalnızca aşamalı göçmenin tasarımı kontrol ettiği süreçte geometrik olarak sıra dışı ve düzensiz bir tasarım ortaya çıkmıştır. Daha önce belirtildiği gibi en üst iki kattaki daha büyük kesit alanına sahip kesitler, aşamalı göçme sınırlayıcısının içgüdüsel olarak Vierendeel kafesleri oluşturmaya çalışması olarak yorumlanmıştır.



(a) UFC ve LRFD (b) Sadece UFC (c) Sadece LRFD

Şekil 2.41. Farklı sınırlayıcıların etkisinde, kesit alanlarına bağlı olarak çerçeve gösterimi

Yalnızca çalışma kapsamında incelenen kaldırma senaryoları göz önüne alındığında bile, yapının sismik sınırlayıcı şartlarını sağlamasının aşamalı göçmeye karşı mutlak güvenlik sağlamadığı da ayrıca görülmüştür. Ancak üç boyutlu model kullanıldığında sismik sınırlayıcıların tasarım üzerindeki kontrolünün gözle görünür biçimde arttığı da daha önce

sunulan talep kapasite oranlarından açıkça görülmektedir. Bu bakımdan UFC'de aşamalı göçme analizi için üç boyutlu model kullanılması zorunluluğu da elde edilen verilere göre karşılık bulmaktadır.

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında çelik çerçevelerin aşamalı göçme etkisinde optimum boyutlandırılmasını gerçekleştirmek amacıyla Tavlama Benzetimi ve Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. Ayrıca çalışma kapsamında, bu iki algoritma üzerinde özellikle yapısal optimizasyon özelinde birtakım geliştirmeler yapılmış; Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi ve Seçkin Jenerasyonlu Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon olarak adlandırılan versiyonları da ayrıca optimum boyutlandırma sürecine tabi tutulmuştur. Optimizasyon süreçlerindeki kaldırma senaryosu analizlerinin gerçekleştirilmesi için alternatif yol metodu doğrusal olmayan dinamik prosedür kullanılmıştır. Aşamalı göçme analizlerinin uygulanması için sonlu elemanlar yöntemini esas alan SAP2000 yazılımı kullanılmıştır. Optimizasyon sürecinin gerektirdiği tekrarlı analizleri gerçekleştirmek için C# dili ile bir yazılım geliştirilmiştir. Yazılım, algoritma ile SAP2000 arasındaki iletişimi OAPI üzerinden sağlamaktadır. Geliştirilen yazılımda kaldırma senaryolarını eşzamanlı olarak analiz edebilmek için eşzamanlı işleme kullanılmıştır. Çalışma kapsamında literatürde yer alan iki boyutlu çelik çerçeve ve aynı modelin üç boyutlu versiyonu bahsi geçen dört algoritmayla optimum boyutlandırma sürecine tabi tutulmuştur. Optimizasyon çalışmasına ek olarak çalışmadaki algoritmalardan biri olan Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi algoritması kullanılarak aşamalı göçme analizi için yönetmelikte önerilen analiz süresi ve optimizasyon sınırlayıcılarının tasarım üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

1. Sürekli değişken değerlerine sahip bir test fonksiyonu olan Ackley fonksiyonu üzerinde yapılan optimizasyon süreçlerinde Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritmasının Tavlama Benzetimi algoritmasına kıyasla çok daha etkili biçimde optimum noktaya yakınsadığı görülmüştür. Bununla birlikte fonksiyonun farklı boyut değerlerinde Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması lokal optimumlara takılabilirken, Tavlama Benzetimi algoritması açısından böyle bir sorun ortaya hiç çıkmamıştır.
2. Çalışma kapsamında incelenen iki boyutlu çelik çerçeve modelinde Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi algoritması diğer algoritmalara kıyasla en hafif çerçeve ağırlığını elde etmiştir. Seçkin Jenerasyonlu Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon

algoritması ikinci en hafif çerçeve ağırlığını elde ederken, Tavlama Benzetimi algoritması üçüncü sırada yer almıştır. Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması literatürde yer alan Genetik Algoritma'dan da sonra gelerek en ağır çerçeve ağırlığını ortaya çıkarmıştır. Her algoritma rastgele oluşturulmuş farklı başlangıç değerleriyle beşer kez optimum boyutlandırma sürecine tabi tutulmuştur. Ortalama değerler bazında da algoritmaların sıralaması değişmemiştir.

