



T.C.
ŞIRNAK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÇELİK KAFES YAPILARIN BİYOLOJİ
TABANLI SEZGİSEL BİR ALGORİTMA İLE ŞEKİL
VE ENKESİT OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet ŞANLI

ŞIRNAK, 2025

**T.C.
ŞIRNAK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÇELİK KAFES YAPILARIN BİYOLOJİ
TABANLI SEZGİSEL BİR ALGORİTMA İLE ŞEKİL
VE ENKESİT OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet ŞANLI

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Behram UĞUR

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu tez çalışmasının Şırnak Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırlandığını, bu tez çalışmasında yer alan tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bahse konu bu kural ve ilkelerin gerektirdiği üzere, bu çalışmada özgün olmayan tüm bilimsel içerikleri kurallara uygun biçimde alıntılıyıp kaynak gösterdiğimi beyan ederim. Beyanımınla çelişen herhangi bir delil bulunduğu takdirde tüm sorumluluğu üstleneceğimi kabul ederim.

Mehmet ŞANLI

TEZ YAZIM KILAVUZUNA UYGUNLUK

“Çelik Kafes Yapıların Biyoloji Tabanlı Sezgisel Bir Algoritma ile Şekil ve Enkesit Optimizasyonu” adlı Yüksek Lisans Tezi, Şırnak Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu’na uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan

Mehmet ŞANLI

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Behram UĞUR

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Başkanı

Doç. Dr. Sedat ÖZCANAN

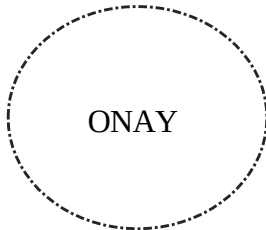
KABUL VE ONAY SAYFASI

Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Behram UĞUR danışmanlığında **Mehmet ŞANLI** tarafından hazırlanan “**Çelik Kafes Yapıların Biyoloji Tabanlı Sezgisel Bir Algoritma ile Şekil ve Enkesit Optimizasyonu**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Şırnak Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jürisi	Unvanı, Adı ve Soyadı	İmza
Jüri Başkanı	Doç. Dr. Sedat ÖZCANAN	
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Gülay YALÇIN BAYAR	
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Behram UĞUR	

Savunma Tarihi: 26.05.2025

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun ../../.... tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. İbrahim HÜSEYİNİ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın şekillenmesinde büyük katkıları olan değerli danışman hocam Sayın Dr. İbrahim Behram UĞUR'a, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşarak sabırla rehberlik edip yol gösterdiği ve her zaman değerli vaktini ayırarak desteğini esirgemediği için en içten teşekkürlerimi sunarım. Hocamın bu süreçte yol göstericiliği, yalnızca akademik bilgi kazanmamı sağlamakla kalmamış; aynı zamanda düşünsel derinlik kazanmamda da önemli bir rol oynamıştır.

Bu süreçte bana olan inancıyla güç ve cesaret veren babama ve hayatın her döneminde yanımda olan aileme sonsuz teşekkür ederim. Onların koşulsuz desteği, özverisi ve bana duydukları güven, her zaman en güçlü dayanağım ve ilham kaynağım olmuştur.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	ix
ABSTRACT.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER LİSTESİ.....	xiv
KISALTMALAR LİSTESİ.....	xvi
GİRİŞ	1
1. LİTERATÜR ÖZETİ	4
1.1. Farklı Sezgisel Yöntemler ile Yapılan Çalışmalar	4
1.2. LPO Algoritması Kullanılarak Yapılan Çalışmalar.....	12
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	13
2.1. Optimizasyon Tanımı	13
2.2. Optimizasyonun Temel Unsurları.....	13
2.2.1. Amaç fonksiyonu	13
2.2.2. Tasarım değişkenleri.....	13
2.2.3. Tasarım sınırlayıcıları.....	14
2.3. Optimizasyon Aşamaları.....	14
2.4. Sezgisel Optimizasyon Yöntemleri	15
2.5. Akciğer Performansına Dayalı Optimizasyon (Lung Performance-Based Optimization - LPO)	17
2.5.1. LPO Algoritması için modelleme	17
2.5.2. LPO Algoritması ile optimizasyon süreci.....	19
2.6. Kafes Yapılar.....	24
2.6.1. Kafes Yapıların Optimizasyon Probleminin Matematiksel İfadesi.....	24
3. SAYISAL UYGULAMALAR	27
3.1. Kafes Yapıların Enkesit Optimizasyonu	29
3.1.1. 25 elemanlı uzay kafes.....	29
3.1.2. 72 elemanlı uzay kafes.....	36
3.1.3. 200 elemanlı düzlem kafes	42
2.1.1. 942 elemanlı uzay kafes.....	48
2.2. Kafes Yapıların Şekil Optimizasyonu	56
2.2.1. 15 elemanlı düzlem kafes	56

2.2.2. 18 elemanlı düzlem kafes	61
2.2.3. 25 elemanlı uzay kafes.....	66
2.2.4. 288 elemanlı uzay kafes.....	73
SONUÇ VE ÖNERİLER	85
KAYNAKÇA.....	87
EKLER	92



ÖZET

ÇELİK KAFES YAPILARIN BİYOLOJİ TABANLI SEZGİSEL BİR ALGORİTMA İLE ŞEKİL VE ENKESİT OPTİMİZASYONU

ŞANLI, Mehmet

Yüksek Lisans, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Behram UĞUR

Mayıs 2025, 106 sayfa

Bu tez çalışmasında, yapısal mühendislikte çelik kafes yapıların optimizasyonu için yenilikçi bir sezgisel yöntem olan Akciğer Performansına Dayalı Optimizasyon (Lung Performance-Based Optimization - LPO) algoritmasının etkinliği incelenmiştir. LPO algoritması ile yapısal sistemlerin taşıma kapasitesi, dayanıklılığı ve elastik davranışı esas alınarak, yapı elemanlarının optimum boyutlandırılması ve yerleşimi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, enkesit optimizasyonu için dört farklı çelik kafes yapı ve şekil optimizasyonu için yine dört farklı çelik kafes yapı üzerinde algoritmanın performansı değerlendirilmiştir. Optimizasyon sürecinde eleman gerilmeleri, deplasmanlar ve burkulma kriterleri göz önünde bulundurularak statik analiz gerçekleştirilmiş; bu amaçla MATLAB ortamında Matris Deplasman Yöntemi'ne dayalı bir analiz programı geliştirilmiştir. Literatürde ilk kez bu tez kapsamında, 288 elemanlı üç boyutlu bir çelik kafes sistemin hem şekil hem de enkesit optimizasyonu gerçekleştirilmiş; elde edilen sonuçlar SAP2000 yazılımı ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Düğüm noktası deplasmanları, eleman uç kuvvetleri ve dayanım oranlarında tam uyum sağlanmış, geliştirilen programın güvenilirliği teyit edilmiştir. Elde edilen bulgular, LPO algoritmasının geniş çözüm uzaylarında hızlı ve güvenilir sonuçlar üretebildiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, lokal minimumlara takılmadan global optimuma yakın çözümler bulmada yüksek başarı sağladığı gözlemlenmiştir. Bu yönleriyle LPO, yapısal tasarım optimizasyonunda yaygın olarak kullanılan sezgisel yöntemlerle karşılaştırıldığında etkili ve tercih edilebilir bir yöntem olarak değerlendirilebilir.

Anahtar Kelimeler: Çelik Kafes Yapılar, Enkesit ve Şekil Optimizasyonu, Sezgisel Algoritmalar, Akciğer Performansına Dayalı Optimizasyon, LPO Algoritması, Yapısal Optimizasyon, Optimum Tasarım

ABSTRACT

SHAPE AND SIZING OPTIMIZATION OF STEEL TRUSS STRUCTURES WITH A BIOLOGY-BASED HEURISTIC ALGORITHM

ŞANLI, Mehmet

Master's Degree in Department of Civil Engineering

Supervisor: Dr. İbrahim Behram UĞUR

May 2025, 106 pages

In this study, the effectiveness of the Lung Performance-Based Optimization (LPO) algorithm, an innovative heuristic method for the optimization of steel truss structures in structural engineering, has been investigated. The LPO algorithm aims to optimize the sizing and placement of structural elements based on the load-carrying capacity, durability, and elastic behavior of structural systems. Within this scope, the algorithm's performance was evaluated on four different steel truss structures for cross-section optimization and four different steel truss structures for shape optimization. During the optimization process, static analysis was performed by considering element stresses, displacements, and buckling criteria; for this purpose, an analysis program based on the Matrix Displacement Method was developed in the MATLAB environment. For the first time in the literature, both shape and cross-section optimization of a three-dimensional steel truss system with 288 elements were performed within the scope of this thesis; the results obtained were verified by comparing them with the SAP2000 software. Full agreement was achieved in node point displacements, element end forces, and strength ratios, confirming the reliability of the developed program. The findings revealed that the LPO algorithm can produce fast and reliable results in large solution spaces. Additionally, it was observed that the algorithm achieved high success in finding solutions close to the global optimum without getting stuck in local minima. In this regard, LPO can be considered an effective and preferable method when compared to heuristic methods commonly used in structural design optimization.

Keywords: Steel Truss Structures, Size and Shape Optimization, Heuristic Algorithms, Lung Performance-Based Optimization, LPO Algorithms, Structural Optimization, Optimum Design

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Akciğer fonksiyonunu simüle etmek için kullanılan RC Devresi Modeli (Ghasemi vd. 2024)	18
Şekil 2. LPO algoritmasına ait akış diyagramı	23
Şekil 3. 25 elemanlı uzay kafes yapı geometrisi (Serpik, 2020)	29
Şekil 4. 25 elemanlı uzay kafes yapı eleman gerilme değerleri	33
Şekil 5. 25 elemanlı uzay kafes yapı düğüm noktası deplasman değerleri (1. yükleme durumu).....	33
Şekil 6. 25 elemanlı uzay kafes yapı düğüm noktası deplasman değerleri (2. yükleme durumu).....	34
Şekil 7. 25 elemanlı uzay kafes yapı yakınsama süreci.....	35
Şekil 8. 25 elemanlı uzay kafes yapıya ait nihai tasarım.....	35
Şekil 9. 72 elemanlı uzay kafes yapı geometrisi (Khodadadi vd. 2023)	36
Şekil 10. 72 elemanlı uzay kafes yapı eleman gerilme değerleri	37
Şekil 11. 72 elemanlı uzay kafes yapı düğüm noktası deplasman değerleri (1. yükleme durumu).....	39
Şekil 12. 72 elemanlı uzay kafes yapı düğüm noktası deplasman değerleri (2. yükleme durumu).....	40
Şekil 13. 72 elemanlı uzay kafes yapı yakınsama süreci.....	40
Şekil 14. 72 elemanlı uzay kafes yapıya ait nihai tasarım.....	41
Şekil 15. 200 elemanlı düzlem kafes yapı geometrisi (Serpik, 2020)	43
Şekil 16. 200 elemanlı düzlem kafes yapı eleman gerilme değerleri	46
Şekil 17. 200 elemanlı düzlem kafes yapı yakınsama süreci	47
Şekil 18. 200 elemanlı düzlem kafes yapıya ait nihai tasarım	48
Şekil 19. 942 elemanlı uzay kafes yapı geometrisi (Kaveh ve Hosseini, 2022)	49
Şekil 20. 942 elemanlı uzay kafes yapı eleman gerilme değerleri	53

Şekil 21. 942 elemanlı uzay kafes yapı düğüm noktası deplasman değerleri	54
Şekil 22. 942 elemanlı uzay kafes yapı yakınsama süreci.....	54
Şekil 23. 942 elemanlı uzay kafes yapıya ait nihai asarım	55
Şekil 24. 15 elemanlı düzlem kafes yapı (Jawad vd. 2021)	56
Şekil 25. 15 elemanlı düzlem kafes yapı eleman gerilme değerleri	59
Şekil 26. 15 elemanlı düzlem kafes yapı yakınsama süreci	60
Şekil 27. 15 elemanlı düzlem kafes yapıya ait nihai tasarım	60
Şekil 28. 18 elemanlık kafes yapı geometrisi (Awad, 2021).....	61
Şekil 29. 18 elemanlı kafes yapı burkulma ve gerilme sınır değerleri	64
Şekil 30. 18 elemanlı düzlem kafes yapı elemanlarının dayanım oranları	65
Şekil 31. 18 elemanlı düzlem kafes yapı yakınsama süreci	65
Şekil 32. 18 elemanlı düzlem kafes yapıya ait nihai tasarım	66
Şekil 33. 25 elemanlı kafes yapı eleman gerilme değerleri	68
Şekil 34. 25 elemanlı kafes yapı düğüm noktası deplasman değerleri.....	71
Şekil 35. 25 elemanlı kafes yapı yakınsama süreci	72
Şekil 36. 25 elemanlı kafes yapıya ait nihai tasarım	72
Şekil 37. 288 elemanlı kafes yapı geometrisi	73
Şekil 38. 288 elemanlı kafes yapı düğüm noktası deplasman değerleri (1. yükleme durumu).....	79
Şekil 39. 288 elemanlı kafes yapı düğüm noktası deplasman değerleri (2. yükleme durumu).....	80
Şekil 40. 288 elemanlı kafes yapı düğüm noktası deplasman değerleri (3. yükleme durumu).....	80
Şekil 41. 288 elemanlı kafes eleman dayanım oranları	81
Şekil 42. 288 elemanlı kafes yapı yakınsama süreci	82
Şekil 43. 288 elemanlı kafes yapıya ait nihai tasarım	83

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1. Akciğer fonksiyonu ile LPO algoritmasındaki eşdeğer kavramlar (Ghasemi vd. 2024)	19
Çizelge 2. Farklı popülasyon sayıları için optimizasyon sonuçları	28
Çizelge 3. 25 elemanlı uzay kafes yapı yükleme durumu	30
Çizelge 4. 25 elemanlı uzay kafes yapı gerilme sınır değerleri	30
Çizelge 5. 25 elemanlı uzay kafes yapı optimizasyon sonuçları	32
Çizelge 6. 72 elemanlı uzay kafes yapı yükleme durumu	37
Çizelge 7. 72 elemanlı uzay kafes yapı optimizasyon sonuçları	38
Çizelge 8. 200 elemanlı düzlem kafes yapı tasarım değişkenleri	42
Çizelge 9. 200 elemanlı düzlem kafes yapı yükleme durumu	44
Çizelge 10. 200 elemanlı düzlem kafes yapı optimizasyon sonuçları	45
Çizelge 11. 942 elemanlı uzay kafes yapı yükleme durumu	50
Çizelge 12. 942 elemanlı uzay kafes yapı optimizasyon sonuçları	51
Çizelge 13. 15 elemanlı düzlem kafes optimizasyon sonuçları	58
Çizelge 14. 18 elemanlı kafes yapı tasarım değişkenleri	62
Çizelge 15. 18 elemanlı kafes yapı optimizasyon sonuçları	63
Çizelge 16. 25 elemanlı kafes yapı yükleme durumu	67
Çizelge 17. 25 elemanlı kafes yapı optimizasyon sonuçları	69
Çizelge 18. 288 elemanlı kafes yapı için enkesit tablosu	74
Çizelge 19. 288 elemanlı kafes yapı optimizasyon sonuçları	77

SİMGELER LİSTESİ

Simge	Açıklama
A	Enkesit alanı
α	Popülasyon aralığını belirleyen parametre
C	Ceza katsayısı
D	Tabaka kalınlığı
d_{max}	Deplasman üst sınır değeri
$d(X)$	Deplasman ihlali oranı
E	Elastisite modülü
fr	Problemin boyutu
$f(x)$	Amaç fonksiyonu
$Iter_{maks}$	Maksimum iterasyon sayısı
ΔP	Basınç değişimi
K	Gaz difüzyon katsayısı
K_{ij}	Yeni popülasyonu belirleyen parametre
L	Eleman uzunluğu
L_b	Enkesit alanı alt sınırı
M_i	Başlangıç popülasyonu
M_i^{new}	Yeni popülasyon
N_e	İnhalasyon-ekshalasyon sayısı
n_m	Eleman sayısı
N_g	Tasarım değişkeni sayısı
N_{pop}	Popülasyon sayısı

Ne	Nefes alış-veriş sayısı
R	Direnç
P	Birim hacim ağırlığı
σ_c	Basınç gerilmesi
σ_t	Çekme gerilmesi
S_i	Her iterasyonda azalan bir olasılık değeri
$S(X)$	Gerilme ihlali oranı
S_{maks}	Gerilme üst sınır değeri
Sd	Standart sapma
U_b	Enkesit alanı üst sınırı
W	Kafes yapı ağırlığı
W_{min}	Minimum ağırlık
W_{maks}	Maksimum ağırlık
W_{ort}	Ortalama ağırlık
W_p	Cezalı ağırlık değeri
$W_p(X)$	Cezalı amaç fonksiyonu
X	Enkesit alanı
X_{nsl}	Tasarım uzayındaki enkesit sayısı
Z_R	Solunum direnci
Z_X	Solunum reaktansı

KISALTMALAR LİSTESİ

ABC	Artificial Bee Colony (Yapay Arı Kolonisi)
ACO	Ant Colony Optimization (Karıncı Koloni Algoritması)
ADEA	Adaptive Differential Evolution Algorithm (Uyarlanabilir Diferansiyel/Farklılaşım Evrim Algoritması)
AISC-LRFD	American Institute of Steel Construction-Load and Resistance Factory Design (Amerikan Çelik Yapılar Entitüsü- Yük ve Dayanım Faktörlü Tasarım)
AP	Adaptive Penalty (Uyarlanabilir Ceza Fonksiyonu)
ARSAGA	Real-Parameter Simulated Annealing Genetic Algorithm (Gerçek Parametrelili Benzetilmiş Tavlama Genetik Algoritması)
CA-ICEA	Cellular Automata-Expanding Competitive Algorithm (Hücre Otomatı-Yayılmacı Rekabetçi Algoritma)
CEC2005	Congress on Evolutionary Computation-2005 (Evrimsel Hesaplama Kongresi-2005)
CGO	Chaos Game Optimization (Kaos Oyunu Optimizasyonu)
CHT	Constraint-Handling Technique (Kısıtlama-İşleme Tekniği)
CMLPSA	Corrected Multi-Level & Multi-Point Simulated Annealing (Düzeltilmiş Çok Katmanlı ve Çoklu Nokta Benzetilmiş Tavlama)
COA	Coyote Optimization Algorithm (Çakal Optimizasyon Algoritması)
CPSO	Cellular Particle Swarm Optimization (Hücresel Parçacık Sürü Optimizasyonu)
CS	Cuckoo Search (Guguk Kuşu Arama)
DE	Dolphin Echolocation (Yunus Ekolokasyonu)
D-ICDE	Discrete-Improved Constrained Differential Evolution (Ayrık- Geliştirilmiş Kısıtlı Diferansiyel Evrim Algoritması)
DO	Dandelion Optimizer (Karahindiba Optimizeri)
FA	Firefly Algorithm (Ateşböceği Algoritması)
FBS	Feasible Boundary Search (Uygulanabilir Sınır Arama)

FM-GA	Forced Method-Genetic Algorithm (Kuvvet Yöntemi-Genetik Algoritma)
FPA	Flower Pollination Algorithm (Çiçek Tozlaşma Algoritması)
FSD	Fully Stressed Design (Tam Gerilmeli Tasarım)
GA	Genetic Algorithm (Genetik Algoritma)
GLS-ECLPSO	Gaussian Local Search-Based Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization (Gauss Yerel Aramalı Kapsamlı Öğrenme Parçacık Sürüsü Optimizasyonu)
GMO	Geometric Mean Optimization (Geometrik Ortalama Optimizasyonu)
GNMS	Genetik-Nelder Mead Simplex Algoritması
GSO	Group Search Optimization (Grup Arama Optimizasyonu)
HPSACO	Heuristic Particle Swarm Ant Colony Optimization (Sezgisel Parçacık Sürüsü - Karınca Kolonisi Optimizasyonu)
HPSSO	Hybrid Particle Swallow Swarm Optimization (Hibrit Parçacık Yutma Sürüsü Optimizasyonu)
HS	Harmony Search (Armoni Arama)
IGA	Improved Genetic Algorithm (Geliştirilmiş Genetik Algoritma)
IRO	Improved Ray Optimization (Geliştirilmiş Ray Optimizasyonu)
JA	Jaya Algoritması
JSI	Job Search Inspired (İş Arama Esinli)
LPO	Lung Performance Based Optimization (Akciğer Performansına Dayalı Optimizasyon)
MGA	Material Generation Algorithm (Malzeme Üretme Algoritması)
MHS	Modified Harmony Search (Modifiye Edilmiş Armoni Arama)
MRFO	Manta Ray Foraging Optimization (Manta Ray Toplayıcılık Optimizasyonu)
PO	Political Optimization (Politik Optimizer)
PSO	Particle Swarm Optimization (Parçacık Sürü Optimizasyonu)
PSOPC	Passive Sum Particle Swarm Optimization (Pasif Toplamalı Parçacık Sürü Optimizasyonu)

SAHS	Self Adaptive Harmony Search (Kendini Uyarlayan Armoni Arama)
SCPSO	Sequential Cellular Particle Swarm Optimization (Sıralı Hücresel Parçacık Sürü Optimizasyonu)
SRM	Statistical Regeneraiton Mechanism (İstatistiksel Yenileme Mekanizması)
SSOA	Shuffled Shepherd Optimization Algorithm (Karışık Çoban Optimizasyon Algoritması)
TLBO	Teaching-Learning Based Optimization (Öğretme-Öğrenme Esaslı Optimizasyon)
WEO	Water Evaporation Optimization (Su Buharlaşması/Dönüşüm Optimizasyonu)



GİRİŞ

Son yıllarda, yapay zekâ ve bilgisayar bilimlerindeki ilerlemeler, inşaat mühendisliği sektöründe problem çözme yaklaşımlarını da etkilemiştir. Birçok alanda kullanımı oldukça hızlı bir şekilde yaygınlaşan yapay zekâ teknolojisinin inşaat mühendisliği alanında başlıca uygulamalarından biri, algoritmalar yardımıyla gerçekleştirilen yapısal optimizasyon yöntemleridir. Büyük ölçekli kompleks yapıların tasarımı ve diğer mühendislik problemlerinin çözümünde kritik bir rol oynayan yapısal optimizasyon işlemi; belirli sınır koşulları ve kısıtlayıcılar altında, verilen bir tasarım topolojisinin esas alınarak malzeme dağılımının veya şeklinin değiştirilmesi suretiyle mümkün olan en iyi tasarıma ulaşılması olarak tanımlanabilir. Dolayısıyla yapısal optimizasyonda amaç; en az çabayla, uygulanan yükleri güvenli bir şekilde taşıyabilen en hafif yapılar üretmektir. Bu da eleman enkesit alanları ve/veya yapının şeklini teşkil eden eleman uzunlukları ya da düğüm noktası koordinatları gibi yapısal tasarım değişkenleri üzerinde yapılacak değişikliklerle sağlanabilir. Bu noktada, yapı elemanlarının kesit kalınlıkları için en uygun çözümleri bulmak üzere yaygın olarak kullanılan bir yöntem olan enkesit optimizasyonu ve yüksek gerilme değerleri ile karşılaşılan bölgelerde eleman uzunluklarını ayarlayarak mevcut gerilmeyi eşit bir şekilde dağıtma prensibine dayanan şekil optimizasyonundan bahsedilebilir. Optimizasyon sürecinde enkesit ve şekil optimizasyonları eş zamanlı olarak da yürütülebilmektedir. Optimizasyon açısından dikkat edilmesi gereken diğer kavramlar ise optimizasyon sürecinin bir sınıra doğru yaklaştığını gösteren yakınsama durumu ve kullanılan yöntemin bir sonuca götürme kararlılığına işaret eden standart sapma değeridir.

Sezgisel algoritmalar, çözüm uzayında optimum veya optimuma yakın çözümleri bulmayı amaçlayan güçlü matematiksel araçlardır. Özellikle doğadaki biyolojik, fiziksel veya sosyal süreçlerden esinlenerek geliştirilen bu algoritmalar, optimizasyon problemlerinde geniş bir çözüm stratejisi yelpazesi sunmaktadır. Bu algoritmalar, genellikle geniş bir çözüm uzayını hızlı bir şekilde tarayarak yerel minimumlara takılmadan daha iyi sonuçlar sağlar. Bu yüzden özellikle çözümü zor ve karmaşık olan mühendislik problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Klasik optimizasyon yöntemlerinden farklı olarak sezgisel algoritmalar, global optimuma ulaşmak için problem çözüm sürecinde rastgelelik ve adaptasyon prensiplerinden yararlanır. Genetik algoritmalar, parçacık sürü optimizasyonu, karınca kolonisi optimizasyonu gibi popüler örnekleri, mühendislik ve bilimsel araştırmalarda sıkça karşılaşılan optimizasyon sorunları için etkili çözümler sunmaktadır.

Yapısal optimizasyon problemlerinin çözümünde her biri farklı bir doğal süreçten esinlenen pek çok algoritma kullanılabilmekle beraber bu çalışmada, solunum sisteminde kritik öneme sahip akciğerlerin çalışma prensibinden esinlenerek ortaya konulmuş biyoloji tabanlı sezgisel bir algoritma olan Akciğer Performansına Dayalı Optimizasyon (Lung Performance-Based Optimization - LPO) yöntemi kullanılacaktır. Akciğerler, bilindiği üzere etrafımızdaki havadan oksijeni filtreleyip dolaşım sistemine etkili bir şekilde iletirken aynı zamanda karbondioksiti dolaşım sisteminden uzaklaştırmak ve gaz değişim sürecinde havaya vermekten sorumludur. Akciğerin biyolojik işleyişinden ilham alınarak geliştirilen algoritmanın kullanıldığı bu çalışmada, LPO Algoritması'nın, düzlem ve uzay kafes yapıların gerilme, deplasman ve burkulma sınırlayıcıları altında dayanım ve malzeme verimliliği açısından optimum tasarımına uygulanabilirliği araştırılacaktır. LPO'nun tercih edilmesinin başlıca nedeni, çoklu kısıtlar altında karmaşık yapıların optimum tasarımını yüksek doğrulukla gerçekleştirebilme potansiyelidir. LPO algoritması geniş çözüm uzayında daha etkili bir arama gerçekleştirerek global çözümlere daha yüksek olasılıkla ulaşabilmektedir. Ayrıca hızlı yakınsama yeteneği ve hassas çözüm arama kapasitesi sayesinde hem hesaplama süresinde verimlilik sağlamak hem de mühendislik uygulamalarına doğrudan entegre edilebilecek nitelikte sonuçlar üretmektedir. Bu yönüyle LPO, malzeme verimliliğinin kritik öneme sahip olduğu sektörlerde yenilikçi çözümler sunma potansiyeline sahiptir. Akademik açıdan ise, LPO yöntemi mevcut sezgisel algoritmalar literatürüne biyolojik sistem temelli özgün bir yaklaşım kazandırmakta ve yapı optimizasyonu alanında alternatif çözüm yolları geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. LPO algoritmasına yönelik, literatürde şu ana dek yalnızca mühendislik test problemleri üzerinde gerçekleştirilmiş tek bir çalışma yer almaktadır. Bu bağlamda, LPO yöntemi ilk kez kafes yapıların optimizasyonunda uygulanmış; AISC-LRFD yönetmeliğine göre kısıtları tanımlanmış, gerçek boyutlu bir tasarım modeli olan 288 elemanlı uzay kafes yapı ise, bu çalışma kapsamında optimize edilerek yapı optimizasyonu alanında literatüre yeni bir uygulama örneği sunulmuştur.