3. Optimum boyutlandırma sürecine tabi tutulan üç boyutlu modelde en hafif çerçeve ağırlığını Seçkin Jenerasyonlu Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması ile elde edilmiştir. Bu algoritmayı takiben en hafif çerçeve ağırlıkları sırasıyla; Yönlendirilmiş Tavlama Benzetimi, Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon ve Tavlama Benzetimi algoritmaları ile elde edilmiştir. Her algoritma beşer kez optimum boyutlandırma sürecinde kullanılmıştır. Algoritmaların ürettiği ortalama değerler bazında ise Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritması en ağır çerçeve ağırlığı elde edilmiştir.
4. Tavlama Benzetimi algoritmasının performansını iyileştirmek için geliştirilen yönlendirme yaklaşımı, olumlu sonuçlar ortaya koymuş ve her iki modelde de orijinal algoritmadan daha hafif çerçeve ağırlıkları elde edilmiştir. Yönlendirilmiş yaklaşım iki boyutlu modelde %2.5, üç boyutlu modelde ise %3 daha hafif çerçeve ağırlıkları üretebilmiştir.
5. Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon algoritmasının performansını iyileştirmek amacıyla algoritmaya eklenen Seçkin Jenerasyon yaklaşımının orijinal algoritmaya kıyasla kayda değer ölçüde olumlu katkı sağladığı görülmüştür. Hem iki boyutlu modelde hem de üç boyutlu modelde orijinal algoritmaya kıyasla yaklaşık %2 daha hafif çerçeve ağırlıkları elde edilmiştir.
6. Çalışmada kullanılan tepe tırmanma ve popülasyon temelli algoritmalar kıyaslandığında her ikisinin de birbirine yakın sonuçlar ürettiği görülmüştür. Ancak kullanılan popülasyon temelli algoritmalarda, tepe tırmanma amaçlı algoritmalara kıyasla çok daha fazla sayıda analiz neticesinde benzer sonuçların elde edebildiği görülmüştür. Bu bakımdan Tavlama Benzetimi algoritması ve geliştirilmiş versiyonunun optimizasyon süresi açısından diğer iki algoritmaya kıyasla daha başarılı olduğu değerlendirilmiştir. Ancak bu durumun yapısal optimizasyon problemlerinin doğasıyla da ilişkili olduğu düşünülmektedir.

7. Aşamalı göçme etkisinde boyutlandırma için iki veya üç boyutlu model kullanılmasına bağlı olarak boyutların önemli ölçüde farklılaştığı görülmüştür. Buna ek olarak yine modelleme boyutuna bağlı olarak tasarımda hakim olan sınırlayıcıların da değiştiği görülmüştür. Bu bakımdan aşamalı göçme etkisinde boyutlandırmada daha gerçekçi analizlerin gerçekleştirilebilmesi için üç boyutlu yapısal modellemenin kullanılması önem taşımaktadır.
8. Alternatif yol metodu doğrusal olmayan dinamik prosedürün uygulamasında, sismik sınırlayıcıların dahil olmadığı ve buna bağlı olarak geometrik olarak düzensiz tasarımlar ortaya çıkması halinde UFC'de önerilen analiz süresinin yetersiz kalabildiği görülmüştür. Sismik sınırlayıcıların tasarım sürecine dahil edilmesi halinde bu açıdan herhangi bir sorun oluşmamasının yanında ortaya çıkan tasarımların da geometrik olarak düzenli bir yapıya sahip olduğu görülmüştür.
9. Aşamalı göçme sınırlayıcılarının optimum boyutlandırma sürecinde özellikle yapının üst katlarında yapının geri kalanına kıyasla görece güçlü kafesler oluşturmaya çalıştığı gözlenmiştir. Ortaya çıkan bu tasarım biçimi, aşamalı göçmeyi önleyebilmek için çerçevenin Vierendeel kirişleri oluşturmaya çalışması olarak yorumlanmıştır.

Çalışma kapsamında elde edilen verilere dayanarak aşağıdaki hususlar önerilmiştir;

1. Kullanılan yönlendirme yaklaşımı iteratif birçok yapısal optimizasyon algoritmasında kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Yaklaşımın etkinliğinin bu tip iteratif algoritmalar üzerinde test edilmesi faydalı görülmüştür.
2. Doğrusal olmayan dinamik prosedür için gözlemlenen yeterli analiz süresi ile ilgili soru işaretlerinin daha detaylı biçimde irdelenmesi faydalı görünmektedir. Yeterli analiz süresiyle; çerçevenin oturma alanı, yapı geometrisi gibi parametreler arasındaki ilişkilerin irdelenmesi bu durum hakkında daha detaylı bilgi elde edilebilmesini sağlayabilir.
3. Çalışmada incelenen başlıklar bağlamında elde edilen verilerin geometrik kısıtlayıcıların dahil olması halinde de incelenmesinin faydalı olacağı düşünülmüştür.

4. KAYNAKLAR

1. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı., Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, 2018.

2. Allen, D.E. ve Schriever, W.R., Progressive collapse, abnormal loads, and building codes, ASCE National Meeting on Structural Engineering 1972, 21–47.

3. Starossek, U. ve Wolff, M., Progressive Collapse: Design Strategies, IABSE Symposium Report 2011, 9–16.

4. American Society of Civil Engineers., Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures : ASCE/SEI 7-16., 2017.

5. Kiakojouri, F. De Biagi, V. Chiaia, B. ve Sheidaii, M.R., Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects, Engineering Structures, 206,11 (2020) 110061.

6. National Defense Research Committee., Effects of impact and explosions., Washington, 1946.

7. Christopherson, D.G., Structural defense, London, 1945.

8. Baker, J.F., Plasticity as a factor in the design of war-time structures, Institution of Civil Engineers, London, 1948.

9. Walley, F., The design of bomb-resisting structures against H.E. attack, London, 1954.

10. Adam, J.M. Parisi, F. Sagaseta, J. ve Lu, X., Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century, Engineering Structures, 173,3 (2018) 122–149.

11. Smith, P.P. Byfield, M.P. ve Goode, D.J., Building Robustness Research during World War II, Journal of Performance of Constructed Facilities, 24,6 (2010) 529–535.

12. Bažant, Z.P. ve Verdure, M., Mechanics of Progressive Collapse: Learning from World Trade Center and Building Demolitions, Journal of Engineering Mechanics, 133,3 (2007) 308–319.

13. Pearson, C. ve Delatte, N., Ronan Point Apartment Tower Collapse and its Effect on Building Codes, Journal of Performance of Constructed Facilities, 19,2 (2005) 172–177.

14. https://www.newcivilengineer.com/latest/insight-the-ronan-point-legacy-50-years-on-16-05-2018/ Insight | The Ronan Point legacy 50 years on, 30 Kasım 2022.

15. Agarwal, J. Haberland, M. Holický, M. Sykora, M. ve Thelandersson, S., Robustness

of structures: Lessons from failures, Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 22,1 (2012) 105–111.

16. https://uvadisasters.fandom.com/wiki/Virginia_Skyline_Collapse_of_1973 Virginia Skyline Collapse of 1973, 30 Kasım 2022.