Tez çalışması; giriş bölümüyle beraber literatür özeti, materyal ve yöntem, sayısal uygulamalar ile sonuç ve öneriler olmak üzere beş ana bölümden oluşmaktadır. Literatür özeti bölümünde, çelik kafes yapıların optimizasyonu üzerine farklı algoritmalar kullanılarak yapılan çalışmalar ve bulguları özetlenmiştir. Materyal ve yöntem bölümünde, LPO algoritmasının teorik altyapısı detaylı bir şekilde açıklanmış ve bu algoritmanın çelik kafes yapıların enkesit ve şekil optimizasyonuna nasıl entegre edildiği açıklanmıştır. Sayısal

uygulamalar bölümünde, literatürde yaygın olarak kullanılan farklı ölçeklerdeki kafes yapı örnekleri üzerinde enkesit ve şekil optimizasyonuna yönelik yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda enkesit optimizasyonu için dört kafes ve şekil optimizasyonu için dört kafes olmak üzere toplamda sekiz kafes yapı analiz edilmiştir.

Optimizasyon sürecinde eleman gerilmelerinin, düğüm noktası deplasmanlarının ve eleman kritik burkulma gerilmelerinin güvenilir bir şekilde değerlendirmesi için yapıların statik analizinin yapılması gerekmektedir. Bu amaçla, kafes yapı sistemlerinin analizi için MATLAB programlama dilinde Matris Deplasman Yöntemi'ne dayalı bir analiz programı geliştirilmiştir. Bu yöntem aracılığıyla eleman uç kuvvetleri ve düğüm noktası deplasmanları hesaplanmış, bu veriler ile elde edilen tasarımlara ait gerilme ve deplasman sınır değerlerinin aşılp aşılmadığı kontrol edilmiştir. Böylece üçüncü parti bir yazılıma ihtiyaç duyulmadan, daha hızlı ve doğrudan sonuçlara ulaşılması hedeflenmiştir. Geliştirilen programın doğruluğunu sınamak amacıyla, 288 elemanlı üç-boyutlu kafes sistem SAP2000 yazılımında birebir modellenmiş ve her iki ortamda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma, düğüm noktası deplasmanları, eleman uç kuvvetleri ve AISC-LRFD93 yönetmeliğine göre hesaplanan dayanım oranlarını içerecek biçimde kapsamlı olarak gerçekleştirilmiş; tüm sonuçlar için mutlak uyum sağlandığı görülmüştür. Böylece geliştirilen statik analiz programının, optimizasyon sürecinde güvenle kullanılabileceği teyit edilmiştir. Karşılaştırmaya ilişkin ayrıntılı tablo ve grafikler Ek 1– 4'te sunulmuştur.

1. LİTERATÜR ÖZETİ

Tez konusu ile ilişkili çalışmalar, iki ana başlık altında incelenmiştir: (i) farklı metasezgisel yöntemler kullanılarak, sürekli ve/veya ayrık tasarım değişkenlerine sahip kafes yapıların optimizasyonuna yönelik çalışmalar ve (ii) Akciğer Performansına Dayalı Optimizasyon (LPO) algoritması kullanılarak yapılan çalışmalar. Bu sınıflandırma hem literatürdeki yöntem çeşitliliğini hem de çalışmanın özgün katkı sağladığı LPO tabanlı yaklaşımları sistematik biçimde değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

1.1. Farklı Sezgisel Yöntemler ile Yapılan Çalışmalar

Erbatur vd. (2000), Genetik Algoritma (GA) yöntemini kullanarak sırasıyla; (1) 25 elemanlı uzay kafes, (2) 72 elemanlı kule, (3) 112 elemanlı kubbe, (4) 22 elemanlı düzlem kafes, (5) 5 kademeli konsol giriş ve (6) 29 elemandan oluşan endüstriyel bir yapı üzerinde optimizasyon işlemi gerçekleştirmiştir. Sonuçlara bakıldığında karşılaştırılan diğer yöntemlere göre 1, 3 ve 6. yapılarda en iyi çözümleri bulunmuş; 2 ve 5'te yine tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir. 4. yapıda ise 22 tasarım değişkeninden 17'sinin optimum değeri ikinci optimizasyonda kolayca elde edilmiş, üçüncü optimizasyonda ise tüm değişkenler için optimum çözüm bulunarak çözüm açısından GA'nın en etkili olduğu yapı olmuştur.

Lee ve Geem (2004), Armoni Arama (HS) yöntemini, sürekli tasarım değişkenli farklı ölçekte sekiz kafes yapı örneği üzerinde uygulayarak algoritmanın etkinliğini incelemiştir. 2001 yılında Zong Woo Geem tarafından farklı enstrümanların bir araya gelerek uyumlu bir melodi oluşturma süreci ilham alınarak geliştirilmiş bir optimizasyon yöntemidir. Bu yöntem, çözüm uzayındaki farklı çözüm kümelerini "armoni" olarak düşünüp, en iyi çözümü aramayı hedefler. Çalışma sonunda elde edilen bulgular, genetik algoritma tabanlı yaklaşımlara kıyasla yapı mühendisliği problemlerini çözmek için HS algoritmasının güçlü bir arama ve optimizasyon yöntemi olduğunu göstermiştir.

Li vd. (2007), mafsallı yapıların optimum tasarımı için Pasif Toplamalı Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSOPC) ve uyum arama (HS) algoritmasına dayanan bir hibrit parçacık sürü optimizasyonu (HPSO) geliştirmişlerdir. HPSO algoritması, probleme özgü kısıtlamalar için bir 'geri dönüş mekanizması' yöntemi kullanırken HS algoritması, tasarım kısıtlayıcıları için kullanılmıştır. HPSO algoritmasının etkinliği, beş düzlemsel ve uzaysal kafes yapının optimum tasarımı için PSO ve PSOPC algoritmaları ile kıyaslanarak test edilmiştir. Sonuçlar, HPSO algoritmasının ilk iterasyonlarda PSO ve PSOPC

algoritmalarından daha hızlı optimum tasarıma yakınsadığını ancak iterasyon sayısı arttığında yakınsama hızının yavaşladığını göstermiştir.

Sönmez (2011), Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritmasına ‘uyarlanabilir ceza fonksiyonu’ (adaptive penalty –AP) entegre ederek ABC-AP yaklaşımıyla kafes yapıların ağırlığını minimize etmeye çalışmıştır. ABC algoritması, bal arılarının akıllı yiyecek arama davranışından esinlenen sürü zekası tabanlı bir optimizasyon tekniğidir. Çalışmada AP, kısıtlı optimizasyon problemlerini kısıtsız optimizasyon problemlerine dönüştürmek için kullanılmıştır. Kafes yapılar için en uygun tasarımın oluşturulmasında ABC-AP yönteminin etkinliğini araştırmak için çoklu yükleme koşullarına maruz beş kafes yapı üzerinde optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında, ABC-AP yönteminin yapısal tasarım için güçlü bir arama ve optimizasyon tekniği olduğu vurgulanmıştır. Yapısal analiz sayısı arttıkça yakınsama hızında ise herhangi bir gelişim olmaması, yöntemin bir dezavantajı olarak belirtilmiştir.

Miguel vd. (2013), kafes yapıların eş zamanlı boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu için çalışmalarında tek aşamalı ateşböceği tabanlı algoritma (FA) yönteminin etkinliğini incelemişlerdir. Çalışmada deplasman ve gerilme kısıtlamaları altında hem ayrık hem sürekli değişkenleri içeren karma tasarım değişkenleri kullanılmıştır. Çalışma sonunda, literatürdeki çalışmalarla benzer sonuçlar elde edilmiş, bazı örneklerde ise kullanılan yöntem daha iyi sonuç vermiştir. Ayrıca, çalışmada çok modlu optimizasyon gerçekleştirilmiş, böylece her bir çalıştırmada birden fazla optimal veya optimale yakın çözüm bulunmuş ve optimizasyon aşamasının sonunda birden fazla tasarım ortaya çıkmıştır. Uygunluk fonksiyonlarında yapısal yönleri veya estetiği hesaba katmak her zaman mümkün olmadığı için çok modlu optimizasyonun mühendisin dış gereksinimlerini göz önünde bulundurarak bu seçenekleri değerlendirmesine olanak tanıdığı ve bu yüzden çok cazip olduğu vurgulanmıştır.

Bekdaş vd. (2015), Çiçek Tozlaşma Algoritması (FPA) ile kafes yapıların ağırlık optimizasyonu üzerine araştırma yapmışlardır. FPA, çiçekli bitkilerin çapraz tozlaşma ve kendi kendine tozlaşmasından esinlenerek yerel ve global aramaları verimli bir şekilde birleştirmeyi amaçlar. Ayrıca bu yöntem ile, deneme tasarımlarının, izin verilen kısıtlama ihlali miktarına bağlı olarak kabul edildiği veya reddedildiği ‘yinelemeli bir kısıtlama işleme stratejisi’ uygulanarak, optimum çözüme yaklaştıkça kısıtlama ihlali miktarı aşamalı olarak azaltılır. Üç klasik kafes yapının boyutlandırma optimizasyonu ile yöntemin etkinliği test

edilmiştir. Optimizasyon sonuçları, önerilen yöntemin literatürde sunulan diğer metasezgisel algoritmalarla rekabetçi olduğunu göstermiştir.

Değertekin vd. (2018), kafes yapıların boyutlandırma ve düzen optimizasyonu için Jaya Algoritmasının (JA) uygulanabilirliğini araştırmışlardır. JA, en iyi çözüme yaklaşmak ve en kötü çözümden kaçmak üzerine kurulu basit bir formülasyona sahiptir. Bu araştırmada yakınsama hızını artırmak ve optimizasyon sürecinde gerekli olan yapı analizi sayısını azaltmak amacıyla orijinal JA formülasyonu üzerinde değişiklik yapılmıştır. JA'nın kafes yapıların optimizasyonu açısından uygunluğunu araştırmak için, 942 ve 1938 elemanlı büyük ölçekli yapılar dâhil olmak üzere altı kafes yapı üzerinde ağırlık minimizasyonu yapılmıştır. Çalışmada kullanılan kafes yapı örnekleri, yapı optimizasyonunda çok yaygın olan ve tasarımcıların karşılaşabileceği tüm senaryoları tanımlayan referans problemlerdir. Sonuçlar, JA'nın, optimize edilmiş ağırlık, standart sapma ve yapı analizlerinin sayısı açısından diğer metasezgisel yöntemlerden daha iyi tasarımlar elde edebileceğini göstermiştir.

Omidinasab ve Goodarzimehr (2019), ayırık değişkenli kafes yapıların optimum tasarımı için Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Genetik Algoritmanın (GA) hibrit edilmesiyle oluşturulan PSOGA yaklaşımını kullanmışlardır. PSO'nun üniform olmayan hareketi nedeniyle yerel noktada kolayca sıkışıp kalabilmesinden dolayı en iyi algoritmaya ulaşmak için mutasyon, rastgele seçim ve üreme gibi doğal genetik operatörleri kullanılarak yalnızca özdeş kromozomlar veya parçacıkların yakınsayabilmesi sağlanmıştır. Başka bir deyişle, arama uzayında bir noktadan başka bir noktaya gitmek için PSO ve GA algoritmalarının birbirleriyle etkileşime girmesi sağlanmıştır. PSOGA'nın performansını ölçmek için dört kafes yapı optimize edilmiştir. Bulunan sonuçlar yaygın metasezgisel algoritmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve yeni algoritmanın performansının arttığı gözlemlenmiştir.

Grzywinsky (2020), 18 ve 39 elemanlı iki yapı üzerinde Jaya algoritması (JA) ile analiz yapmıştır. Çalışmada enkesit alanları için ayırık tasarım değişkenleri, düğüm noktaları için ise sürekli tasarım değişkenleri dikkate alınmıştır. JA, temel fikrin en iyi çözüme yaklaşmak ve en kötü tasarımdan kaçınmak olduğu temel bir formülasyona sahiptir. Algoritmalara özgü parametreleri gerektirmeyip sadece popülasyon büyüklüğü (popülasyondaki kafes tasarım sayısı) ve maksimum iterasyon sayısı gibi iki standart kontrol

parametresi gerektirir. Optimizasyon sürecinin sonunda elde edilen verilere göre 18 elemanlı yapı için öğretim-öğrenme esaslı optimizasyon (TLBO)'dan sonra en iyi ağırlık değeri bulunmuştur. 39 elemanlı yapı için ise referans alınan TLBO ve tam gerilmeli tasarım (FSD) algoritmalarına göre daha düşük ağırlık değeri bulunmuştur.

Pierezan vd. (2020) Çakal Optimizasyon Algoritmasının (COA) değiştirilmiş bir yaklaşımı olan MCOA'yı kullanarak ayırık tasarım değişkenlerine sahip dört farklı kafes yapı üzerinde gerekli kısıtlamalar altında yapı ağırlığının en aza indirilmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Bu yöntemde, dağılım ve birleşme olasılıklarına dayanan yeni rastgele değerlerin üretilmesi için 'Tinkerbelle haritası' denilen bir grafik kullanılarak üretilen kaotik diziler, klasik COA'ya göre daha kolay bir şekilde yerel minimumlardan kaçınılmasına yardımcı olmuştur. Bulunan sonuçlar diğer metasezgisel algoritmalarla karşılaştırıldığında rekabetçi çözümler sunmakla beraber ortalama ve en kötü ağırlık açısından daha üstün sonuçlar elde edilmiştir.

Bryansk Devlet Mühendislik Teknoloji Üniversitesi'nden Igor Serpik (2020), kafes yapıların ayırık boyut ve şekil optimizasyonu için iş arama esinli (Job Search Inspired - JSI) yaklaşımı ile mutasyon, seçim ve çaprazlama gibi genetik işlemlere dayalı bir algoritma geliştirmiştir. Kullanılan yöntem her döngüde amaç fonksiyonu ve yapı elemanlarının yük taşıma kapasitesine göre gerekliliklerin yeniden tanımlanmasıyla diğer metasezgisel algoritmalarından ayrılır. Bu yaklaşımla herhangi bir algoritma kullanımında sınırlayıcıların sıkı bir şekilde kontrol edilmesini sağlayan ceza fonksiyonları ortadan kaldırılmıştır. Çalışmada yöntemin çözüm doğruluğu açısından verimliliği beş tasarım örneği üzerinden diğer yöntemlerle karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Çalışmada dikkat çekici bir diğer detay ise bütün örneklerde en iyi, ortalama ve en kötü ağırlık değerleri için aynı sonucun bulunmasıdır.

Awad (2021), sürekli boyutlandırma değişkenleri ile kafes yapıların boyutlandırma optimizasyonu için Politik Optimizer (PO) algoritmasının uygulanabilirliği üzerine bir araştırma yapmıştır. Parlamenter demokrasilerdeki çok aşamalı siyasi süreçten esinlenen algoritma, seçim bölgesini rekabet eden siyasi partilere verimli bir şekilde bölerek denge kurma mantığıyla işler. Bu rekabete dayalı popülasyon paylaşımı algoritmik hız ve verimliliği korurken, arama uzayının kapsamlı bir şekilde araştırılmasını sağlar. Algoritmanın performansını değerlendirmek için tasarım kısıtlamaları altında çoklu

yüklemelere maruz üç düzlemsel kafes yapı ve dört uzay kafes yapı dikkate alınmıştır. Sonuçlar, küçük ve orta ölçekli yapısal sistemler için PO algoritmasının, optimum ağırlık, algoritmik kararlılık veya yakınsama hızları açısından diğer optimizasyon yöntemlerinden daha iyi performans sağladığını, daha büyük yapılar için de performansın korunduğunu ancak kabul edilebilir bir algoritmik kararsızlık derecesinin ortaya çıktığını göstermiştir.

Dehghani vd. (2021) kafes yapıların topoloji, yerleşim ve boyutlandırma optimizasyonu için hibrit metasezgisel bir yöntem olan Hücre Otomatı-Yayılmacı Rekabetçi Algoritma (CA-ICEA) algoritmasını kullanmışlardır. Çalışmada yunus ekolokasyonu (DE) algoritması ve hücresel otomata (CA) yöntemi kullanılarak yayılmacı rekabetçi algoritmanın (ICA) etkinliğinin artırılması amaçlanmıştır. 25 ve 47 elemanlı iki kafes yapı ve iki büyük ölçekli çift katmanlı ızgara yapı (DLGS) sisteminin test edildiği çalışmada farklı başlangıç popülasyonlarından başlayarak yirmi bağımsız optimizasyon çalıştırması gerçekleştirilmiştir. Hesaplama verimliliğini artırmak için yayılmacı rekabetçi algoritma (ICA) üzerinde olasılık ve komşuluk örüntüleri kullanılarak asimilasyon adımları uygulanmıştır. Her alternatif için tasarım uzayındaki bitişik değerlerle yeni olasılıklar atanarak yeni çözümler geliştirilmiştir. ICA, DE ve CA-ICEA yöntemleri ile elde edilen optimizasyon sonuçları karşılaştırılmış ve önerilen algoritma optimum ağırlıklar, bunların ortalaması ve standart sapması açısından rakiplerinden daha iyi performans göstermiştir.

Delyova vd. (2021), üç kafes yapısı üzerinde Genetik Algoritma (GA) metodunu uygulamıştır. Doğal seçilim ilkesine dayanan başka bir deyişle canlıların gelişimini belirleyen ilkeler gözlemlenerek simüle edilen Genetik Algoritma'da amaç, bireylerden oluşan bir popülasyonda giderek daha güçlü bireyler oluşturmaktır. Genetik Algoritma, doğrusal olmayan durumların optimizasyonu için etkili bir araçtır. Kafes yapıların topolojik optimizasyonundaki avantajı, girdi parametrelerinden bağımsız olarak geniş bir tasarım uzayında arama yapabilmesidir. Çalışmada topolojik ve boyut optimizasyonunun yanı sıra dikkat çeken bir diğer detay, algoritma tarafından önerilen kesit alanından bağımsız olarak yapıdaki her elemanın varlığına karar veren ek bir bit (ikili gösterim) sunulmuş olmasıdır. Böylece eleman, kesit alanı çok küçük hale getirilerek veya bit değiştirilerek yapıdan çıkarılabilir. Bu da topolojik optimizasyon sürecini hızlandırmıştır. Üç kafes yapı üzerinden GA yaklaşımının test edildiği çalışmada sonuç olarak, her üç durumda da optimum ağırlık açısından daha iyi performans elde edilmiştir.

Jawad vd. (2021) çalışmalarında yer değiştirme, gerilme ve burkulma kısıtlamaları altında düzlemsel ve uzay kafes yapıların birleşik boyutlandırma-yerleşim optimizasyonu için sürü zekası tabanlı bir optimizasyon tekniği olan Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritmasını kullanmışlardır. ABC algoritması bal arılarının akıllı yiyecek arama davranışını simüle etmeye dayanır. Dört farklı yapısal optimizasyon probleminde ABC'nin etkinliğinin test edildiği çalışmada kesit alanları için ayrık tasarım değişkenleri, bağlantıların düğüm koordinatları için sürekli tasarım değişkenleri dikkate alınmıştır. Çıkan sonuçlar, optimize edilen ağırlık, standart sapma ve analiz sayısı açısından ABC'nin yapısal optimizasyon problemleri için son derece uygun olduğunu ve diğer algoritmalarla kıyasla daha kısa sürede daha hafif tasarım elde etme potansiyeline sahip olduğunu kanıtlamıştır.

Pham (2021), kafes yapıların boyutlandırması için sürekli tasarım değişkenlerine sahip dört örnek üzerinden modifiye edilmiş bir Rao Algoritmasının uygulanabilirliğini araştırmıştır. Değiştirilmiş Rao algoritma daha sonra Uygulanabilir Sınır Arama (FBS) tekniği ile entegre edilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, Rao algoritmalarının kafes yapılarda optimum ağırlık elde etmek için kullanılabileceğini göstermiştir. Çözüm kalitesi ve yakınsama hızı açısından orijinal Rao algoritmalarından daha iyi performans veren hibritleştirilmiş FBSmRao, diğer bazı metasezgisel yöntemlerle karşılaştırıldığında özellikle büyük ölçekli yapılarda rekabetçi tasarımlar elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca FBS yönteminin doğası gereği, FBSmRao'nun none-linear ve elastik olmayan kafes yapılar için uygun olmayabileceği belirtilmiş ve FBSmRao'nun ayrık tasarım değişkenli kafes yapı tasarımı için kullanılabilirliği garanti edilmemiştir.

Zaerrezza (2021), kafes yapıların şekil optimizasyonu için doğadaki doğadaki çoban davranışını taklit eden Karışık Çoban Optimizasyon Algoritması (Shuffled Shepherd Optimization Algorithm - SSOA) yöntemini araştırmıştır. Bu algortmada elemanlar önce sürü olarak adlandırılan gruplara ayrılır ve her bir sürü üzerinde doğadaki çoban davranışından esinlenen optimizasyon süreci işletilerek elitizm tekniği ile seçilen elemanlar birleştirilir. SSOA'nın yeterliliğin göstermek için beş farklı örnek üzerinde yerleşim optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha az sayıda analizle hemen hemen aynı sonuçlar elde edilmiştir.

Huynh Van vd. (2022), uygulanan kuvvetler ve tasarım kısıtlamaları altında kafes yapıların eşzamanlı optimum boyut ve şekil tasarımı için Gauss Yerel Aramalı Kapsamlı

Öğrenme Parçacık Sürüşü Optimizasyonu (GLS-ECLPSO) yöntemini geliştirmişlerdir. ECLPSO yaklaşımı yerel optimal çözümlerin erken yakınsamasını önleyen pertürbasyon tabanlı sömürü ve uyarlanabilir öğrenme olasılığı olmak üzere iki yeni geliştirme tekniği sunmaktadır. Pertürbasyon, parçacıkların güncellenme hızında fayda sağlarken öğrenme olasılıkları ile en iyi çözümler devamlı bir şekilde sıralanır. GLS tekniği ise yakınsama hassasiyetini artırmak için ECLPSO tarafından verilen sonuçlara dayanarak, son iterasyondaki en iyi çözümlerden veri alır. Bu tekniklerin kombinasyonu ile hızlı yakınsama ve optimum çözümü elde etme olasılığı artmış olur. Sonuç olarak limit durum ve tasarım koşullarına uygun kafes yapıların eşzamanlı optimal boyut ve şekil dağılımı için birleşik GLS-ECLPSO yönteminin sağlamlığı ve doğruluğu, diğer metasezgisel algoritmalarla kıyaslandığında daha az sayıda analizle daha iyi sonuçlar bulunarak gösterilmiştir.

Azizi vd. (2022), ayrık tasarım değişkenli kafes yapıların optimum tasarımı için malzeme biliminin yanı sıra kimyasal reaksiyonlar ve kimyasal bileşenlerin perspektif olarak alındığı son zamanlarda geliştirilen metasezgisel algoritmalarından olan Malzeme Üretme Algoritması (MGA) kullanmışlardır. Çalışmada 25 çubuklu, 72 çubuklu ve 200 çubuklu kafes yapıları da dahil olmak üzere kafes optimizasyon alanındaki referans problemler üzerinde çoklu optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar MGA'nın mümkün olan en düşük ağırlıkla optimum tasarım kesitleri sağlayabildiğini göstermiştir. Ayrıca MGA tarafından yapılan çoklu çalıştırmalara göre ortalama ve en kötü ağırlık da çok yakın ve diğer çalışmalara göre daha düşük çıkmıştır.

Azizi vd. (2022), son zamanlarda geliştirilen metasezgisel algoritmalarından, kaos teorisi ve fraktal konfigrasyon prensiplerinin ilham alındığı Kaos Oyun Optimizasyonu (CGO) algoritmasını kullanarak alandaki dört referans tasarım problemi ile frekans kısıtlamaları altında kafes yapıların boyut ve şekil optimizasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır. Kaos teorisi, kaotik ve düzensiz durumların görünüşte rastlantısal olduğu, ancak pratikte gizli örüntüler ve tanımlayıcı kurallar tarafından yönetildiği dinamik sistemlerin araştırılmasıyla ilgilidir. Fraktal, her bir parçanın orijinal yapıya göre belirli bir oranda büyütülmesiyle elde edilen geometrik bir yapıdır. Sierpinski fraktali ise bölünerek çok sayıda alt üçgene ayrılan bir eşkenar üçgendir. Çalışma kapsamında CGO, kaos teorisindeki fraktalların ve Sierpinski üçgeni oluşturmanın genel yönlerine dayanarak matematiksel olarak formüle edilmiştir. Literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırma yapıldığında daha düşük standart sapmalarla en iyi, ortalama ve en kötü ağırlıklar açısından

daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak CGO'nun, ele alınan tasarım örneklerinin tamamında daha istikrarlı ve daha iyi sonuçlar sağladığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, binalarda ve diğer mühendislik yapılarında titreşim kontrol sistemlerinin optimum tasarımı da dahil olmak üzere gelecekteki zorluklar açısından CGO algoritmasının standart formülasyonunun, genel davranışını iyileştirmek için bu algoritmanın ana döngüsünde çok sayıda iyileştirme tekniği sunduğu vurgulanmıştır.

Hongyou Cao vd. (2023), kafes yapıların boyut ve şekil optimizasyonunda metasezgisel algoritmalar için etkili bir Kısıtlama-İşleme Tekniği (CHT) ve bu yöntem kullanılarak Manta Ray Toplayıcılık Optimizasyonu'nun (MRFO) yapısal optimizasyondaki performansını incelemişlerdir. Vatoz sürülerinin yiyecek arama davranışlarından esin alınarak geliştirilen parametresiz bir optimizasyon yaklaşımı olan MRFO'yu kullanırken yalnızca popülasyon boyutu ve iterasyon durdurma kriteri tanımlanır. CHT, arama sürecinde gereksiz yapısal analizleri filtrelemek için geliştirilmiş bir Deb Kuralı kullanır ve analiz sayısını neredeyse yarı yarıya azaltan haritalama stratejisi ile arama yeteneği ve kararlılığını geliştirerek aday tasarımları yapısal optimizasyon için uygulanabilir bir sınıra eşler. Çalışmada beş kafes yapı üzerinden CHT'nin verimliliği araştırılmış ve yaygın olarak kullanılan Uyum Arama (HS), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Öğretme-Öğrenme Esaslı Optimizasyon (TLBO) ve Guguk Kuşu Arama (CS) gibi dört metasezgisel algoritma da MRFO'nun yapısal optimizasyondaki performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. Sayısal sonuçlardan CHT'nin, metasezgisel algoritmaların hem arama kapasitesini hem de hesaplama verimliliğini önemli ölçüde artırabildiği ve MRFO'nun, yapısal optimizasyonda mevcut algoritmalarla karşılaştırıldığında belirgin bir zayıflık göstermediği anlaşılmıştır.

Kaveh ve Zaerreza (2023), yapıların optimum tasarımında tohumun hareketlerinden esinlenen bir metasezgisel algoritma olan Karahindiba Optimizeri (Dandelion Optimizer - DO) üzerine araştırma yapmışlar. DO, yükselme, alçalma ve iniş aşaması olarak adlandırılan üç aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamaların her birinde tohumun konumu değişir ve iniş aşamasından sonra tohumun konumu değerlendirilir. Ayrık tasarım değişkenli üç çelik çerçeve yapı üzerinden yapılan çalışmada optimizasyon süreci sonunda elde edilen bulgular DO'nun çelik çerçevelerin optimum tasarımında iyi bir performansa sahip olmadığını göstermiştir. Bunun üstesinden gelmek için İstatistiksel Yenileme Mekanizması (SRM) yöntemi kullanılmıştır. SRM, optimizasyon sürecinin ilk yarısında popülasyonun ortalaması ve standart sapmasına dayanarak tasarım değişkenlerinin yüzde yirmisini yeniden üretir.