17. Davis, M., Buda's Wagon: A Brief History of the Car Bomb, Verso Publishing, London, 2007.

18. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Marine_Barracks,_Beirut_1982.jpg Marine Barracks, Beirut 1982, 30 Kasım 2022.

19. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/47/MarineBarracksBeirut_23October1983.jpg 1983 Beirut barracks bombings, 30 Kasım 2022.

20. https://www.theguardian.com/uk/2000/aug/28/northernireland.jamiewilson Brighton bomber thinks again, 30 Aralık 2022.

21. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/24/Grand-Hotel-Following-Bomb-Attack-1984-10-12.jpg D4444n., Brighton hotel bombing 30 Kasım 2022.

22. Kazemi-Moghaddam, A. ve Sasani, M., Progressive collapse evaluation of Murrah federal building following sudden loss of column G20, Engineering Structures, 89(2015) 162–171.

23. Corley, W.G. Sr., P.F.M. Sozen, M.A. ve Thornton, C.H., The Oklahoma City Bombing: Summary and Recommendations for Multihazard Mitigation, Journal of Performance of Constructed Facilities, 12,3 (1998) 100–112.

24. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8e/Murrah_Building_-_Aerial.jpg Alfred P. Murrah Federal Building, 30 Kasım 2022.

25. Park, T.W., Inspection of collapse cause of Sampoong Department Store, Forensic Science International, 217,1–3 (2012) 119–126.

26. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/52/2000년대_초반_서울소방_소방공무원%28소방관%29_활동_사진_삼풍001.jpg Sampoong Department Store collapse, 30 Kasım 2022.

27. Kirk, J.A., The World Trade Centre Collapse: Analysis and Recommendations, (2005).

28. Department of Defense., Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, USA, 2016.

29. Byfield, M. Mudalige, W. Morison, C. ve Stoddart, E., A review of Progressive Collapse research and regulations, Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings, 167,8 (2014) 447–456.

30. GSA (General Service Administration)., Progressive collapse analysis and design

guidelines for new federal buildings and major modernization projects, USA, 2003.

31. Department of Defense., Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, USA, 2005.

32. Department of Defense., Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, USA, 2009.

33. Liu, M., Progressive collapse design of seismic steel frames using structural optimization, Journal of Constructional Steel Research, 67,3 (2011) 322–332.

34. Starossek, U., Typology of progressive collapse, Engineering Structures, 29,9 (2007) 2302–2307.

35. Culache, G. Byfield, M.P. Ferguson, N.S. ve Tyas, A., Robustness of Beam-to-Column End-Plate Moment Connections with Stainless Steel Bolts Subjected to High Rates of Loading, Journal of Structural Engineering, 143,6 (2017) 04017015.

36. Dinu, F. Marginean, I. ve Dubina, D., Experimental testing and numerical modelling of steel moment-frame connections under column loss, Engineering Structures, 151(2017) 861–878.

37. Song, B.I. ve Sezen, H., Experimental and analytical progressive collapse assessment of a steel frame building, Engineering Structures, 56(2013) 664–672.

38. Song, B.I. Giriunas, K.A. ve Sezen, H., Progressive collapse testing and analysis of a steel frame building, Journal of Constructional Steel Research, 94(2014) 76–83.

39. Li, K. Wood, C. ve Sezen, H., Progressive Collapse Performance of Buildings and the Contribution of Infill Walls, Structures Congress 2017American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2017, 86–97.

40. Sasani, M., Response of a reinforced concrete infilled-frame structure to removal of two adjacent columns, Engineering Structures, 30,9 (2008) 2478–2491.

41. Sasani, M. ve Sagiroglu, S., Progressive Collapse Resistance of Hotel San Diego, Journal of Structural Engineering, 134,3 (2008) 478–488.

42. Sasani, M. Kazemi, A. Sagiroglu, S. ve Forest, S., Progressive Collapse Resistance of an Actual 11-Story Structure Subjected to Severe Initial Damage, Journal of Structural Engineering, 137,9 (2011) 893–902.