Kalan iterasyonlarda ise sadece bir değişken SRM kullanılarak yeniden üretilir. Böylece algoritmanın daha iyi bir çözüm bulma yeteneği artırılmış olur. Geliştirilmiş Dandelion Optimizatörü (EDO) adını verdikleri bu yeni yöntem ile bulunan sonuçlar, SRM'nin DO'nun performansını belirgin bir şekilde iyileştirdiğini göstermiştir. Tek açıklığa sahip 10 katlı ile 3 açıklığa sahip 10 ve 25 katlı üç çelik çerçeve yapı üzerinde test edilen EDO, DO ve dikkate alınan diğer tüm optimizasyon yöntemlerinden daha iyi sonuçlar vermiştir.

1.2. LPO Algoritması Kullanılarak Yapılan Çalışmalar

Ghasemi vd. (2023), solunum sisteminde akciğerlerin düzenli ve kilit rolünden ilham alınarak geliştirilen bir algoritma olan Akciğer Performansına Dayalı Optimizasyon (LPO) yöntemi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada LPO'nun etkinliğini değerlendirmek için CEC2005 (Congress on Evolutionary Computation-2005) ve CEC2014 kısıtlamasız optimizasyon fonksiyonları ve mühendislik tasarım optimizasyon problemleri kullanılarak literatürde önerilen çok sayıda algoritma ile kıyaslama yapılmıştır. Sonuçlar LPO yönteminin diğer algoritmalara göre daha iyi hesaplama performansı sergilediğini ve daha optimal çözümler üretebildiğini göstermiştir. Güçlü global ve yerel arama özelliği ile yerel optimumlardan kaçınması, farklı optimizasyon problemlerini ele alma yeteneği ve çeşitli alanlardaki uygulama potansiyelinin LPO'yu gelecekteki araştırmalar ve pratik uygulamalar için umut verici bir algoritma haline getirdiğini değerlendirmesi yapılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Optimizasyon Tanımı

Optimizasyon genel anlamıyla, belirli bir hedefe ulaşmak için en iyi çözümü bulma sürecidir. Bu süreç, sınırlı kaynaklarla en yüksek verimi elde etmek amacıyla karar değişkenlerini en uygun şekilde ayarlamayı içerir. Dolayısıyla optimizasyonun amacı, kaynakların (zaman, malzeme, para, enerji vb.) en verimli ve etkili şekilde kullanılmasını sağlamaktır. Mühendislik disiplinlerinde karşılaşılan birçok problem, sınırlı kaynaklarla zamanın veya maliyetin en verimli şekilde kullanılmasını gerektiren kararlar almayı zorunlu kılmaktadır. İyi bir mühendislik tasarımı, mevcut kısıtlamalar altında en yüksek verimlilikle çalışacak şekilde optimize edilmelidir. Örneğin, makine mühendisliği alanında, bir motorun tasarımında yakıt verimliliğini artırırken aynı zamanda motorun gücünü ve dayanıklılığını optimize etmek gerekir. Elektrik mühendisliğinde, enerji iletim ağlarının tasarımında enerji kayıplarını minimize ederken sistemin güvenilirliğini artırmak için optimizasyon yöntemleri kullanılır. İnşaat mühendisliğinde ise optimizasyon, yapısal tasarımda genellikle taşıma kapasitesini en üst düzeye çıkarırken malzeme kullanımını en aza indirmeye çalışır.

2.2. Optimizasyonun Temel Unsurları

Bir yapı optimize edilirken analize başlamadan önce tanımlanması gereken bazı temel parametreler bulunmaktadır.

2.2.1. Amaç fonksiyonu

Optimizasyonda hedeflenen kriteri, tasarım değişkenlerini kullanarak matematiksel olarak ifade eden fonksiyondur. Yapının performansını ölçmek ve iyileştirilmesi gereken parametreyi araştırır. Amaç fonksiyonu maksimum veya minimum sonuca ulaşacak şekilde ayarlanır. Yapı optimizasyonunda minimum ağırlık, minimum maliyet veya maksimum dayanıklılık amaç fonksiyonu olarak belirlenebilir. Bu çalışmada amaç fonksiyonu olarak yapı ağırlığı minimize edilecektir.

2.2.2. Tasarım değişkenleri

Optimizasyonda tasarımı belirleyen en temel unsurlardır. Bir yapının, belirlenen hedef kriteri (amaç fonksiyonu) doğrultusunda performansının iyileştirilebilmesi için değiştirmek suretiyle kontrol edilebilen parametrelerdir. Tasarım değişkenleri sürekli ve ayrık tasarım değişkenleri olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Sürekli tasarım değişkenleri,

belirli bir aralıkta kesintisiz değışebilen değerler alırken; ayırık tasarım değışkenleri, önceden belirlenmiş bir tasarım havuzu içerisinde seçim yaparak belirlenir. Bir başka deyişle ayırık tasarım değışkenleri belirli seçenekler arasında karar verilmesi gereken durumlarda kullanılır. Örneğin, bir optimizasyon probleminde, tasarım değışkeni enkesit alanı olarak tanımlanacaksa fabrikalarda hazır profiller üretildiği için ayırık değışkenlerle tasarım yapmak uygulamada daha pratik bir yöntemdir.

Yapı tasarımında eleman kalınlıkları, eleman uzunlukları, düğüm noktası koordinatları, malzeme türü, açıklık sayısı ve/veya mesafeleri gibi parametreler tasarım değışkeni olarak tanımlanabilir. Bu çalışma kapsamında, enkesit optimizasyonu için eleman enkesit alanları, şekil optimizasyonu için ise düğüm noktaları koordinatları tasarım değışkeni olarak kullanılmıştır.

2.2.3. Tasarım sınırlayıcıları

Optimizasyon problemi sırasında yükleme koşulları altında tasarımın belirli bir çerçevede kalması için belirlenen kısıtlardır. Aşağıda verilen durumlarda, belirtilen türde kısıtlamalar olabilir;

- Yapı ağırlığını olabildiğince düşürmek için eleman uzunluk ve enkesit alanları gibi boyut kısıtlamaları
- Yapı elemanları üzerindeki gerilmenin taşıma kapasitesini aşmaması için gerilme kısıtı
- Yapı elemanlarının yükleme durumu altında aşırı deformasyona uğramaması gerektiğinde eleman uzunlukları ve düğüm noktası koordinatları gibi deplasman kısıtları

2.3. Optimizasyon Aşamaları

Bir sistemin optimizasyonu yapılırken, belirli kısıtlamalar, değışkenler ve uygulama metotları söz konusudur. İyi tanımlanmış bir problem ve doğru bir çözüm yöntemi ile yüksek verimli ve etkili sonuçlar elde edilebilir. Bu aşamalar, problemten çözümün elde edilmesine kadar olan sürecin net bir şekilde yapılandırılmasını sağlar. Genel olarak bakıldığında optimizasyon aşamaları şu şekildedir:

- | | |
|---------------------------------------|--|
| a) Problemin tanımlanması | d) Yükleme koşulları ve kısıtlayıcılar |
| b) Hedefin ortaya konulması | e) Uygun optimizasyon yöntemi |
| c) Tasarım değışkenlerin belirlenmesi | f) Sistemin analizi ve kontrol |

2.4. Sezgisel Optimizasyon Yöntemleri

Optimizasyon yöntemleri genel olarak klasik optimizasyon yöntemleri ve sezgisel optimizasyon yöntemleri olmak üzere iki gruba ayrılır. Klasik optimizasyon yöntemleri, hedeflenen sonuca ulaşmak için matematiksel modellemelere dayanır ve genellikle daha basit problemlerde kullanılır. Bu yöntemler, çözüm sürecinde amaç fonksiyonundan uzaklaşıldığında ıraksama gösterirken, çözüme yaklaşıldığında ise yakınsama sağlar. Ancak, bu süreçlerin her biri sadece belirli bir yön üzerinde ilerlediği için, global ve lokal çözüm aramaları tek yönlüdür. Mevcut tez çalışmasının da konusu olan sezgisel optimizasyon yöntemleri ise klasik optimizasyon yöntemine alternatif olarak lokal ve global arama yapabilen, daha karmaşık, doğrusal olmayan ve büyük ölçekli problemleri çözmek için tercih edilir. Sezgisel algoritmalar, kabul edilebilir sürede optimuma yakın çözümler verebilen algoritmalarlardır. “Sezgisel” terimi bu algoritmaların, beyin gücü veya *sezgi* ile insan gibi çözüm bulmaya çalışmasının bir yansıması olarak kullanılır. Problem çözme sürecinde doğrudan bir çözüm yolu yerine, çeşitli yolları deneyerek ve her denemede biraz daha iyileşerek sonuca ulaşmayı hedefler. Bu algoritmalar çoğunlukla doğadaki olaylardan ilham alınarak geliştirilmiş olup doğa olaylarıyla bağlantısı, biyolojik ve fiziksel süreçlerin insan yapımı problemlere çözüm bulmak için benzer şekilde uygulanmasından gelir. Doğa temelli algoritmalar, çözüm arama aşamasında doğal sistemlerin işleyişini model alarak taklit ederler.

Bilimsel araştırmalar ve akademik çalışmalarda sıklıkla kullanılan sezgisel optimizasyon yöntemleri aşağıda kısaca özetlenmiştir:

- Genetik Algoritma (Genetic Algorithm - GA): İlk olarak John Holland tarafından 1960'larda geliştirilmiştir. Bu algoritmalar, biyolojik evrim sürecindeki doğal seleksiyon ve genetik prensipleri temel alarak çözüm arayışına yönelir. Amaç, her nesilde daha iyi çözümler bulmaktır.
- Karınca Kolonisi Optimizasyonu (Ant Colony Optimization - ACO): Karıncaların yiyecek bulma davranışlarından ilham alınarak Marco Dorigo tarafından 1992'de geliştirilmiştir. Bu algoritma, çözüm uzayında en iyi çözümü bulmak için karıncaların işbirliği yapmasını simüle eder. Karıncalar, yiyecek kaynaklarına doğru giderken feromon denilen bir salgı bırakır ve diğer karıncalar bu feromon izlerini takip ederek en kısa yolu bulurlar. Bu algoritma, çözüm uzayında iyi çözümleri daha fazla takip eden bir strateji kullanır.

- Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization - PSO): James Kennedy ve Russ Eberhart tarafından 1995 yılında doğadaki kuş ve balık sürüleri gibi grupların toplu hareketlerinden esinlenerek geliştirilmiştir. Bu yöntemde çözüm uzayındaki her çözüm bir parçacık olarak kabul edilir. Çözüm uzayında en iyi çözümü bulmak için bu parçacıklar birbirlerinin hareketlerini takip eder.
- Armoni Arama (Harmony Search – HS) Algoritması: Geem vd. (2001) tarafından 2001 yılında müzikal armoniden esinlenerek geliştirilen bir optimizasyon yaklaşımıdır. Müzikal armoni, farklı notaların uyumlu bir şekilde bir araya gelmesiyle oluşur. Algoritmanın ana fikri de benzer şekilde, çeşitli çözüm noktalarının "uyumlu" bir şekilde birleşerek en iyi çözümü bulmasıdır.
- Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony - ABC): Derviş Karaboğa tarafından 2005 yılında bal arılarının doğada yiyecek arama davranışları model alarak geliştirilmiştir. Doğadaki arıların işbirliği yaparak verimli çözümler bulma davranışını taklit ederek, çok sayıda optimizasyon problemine etkili bir şekilde uygulanabilen güçlü bir algoritmadır.
- Öğretme-Öğrenme Esaslı Optimizasyon (Teaching-Learning Based Optimization – TLBO): Xing-Fei Liu ve Qing-Wei Chen tarafından 2011 yılında geliştirilen bir optimizasyon algoritmasıdır. Öğretim ve öğrenme süreçleri taklit edilerek çözüm aramak için kullanılır.
- Jaya Algoritması (JA): İlk kez 2016 yılında R.V. Rao tarafından geliştirilmiş bir optimizasyon yöntemidir. "Jaya" kelimesi, Sanskritçe'de "zafer" anlamına gelir. Bu algorithmada temel amaç, her adımda en iyi çözümü bulmaya bir adım daha yaklaşmak ve en kötü çözümden mümkün olduğunca uzaklaşmaktır.

2.5. Akciğer Performansına Dayalı Optimizasyon (Lung Performance-Based Optimization - LPO)

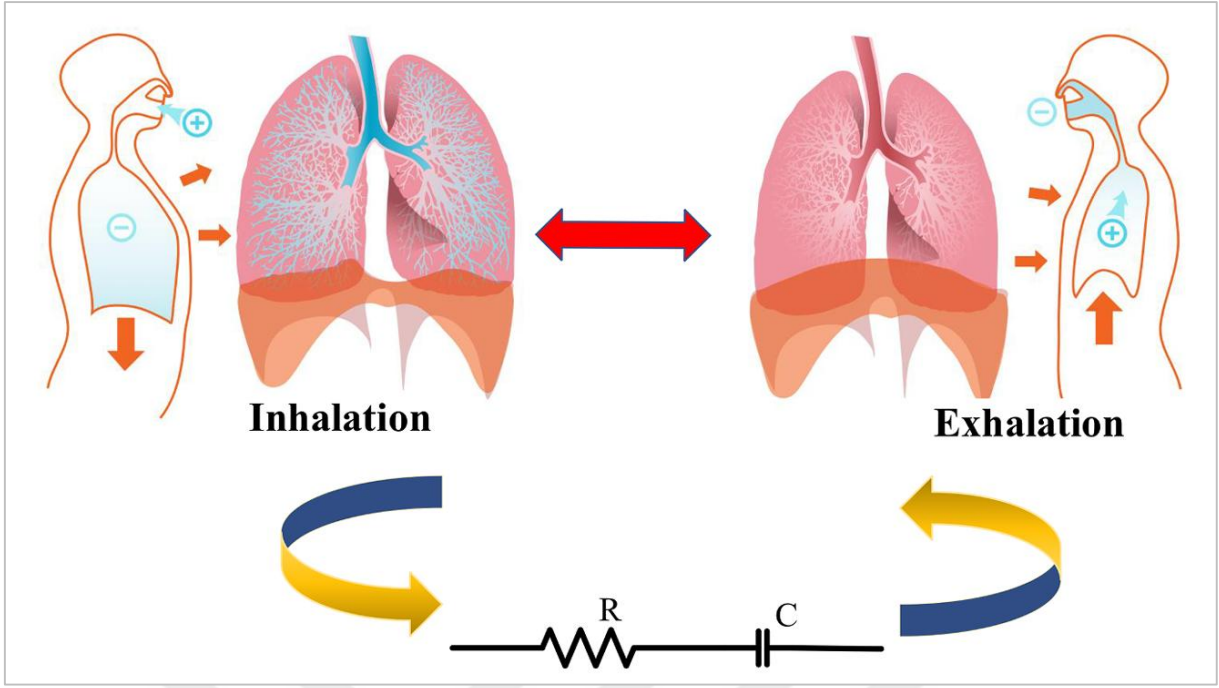
2.5.1. LPO Algoritması için modelleme

Akciğerler, nefes alış-veriş sürecinde soluduğumuz havadan oksijeni filtreleyip dolaşım sistemine iletir ve oluşan karbondioksiti dolaşım sisteminden uzaklaştırır. Bu yönüyle insan vücudu için hayati öneme sahip bir organdır. Solunum sistemi elektriksel olarak modellenenebilir. Bu kapsamda akciğer fonksiyonlarının değerlendirilmesi için yaygın olarak kullanılan yöntem, zorlanmalı salınım tekniğidir. Bu teknikle solunum sisteminin girişinde hava basıncı ve hava akış hızı ölçülerek elektriksel empedans hesaplanır. Empedans, elektrik devrelerinde alternatif akıma karşı gösterilen dirençtir. Bu ölçümlerde solunum sisteminin davranışı, empedans eğrileriyle gösterilir. Bu eğrilerin iki bileşeni vardır: gerçek kısım (solunum direnci, Z_R) ve sanal kısım (solunum reaktansı, Z_X). Solunum direnci hava akımına karşı oluşan dirençleri, solunum reaktansı ise akciğerlerin elastik ve atalet özelliklerini temsil eder. Bu eğrileri yorumlamak için hem klinik yaklaşımlar hem de mühendislik bakış açısı kullanılabilir. Örneğin, solunum sistemi elektrik devrelerindeki direnç, kapasite (esneklik) ve indüktans (atalet) elemanlarıyla modellenenebilir.

Bir dokudan gazın geçişi ise Fick yasasına göre gerçekleşir. Fick Yasası, moleküllerin veya atomların bir ortamda dış etkenlere bağlı olarak yayılma hızını açıklar. Bu yasaya göre, gaz difüzyonu, doku yüzeyi ve konsantrasyon farkıyla doğru orantılıdır. Moleküllerin, bir doku tabakasından difüzyon yoluyla geçen gaz kütlesi aşağıdaki bağıntıdan hesaplanabilir. Denklemden ΔP basınç değişimi, K gaz difüzyon katsayısı, A enkesit alanı ve d tabaka kalınlığını ifade eder.

$$V = \frac{AK}{d} \Delta P \quad (2.1)$$

Solunum sistemi ve akciğerlerin fonksiyonu modellemek için yapılan çalışmalardan biri de akciğerlerin fonksiyonu için Şekil 1’de gösterilen bir RC devre teorisi modellemesidir (Diong vd. 2007). RC devresinde, zamanla değişen bir voltaj ve akım ilişkisi vardır. Elektriksel enerjiyi geçici olarak depolayan ve serbest bırakan bir yapı sunduğu için zaman tabanlı süreçleri düzenleme, filtreleme ve sinyal işleme gibi farklı işlevler için kullanımı yaygındır.



Şekil 1. Akciğer fonksiyonunu simüle etmek için kullanılan RC Devresi Modeli (Ghasemi vd. 2024)

Yukarıda bahsedilen RC devre teorisi modeline göre basınç değişimi aşağıdaki formülden hesaplanır:

$$\Delta P = V * \left(\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi \times fr \times RC} \right)^2} \right) \times \sin(2\pi \times fr \times t) \times \sin(2\pi \times fr \times t + \theta) \quad (2.2)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{1}{2\pi \times fr \times RC} \right) \quad (2.3)$$

Solunum sisteminde akciğerlerin fonksiyonuna ilişkin kavramlar ile RC devre teorisindeki parametrelerin LPO algoritmasındaki eşdeğer kavramları Çizelge 1’de açıklanmıştır.

Çizelge 1. Akciğer fonksiyonu ile LPO algoritmasındaki eşdeğer kavramlar (Ghasemi vd. 2024)

Akciğer Fonksiyonu	Eşdeğer Kavram
Hava veya kan kütlesi	Başlangıç popülasyonu (M_i)
Havadan karbondioksitin ayrıştırılması ve kanın damarlardaki hareketi	Alt ve üst sınır arasında popülasyonun değişimi
Akciğerlerin daha iyi performans göstermesi	Amaç fonksiyonu
Nefes alıp verme	İterasyon (<i>Iter</i>)
Kandan karbondioksitin ayrıştırılması	Yeni popülasyon (M_i^{new})
R (Direnç)	$f(x)$
C (Kondansatör)	$f(x) \times 0.5 \times \sin \theta$
t	Mevcut iterasyon
fr	Ng (Tasarım değişkeni sayısı)
Value	Değer, Sonuç

2.5.2. LPO Algoritması ile optimizasyon süreci

LPO, hedeflenen problem aralığında yani minimum (L_b) ve maksimum (U_b) değerler arasında, rastgele üretilen bir başlangıç popülasyonu ($M_i = 1, 2, 3 \dots Npop$) ile başlayan ve her döngüde yeni bir popülasyonlar oluşturan bir optimizasyon yöntemidir.

RC devre teorisi modelleme parametreleri dikkate alındığında akciğerlere giren hava kütlesi, optimizasyonda başlangıç popülasyonuna eşdeğerdir. Hava kütlesinin yeni konumu, baz alınan RC devre modelindeki parametreler yardımıyla aşağıdaki gibi belirlenir:

M_i : Başlangıç popülasyonu $i = 1, 2, 3 \dots Npop$ $Npop$: Popülasyon sayısı

$$M_i^{new} = M_i + M_i \times \left(\sqrt{R_i^2 + \left(\frac{1}{2\pi \times fr \times R_i C_i} \right)^2} \times \sin(2\pi \times fr \times t) \times \sin(2\pi \times fr \times t + \theta_i) \right) \quad (2.4)$$

$$\theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{1}{2\pi \times fr \times R_i \times C_i} \right) \quad (2.5)$$

$$R_i = f(S_i) \quad (2.6)$$

$$C_i = \frac{f(S_i)}{2} \times \sin(\theta_i) \quad (2.7)$$

$$fr = D, t = Iter \quad (2.8)$$

Akciğerler tarafından havadan ayrıştırılan oksijen kütlesi optimizasyon probleminde popülasyonun (M_i) hareketine eşdeğerdir. Daha fazla basınç uygulanan taraftan daha az kuvvet uygulanan tarafa, yani uygunluk değeri iyi olan taraftan daha zayıf bir uygunluk değeri olan tarafa doğru hareket eder. Üzerine uygulanan basınç sayesinde kana giren oksijenin hareketi aşağıdaki formülle ifade edilebilir.

$$M_i^{new,2} = M_i^{new,1} + K_{i,1} \times \alpha_i \times (M_i^{new,1} - M_1) + K_{23} \times \alpha_i \times (M_3 - M_2) \quad (2.9)$$

$$K_{ij} = \text{sign}(f(M_j) - f(M_i)) = \begin{cases} 1; & \text{if } f(M_i) < f(M_j) \\ 0 & \text{if } f(M_i) = f(M_j) \\ -1; & \text{if } f(M_i) > f(M_j) \end{cases} \quad (2.10)$$

Kan kütlesinin arterler içindeki hareket yönünü yani belirleyen K_{ij} , optimizasyonda yeni popülasyonu belirler. Her bir dolaşım döngüsünde (iterasyon) α_i , 0 ile 1 arasında daha üst bir değere doğru kayarak yeni popülasyon aralığını belirler.

Çizelge 1.'de belirtilen yeni popülasyon üretimi ve çaprazlama aşağıdaki döngü ile gerçekleştirilir.

$$\begin{aligned} & \text{for } j = 1:Ng \\ & \quad \text{if } S_i > rand \\ & \quad \quad m_{ij}^{new,3} = m_{1j} + \alpha_i \times (m_{3j} - m_{2j}) \\ & \quad \quad \text{else} \\ & \quad \quad m_{ij}^{new,3} = m_{ij}^{new,2} \\ & \quad \quad \text{end} \\ & \quad \text{end} \\ & M_i = [m_1, m_2, \dots, m_{ij}, \dots, m_{Ng}] \end{aligned} \quad (2.11)$$

S_i , her nefes alış-verişte kanın akciğerler tarafından temizlenmesi nedeniyle azalan bir olasılık değeridir ve LPO algoritmasında optimizasyon sürecinde kullanıcı tarafından

belirlenen ‘nefes alış-verişi sayısı’ (N_e) parametresi ile ters orantılıdır. Bu bağıntı Denklem 2.12’deki gibi ifade edilir.

$$S_i = \frac{rand}{N_e} \quad (2.12)$$

Çözüm kümesi yani elde edilen yeni popülasyon daha iyiye mevcut popülasyonun yerini alır. Yani $M_{ij}^{new,3}$, M_i ’den daha iyiye M_i ile yer değiştirir. $M_{ij}^{new,3}$ ’nin ikinci iterasyondan sonra aşağıdaki denklemde kullanıldığına dikkat edilmelidir.

$$M_i^{new} = M_i + M_{ij}^{new,3} \times \left(\sqrt{R_i^2 + \left(\frac{1}{2\pi \times fr \times R_i C_i} \right)^2} \times \sin(2\pi \times fr \times t) \times \sin(2\pi \times fr \times t + \theta_i) \right) \quad (2.13)$$

LPO algoritmasıyla optimizasyon sürecini özetlersek;

1. *Adım:* Popülasyon sayısı (N_{pop}), N_e ve maksimum iterasyon sayısı ($Iter_{maks}$) parametrelerini belirle.
2. *Adım:* Kafes yapıya ait bilgileri gir (eleman sayısı ve bağlantıları, düğüm noktası sayısı ve koordinatları, tasarım değişkeni sayısı (N_g), malzeme elastisite modülü ve birim hacim ağırlıkları, yükleme koşulları, mesnetlenme koşulları vb.)
3. *Adım:* Gerilme ve deplasman sınır koşulları (S_{maks} ve d_{max}) ile enkesit alanı alt ve üst limit değerlerini (L_b ve U_b) tanımla.
4. *Adım:* Başlangıç popülasyonunu (M_i) rastgele oluştur. α_i ve θ_i parametrelerinin başlangıç değerlerini rastgele hesapla.

for $i = 1: N_{pop}$

$X = L_b + rand(1, N_g) \times (U_b - L_b)$

end

5. *Adım:* Her bir tasarıma ait cezalı fonksiyon ağırlık değerini (W_p) hesapla.
6. *Adım:* Popülasyondaki en iyi tasarımı bul. En düşük cezalı ağırlık değeri ve ilgili enkesit alanlarını gerekli parametrelere (W_{pbest} ve X_{best}) ata.
7. *Adım:* Modifiye edilmiş popülasyon, aşağıdaki adımlar izlenerek hesaplanır:

for $i = 1: N_{pop}$

for $j = 1: N_e$

R_i ve C_i 'yi Denklem 2.6 ve Denklem 2.7'ye göre hesapla

if $j=1$

M_i^{new} 'i Denklem 2.4'e göre hesapla

else

M_i^{new} 'i Denklem 2.13'e göre hesapla

end

K_{i1} ve K_{23} değerlerini Denklem 2.10'a göre hesapla

for $j=1: Ng$

S_i 'yi Denklem 2.12'ye göre hesapla

if $S_i > rand$

$M_i^{new,3}$ 'ü Denklem 2.11'e göre hesapla

else

$M_i^{new,3}$ 'ü Denklem 2.9'a göre hesapla

end

end

If $f(M_i^{new,3}) < f(M_i)$

$M_i = M_i^{new,3}$

end

α vektörünü rastgele, θ vektörünü ise Denk. 2.3'göre güncelle

end

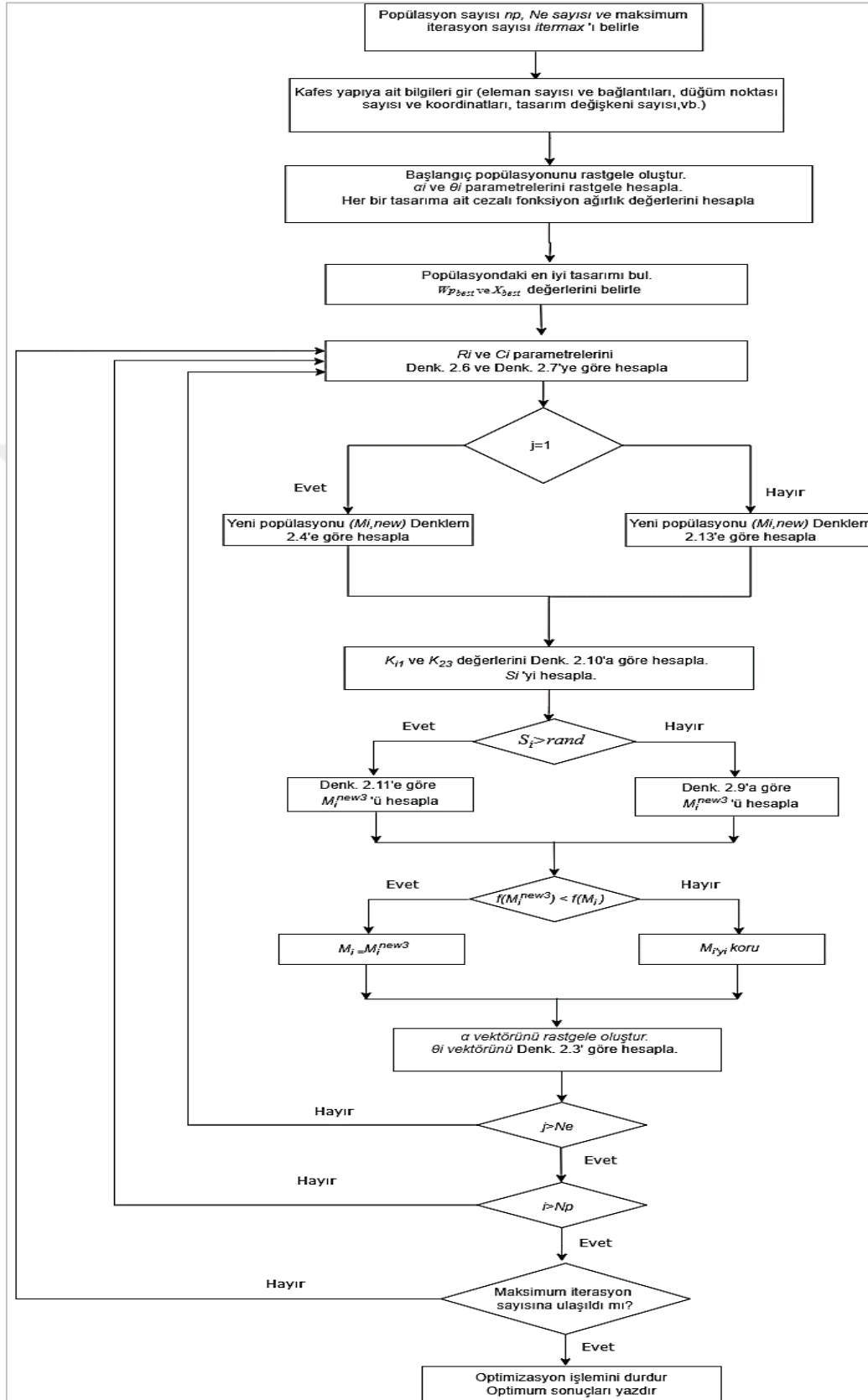
end

8. *Adım*: Modifiye edilmiş popülasyondaki en düşük ağırlık değeri ve buna ait tasarım değişkenlerini belirle

9. *Adım*: İterasyon sayısı $Iter_{maks}$ sayısına ulaşincaya kadar 7. Adımdaki işlemleri tekrarla.

10. *Adım*: Maksimum iterasyon sayısına ulaşınca optimizasyonu durdur. En düşük ağırlığa sahip tasarımı raporla.

Şekil 2’de LPO algoritmasına ait akış diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2. LPO algoritmasına ait akış diyagramı

2.6. Kafes Yapılar

Kafes yapı sistemleri, yalnızca normal kuvvet taşıyan doğru eksenli çubukların birleştirilmesinden meydana gelirler. Çubukların mafsallık ile birbirlerine bağlandığı uç noktalarına düğüm noktası denir. Kafes yapı elemanları, çekme veya basınç kuvveti şeklinde etkiyen eksenel kuvvetlere maruz kalacak şekilde tasarlanıp birbirine bağlanır.

Kafes sistemlerinde, dik doğrultudaki yükler doğrudan çubuklara aktarılmaz, bunun yerine tüm yükler düğüm noktalarına iletilir. İki düğüm noktası arasında yayılı yük uygulandığında, bu yükler komşu düğümlere orantılı şekilde dağıtılarak sistem tasarlanır. Ayrıca çubukların ağırlıkları da, çubuğun bağlandığı iki düğüm noktası arasında paylaştırılır.

Gerçek taşıyıcı sistemler, birden fazla düzlem kafes sisteminin birleştirilerek uzaysal bir yapı oluşturmasıyla meydana gelir. Doğru şekilde tasarlandığında kafes sistemler, kullanılan malzeme miktarını minimumda tutarak uzun açıklıkların etkili bir şekilde kat edilebildiği yapılar oluşturulmasına olanak tanır. Bunun temel nedeni her bir elemanın iç yüklerinin eksenel olarak yönlendirilmesidir; başka bir ifadeyle, kafes yapı elemanları yalnızca uç noktalarına kuvvet uygulanacak şekilde tasarlanır ve bu kuvvetler, çubuğun uzunluğu boyunca sıkıştırma/basınç veya gerilme/çekme kuvveti şeklinde eleman doğrultusunda aktarılır. Bu sayede kuvvet, birçok yapı elemanı arasında paylaştırılarak daha az malzemeye yapının taşıma kapasitesi optimize edilir.

2.6.1. Kafes Yapıların Optimizasyon Probleminin Matematiksel İfadesi

Kafes yapıların optimizasyonunda, yapı elemanlarının boyutları belirlenirken gerilme ve deplasman gibi tasarım kısıtlayıcıları göz önünde bulundurularak minimum ağırlık elde edilmeye çalışılır. Dolayısıyla bir kafes yapısının optimizasyonunda amaç, her bir elemanın taşıma kapasitesini en verimli şekilde kullanarak yapının toplam ağırlığını azaltmaktır. Kafes yapıların optimizasyonunda amaç fonksiyonu şu şekilde formüle edilebilir:

$$W_x = \rho \sum_{i=1}^{ng} X_i \sum_{j=1}^{nm} L_j$$

W_x : Kafes yapı ağırlığı
 x : Tasarım değişkenlerini içeren vektör
 X_i : i -inci tasarım değişkeni enkesit alanı
 L_j : j -inci eleman uzunluğu
 ρ : Malzeme birim hacim ağırlığı
 ng : Tasarım değişkeni sayısı
 nm : Eleman sayısı

(2.14)

Tasarım değişkenlerinin formülasyonu, bir yapıda eleman enkesit alanı ve/veya uzunluğu ile malzeme yoğunluğu gibi özelliklerin belirli sınırlamalar ve hedefler doğrultusunda tanımlanmasını içerir. Tasarım değişkenleri iki farklı şekilde sınıflandırılabilir. İlk yaklaşımda, tasarım değişkenleri belirli bir alt ve üst sınır arasında sürekli bir değer alınabilir. Bu durumda enkesit alanı, bu sınırlar dâhilinde serbestçe belirlenebilir. Eğer tasarım değişkenleri sürekli değerler arasından seçiliyorsa:

$$X_i \in [X_{min}, X_{max}]$$

Burada X_i i – inci elemanın enkesit alanını, X_{min} ve X_{max} ise yapı elemanlarına atanacak enkesit alanları için belirlenen alt ve üst sınırları ifade eder.

İkinci yaklaşım ise tasarım değişkenlerinin, önceden belirlenmiş bir enkesit alanı listesi (tasarım uzayı) içerisinde seçilen değerlere göre belirlendiği ayrık tasarım değişkenli durumdur. Tasarım değişkenleri enkesit listesi içerisinde ayrık olarak seçiliyorsa:

$$X_i \in [X_1, X_2, \dots, X_{nsl}]$$

Burada, X_i i - inci elemanın enkesit alanını, X_{nsl} ise tasarım uzayındaki enkesit sayısını ifade eder.

Optimizasyon probleminde gerilme ve deplasman kısıtlayıcıları ise aşağıdaki gibi formüle edilir:

$$\begin{aligned} \sigma_{min} \leq \sigma_i \leq \sigma_{max} \quad \sigma_{min} &= \sigma_c \\ \sigma_{max} &= \sigma_t \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\delta_{min} \leq \delta_i \leq \delta_{max}$$

Denklemlerde geçen σ_{min} ve σ_{max} kafes yapı elemanları için minimum ve maksimum gerilme, δ_{min} ve δ_{max} düğüm noktalarının yapabileceği minimum ve maksimum deplasmanı, σ_i ve δ_i sırasıyla, i -inci elemanın gerilme ve i -inci düğüm noktasının deplasman değerlerini, σ_c ve σ_t ise elemanlar için izin verilen basınç ve çekme gerilme değerlerini göstermektedir.

Bir optimizasyon probleminde, çözümün kısıtları ihlal etmemesi istenir. Kısıtların ihlalini tespit eden ve ihlal miktarına bağlı olarak amaç fonksiyonuna ceza ekleyen cezalandırılmış amaç fonksiyonu için aşağıdaki formül kullanılır. ($W_p(X)$: Cezalı amaç fonksiyonu, nm : eleman sayısı, nd : düğüm noktası sayısı, $s_i(X)$: i -inci eleman için gerilme ihlal oranı, $d_j(X)$: j -inci düğüm noktası için deplasman ihlal oranı, C : Ceza katsayısı)

$$W_p(X) = \left(1 + \sum_{i=1}^{nm} s_i(X) + \sum_{j=1}^{nd} d_j(X) \right)^C \quad (2.16)$$

$$s_i(X) = \frac{\sigma_i - \sigma_{max}}{\sigma_{max}} \leq 0 \quad (2.17)$$

$$d_j(X) = \frac{\delta_j - \delta_{max}}{\delta_{max}} \leq 0 \quad (2.18)$$

3. SAYISAL UYGULAMALAR

Kafes yapıların optimizasyonu, malzeme kullanımını minimize ederek yapısal dayanıklılığı en üst seviyeye çıkarmayı hedefler. Kafes yapı örnekleri; ilk bölümde enkesit optimizasyonu için dört kafes yapı ve ikinci bölümde şekil optimizasyonu için dört kafes yapı olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Bu çalışma kapsamında optimize edilen kafes yapıların boyut ve eleman sayıları aşağıda belirtilmiştir:

- Enkesit optimizasyonu yapılacak kafes yapılar:
 - 25 elemanlı uzay kafes
 - 72 elemanlı uzay kafes
 - 200 elemanlı düzlem kafes
 - 942 elemanlı uzay kafes
- Şekil optimizasyonu yapılacak kafes yapılar:
 - 15 elemanlı düzlem kafes
 - 18 elemanlı düzlem kafes
 - 25 elemanlı uzay kafes
 - 288 elemanlı uzay kafes

LPO'da kullanılan parametrelerden en uygun popülasyon sayısını (N_{pop}) bulmak amacıyla 25, 72 ve 200 elemanlı kafes yapılar, farklı N_{pop} değerleri için optimize edilmiştir. Buna ilişkin sonuçların gösterildiği Çizelge 2'de görüldüğü üzere; 25 elemanlı kafes yapıda popülasyon sayısının farklı olması minimum ağırlık açısından bir etki yaratmamış ve bütün popülasyon sayıları için en düşük ağırlık değeri aynı bulunmuştur. 72 elemanlı kafes yapıda en düşük ağırlık değeri üç farklı popülasyon sayısı için (20, 30 ve 40) aynı bulunmuştur. Bu üç popülasyon sayısı arasında seçim yapmak için standart sapma (S_d) kriteri dikkate alınmış ve buna göre en kararlı optimizasyon süreci $N_{pop}=40$ seçildiğinde gerçekleşmiştir. 200 elemanlı kafes yapıda ise en hafif tasarım $N_{pop}=40$ ile elde edilmiş ve bu aynı zamanda en düşük standart sapma kriteri ile en istikrarlı analiz süreci olmuştur. Bu sonuçlara göre en hafif tasarımın en düşük standart sapma ile elde edildiği popülasyon sayısı olan $N_{pop}=40$, optimizasyonu gerçekleştirilen tüm kafes yapılar için de referans alınmıştır. Popülasyon sayısının belirlenmesinin ardından, optimizasyonun bir diğer parametresi olan durdurma kriteri ($Iter_{maks}$) her bir kafes yapı için literatürde benzer çalışmalarda gerçekleştirilen analiz sayılarının ortalaması esas alınarak belirlenmiştir.

Her bir tasarım örneği, farklı yükleme koşullarına altında gerilme ve deplasman sınırlayıcıları göz önünde bulundurularak LPO algoritmasıyla optimize edilmiştir. Hazırlanan optimizasyon programı her bir tasarım örneği için 10 farklı kez çalıştırılmıştır. Elde edilen en iyi tasarım, en kötü tasarım, ortalama ağırlık ve standart sapma gibi istatistiksel veriler ile bu değerlerin elde edilmesi için gerekli analiz sayısı; GA (Erbatur vd. 2000), HS (Lee ve Geem 2004), HPSO (Lee vd. 2007), PSO (Perez ve Behdinan 2007), ESs (Hasançebi 2008), CMLPSA (Lamberti 2008), HPSACO (Kaveh ve Talatahari 2009), Rahami (GNMS 2011), GS (Li ve Liu 2011), ABC-AP (Sönmez 2011), GA (Dede 2011), SAHS (Değertekin 2012), PSO ve MPSO (Talatahari vd. 2012), IRO (Kaveh vd. 2013), CS (Gandomi 2013), TLBO (Değertekin 2013, Camp 2014), FPA (Bekdaş 2015), ADEA (Bureerat 2016), WEO (Kaveh ve Bakhshpoori 2016), JA (Değertekin 2018, Bekdaş 2021) ve GMO (Pham 2024) yöntemleriyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2. Farklı popülasyon sayıları için optimizasyon sonuçları

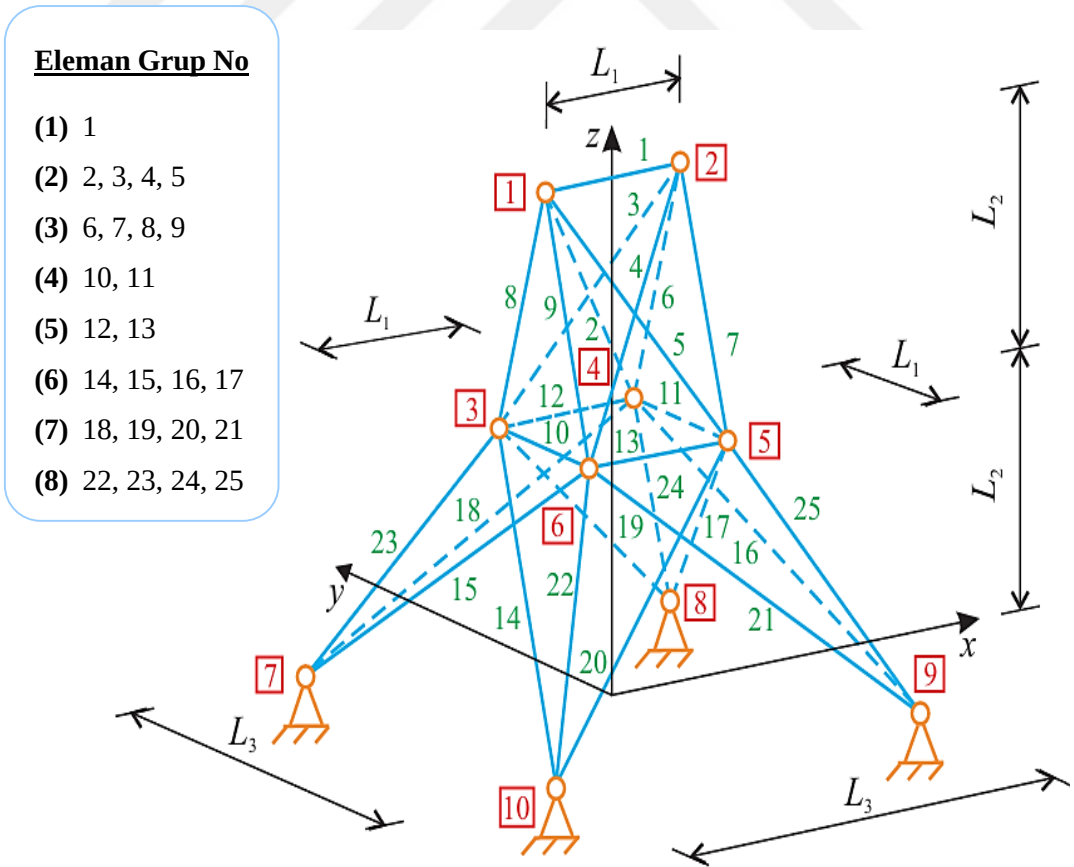
200 Elemanlı Kafes							
<i>Npop</i>	10	20	30	40	50	100	250
Wmin	26,206.43	25,478.49	25,478.19	25,474.54	25,486.10	25,688.86	29,207.56
Wort	27,142.75	25,740.09	25,933.48	25,509.92	25,556.30	25,744.64	29,482.29
Wmaks	29,214.31	26,166.08	25,659.82	25,596.42	25,869.06	25,806.12	29,768.94
Sd	861.58	211.93	157.5230	40.69	112.88	37.06	204.70
72 Elemanlı Kafes							
<i>Npop</i>	10	20	30	40	50	100	250
Wmin	379.62	379.61	379.61	379.61	379.62	379.64	380.71
Wort	381.86	379.62	379.62	379.62	379.62	379.65	381.16
Wmaks	402.03	379.62	379.62	379.62	379.62	379.67	381.61
Sd	7.09	0.0037	0.00046	0.00044	0.00034	0.00967	0.34651
25 Elemanlı Kafes							
<i>Npop</i>	10	20	30	40	50	100	250
Wmin	545.163	545.163	545.163	545.163	545.163	545.163	545.163
Wort	545.263	545.163	545.163	545.163	545.163	545.163	545.163
Wmaks	545.540	545.163	545.163	545.163	545.163	545.163	545.163
Sd	0.14318	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

3.1. Kafes Yapıların Enkesit Optimizasyonu

Yapısal tasarımda enkesit optimizasyonu, verilen yükleme koşulları altında tasarım sınırlayıcılarını sağlayan en hafif tasarımı elde etmek için eleman enkesit alanlarının belirlenmesidir. Taşıyıcı sistem elemanları taşıma kapasitesi, stabilite, rijitlik, deformasyon sınırları gibi performans kriterlerini sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Enkesit optimizasyonu için farklı yükleme koşulları ve tasarım kısıtlamaları altında sürekli tasarım değişkenlerine sahip 25 elemanlı uzay kafes, 72 elemanlı uzay kafes, 200 elemanlı düzlem kafes ve 942 elemanlı uzay kafes olmak üzere dört farklı kafes yapı optimize edilmiştir.

3.1.1. 25 elemanlı uzay kafes

Daha önce farklı yöntemlerle yapılan optimizasyon işlemlerinde kullanılan 25 elemanlı düzlem kafes yapı, literatürde karşılaştırma örneği olarak sık başvurulan bir örnektir. Şekil 3'te kafes yapının geometrisi ve eleman grup numaraları (tasarım değişkenleri) verilmiştir. $L_1=75$ inç, $L_2=100$ inç ve $L_3=200$ inç; yapı elemanlarının malzeme elastisite modülü ve birim hacim ağırlıkları sırasıyla 10.000 ksi ve 0.1 lb/in^3 'tür.



Şekil 3. 25 elemanlı uzay kafes yapı geometrisi (Serpik, 2020)

Çizelge 3’te gösterilen iki farklı yükleme durumu söz konusudur. Deplasman kısıtı sadece 1 ve 2 no’lu düğüm noktaları için bütün yönlerde $\pm 0,35$ inç’tir. Kafes yapı 8 tasarım değişkeninden (eleman grubundan) oluşmaktadır. Bu eleman grupları: (1) A₁, (2) A₂...A₅, (3) A₆...A₉, (4) A₁₀-A₁₁, (5) A₁₂-A₁₃, (6) A₁₄...A₁₇, (7) A₁₈...A₂₁, (8) A₂₂...A₂₅ şeklindedir. Her bir eleman için minimum enkesit alanı 0,01 inç², maksimum enkesit alanı ise 3,5 inç²’dir. Tasarım değişkenleri için izin verilen basınç ve çekme gerilmesi sınır değerleri Çizelge 4’ te verilmiştir.

Çizelge 3. 25 elemanlı uzay kafes yapı yükleme durumu

Yükleme Durumu	Düğüm Noktası	Koordinat		
		x	y	z
1	1	1	10	-5
	2	0	10	-5
	3	0.5	0	0
2	5	0	20	-5
	6	0	-20	-5

Çizelge 4. 25 elemanlı uzay kafes yapı gerilme sınır değerleri

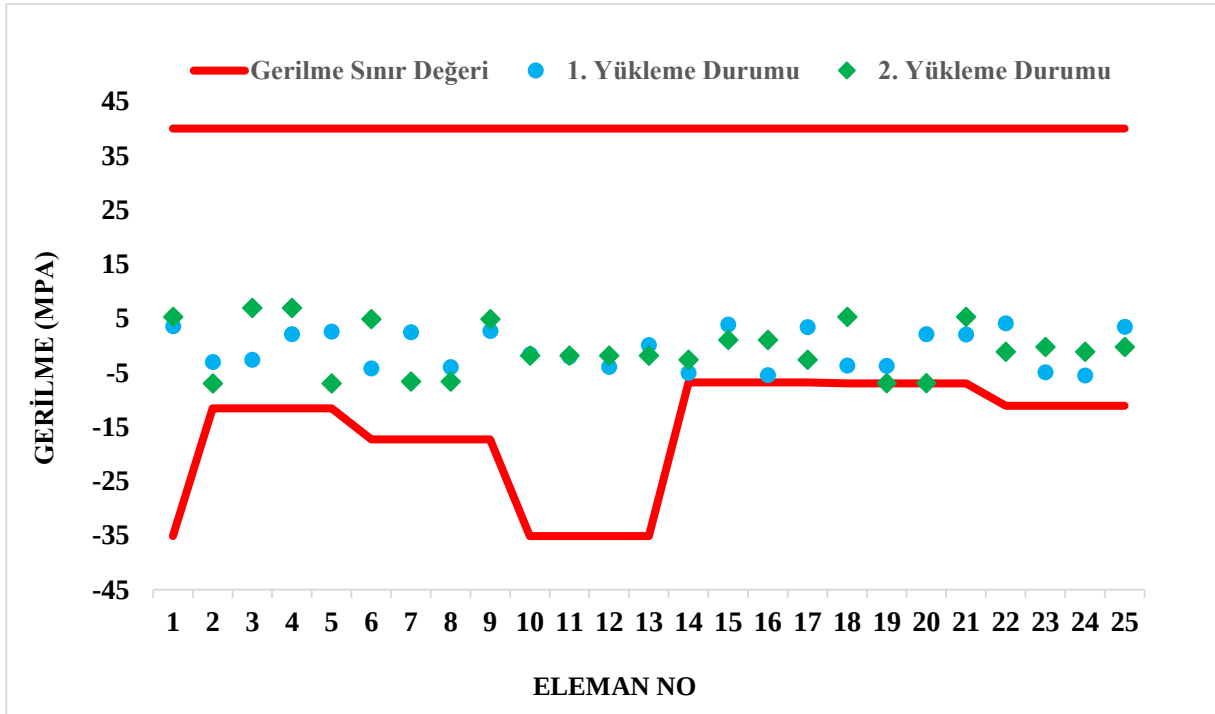
Tasarım Değişkenleri	Eleman No	Basınç Gerilmesi	Çekme Gerilmesi
1	A1	35.092	40.000
2	A2-A5	11.590	40.000
3	A6-A9	17.305	40.000
4	A10-A11	35.092	40.000
5	A12-A13	35.092	40.000
6	A14-A17	6.759	40.000
7	A18-A21	6.959	40.000
8	A22-A25	11.082	40.000

Optimizasyon sonucunda bulunan sonuçlar ve farklı metotlar kullanılarak yapılmış çalışmalardan elde edilen sonuçlar Çizelge 5'te gösterilmiştir. LPO algoritmasıyla 8.000 analiz sonucunda en düşük ağırlık 545.1731 lb olarak bulunmuştur. Çizelgede gösterilen diğer değerlere bakıldığında, üç çalışmada (HS, HPSACO ve TLBO) LPO'dan daha hafif tasarımlar elde edilmiş olmasına rağmen hepsinde de kısıtlayıcı ihlali olduğu görülmektedir. HS (Lee ve Geem 2004) yöntemiyle 15.000 analiz sonucunda 544.365 lb ile en hafif tasarım elde edilmiş olmasına rağmen hem deplasman hem de gerilme sınırlayıcı ihlali yapılmıştır. HPSACO (Kaveh ve Talatahari 2009) yöntemiyle 9.875 analiz sonucunda 544.991 lb ağırlık değeri elde edilmiş fakat gerilme ve deplasman sınırlayıcı koşulları karşılanamamıştır. TLBO (Camp 2014) metoduyla ise 12.200 analiz sonucunda bulunan değer 545.154 lb'dir. Burada gerilme koşulları karşılanmış olmasına rağmen deplasman ihlali yapılmıştır. Dolayısıyla 11 farklı optimizasyon metoduna göre kısıtları sağlayan en hafif tasarım LPO algoritmasıyla elde edilmiştir. Çizelgedeki mevcut veriler arasından en düşük ortalama ağırlık değeri yine bu çalışma sonucunda elde edilmiştir. Bu da her döngüde bulunan ağırlık değerlerinin birbirine daha yakın olduğunu ve LPO algoritmasının standart sapma açısından kararlı bir yaklaşım gösterdiğini işaret eder.