43. Chen, J. Huang, X. Ma, R. ve He, M., Experimental Study on the Progressive Collapse Resistance of a Two-Story Steel Moment Frame, Journal of Performance of Constructed Facilities, 26,5 (2012) 567–575.

44. Bermejo, M. Santos, A.P. ve Goicolea, J.M., Development of Practical Finite Element Models for Collapse of Reinforced Concrete Structures and Experimental Validation, Shock and Vibration, 2017(2017) 1–9.

45. Lew, H.S. Bao, Y. Sadek, F. Main, J.A. Pujol, S. ve Sozen, M.A., An Experimental

and Computational Study of Reinforced Concrete Assemblies under a Column Removal Scenario, Gaithersburg, MD, 2011.

46. Durgun, Y. Karadoğan, F. Pala, S. ve Yüksel, E., Yapısal Çözümleme Cilt I, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2011.

47. Sungur, İ.İ., Taşıyıcı Sistemler ve Yapı Statiği, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2005.

48. Wickersheimer, D.J., The Vierendeel, Journal of the Society of Architectural Historians, 35,1 (1976) 54–60.

49. Aydın, R., Yapı Statiği Hiperstatik Sistemler Teori ve Uygulamalar, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2018.

50. Meng, B. Zhong, W. Hao, J. ve Tan, Z., Improved steel frame performance against progressive collapse with infill panels, Journal of Constructional Steel Research, 158(2019) 201–212.

51. Jeyarajan, S. Richard Liew, J.Y. ve Koh, C.G., Progressive collapse mitigation approaches for steel-concrete composite buildings, International Journal of Steel Structures, 15,1 (2015) 175–191.

52. Qiao, H. Luo, C. Wei, J. ve Chen, Y., Progressive Collapse Analysis for Steel-Braced Frames Considering Vierendeel Action, Journal of Performance of Constructed Facilities, 34,4 (2020) 04020069.

53. American Society of Civil Engineers., Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, USA, 2017.

54. Powell, G.H., Modeling for Structural Analysis : Behavior and Basics., Computers and Structures INC., California, 2010.

55. Celep, Z., Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, 5. Baskı., Beta Basım, İstanbul, 2017.

56. Taleb, R. Bechtoula, H. Sakashita, M. Bourahla, N. ve Kono, S., Investigation of the shear behaviour of multi-story Reinforced Concrete walls with eccentric openings, Computers and Concrete, 10,4 (2012) 361–377.

57. Micelli, F. ve Cascardi, A., Structural assessment and seismic analysis of a 14th century masonry tower, Engineering Failure Analysis, 107,10 (2020) 104198.

58. Beskou, N.D. Hatzigeorgiou, G.D. ve Theodorakopoulos, D.D., Dynamic inelastic analysis of 3-D flexible pavements under moving vehicles: A unified FEM treatment, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 90(2016) 420–431.

59. Kwasniewski, L., Nonlinear dynamic simulations of progressive collapse for a multistory building, Engineering Structures, 32,5 (2010) 1223–1235.

60. Shakeri, A. ve Bargi, K., Use of applied element method for structural analysis, KSCE Journal of Civil Engineering, 19,5 (2015) 1375–1384.

61. Masoero, E. Wittel, F.K. Herrmann, H.J. ve Chiaia, B.M., Hierarchical Structures for a Robustness-Oriented Capacity Design, Journal of Engineering Mechanics, 138,11 (2012) 1339–1347.

62. Hakuno, M. ve Meguro, K., Simulation of Concrete-Frame Collapse due to Dynamic Loading, Journal of Engineering Mechanics, 119,9 (1993) 1709–1723.

63. Artar, M. ve Daloğlu, A.T., Optimum weight design of steel space frames with semi-rigid connections using harmony search and genetic algorithms, Neural Computing and Applications, 29,11 (2018) 1089–1100.

64. Zavala, G.R. Nebro, A.J. Luna, F. ve Coello Coello, C.A., A survey of multi-objective metaheuristics applied to structural optimization, Structural and Multidisciplinary Optimization, 49,4 (2014) 537–558.

65. Zhou, M. Pagaldipti, N. Thomas, H.L. ve Shyy, Y.K., An integrated approach to topology, sizing, and shape optimization, Structural and Multidisciplinary Optimization, 26,5 (2004) 308–317.

66. Mei, L. ve Wang, Q., Structural optimization in civil engineering: A literature review, Buildings, 11,2 (2021) 1–28.

67. Saka, M.P. ve Geem, Z.W., Mathematical and Metaheuristic Applications in Design Optimization of Steel Frame Structures: An Extensive Review, Mathematical Problems in Engineering, 2013(2013) 1–33.

68. Degertekin, S.O., A comparison of simulated annealing and genetic algorithm for optimum design of nonlinear steel space frames, Structural and Multidisciplinary Optimization, 34,4 (2007) 347–359.

69. Kaveh, A. ve Talatahari, S., Hybrid Algorithm of Harmony Search, Particle Swarm and Ant Colony for Structural Design Optimization, Studies in Computational Intelligence 2009, 159–198.

70. Chapman, C.D., Structural Topology Optimization via the Genetic Algorithm, (1994).

71. Artar, M., Kompozit kirişli çelik çerçevelerin genetik algoritma ile optimizasyonu, (2015).

72. Camp, C. V. Bichon, B.J. ve Stovall, S.P., Design of Steel Frames Using Ant Colony Optimization, Journal of Structural Engineering, 131,3 (2005) 369–379.

73. Artar, M. ve Carbas, S., Discrete sizing design of steel truss bridges through teaching-learning-based and biogeography-based optimization algorithms involving dynamic constraints, Structures, 34,May (2021) 3533–3547.

74. Kamali Janfada, B. ve Ghasemi, M., Optimal Design of Steel Moment Frame Structures Using the Ga-Based Reduced Search Space (Ga-Rss) Technique, International Journal of Optimization in Civil Engineering, 10,4 (2020) 611–627.

75. Tharwat, A. ve Schenck, W., A conceptual and practical comparison of PSO-style

optimization algorithms, Expert Systems with Applications, 167,11 (2021) 114430.

76. Glover, F., Tabu Search—Part I, ORSA Journal on Computing, 1,3 (1989) 190–206.

77. Kirkpatrick, S. Gelatt, C.D. ve Vecchi, M.P., Optimization by Simulated Annealing, Science, 220,4598 (1983) 671 LP – 680.

78. Tayfur, B. Yilmaz, H. ve Daloğlu, A.T., Hybrid tabu search algorithm for weight optimization of planar steel frames, Engineering Optimization, (2020) 1–15.

79. Alberdi, R. ve Khandelwal, K., Comparison of robustness of metaheuristic algorithms for steel frame optimization, Engineering Structures, 102(2015) 40–60.

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

81. American Institute of Steel Construction., Specification for Structural Steel Buildings, 2010.

82. American Institute of Steel Construction., Specification for Structural Steel Buildings, 1989.

83. Toĝan, V., Design of planar steel frames using Teaching-Learning Based Optimization, Engineering Structures, 34(2012) 225–232.

84. Degertekin, S.O. ve Hayalioglu, M.S., Sizing truss structures using teaching-learning-based optimization, Computers and Structures, 119(2013) 177–188.

85. https://www.aisc.org/globalassets/aisc/manual/v15.0-shapes-database/aisc-shapes-database-v15.0.xlsx AISC., AISC Shapes Database v15.0, (2017).

86. Clough, R.W., The Finite Element Method in Plane Stress Analysis, 1960.

87. Saouma, E., Matrix Structural Analysis Introduction to Finite Elements CVEN4525/5525, 1999.

88. McGuire William, Gallagher Richard H., Z.R.D., Matrix Structural Analisys - 2nd Edition, CreateSpace Independent Publishing Platform, 1999.