Çizelge 5. 25 elemanlı uzay kafes yapı optimizasyon sonuçları

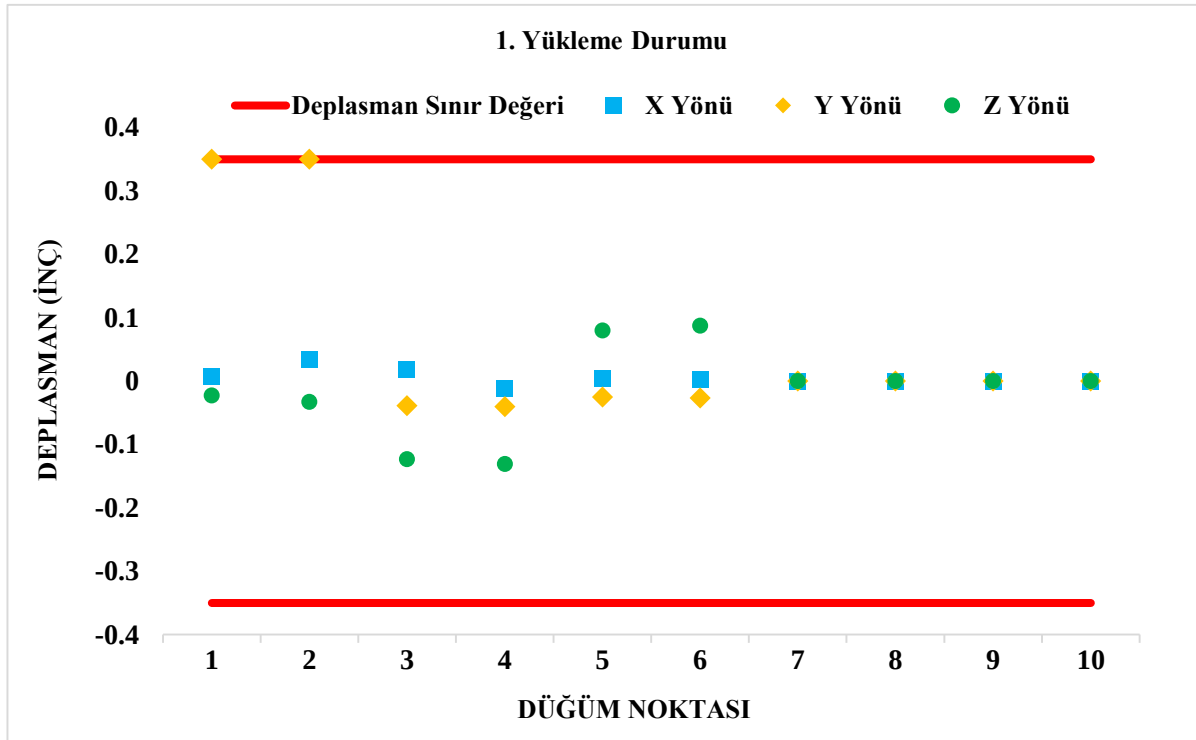
	Lee ve Geem (2004)	Lee vd. (2007)	Lamberti (2008)	Kaveh ve Talatahari (2009)	Li ve Liu (2011)	Sonmez (2011)	Talatahari vd. (2012)		Kaveh vd. (2013)	Camp (2014)	Pham vd. (2024)	Mevcut Çalışma
ALG Ai (in2)	HS	HPSO	CMLPSA	HPSACO	GSO	ABC-AP	PSO	MSPSO	IRO	TLBO	GMO	LPO
A ₁	0.0470	0.0100	0.0100	0.0100	0.1190	0.0110	0.0100	0.0100	0.0112	0.0100	0.0100	0.0100270
A2-A5	2.0220	1.9700	1.9870	2.0540	1.8380	1.9790	1.9503	1.9848	1.9766	1.9878	1.9867	1.9848876
A6-A9	2.9500	3.0160	2.9940	3.0080	2.7730	3.0030	3.0408	2.9956	3.0099	2.9914	2.9940	2.9963608
A10-A11	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100	0.0170	0.0100	0.1000	0.1000	0.1000	0.0102	0.1000	0.0100000
A12-A13	0.0140	0.0100	0.0100	0.0100	0.0310	0.0100	0.1000	0.1000	0.1000	0.0100	0.1000	0.0101746
A14-A17	0.6880	0.6940	0.6940	0.6790	0.7290	0.6900	0.6929	0.6852	0.6842	0.6825	0.6841	0.6804534
A18-A21	1.6570	1.6810	1.6810	1.6110	1.9880	1.6790	1.6866	1.6778	1.6783	1.6775	1.6770	1.6777295
A22-A25	2.6630	2.6430	2.6430	2.6780	2.6100	2.6520	2.6362	2.6599	2.6571	2.6640	2.6619	2.6657093
Wmin (lb)	544.380	545.190	545.161	544.990	552.200	545.193	545.220	545.172	545.190	545.175	545.163	545.1731
Wort (lb)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	549.96	546.03	545.35	545.483	547.146	545.1900
Standart Sapma	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	9.91	0.8	N/A	0.306	1.445	0.0103
Deplasman İhlali (%)	0.1992	0.0000	0.0590	0.0075	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0061	0.0000	0.0000
Gerilme İhlali (%)	0.2064	0.0000	0.0000	3.5240	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Analiz Sayısı	15,000	N/A	N/A	9,875	N/A	300,000	18,400	10,800	12,200	12,200	11,500	8,000
Wkontrol	544.365	545.238	545.186	544.991	552.223	545.206	547.932	547.872	547.878	545.154	547.872	

*1 lb=0,4536 kg



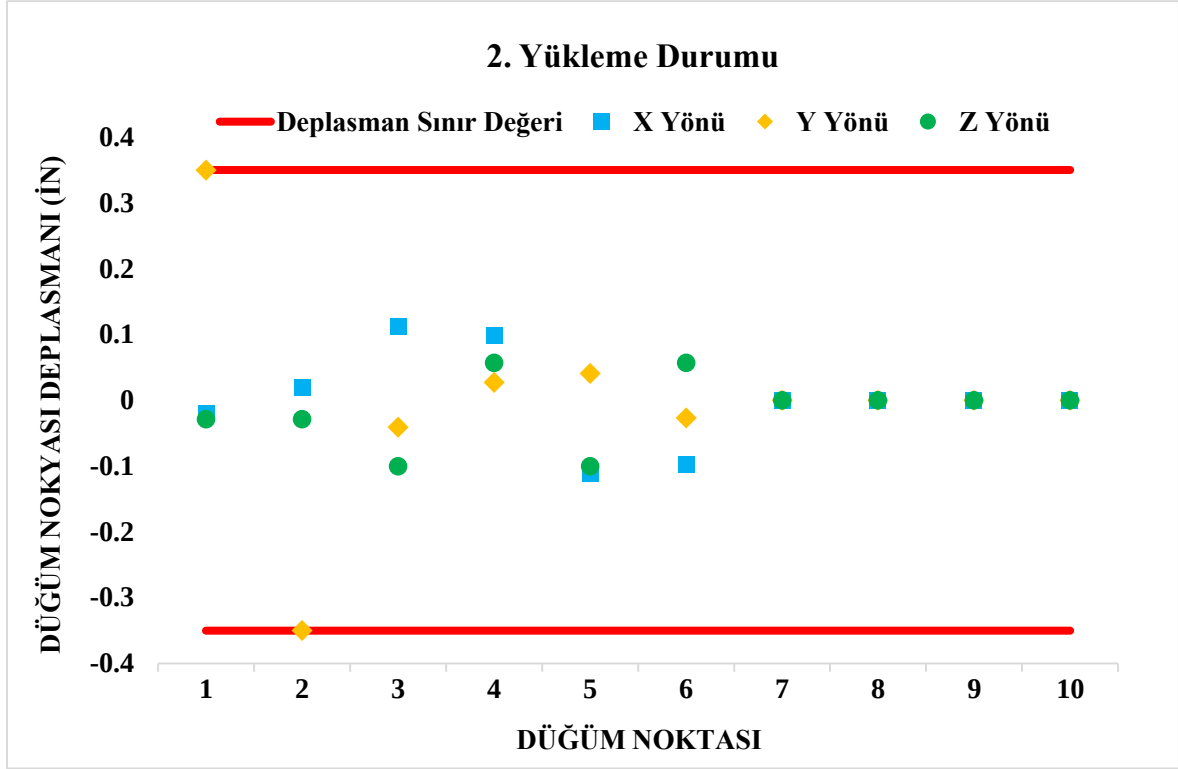
Şekil 4. 25 elemanlı uzay kafes yapı eleman gerilme değerleri

Şekil 4'teki grafikte iki yükleme durumu altında kafes yapı elemanlarında oluşan gerilme değerleri verilmiştir. Grafiğe bakarak gerilme açısından en çok zorlanan dolayısıyla en kritik kesitlerin 2. yükleme durumu için 19 ve 20 no'lu elemanlar olduğu söylenebilir.



Şekil 5. 25 elemanlı uzay kafes yapı düğüm noktası deplasman değerleri (1. yükleme durumu)

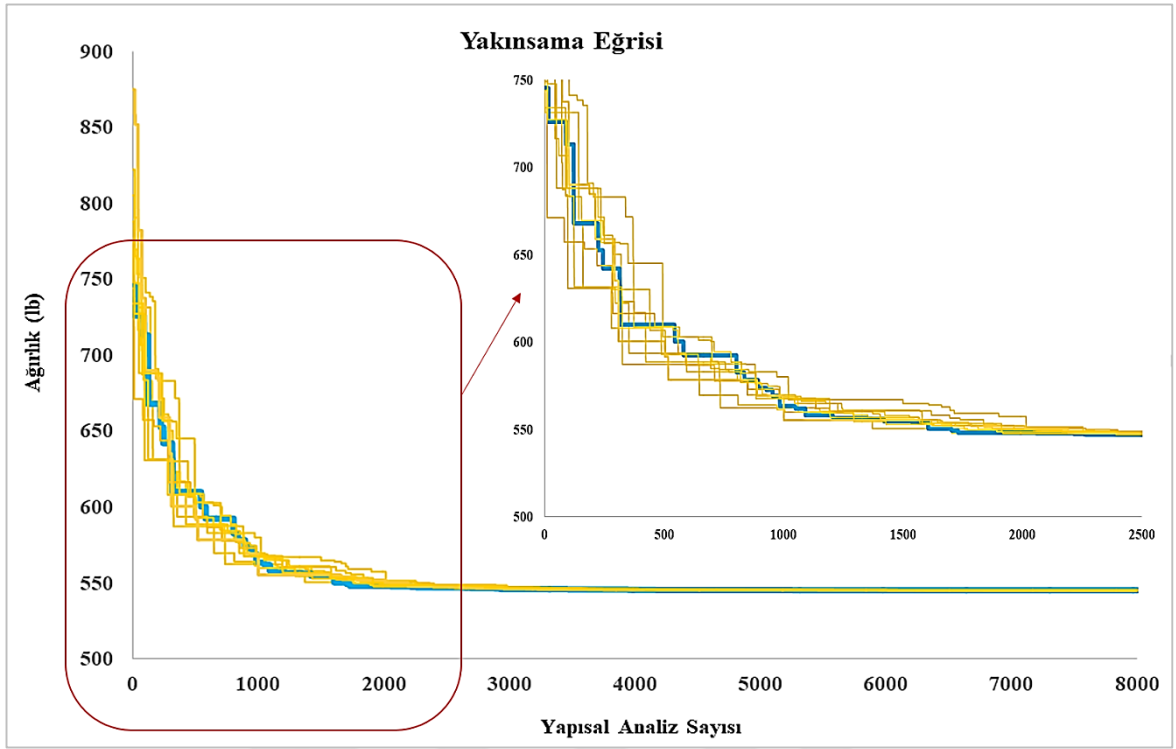
Şekil 5 ve Şekil 6'daki grafiklerde ise sırasıyla birinci ve ikinci yükleme durumu için düğüm noktalarında oluşan deplasman değerleri verilmiştir. Her iki yükleme durumunda da beklendiği gibi en fazla deplasman en üstteki 1 ve 2 no'lu düğüm noktalarında meydana gelmiş ve Y yönünde etki eden kuvvetin büyüklüğünden kaynaklı her iki yükleme durumunda da düğüm noktaları bu yönde daha fazla zorlanmıştır.



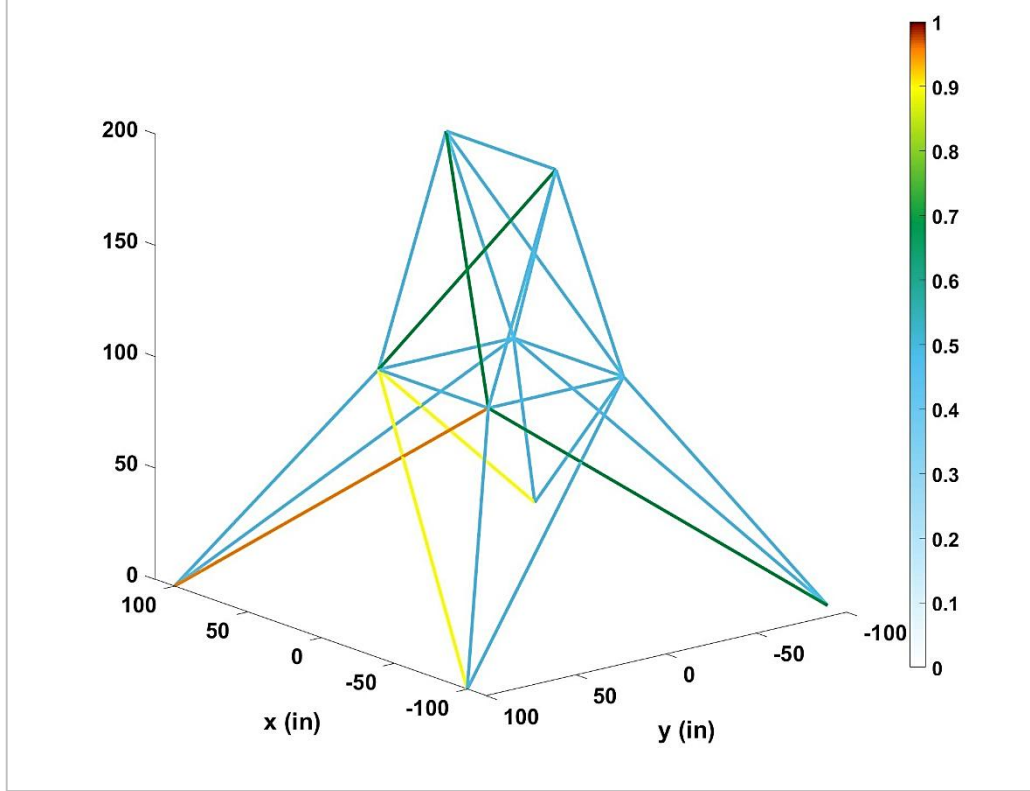
Şekil 6. 25 elemanlı uzay kafes yapı düğüm noktası deplasman değerleri (2. yükleme durumu)

Optimizasyon boyunca yapısal analiz sayısına bağlı olarak optimum ağırlıktaki değişim Şekil 7'deki grafikte gösterilmiştir. Yakınsama davranışının daha iyi gözlemlenebilmesi için aynı şekil üzerinde, 0-2500 analiz sayısı için yakınlştırılmış grafik üstte verilmiştir. En hafif tasarımın elde edildiği süreç mavi renkli eğri ile diğerlerinden ayırt edilmiştir. Buna göre optimum tasarım süreci yaklaşık olarak 750 lb ile başlamış, 2500 analize kadar belirgin bir düşüş göstererek optimal tasarım olan 545 lb seviyelerine inmiştir. 2500 analizden sonra ise optimum tasarıma ulaşınca kadar yakınsama süreci oldukça yavaş bir değişim göstermiştir.

Son olarak Şekil 8'de, optimizasyon sonucunda elde edilen en hafif tasarıma ait yapı şekli ve her bir elemanın maruz kaldığı gerilme durumunun sınır gerilme durumuna yaklaşp yaklaşmadığı renk skalasıyla gösterilmiştir.



Şekil 7. 25 elemanlı uzay kafes yapı yakınsama süreci

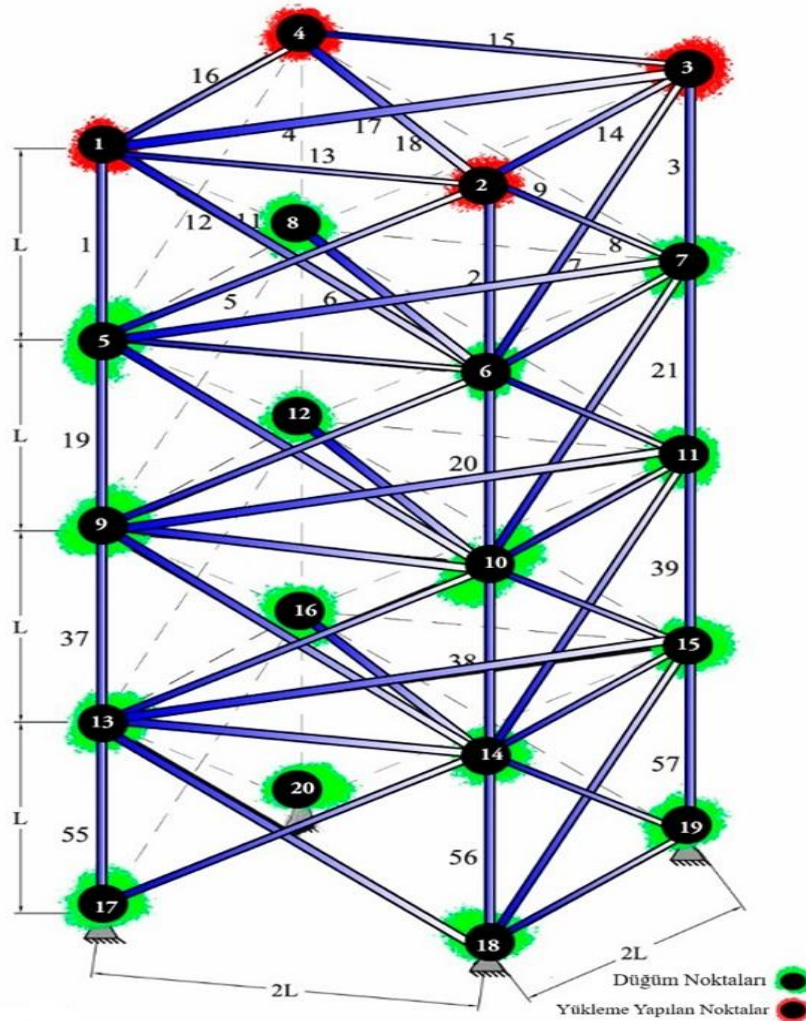


Şekil 8. 25 elemanlı uzay kafes yapıya ait nihai tasarım

3.1.2. 72 elemanlı uzay kafes

Yapı geometrisi Şekil 9’da gösterilen, 20 düğüm noktası ve 72 elemandan oluşan dört katlı kafes yapıda $L=60$ inç alınacaktır. Malzeme elastisite modülü 10.000 ksi ve malzeme özgül ağırlığı 0.01 lb/inç³’tür. Kafes yapı için (1) $A_1...A_4$, (2) $A_5...A_{12}$, (3) $A_{13}...A_{16}$, (4) $A_{17}-A_{18}$, (5) $A_{19}-A_{22}$, (6) $A_{23}...A_{30}$, (7) $A_{31}...A_{34}$, (8) $A_{35}-A_{36}$, (9) $A_{37}...A_{40}$, (10) $A_{41}...A_{48}$, (11) $A_{49}...A_{52}$, (12) $A_{53}-A_{54}$, (13) $A_{55}...A_{58}$, (14) $A_{59}...A_{66}$, (15) $A_{67}...A_{70}$, (16) $A_{71}-A_{72}$ olmak üzere 16 bağımsız tasarım değişkeni tanımlanmıştır. Her bir eleman için minimum enkesit alanı 0,01 inç², maksimum enkesit alanı ise 4 inç² olarak belirlenmiştir.

Çizelge 6’da verilen iki farklı yükleme durumu göz önüne alınarak belirtilen düğüm noktalarına yüklemeler yapılacaktır. Bu yüklemeler altında izin verilen gerilme sınır değeri bütün elemanlar için ± 25 ksi, deplasman sınır değeri ise en üstteki 1, 2, 3 ve 4 no’lu düğüm noktaları için x ve y yönlerinde $\pm 0,25$ inç’tir.

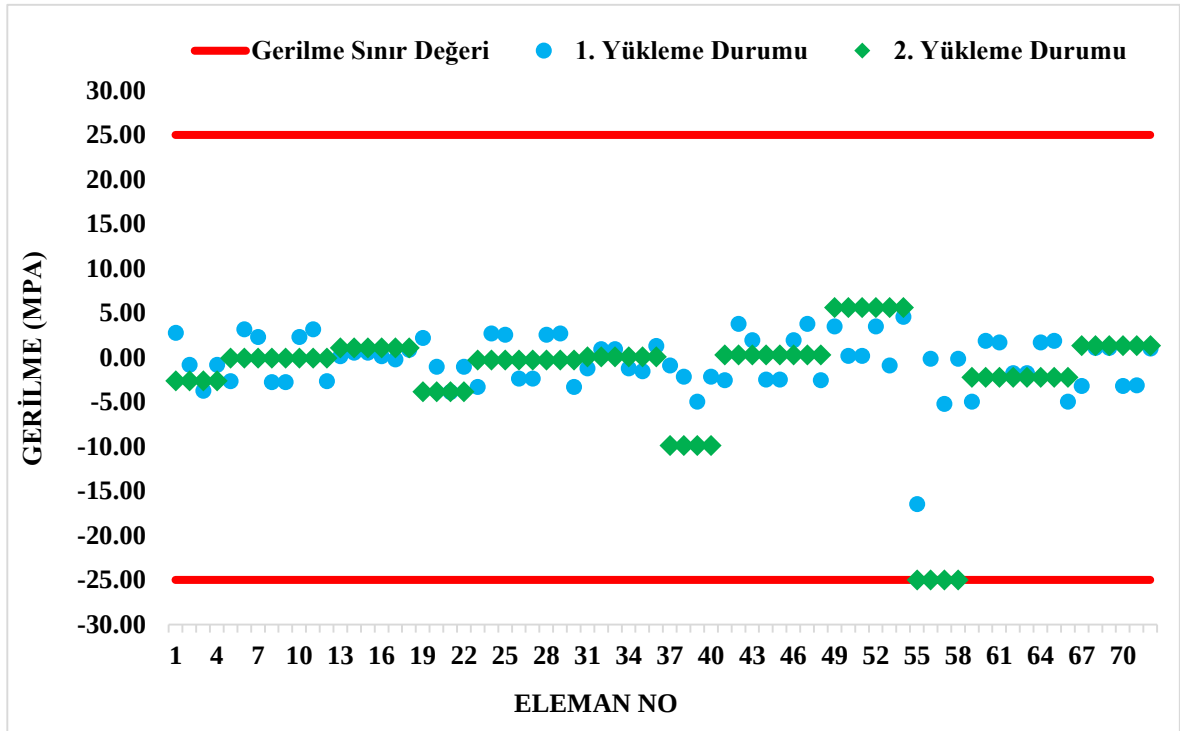


Şekil 9. 72 elemanlı uzay kafes yapı geometrisi (Khodadadi vd. 2023)

Çizelge 6. 72 elemanlı uzay kafes yapı yükleme durumu

Yükleme Durumu	Düğüm Noktası	Koordinat		
		x	y	z
1	1	5.00	5.00	-5.00
2	1	0	0	-5.00
	2	0	0	-5.00
	3	0	0	-5.00
	4	0	0	-5.00

Mevcut çalışmada kullanılan LPO algoritması ile bulunan sonuç ve diğer yöntemlerden elde edilen sonuçlar Çizelge 7’de verilmiştir. LPO algoritmasıyla 18.000 analiz sonunda en düşük ağırlık değeri 379,6248 lb, ortalama ağırlık değeri 379,6480 lb olarak bulunmuştur. Bu değer, çizelgedeki sonuçlar içerisinde HPSO (Li vd. 2007) yöntemiyle elde edilen 372.253 lb ağırlıktan sonraki en hafif tasarım olmuştur. Ancak HPSO ile kaç analiz sonunda bu değer elde edildiği bilinmemektedir. Diğer yöntemlerden HS (Lee ve Geem 2004), CMLPSA (Lamberti 2008) ve ABC-AP (Sönmez 2011) algoritmaları kullanılarak daha düşük ağırlıklar elde edilmiş olmasına rağmen ciddi derecede gerilme ve deplasman ihlalleri gerçekleştiği görülmektedir. Bu sonuçlar, LPO algoritmasının yapısal kısıtları ihlal etmeden rekabetçi tasarımlar üretebildiğini göstermektedir.



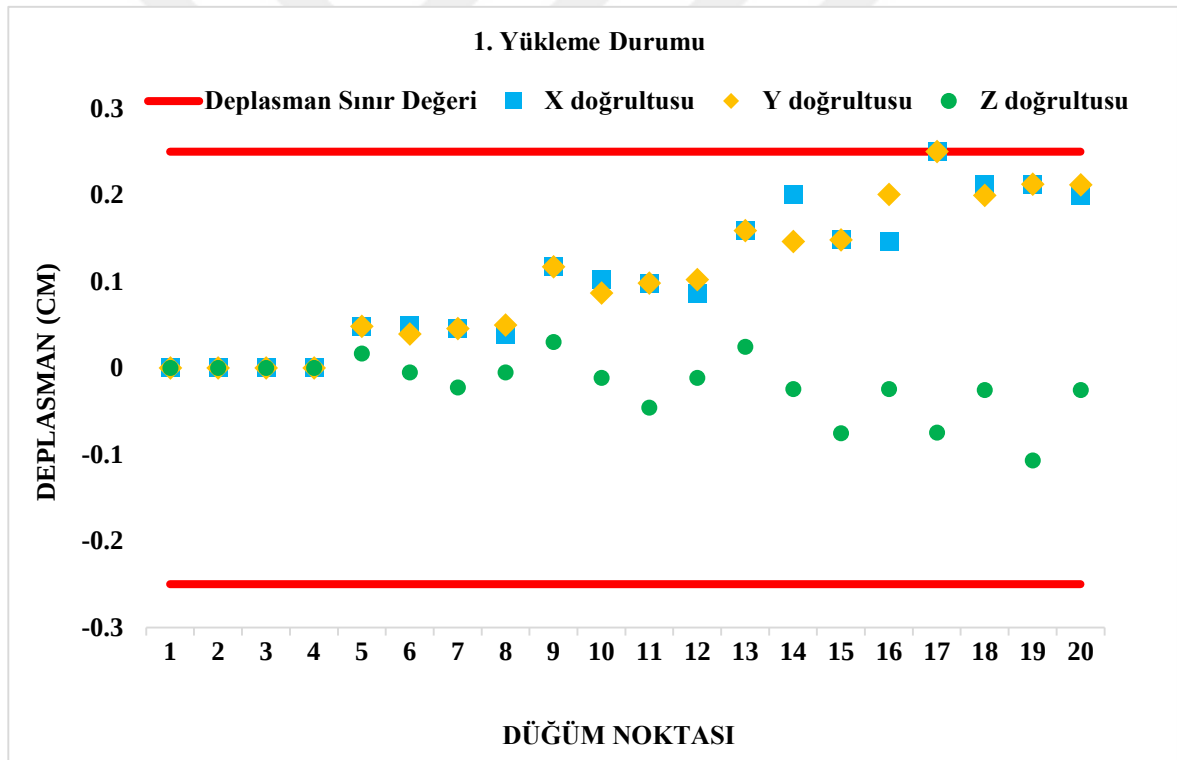
Şekil 10. 72 elemanlı uzay kafes yapı eleman gerilme değerleri

Çizelge 7. 72 elemanlı uzay kafes yapı optimizasyon sonuçları

	Erbatur vd.	Lee ve Geem	Perez ve Behdinan	Li vd.	Lamberti	Sonmez	Dede	Değertekin	Bureerat	Bekdaş		Mevcut Çalışma
	2000	2004	2007	2007	2008	2011	2011	2013	2016	2021		
ALG Ai (in2)	GA	HS	PSO	HPSO	CMLPSA	ABC-AP	GA	TLBO	ADEA	JA	FPA	LPO
A1-A4	0.155	1.963	0.1615	1.907	0.1665	0.1675	1.7020	1.9064	1.8861	1.8899	1.9057	1.8844
A5-A12	0.535	0.481	0.5092	0.524	0.5363	0.5346	0.4960	0.5061	0.5231	0.5119	0.4916	0.5140
A13-A16	0.480	0.010	0.4967	0.100	0.4460	0.4443	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
A17-A18	0.520	0.011	0.5619	0.100	0.5761	0.5803	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1003	0.1001
A19-A22	0.460	1.233	0.5142	1.288	0.5207	0.5208	1.2880	1.2617	1.2576	1.2702	1.3372	1.2645
A23-A30	0.530	0.506	0.5464	0.523	0.5180	0.5178	0.4690	0.5111	0.5043	0.5120	0.4907	0.5114
A31-A34	0.120	0.011	0.1000	0.010	0.0100	0.0100	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1001
A35-A36	0.165	0.012	0.1095	0.010	0.1141	0.1048	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
A37-A40	1.155	0.538	1.3079	0.544	1.2903	1.2968	0.5050	0.5317	0.5200	0.5234	0.5590	0.5191
A41-A48	0.585	0.533	0.5193	0.528	0.5170	0.5191	0.5500	0.5159	0.5235	0.5165	0.5088	0.5177
A49-A52	0.100	0.010	0.1000	0.019	0.0100	0.0100	0.1090	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
A53-A54	0.100	0.167	0.1000	0.020	0.0100	0.0101	0.1180	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1001
A55-A58	1.755	0.161	1.7427	0.176	1.8866	1.8907	0.1540	0.1562	0.1568	0.1565	0.1560	0.1565
A59-A66	0.505	0.542	0.5185	0.535	0.5169	0.5166	0.6040	0.5493	0.5394	0.5457	0.5373	0.5448
A67-A70	0.105	0.478	0.1000	0.426	0.0100	0.0100	0.4420	0.4097	0.4083	0.4104	0.4890	0.4116
A71-A72	0.155	0.551	0.1000	0.612	0.0100	0.0100	0.6040	0.5698	0.5734	0.5678	0.5802	0.5714
Wmin (lb)	385.760	364.330	381.910	364.860	363.8030	363.8392	382.3500	379.6300	379.6851	379.6156	380.4598	379.6289
Wort (lb)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	379.9205	379.6172	380.4598	379.6430
Sd	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.1842	0.0007	0.0000	0.0121
Deplasman İhlali (%)	167.0000	0.0920	170.7783	0.0000	299.8328	300.8078	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	0.0013	0.0000
Gerilme İhlali (%)	49.1800	0.0514	43.0082	0.0000	135.9431	138.5159	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Analiz Sayısı	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	400,000	N/A	19,709	10,000	17,500	18,000	18,000
Wkontrol	386.444	364.379	381.936	372.253	363.821	363.839	382.353	379.638	379.689	379.617	380.457	

Şekil 10’da analiz sonunda 72 elemanlı kafes yapı elemanlarında oluşan gerilme değerleri verilmiştir. Grafikten 2. yükleme durumu altında 55, 56, 57 ve 58 no’lu elemanların, basınç gerilmesi sınır değerine yaklaştığı görülmektedir. Dolayısıyla kafes yapıda en altta bulunan düşey elemanların en çok zorlanan kesitler olduğu söylenebilir. Bu durum kritik zorlanmanın alt bölgelerde yoğunlaştığını göstermektedir.

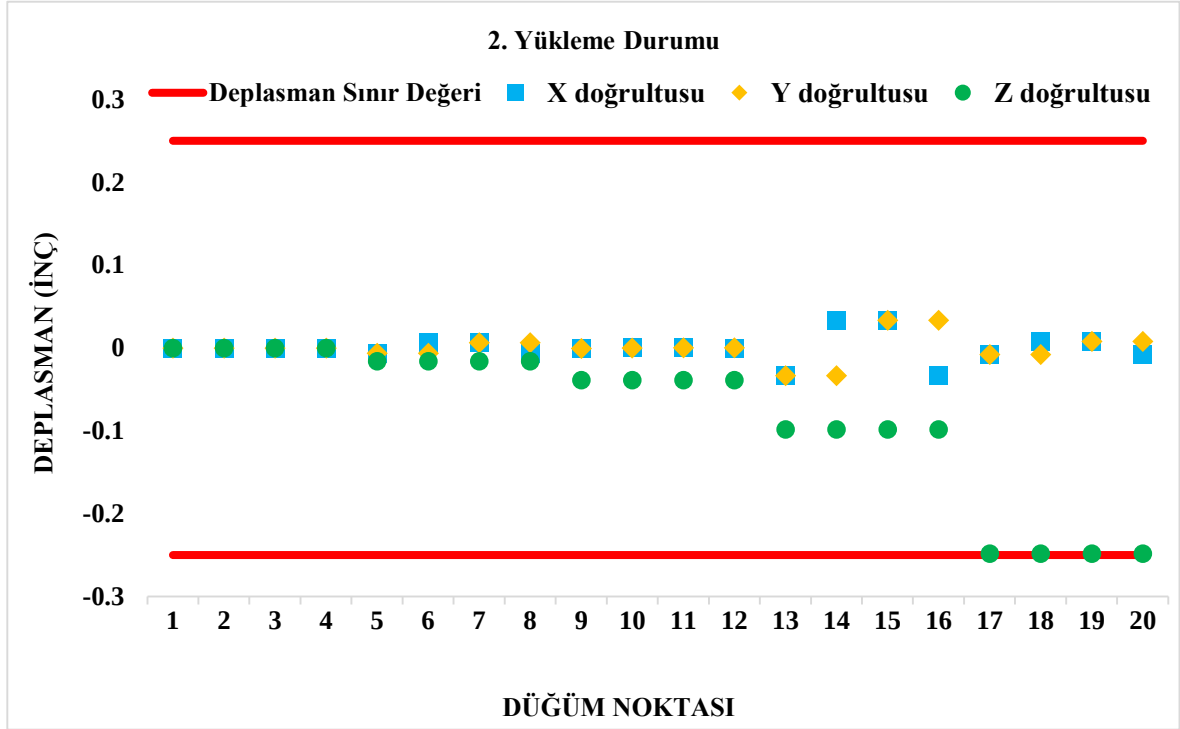
Şekil 11 ve Şekil 12’de ise optimizasyon sonucunda sırasıyla 1. yükleme ve 2. yükleme durumu altında düğüm noktalarında oluşan deplasman değerleri gösterilmektedir. Grafiklere bakıldığında ilk yükleme durumunda sadece 17 no’lu düğüm noktasında +x ve +y yönünde deplasman sınırına yaklaşıldığı görülmektedir. Diğer düğüm noktalarında ise her iki yükleme durumu için de sınır koşulları güvenli bir şekilde yerine getirilmiştir. İkinci yükleme durumunda ise 17, 18, 19 ve 20 no’lu düğüm noktalarında -z yönünde deplasman sınır değerine yaklaşılmıştır.



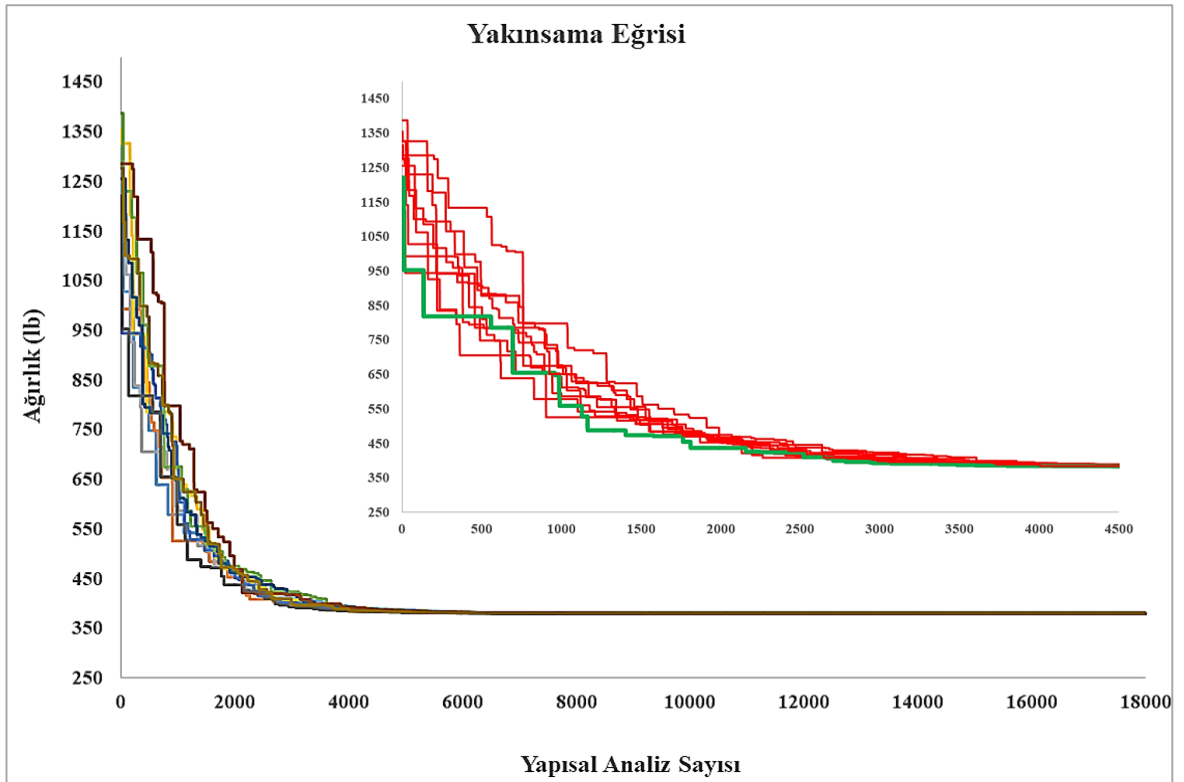
Şekil 11. 72 elemanlı uzay kafes yapı düğüm noktası deplasman değerleri (1. yükleme durumu)

Optimizasyon boyunca yapısal analiz sayısına bağlı olarak optimum tasarım için ağırlık değişimi, Şekil 13’teki grafikte gösterilmiştir. Yakınsama davranışının daha iyi gözlemlenmesi amacıyla aynı şekil üzerinde üstte, 0-4500 analiz süreci için yakınlaştırılmış grafik verilmiştir. Yeşil renkli eğri optimum tasarımın elde edildiği analiz süreci ile diğerlerinden ayırt edilmiştir. Buna göre optimizasyon, yaklaşık 1250 lb ile başlayıp 4500

analize kadar hızlı bir yakınsama göstererek optimum tasarım olan 380 lb seviyesine düşmüştür. 4500-18000 analiz arasında ise optimum tasarıma ulaşıncaya kadar yavaş bir yakınsama süreci yaşanmıştır.

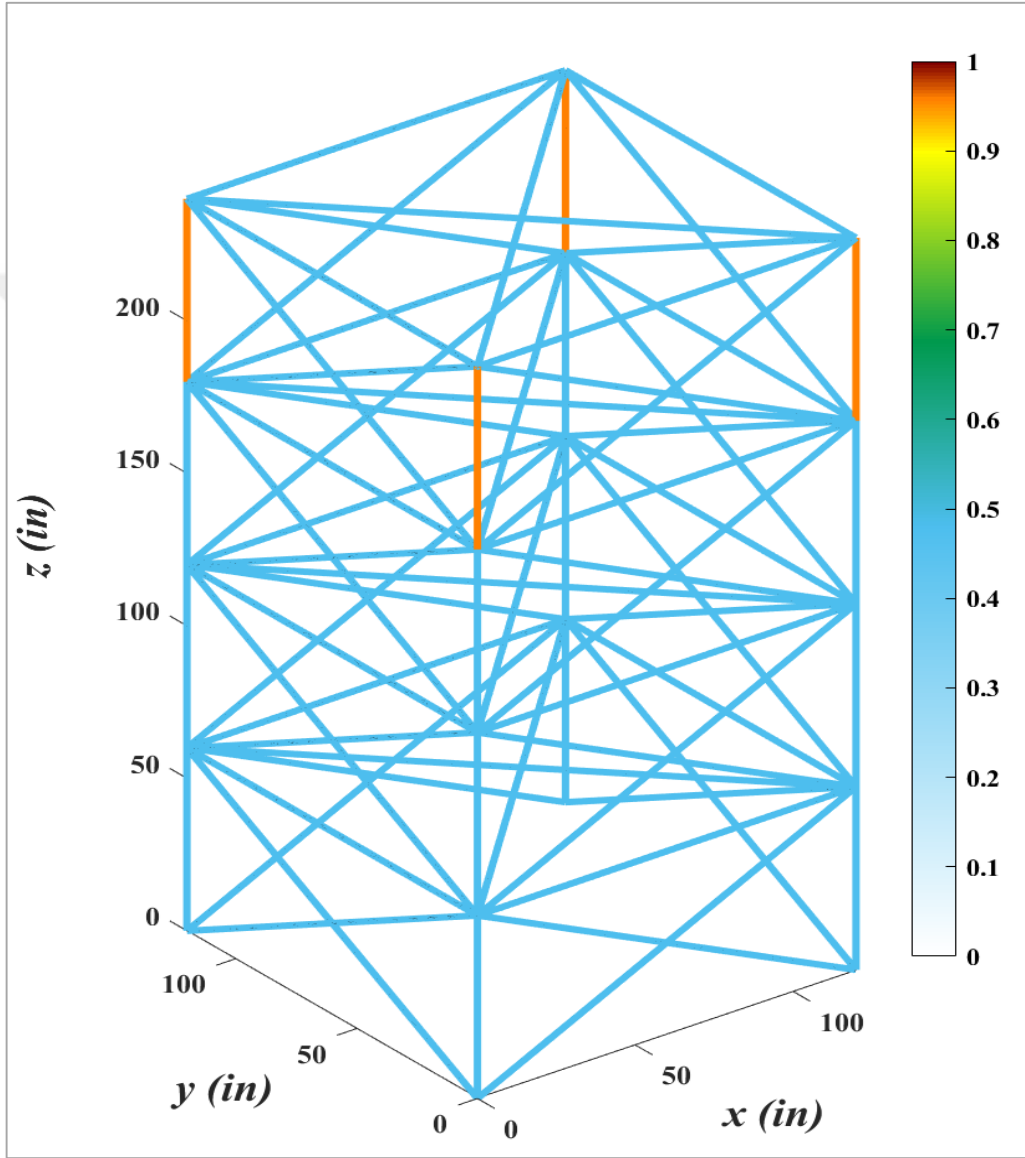


Şekil 12. 72 elemanlı uzay kafes yapı düğüm noktası deplasman değerleri (2. yükleme durumu)



Şekil 13. 72 elemanlı uzay kafes yapı yakınsama süreci

Son olarak Şekil 14’te, 72 elemanlı uzay kafes yapının, optimizasyon sonucunda elde edilen en hafif tasarımına ait yapı şekli ve her bir elemanın maruz kaldığı gerilme durumunun sınır gerilme durumuna yaklaşıp yaklaşmadığı renk skalasıyla verilmiştir. Turuncu renk ile gösterilen dört eleman dışında kalan tüm yapı elemanları, dayanım kriterleri açısından sınır değer koşulunun çok altında performans göstermiştir.



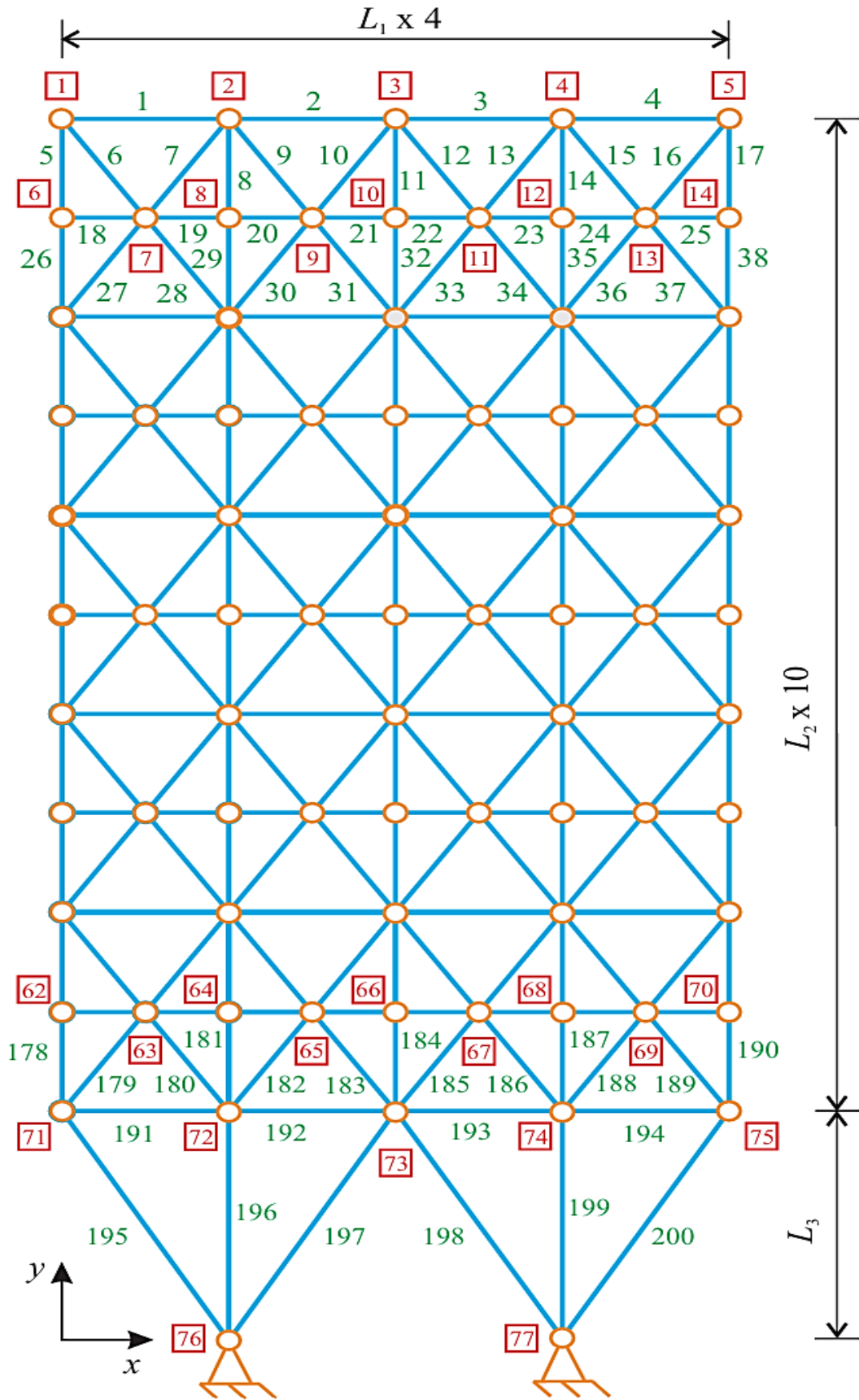
Şekil 14. 72 elemanlı uzay kafes yapıya ait nihai tasarım

3.1.3. 200 elemanlı düzlem kafes

Literatürde bir çok optimizasyon yönteminde kullanılan diğer bir kafes yapı örneği ise Şekil 15'te eleman ve düğüm noktaları ile yapı geometrisi verilen 200 elemanlı düzlem kafestir. Malzeme elastisite modülü ve birim hacim ağırlığı sırasıyla 30.000 ksi ve 0,283 lb/in³ olarak alınacaktır. $L_1 = 240$ inç, $L_2 = 144$ inç, $L_3 = 360$ inç verilmiştir. Yapının geometrisinden dolayı elemanlar tasarım değişkeni olarak Çizelge 8'de belirtilen 29 farklı gruba ayrılmıştır. Tasarım değişkenlerine atanacak minimum enkesit alanı 0,1 inç²'dir.

Çizelge 8. 200 elemanlı düzlem kafes yapı tasarım değişkenleri

Grup No	Eleman No	Grup No	Eleman No
1	1, 2, 3, 4	16	82, 83, 85, 86, 88, 89, 91, 92, 103, 104, 106, 107, 109, 110, 112, 113
2	5, 8, 11, 14, 17	17	115, 116, 117, 118
3	19, 20, 21, 22, 23, 24	18	119, 122, 125, 128, 131
4	18, 25, 56, 63, 94, 101, 132, 139, 170, 177	19	133, 134, 135, 136, 137, 138
5	26, 29, 32, 35, 38	20	140, 143, 146, 149, 152
6	6, 7, 9, 10, 12, 13, 15, 16, 27, 28, 30, 31, 33, 34, 36, 37	21	120, 121, 123, 124, 126, 127, 129, 130, 141, 142, 144, 145, 147, 148, 150, 151
7	39, 40, 41, 42	22	153, 154, 155, 156
8	43, 46, 49, 52, 55	23	157, 160, 163, 166, 169
9	57, 58, 59, 60, 61, 62	24	171, 172, 173, 174, 175, 176
10	64, 67, 70, 73, 76	25	178, 181, 184, 187, 190
11	44, 45, 47, 48, 50, 51, 53, 54, 65, 66, 68, 69, 71, 72, 74, 75	26	158, 159, 161, 162, 164, 165, 167, 168, 179, 180, 182, 183, 185, 186, 188, 189
12	77, 78, 79, 80	27	191, 192, 193, 194
13	81, 84, 87, 90, 93	28	195, 197, 198, 200
14	95, 96, 97, 98, 99, 100	29	196, 199
15	102, 105, 108, 111, 114		



Şekil 15. 200 elemanlı düzlem kafes yapı geometrisi (Serpik, 2020)

Kafes yapı için Çizelge 9’da verilen 3 ayrı yükleme durumu söz konusudur. Bu yükleme koşulları altında izin verilen basınç ve çekme gerilme sınır değeri ± 10 ksi’dir. Düğüm noktaları için ise herhangi bir deplasman kısıtı tanımlanmamıştır.

Çizelge 9. 200 elemanlı düzlem kafes yapı yükleme durumu

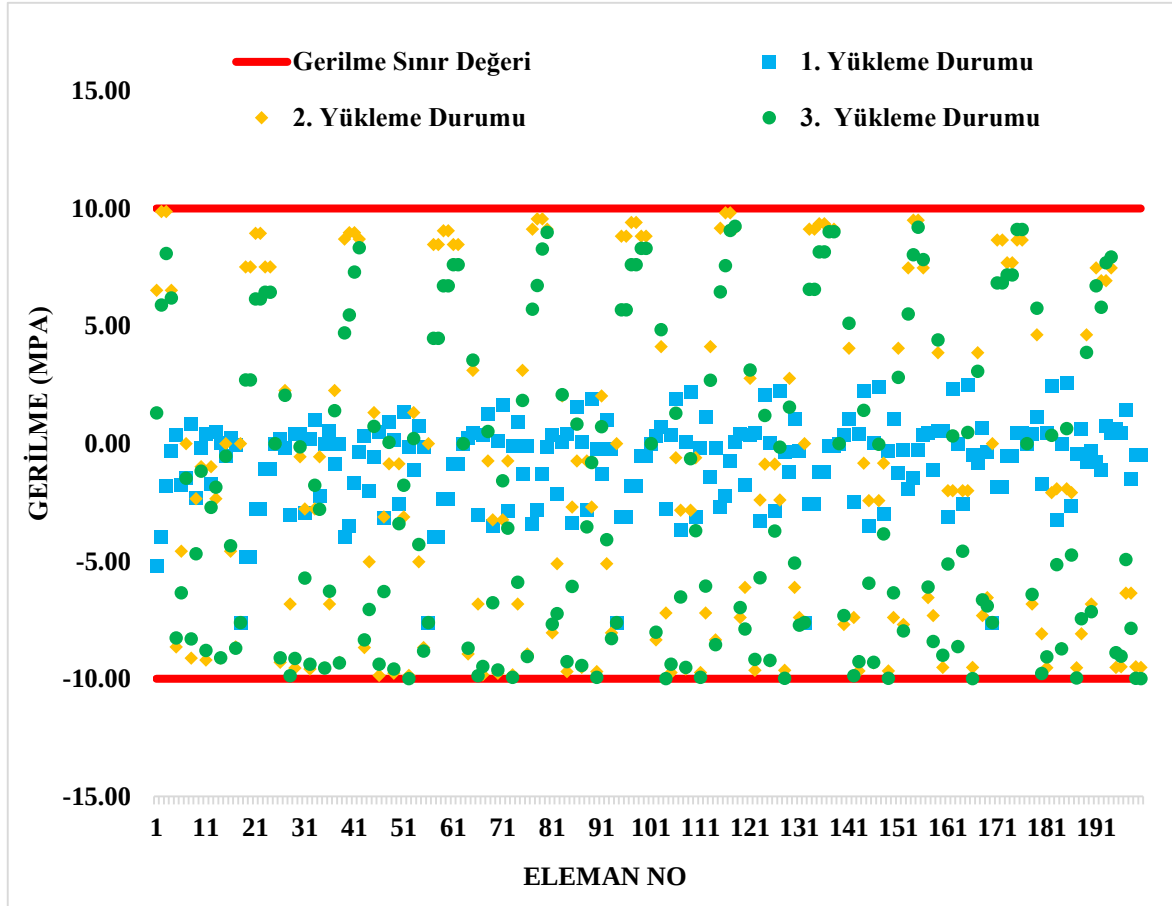
Yükleme Durumu	Düğüm Noktası	Koordinat		
		x	y	z
1	1, 6, 15, 20, 29 34, 43, 48, 57, 62, 71	1.00	0.00	0.00
2	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 24, 26, 28,29 30, 31, 32, 33, 34,36, 38, 40, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 50, 52, 54, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 66, 68, 70, 71, 72, 73, 74, 75	0	-10	0.00
3	1. ve 2. yükleme durumları beraber dikkate alınacaktır			

Optimization sonucunda mevcut çalışmada kullanılan LPO algoritması ile HS (Lee ve Geem 2004), HPSACO (Kaveh ve Talatahari 2009), CMLPSA (Lamberti 2008), ABC-AP (Sönmez 2011), SAHS (Değertekin 2012), TLBO (Değertekin ve Hayalioğlu 2013), HPSSO (Kaveh vd. 2014), WEO (Kaveh ve Bakhshpoori 2016) ve FPA (Bekdaş vd. 2015) yöntemlerinden elde edilen eleman enkesit alan ve optimum ağırlık değerleri Çizelge 10’da verilmiştir. Çizelgede görüldüğü üzere, mevcut çalışmada kullanılan LPO algoritması ile herhangi bir gerilme kısıtlayıcısı aşılmadan 15.000 analiz sonucunda en düşük ağırlık 25.684,748 lb, ortalama ağırlık ise 25,718.429 bulunmuştur. Gerilme koşulları sağlanan diğer dört çalışmada bulunan minimum ağırlık değerleri; TLBO yöntemiyle 28.059 analiz sonucunda 25.488,18 lb, SAHS yöntemiyle 19.670 analiz sayısı sonunda 25.491,92 lb, WEO yöntemiyle 19.410 analiz sonucunda 25.674,74 lb ve HPSSO yöntemiyle 14.406 analiz yapılarak 26.698,82 lb şeklindedir. Buna göre gerilme koşulları sağlanan sonuçlar arasında mevcut çalışmada kullanılan LPO algoritmasıyla elde edilen sonuç; TLBO, SAHS ve WEO yöntemlerinden sonraki en hafif dördüncü tasarım olmuştur. Ancak LPO algoritması, söz konusu üç yönteme kıyasla daha az analiz sayısı ile rekabetçi bir tasarım elde etmiştir.