89. Omurtag, M.H., Statik, 6. Basım., Birsen Yayınevi, İstanbul, 2019.

90. Ekiz, İ., Yapı Statiği I İzostatik Sistemler, 1. Baskı., Birsen Yayınevi, İstanbul.

91. Lin, Y. Bian, Z. ve Liu, X., Developing a dynamic neighborhood structure for an adaptive hybrid simulated annealing – tabu search algorithm to solve the symmetrical traveling salesman problem, Applied Soft Computing Journal, 49(2016) 937–952.

92. Lv, P. Yuan, L. ve Zhang, J., Cloud theory-based simulated annealing algorithm and application, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 22,4–5 (2009) 742–749.

93. Rao, R. V. Savsani, V.J. ve Vakharia, D.P., Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems, CAD Computer Aided Design, 43,3 (2011) 303–315.

94. Črepinšek, M. Liu, S.H. ve Mernik, L., A note on teaching-learning-based optimization algorithm, Information Sciences, 212(2012) 79–93.

95. Waghmare, G., Comments on "a note on teaching-learning-based optimization algorithm", Information Sciences, 229(2013) 159–169.

96. Rao, R.V. ve Patel, V., An improved teaching-learning-based optimization algorithm for solving unconstrained optimization problems, Scientia Iranica, (2012).

97. Črepinšek, M. Liu, S.-H. Mernik, L. ve Mernik, M., Is a comparison of results meaningful from the inexact replications of computational experiments?, Soft Computing, 20,1 (2016) 223–235.

98. Črepinšek, M. Liu, S.-H. ve Mernik, M., Replication and comparison of computational experiments in applied evolutionary computing: Common pitfalls and guidelines to avoid them, Applied Soft Computing, 19(2014) 161–170.

99. AISC., AISC Shapes Database v15.0, (2017).

100. ASTM., Standard Specification for Structural Steel Shapes, USA, 2015.

ÖZGEÇMİŞ

Bilal TAYFUR, Lise eğitimini 2009 yılında İstanbul'da Haydarpaşa Lisesinde tamamladıktan sonra 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Bayburt Üniversitesinde 2016 yılında başladığı yüksek lisans eğitimini 2018 yılında tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesinde İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında doktora programına başladı. İyi derecede İngilizce bilen Tayfur evli ve bir çocuk babası olup, 2016 yılından bu yana Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

Yayınlar

1. Tayfur, B. ve Can, Ö., Farklı Yüksekliğe Sahip Boşluklu Perde Duvarlara ait Davranış Eğrilerinin SAP2000 OAPI ile Elde Edilmesi. Academic Platform Journal of Engineering and Science, (2018), 1–1. (TR Dizin)
2. Can, Ö. ve Tayfur, B., Analysis of the Shear Walls for Suitable Opening. Emerging Materials Research, 9, 3 (2020), 1–14. (SCI Expanded)
3. TAYFUR, B.; USLU, E.; CAN, Ö.; CİHAN, A.; ve ÖZTEKİN, E., 2 Eksenli Sarsma Tablası Tasarımı ve İmalatı. Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 3, 2 (2020), 131–137.
4. Tayfur, B.; Yılmaz, H.; ve Daloğlu, A.T. Hybrid tabu search algorithm for weight optimization of planar steel frames. Engineering Optimization, (2020), 1–15. (SCI Expanded)
5. Tayfur, B. ve Daloğlu, A., Optimum Design of Steel Frames Against Progressive Collapse by Guided Simulated Annealing Algorithm, Steel and Composite Structures (Hakem incelemesinde)
6. Tayfur, B. ve Daloğlu. A., An Investigation on Nonlinear Dynamic Analysis for Design of 3D Steel Frames Against Progressive Collapse, International Journal of Steel Structures (Hakem incelemesinde)