Çizelge 10. 200 elemanlı düzlem kafes yapı optimizasyon sonuçları

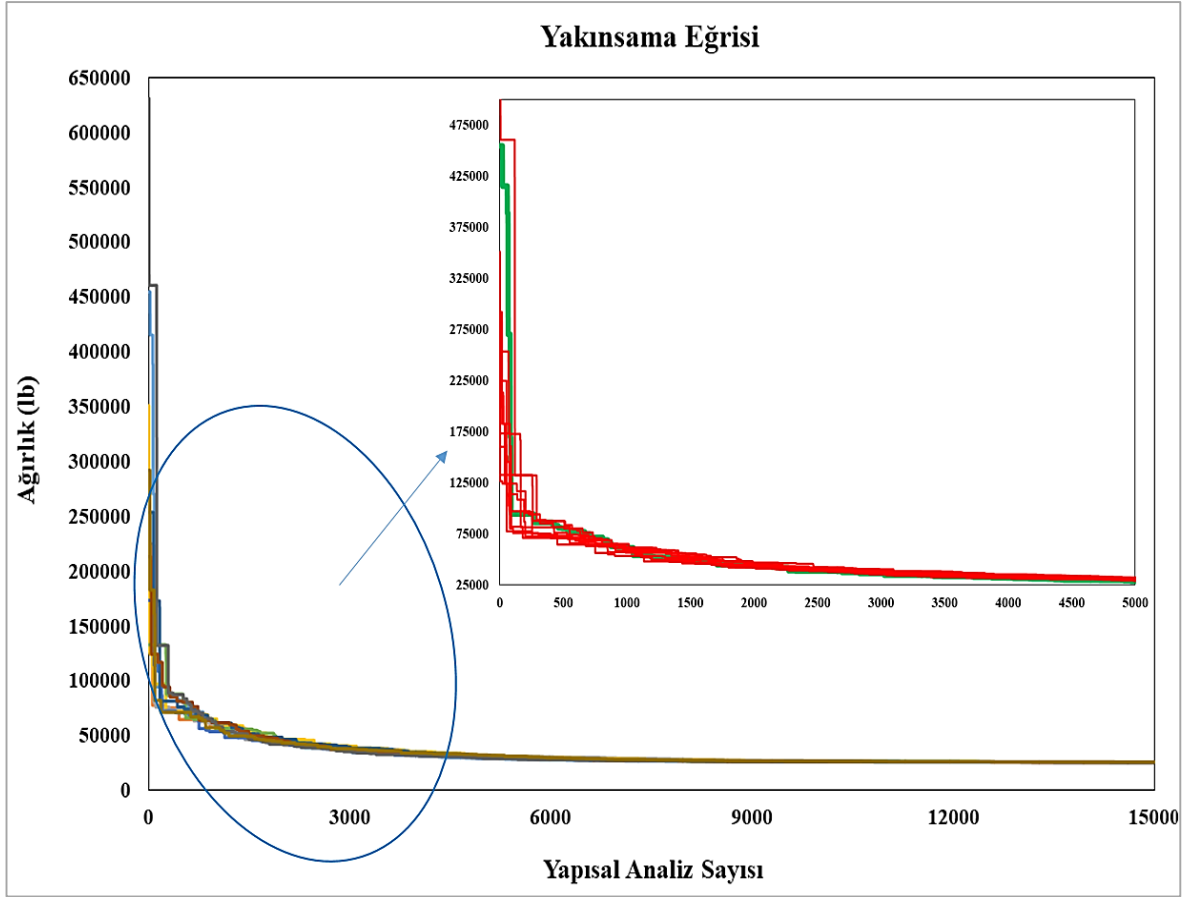
	Lee ve Geem	Kaveh ve Talatahari	Lamberti	Sönmez	Degertekin	Değertekin ve Hayaloğlu	Kaveh vd.	Kaveh ve Bakhshpoori	Bekdaş vd.	Mevcut Çalışma
	2004	2009	2008	2011	2012	2013	2014	2016	2015	
ALG Ai(in2)	HS	HPSACO	CLMPSA	ABC-AP	SAHS	TLBO	HPSSO	WEO	FPA	LPO
G1	0.1253	0.1033	0.1468	0.1042	0.1540	0.1460	0.1213	0.1144	0.1425	0.1294
G2	1.0157	0.9184	0.9400	0.9416	0.9410	0.9410	0.9426	0.9443	0.9637	1.0398
G3	0.1069	0.1202	0.1000	0.1030	0.1000	0.1000	0.1220	0.1310	0.1005	0.1106
G4	0.1096	0.1009	0.1000	0.1118	0.1000	0.1010	0.1000	0.1016	0.1000	0.1314
G5	1.9369	1.8664	1.9400	1.9430	1.9420	1.9410	2.0143	2.0353	1.9514	2.0421
G6	0.2686	0.2826	0.2962	0.2945	0.3010	0.2960	0.2800	0.3126	0.2957	0.2881
G7	0.1042	0.1000	0.1000	0.1072	0.1000	0.1000	0.1589	0.1679	0.1156	0.1063
G8	2.9731	2.9683	3.1042	3.1301	3.1080	3.1210	3.0666	3.1541	3.1133	3.1002
G9	0.1309	0.1000	0.1000	0.1361	0.1000	0.1000	0.1002	0.1003	0.1006	0.1131
G10	4.1831	3.9456	4.1042	4.1856	4.1060	4.1730	4.0418	4.1005	4.1100	4.1259
G11	0.3967	0.3742	0.4034	0.4313	0.4090	0.4010	0.4142	0.4350	0.4165	0.4167
G12	0.4416	0.4501	0.1912	0.1073	0.1910	0.1810	0.4852	0.1148	0.1843	0.1066
G13	5.1873	4.9603	5.4284	5.4680	5.4280	5.4230	5.4196	5.3823	5.4567	5.4318
G14	0.1912	1.0738	0.1000	0.1495	0.1000	0.1000	0.1000	0.1607	0.1000	0.1682
G15	6.2410	5.9785	6.4284	6.4876	6.4270	6.4220	6.3749	6.4152	6.4559	6.4403
G16	0.6994	0.7863	0.5734	0.5782	0.5810	0.5710	0.6813	0.5629	0.5800	0.5526
G17	0.1158	0.7374	0.1327	0.2031	0.1510	0.1560	0.1576	0.4010	0.1547	0.1558
G18	7.7643	7.3809	7.9717	8.0759	7.9730	7.9580	8.1447	7.9735	8.0132	7.9108
G19	0.1000	0.6674	0.1000	0.2015	0.1000	0.1000	0.1000	0.1092	0.1000	0.1322
G20	8.8297	8.3000	8.9717	9.0666	8.9740	8.9580	9.0920	9.0155	9.0135	8.9144
G21	0.6986	1.1967	0.7049	0.8548	0.7190	0.7200	0.7462	0.8628	0.7391	0.7364
G22	1.5563	1.0000	0.4196	0.4106	0.4220	0.4780	0.2114	0.2220	0.7870	0.3925
G23	10.9806	10.8262	10.8636	11.2225	10.8920	10.8970	10.9587	11.0254	11.1795	10.7544
G24	0.1317	0.1000	0.1000	0.1840	0.1000	0.1000	0.1000	0.1397	0.1462	0.1167
G25	12.1492	11.6976	11.8606	12.2790	11.8870	11.8970	11.9832	12.0340	12.1799	11.7843
G26	1.6373	1.3880	1.0339	1.2040	1.0400	1.0800	0.9241	1.0043	1.3424	1.0341
G27	5.0032	4.9523	6.6818	5.6580	6.6460	6.4620	6.7676	6.5762	5.4844	7.3330
G28	9.3545	8.8000	10.8113	10.2616	10.8040	10.7990	10.9639	10.7265	10.1372	10.9505
G29	15.0919	14.6645	13.8404	14.4170	13.8700	13.9220	13.8186	13.9666	14.5262	13.7507
Wmin (lb)	25,447.10	25,156.50	25,447.53	25,600.03	25,491.900	25,488.15	25,698.85	25,674.83	25,521.81	25,684.748
Wort (lb)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	28,386.720	26,613.450	25,543.510	25,718.429
Sd	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	2,403.0	702.80	18.13	119.02
Gerilme ihlali (%)	3.69	9.97	0.07	11.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
Analiz Sayısı	48,000	9,875	N/A	507,50	19,670	28,059	14,406	19,410	10,685	15,000

Şekil 16'daki grafikte analiz sonucunda 200 elemanlı kafes yapı elemanlarında oluşan gerilme değerlerinin sınır değerler arasındaki konumu gösterilmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere, tahmin edildiği gibi birinci ve ikinci yükleme durumu beraber dikkate alındığında (3. yükleme durumu) elemanlar basınca daha çok zorlanmıştır.



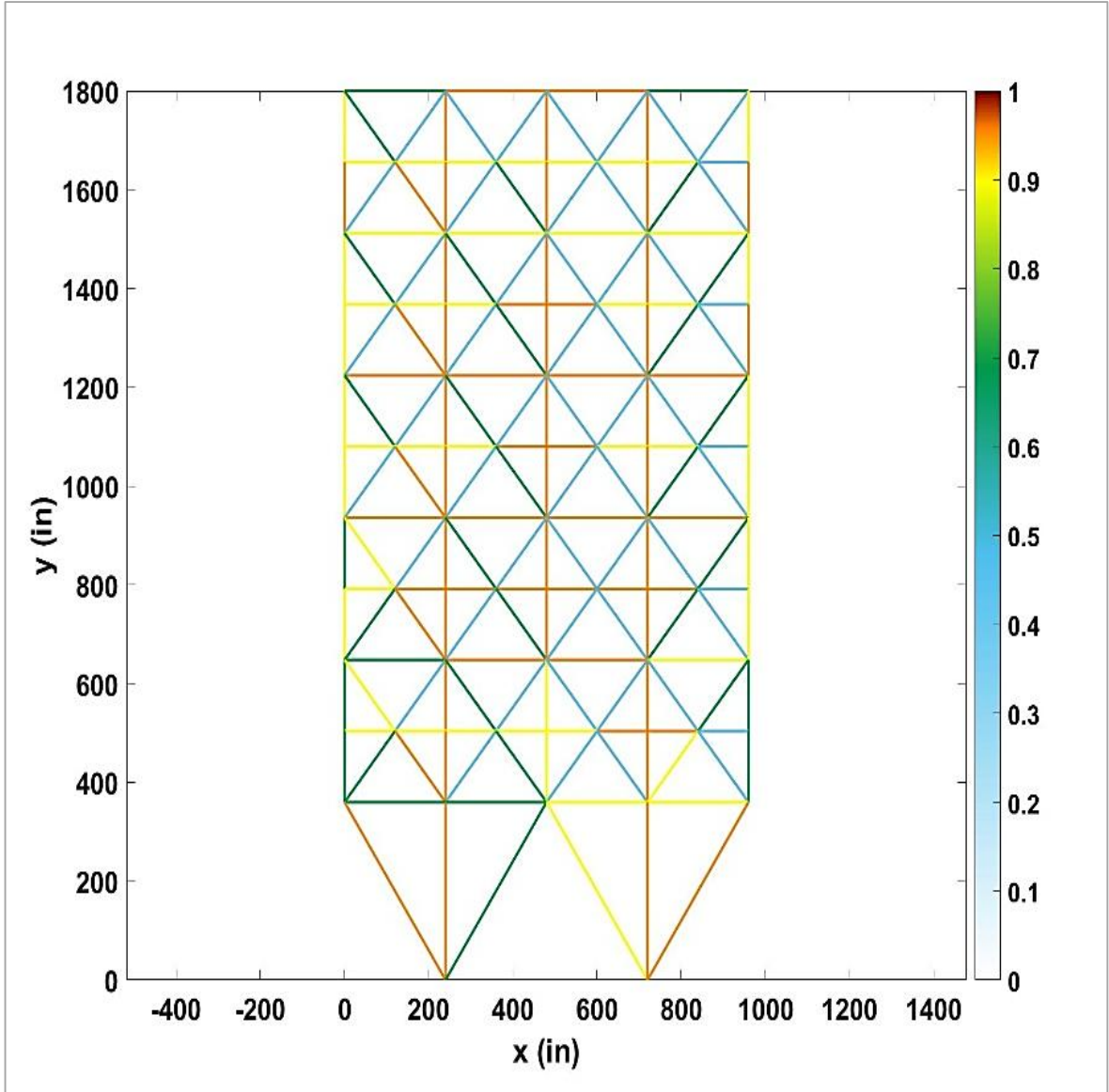
Şekil 16. 200 elemanlı düzlem kafes yapı eleman gerilme değerleri

10 farklı çalıştırma için optimizasyon boyunca yapısal analiz sayısına bağlı olarak optimum ağırlıktaki değişim Şekil 17'deki grafikte gösterilmiştir. Yakınsama davranışının daha iyi gözlemlenebilmesi için 0-5.000 analiz aralığı için yakınlaştırılmış grafik üstte verilmiştir. En hafif tasarımın elde edildiği süreç yeşil renkli eğri ile diğerlerinden ayırt edilmiştir. Buna göre optimum tasarım süreci yaklaşık olarak 450.000 lb yapısal ağırlık ile başlamış, 5.000 analiz sonunda belirgin bir düşüş göstererek 27.500 lb seviyelerine inmiştir. 5.000-15.000 analiz aralığında ise yavaş bir yakınsama süreci ile yapının optimum ağırlığı 25.684,75 lb olarak bulunmuştur.



Şekil 17. 200 elemanlı düzlem kafes yapı yakınsama süreci

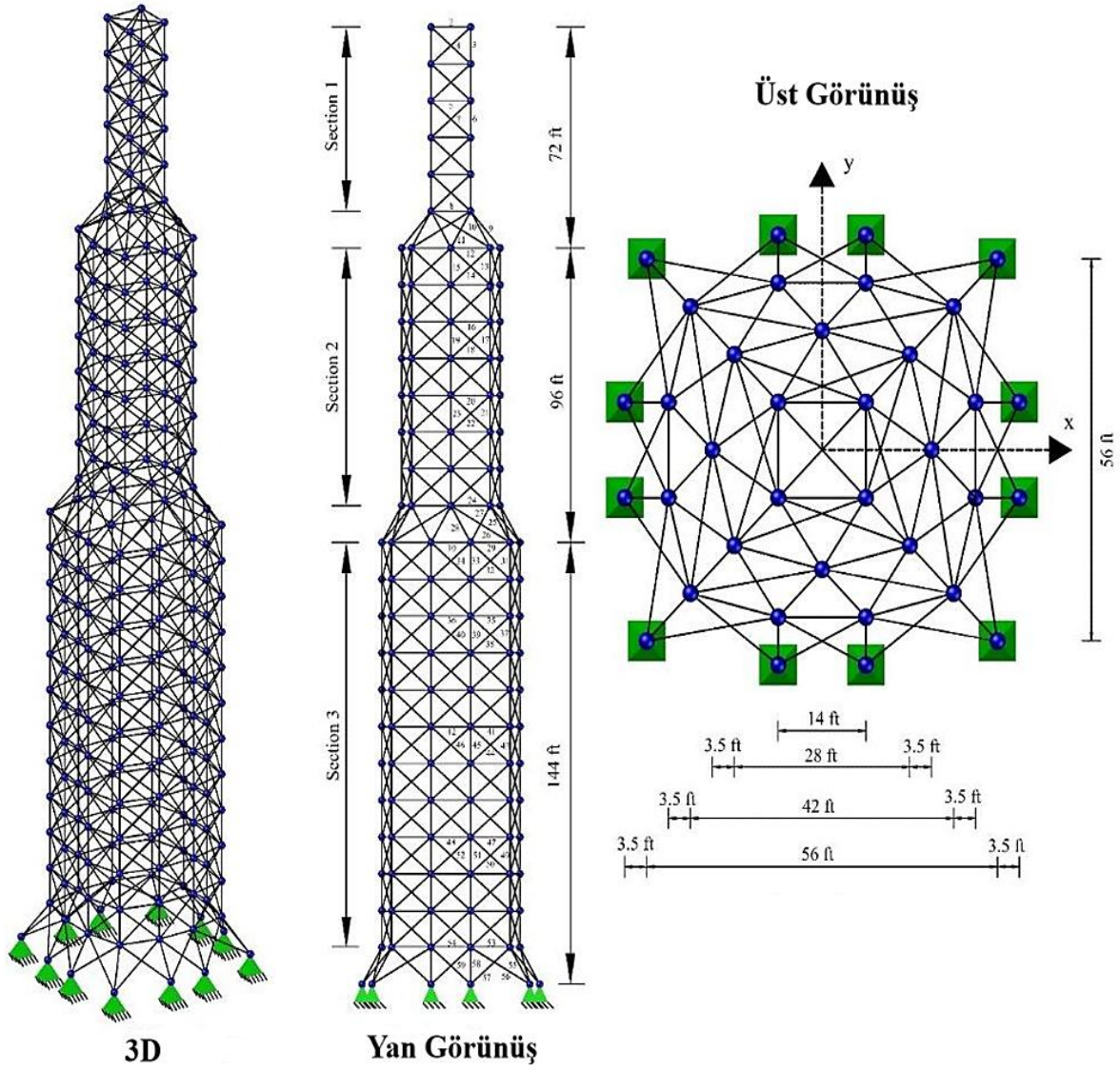
Şekil 18'de, optimizasyon süreci sonucunda elde edilen en hafif yapısal tasarımın geometrisi ile bu yapıya ait elemanların gerilme dağılımları, sınır gerilme değerine olan yakınlıkları renk skalasıyla görselleştirilmiştir. Elde edilen optimum tasarımda, tüm elemanların gerilme sınırlayıcılarını karşıladığı, başka bir deyişle hiçbir elemanın izin verilen sınır gerilme değerini aşmadığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, 200 elemandan oluşan kafes sistemde 112 elemanın gerilme kapasitesinin en az %75'ini, 64 elemanın ise %90'ını ve daha fazlasını kullandığı tespit edilmiştir. Şekil 18'de de gösterilen bu yüksek gerilme dağılımının başlıca nedeni, söz konusu optimizasyon probleminde deplasman sınırlayıcısının tanımlanmamış olması ve yalnızca gerilme tabanlı kısıtların dikkate alınmasıdır. Dolayısıyla algoritma, eleman kesitlerini gerilme limitlerini tam kapasiteye yaklaştıracak biçimde daraltarak yapının ağırlığını minimize etmiş; deplasman kontrolü yapılmadığından, gerilme oranları birçok elemanda üst seviyelere ulaşmıştır.



Şekil 18. 200 elemanlı düzlem kafes yapıya ait nihai tasarım

2.1.1. 942 elemanlı uzay kafes

Enkesit optimizasyonu kapsamında son olarak 942 eleman ve 244 düğüm noktasından oluşan büyük ölçekli kule tipi uzay kafes yapı analiz edilecektir. Bu örnekte eleman grupları için 59 farklı tasarım değişkeni tanımlanmış olup kafes yapının geometrisi ve eleman grupları Şekil 19’da verilmiştir. Malzeme elastisite modülü ve birim hacim ağırlıkları sırasıyla 10.000 ksi ve 0.1 lb/in^3 ’tür. Her bir elemana atanacak enkesit alanı sınır değerleri 0,01 ile 200 in^2 arasında olacaktır. Elemanlarda oluşacak basınç ve çekme gerilmesi sınır değeri $\pm 25 \text{ ksi}$, düğüm noktası deplasman sınır değeri ise plan görünüşünde en üstteki dört düğüm noktası için bütün yönlerde $\pm 15 \text{ inç}$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 19. 942 elemanlı uzay kafes yapı geometrisi (Kaveh ve Hosseini, 2022)

Kafes yapı için tek yükleme durumu söz konusudur. Buna göre düğüm noktalarına etkiyen yükler Çizelge 11’de de verilmiş olup aşağıdaki gibi etki ettirilecektir:

- Yapının birinci, ikinci ve üçüncü bölümünde yer alan düğüm noktalarına düşey yönde sırasıyla 3, 6 ve 9 Kips (negatif z yönü)
- Yapıdaki tüm düğüm noktalarına yanal yönde 1 Kips (y yönü)
- Yapının sol tarafında ve sağ tarafındaki düğüm noktalarına sırasıyla 1.5 ve 1 Kips (x yönü)

Çizelge 11. 942 elemanlı uzay kafes yapı yükleme durumu

Yükleme Durumu	Düğüm Noktası	Koordinat		
		x	y	z
1	1, 4, 5, 8, 9, 12, 13, 16, 17, 20, 21, 24	1.50	1.00	-3.00
	25, 26, 27, 31, 32, 33, 34, 35, 39, 40, 41, 42, 43, 47, 48, 49, 50, 51, 55, 56, 57, 58, 59, 63, 64, 65, 66, 67, 71, 72, 73, 74, 75, 79, 80, 81, 82, 83, 87, 88			-6.00
	89, 90, 91, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 230, 231, 232			-9.00
	2, 3, 6, 7, 10, 11, 14, 15, 18, 19, 22, 23	1	1.00	-3.00
	28, 29, 30, 36, 37, 38, 44, 45, 46, 52, 53, 54, 60, 61, 62, 68, 69, 70, 76, 77, 78, 84, 85, 86			-6.00
	92, 93, 94, 95, 96, 97, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 224, 225, 226, 227, 228, 229			-9.00

Optimizasyon sonucunda mevcut çalışmada kullanılan LPO algoritması ile SA (Hasançebi ve Erbatur 2002), ESs (Hasançebi 2008), GNMS (Rahami vd. 2011), FFA (Talatahari vd. 2012), CS (Gandomi 2013) ve JA (Değertekin vd. 2018) yöntemlerinden elde edilen eleman enkesit alan ve optimum ağırlık değerleri Çizelge 12’de verilmiştir. Mevcut çalışmada LPO algoritması kullanılarak 50.000 analiz sonunda optimum ağırlık 136.719,986 lb, ortalama ağırlık 137.414,526 lb ve maksimum ağırlık 137.980,273 lb bulunmuştur. Çizelgedeki sonuçlar arasında en düşük ağırlık GNMS metoduyla 130.035,932 lb ağırlık elde edilmiş ancak hem gerilme hem de deplasman sınırlayıcıları yüksek oranda aşılmış ve bu çalışmada analiz sayısı bilinmemektedir. CS metoduyla 75.000 analiz sonunda minimum ağırlık 135.435,226 lb bulunmuş ancak gerilme sınırlayıcı koşulları sağlanmış olmasına rağmen deplasman kısıtlayıcıları ihlal edilmiştir. LPO algoritmasına en yakın sonuç ise JA algoritması (Değertekin vd. 2018) kullanılarak 26.730 analizle ulaşılan 137.344,25 lb ağırlık olmuştur. Tablodaki diğer sonuçlar ise ihlal oranlarından bağımsız şekilde LPO algoritmasıyla bulunan değerden daha yüksek çıkmıştır. Buna göre; ESs yöntemiyle 150.000

analiz sonunda gerilme ihlaliyle beraber ulaşılan ağırlık 141.670,066 lb ve SA metoduyla 39.834 analizden sonra gerilme ve deplasman sınırlayıcı koşulları sağlanarak 143.650,396 lb ağırlık elde edilmiştir.

Çizelge 12. 942 elemanlı uzay kafes yapı optimizasyon sonuçları

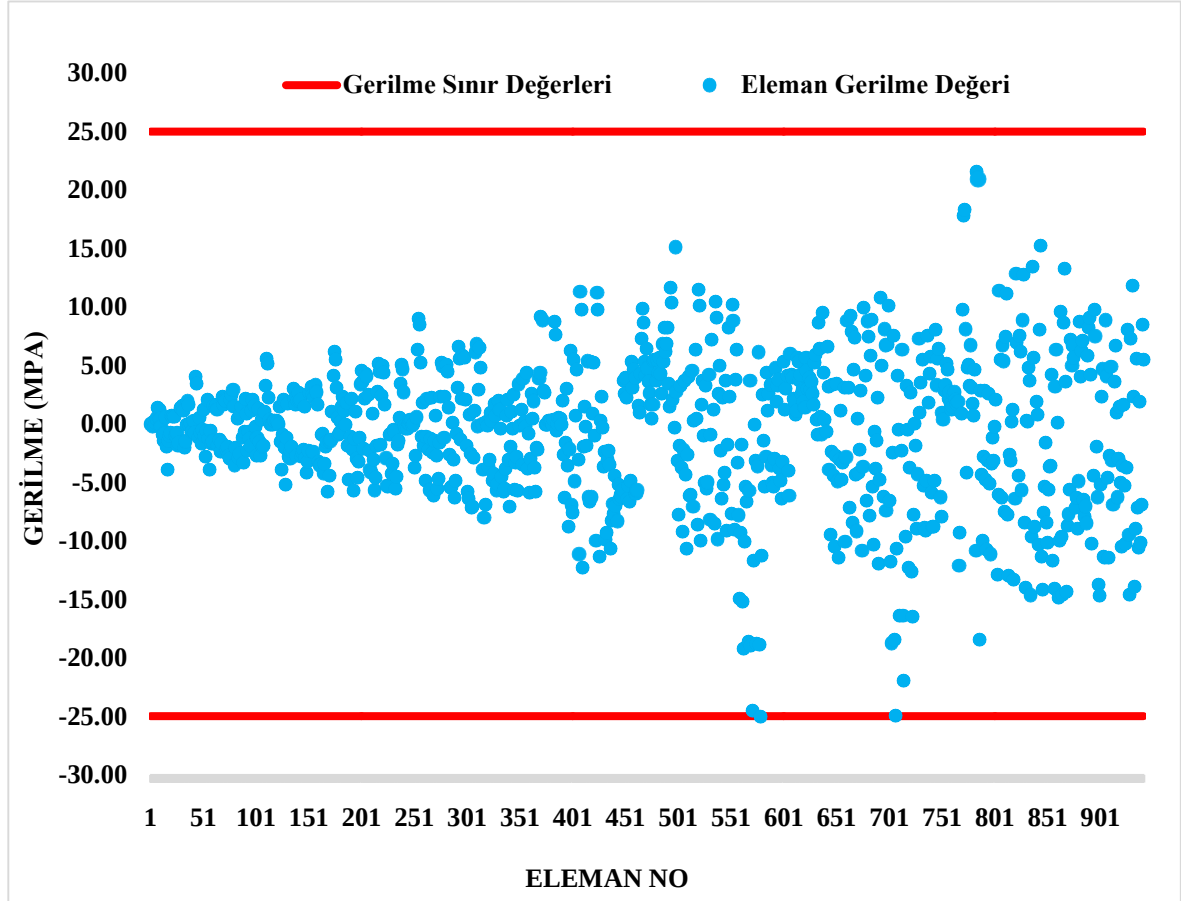
	Hasançebi ve Erbatur	Hasançebi	Rahami vd.	Gandomi	Değertekin vd.	Mevcut Çalışma
	2002	2008	2011	2012	2018	
ALG A (inc2)	SA	ESs	GNMS	CS	JA	LPO
A1-A2	1.00	1.020	2.7859	1.00	1.045258	0.262206
A3...A10	1.00	1.037	1.3572	1.00	1.001630	0.301313
A11...A18	3.00	2.943	5.0362	3.01	3.549999	3.363483
A19...A34	1.00	1.920	2.2398	1.75	1.924590	1.912085
A35...A46	1.00	1.025	1.2226	1.00	1.000032	0.304057
A47...A58	17.00	14.961	14.9575	14.27	15.337079	15.474755
A59...A82	3.00	3.074	2.9568	2.93	3.108905	2.930046
A83...A86	7.00	6.780	10.9038	1.00	6.589077	7.555896
A87...A90	20.00	18.580	14.4117	1.00	16.569661	18.810599
A91...A98	1.00	2.415	3.7090	9.38	2.553777	2.248751
A99...A106	8.00	6.584	5.7076	4.43	6.433946	6.421684
A107...A122	7.00	6.291	4.9264	4.54	5.812166	5.702855
A123...A130	19.00	15.383	14.1751	16.41	15.836882	15.516881
A131...A162	2.00	2.100	1.9043	2.33	2.196943	2.607457
A163...A170	5.00	6.021	2.8101	7.51	4.324553	4.547608
A171...A186	1.00	1.022	1.0000	1.00	1.000047	0.113527
A187...A194	22.00	23.099	18.8070	22.47	21.973772	22.234521
A195...A226	3.00	2.889	2.6151	2.70	2.674909	2.727755
A227...A234	9.00	7.960	12.5328	13.58	8.722646	9.400081
A235...A258	1.00	1.008	1.1314	1.00	1.000032	0.378422
A259...A270	34.00	28.548	30.5122	28.93	29.898613	30.685954
A271...A318	3.00	3.349	3.3460	3.23	3.249223	3.173098
A319...A330	19.00	16.144	17.0450	23.87	16.995624	18.828847
A331...A338	27.00	24.822	18.0785	41.67	25.510407	27.484586
A339...A342	42.00	38.401	39.2717	36.02	37.634066	37.860561
A343...A350	1.00	3.787	2.6062	6.41	1.220731	0.100814
A351...A358	12.00	12.320	9.8303	23.79	11.944077	13.436748
A359...A366	16.00	17.036	13.1126	23.39	16.515003	17.069279
A367...A382	19.00	14.733	13.6897	19.38	14.822892	15.548237
A383...A390	14.00	15.031	16.9776	20.31	15.983565	15.615290
A391...A398	42.00	38.957	37.6006	31.41	38.514252	41.269062
A399...A430	4.00	3.511	3.0602	2.57	3.323571	3.267374
A431...A446	4.00	2.997	5.5106	4.18	3.189674	3.456257

Çizelge 12. (devam)

A447...A462	4.00	3.060	1.8014	3.33	2.822370	2.826345
A463...A486	1.00	1.086	1.1568	1.00	1.001323	0.108781
A487...A498	1.00	1.462	1.2423	1.00	1.002606	0.475916
A499...A510	62.00	59.433	62.7741	47.11	59.530117	59.426098
A511...A558	3.00	3.632	3.3276	2.35	3.250054	3.271152
A559...A582	2.00	1.887	4.2369	3.79	2.068093	2.075165
A583...A606	4.00	4.072	1.7202	3.30	3.084539	4.462876
A607...A630	1.00	1.595	1.0148	1.00	1.000717	0.222556
A631...A642	2.00	3.671	5.4628	1.00	1.239938	1.481443
A643...A654	77.00	79.511	78.0094	63.33	79.891179	75.727866
A655...A702	3.00	3.394	3.2206	3.21	3.299488	3.353246
A703...A726	2.00	1.581	3.5934	4.86	1.964128	1.911218
A727...A750	3.00	4.204	4.7668	2.22	3.489718	3.596357
A751...A774	2.00	1.329	1.1531	1.00	1.000032	0.612566
A775...A786	3.00	2.242	2.1698	1.00	1.000032	0.319900
A787...A798	100.00	96.886	99.6406	76.93	97.181471	93.087403
A799...A846	4.00	3.710	4.1469	3.54	3.322281	3.404724
A847...A870	1.00	1.055	2.1600	3.91	1.002997	1.723198
A871...A894	4.00	4.566	4.1499	2.25	3.651629	3.824098
A985...A902	6.00	9.606	11.2070	11.44	7.226228	9.112299
A903...A906	3.00	2.984	11.0904	11.64	4.544599	8.042691
A907...A910	49.00	45.917	35.9499	36.94	41.411074	42.315002
A911...A918	1.00	1.000	2.1937	1.00	1.002207	0.118973
A919...A926	62.00	62.426	6.1705	48.10	64.803517	60.938330
A927...A934	1.00	2.977	3.3402	5.88	2.525618	4.147222
A935...A942	3.00	1.000	4.0525	1.00	1.000054	0.449207
Wmin (lb)	143,436.00	141,241.00	142,295.750	134,120.00	137,344.356	136,719.9855
Wort (lb)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	137,414.5258
Wmax (lb)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	137,980.2727
Sd	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	449.9084
Deplasman İhlali (%)	0.0000	0.0000	53.8979	18.6552	0.0001	0.0000
Gerilme İhlali (%)	0.0000	3.0471	106.5198	0.0000	0.0000	0.0000
Analiz Sayısı	39,834	150,000	N/A	75,000	26,730	50,000
Wkontrol	143,650.396	141,670.066	130,035.932	135,435.226	137,344.250	

*1 lb=0,4536 kg

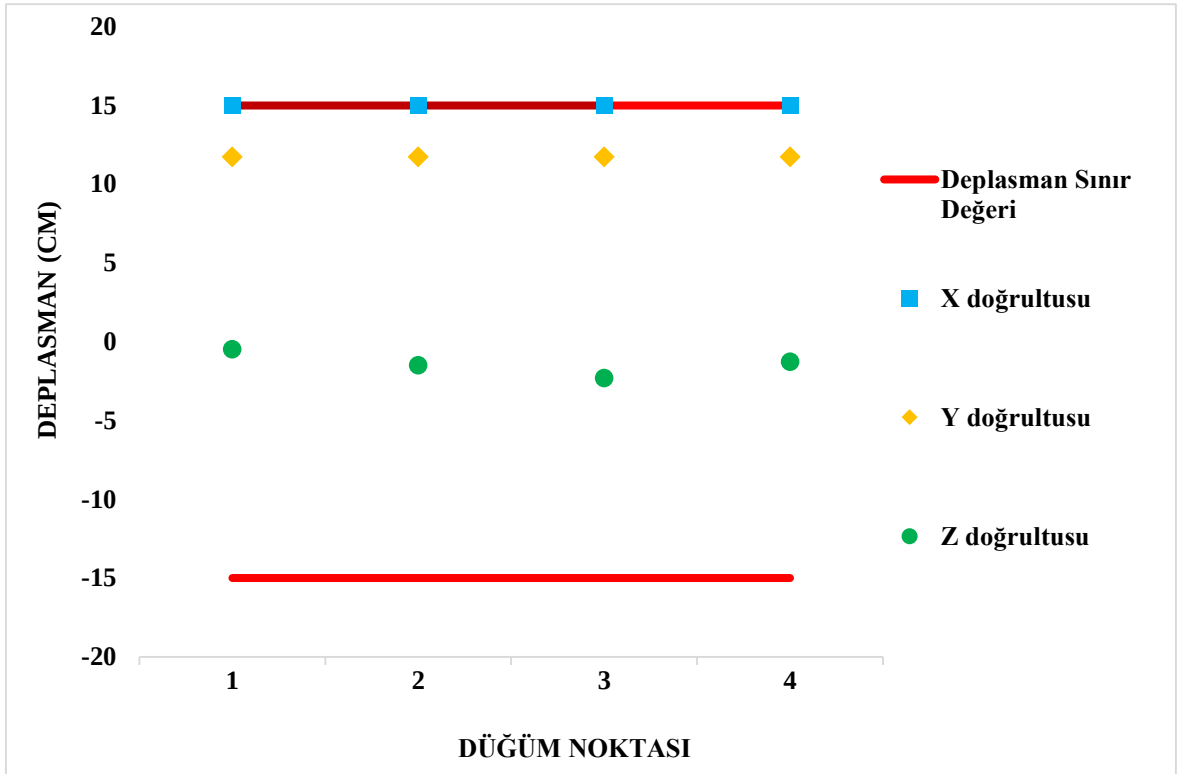
Şekil 20’deki grafikte gerilme sınır değerleri ile analiz sonucunda elemanlarda meydana gelen gerilme kuvvetleri gösterilmiştir. Görüldüğü üzere sadece 571, 579 ve 707 no’lu elemanlarda basınç gerilmesi sınır koşuluna yaklaşılmışsa da herhangi bir ihlal olmamıştır.



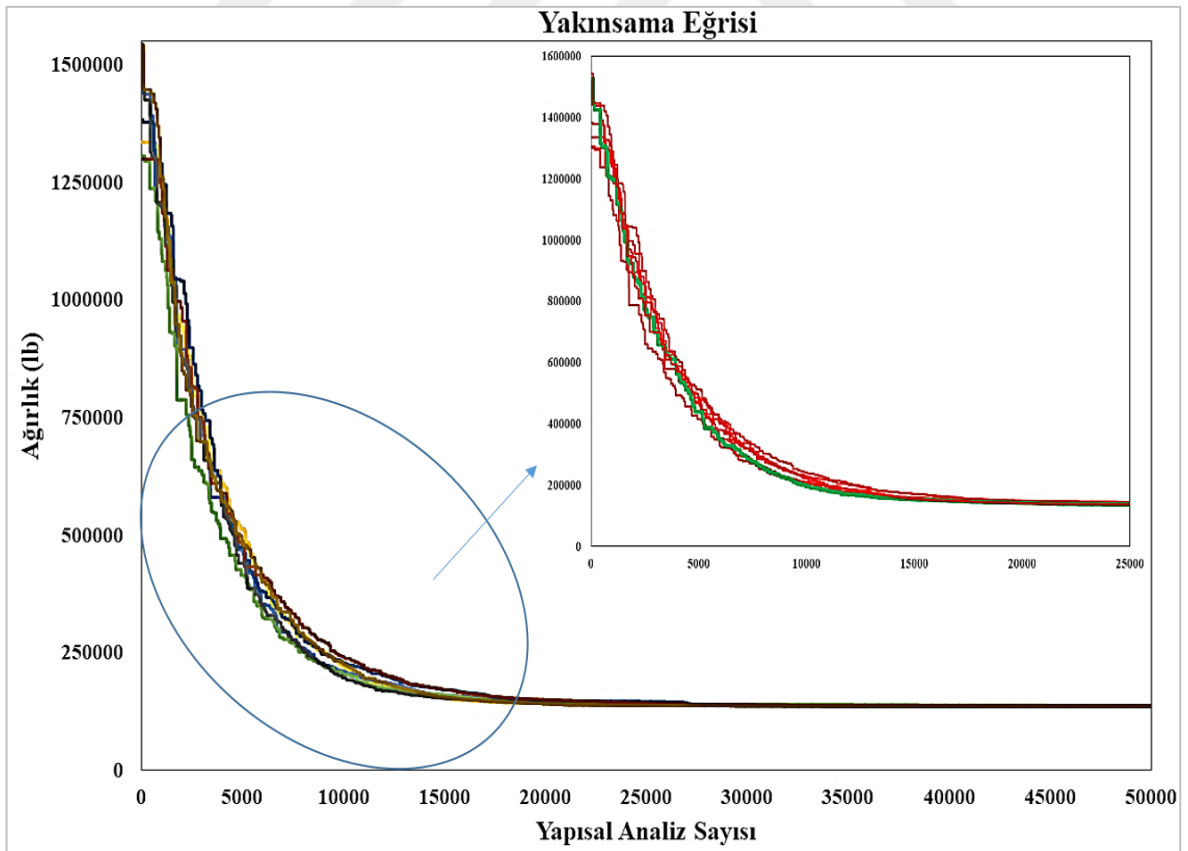
Şekil 20. 942 elemanlı uzay kafes yapı eleman gerilme değerleri

Kafes yapının en üstteki dört düğüm noktasında meydana gelen deplasman mesafelerini gösteren Şekil 21’deki grafikten yapının x yönünde yapmış olduğu deplasman mesafesinin sınır değere yaklaştığı yorumu yapılabilir.

Şekil 22’deki grafikte, 942 elemanlı kafes yapının optimizasyon boyunca 10 farklı çalıştırma için yapısal analiz sayısına bağlı olarak optimum tasarımına ait ağırlık değişimi gösterilmiştir. Şekilde üst tarafta en hafif tasarım yeşil renk ile diğerlerinden ayırt edilmiştir. Buna göre optimum tasarım süreci yaklaşık olarak 1.525.000 lb ile başlamış, 25.000 analize kadar hızla düşüş göstererek 150.000 lb seviyelerine inmiştir. 15.000-50.000 analiz aralığında ise yavaş bir yakınsama ile en hafif tasarım 136.720 lb bulunmuştur.

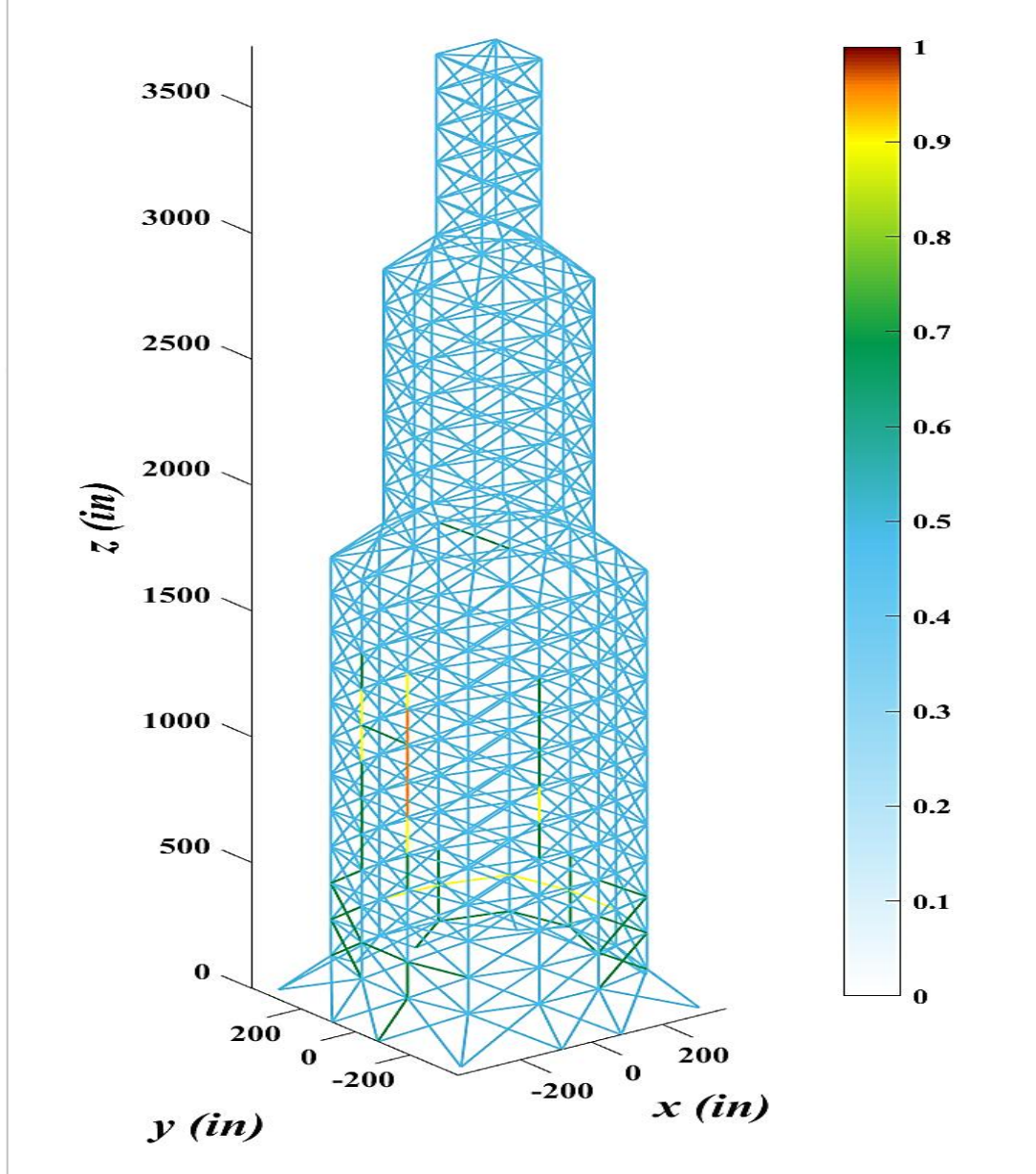


Şekil 21. 942 elemanlı uzay kafes yapı düğüm noktası deplasman değerleri



Şekil 22. 942 elemanlı uzay kafes yapı yakınsama süreci

Şekil 23'te, optimizasyon sonucunda elde edilen en hafif tasarıma ait yapı geometrisi ile her bir elemanın maruz kaldığı gerilmenin, sınır gerilme değerine ne derece yaklaştığını gösteren renk skalası birlikte gösterilmiştir. Elde edilen en hafif tasarımda, birkaç istisna dışında yapı elemanları dayanım kriterleri açısından sınır değerin altında kalmıştır.



Şekil 23. 942 elemanlı uzay kafes yapıya ait nihai asarım

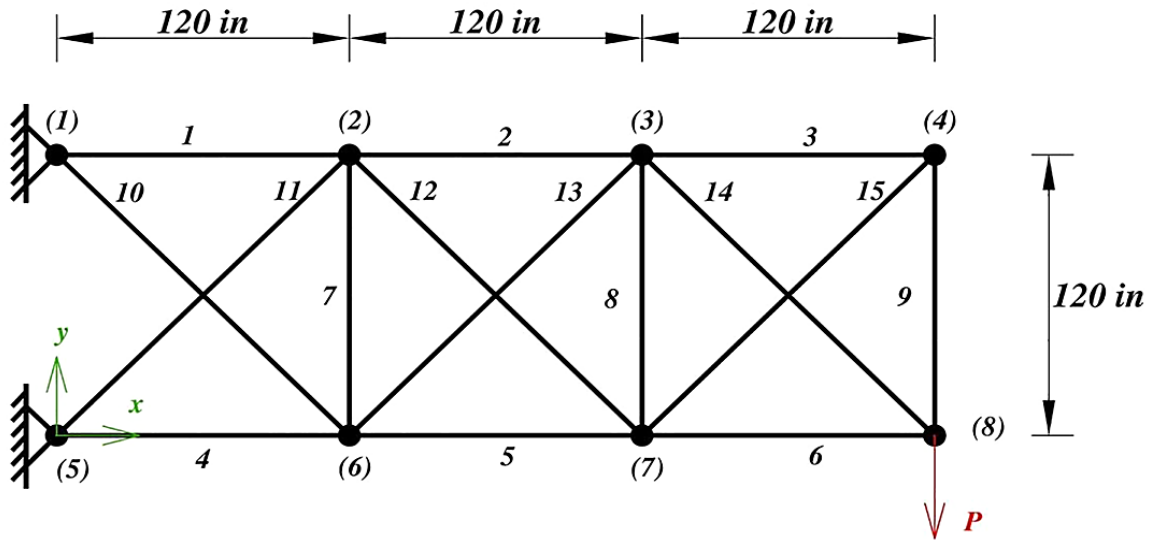
Enkesit optimizasyonu gerçekleştirilen tüm kafes yapı örnekleri incelendiğinde; LPO algoritmasının optimal seviyelere ulaşmaya kadar yüksek hızda bir arama gerçekleştirdiğini, optimal çözüme yakın bölgelerde ise daha hassas bir çözümleme yapması nedeniyle arama sürecinin yavaşladığını göstermektedir.

2.2. Kafes Yapıların Şekil Optimizasyonu

Şekil optimizasyonunda, deplasmanları minimize etmek açısından tasarım değişkeni olarak belirlenen düğüm noktası koordinatları, optimize edilerek en uygun şekilde ayarlanır. Böylece eleman uzunlukları, yüklerin elemanlara daha dengeli bir şekilde dağıtılmasını sağlayacak şekilde ayarlanır ve minimum ağırlıkta kafes yapılar elde edilmeye çalışılır. Bu bölümde, ayırık tasarım değişkenlerine sahip 15 ve 18 elemanlı düzlem kafes ile bölüm 3.1.1.'de enkesit optimizasyonu gerçekleştirilen 25 elemanlı uzay kafes ve 288 elemanlı uzay kafes yapıların şekil optimizasyonu yapılacaktır. Ayrıca, bu bölümde sunulan tüm kafes yapı örneklerinde, şekil optimizasyonu ile eşzamanlı olarak enkesit optimizasyonu da entegre bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

2.2.1. 15 elemanlı düzlem kafes

15 elemanlı düzlem kafes yapının geometrisi Şekil 24'te verilmiştir. Malzeme elastisite modülü ve malzeme özgül ağırlığı sırasıyla 10.000 ksi ve 0,1 lb/in³ olarak alınacaktır. Yapıya şekilde gösterildiği gibi düşey yönde uygulanacak $P=10$ kips tekil yük etkisi altında elemanların maruz kalacağı çekme ve basınç gerilmeleri için sınır değeri ± 25 ksi'dir.



Şekil 24. 15 elemanlı düzlem kafes yapı (Jawad vd. 2021)

Enkesit optimizasyonu için 15 ayrı tasarım değişkeni ($A_1, A_2, A_3, \dots, A_{15}$) belirlenmiş olup eleman enkesit alanlarının seçileceği tasarım uzayı aşağıda verilmiştir:

$$P = \{0,111; 0,141; 0,174; 0,220; 0,270; 0,287; 0,347; 0,440; 0,539; 0,954; 1,081; 1,174; 1,333; 1,488; 1,764; 2,142; 2,697; 2,800; 3,131; 3,565; 3,813; 4,805; 5,952; 6,572; 7,192; 8,525; 9,300; 10,850; 13,330; 14,290; 17,170; 19,180\} (in^2)$$

Şekil optimizasyonu için belirlenmiş olan 8 ayrı tasarım değişkeni ($x_2=x_6, x_3=x_7, y_2, y_3, y_4, y_6, y_7, y_8$) için ise sınır değerleri şu şekilde olacaktır:

$$100(in) \leq x_2 \leq 140 (in); \quad 50(in) \leq y_4 \leq 90 (in);$$

$$220 (in) \leq x_3 \leq 260 (in); \quad -20 (in) \leq y_6 \leq 20(in)$$

$$100(in) \leq y_2 \leq 140 (in); \quad -20(in) \leq y_7 \leq 20 (in);$$

$$100(in) \leq y_3 \leq 140 (in); \quad 20(in) \leq y_8 \leq 60 (in);$$

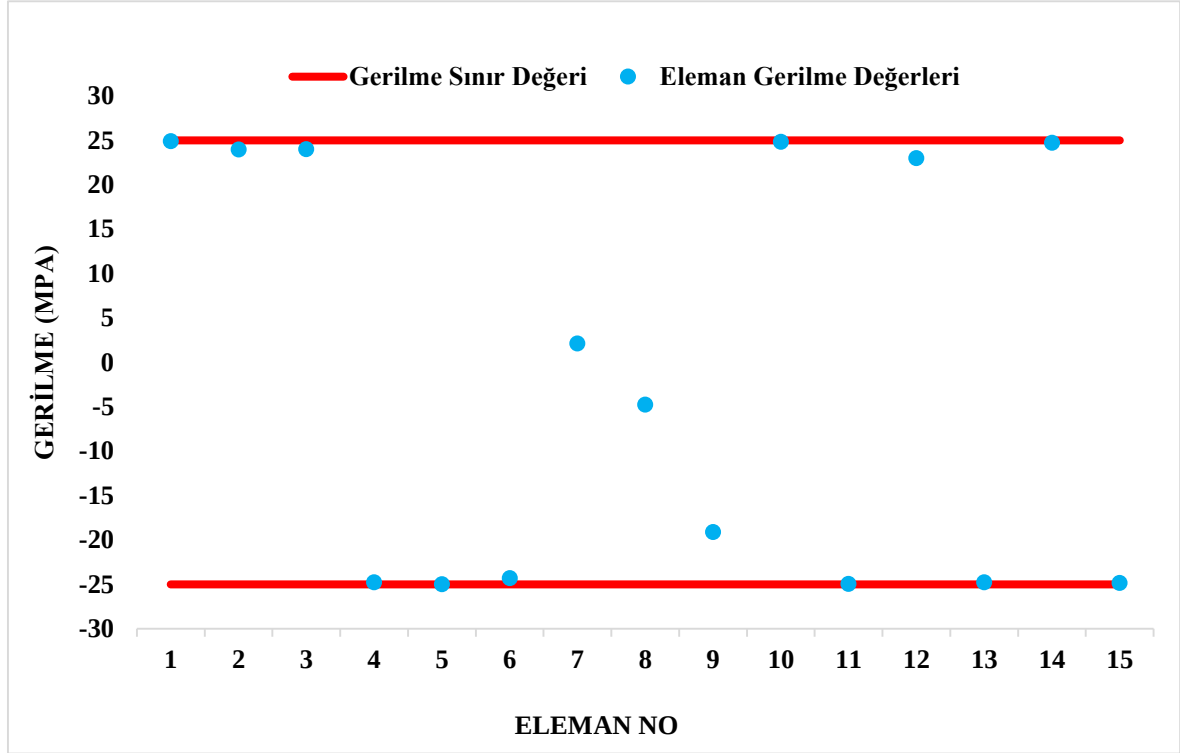
LPO ile optimizasyon süreci sonunda bulunan optimum değerler ile önceki çalışmalarda farklı yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçlar Çizelge 13'te verilmiştir. Tablodaki sonuçlar arasında en hafif tasarım ABC (Jawad vd. 2021) algoritmasıyla 5.640 analiz sonucunda bulunan 72,715 lb ağırlık değeriyle elde edilen tasarım olmuştur. Mevcut çalışmada ise LPO algoritmasıyla 10.000 analiz sonucunda elde edilen 72.833 lb ağırlık en iyi ikinci optimum tasarım olmuştur. Bunu 73,887 lb ile MHS (Gholizadeh 2011), 75,547 lb ile FA (Miguel ve Lopez 2013) ve 76.652 lb ile TLBO (Dede ve Ayvaz 2015) yöntemleri takip etmiştir. Gerilme sınırlayıcıları ihlal edilmesine karşın FM-GA (Rahami vd. 2008) ile 76,846 lb, IGA (Tang vd. 2005) ile 79,808 lb ve ARSAGA (Hwang ve He 2005) ile 104,09 lb optimum ağırlık değerleriyle daha ağır tasarımlar elde edilmiştir. Sonuç olarak LPO algoritması, 72,833 lb ile en iyi ikinci optimum tasarımı elde ederek oldukça rekabetçi bir performans sergilemiştir.

Çizelge 13. 15 elemanlı düzlem kafes optimizasyon sonuçları

	Hwang ve He	Tang vd.	Rahami vd.	Gholizadeh	Miguel ve Lopez	Dede ve Ayvaz	Jawad vd.	Mevcut Çalışma
	2005	2005	2008	2011	2013	2015	2021	
ALG Ai (in2)	ARSAGA	IGA	FM-GA	MHS	FA	TLBO	ABC	LPO
A1	0.954	1.081	1.081	0.954	0.954	1.081	0.9540	0.9540
A2	1.081	0.539	0.539	0.539	0.539	0.954	0.5390	0.5390
A3	0.440	0.287	0.287	0.220	0.220	0.141	0.3470	0.2870
A4	1.174	0.954	0.954	0.954	0.954	1.081	0.9540	0.9540
A5	1.488	0.954	0.539	0.539	0.539	0.539	0.5390	0.5390
A6	0.270	0.220	0.141	0.220	0.220	0.347	0.1110	0.1410
A7	0.270	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111	0.1110	0.1110
A8	0.347	0.111	0.111	0.111	0.111	0.174	0.1110	0.1110
A9	0.220	0.287	0.539	0.440	0.287	0.141	0.5390	0.3470
A10	0.440	0.220	0.440	0.347	0.440	0.270	0.4400	0.3470
A11	0.220	0.440	0.539	0.347	0.440	0.220	0.4400	0.3470
A12	0.440	0.440	0.270	0.270	0.220	0.141	0.1740	0.2700
A13	0.347	0.111	0.220	0.270	0.220	0.440	0.1740	0.2200
A14	0.270	0.220	0.141	0.220	0.270	0.347	0.1110	0.1410
A15	0.220	0.347	0.287	0.220	0.220	0.141	0.3470	0.2700
X2	118.346	133.612	101.5775	135.5676	114.967	100.0042	110.2086	134.057
Y2	225.209	234.75	227.911	245.5421	247.04	241.0473	249.819	260.00
X3	119.046	100.45	134.799	123.1303	125.92	118.8228	133.599	121.997
Y3	105.086	104.74	128.221	120.6957	111.07	100.0829	111.624	112.796
Y4	63.375	73.762	54.8630	57.9313	58.298	50.0000	55.1278	53.7979
Y6	-20.000	-10.067	-16.448	-5.9742	-17.564	3.1411	-18.951	-8.12553
Y7	-20.000	-1.139	-16.4484	-2.9125	-5.821	-9.6997	3.3411	1.08084
Y8	57.722	50.402	54.8572	56.3256	31.465	46.8963	55.1423	54.9046
Wmin (lb)	104.5730	79.820	76.6854	73.8870	75.55	76.6519	72.7150	72.8331
Wort	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	77.7803
Wmaks	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	80.4279
Sd	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	2.4219	2.7513
Gerilme İhlali (%)	32.5735	0.1206	3.0392	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Analiz Sayısı	N/A	N/A	8,000	5,000	8,000	16,000	5,640	10,000
Wcont (lb)	104.0893	79.8081	76.8461	73.8872	75.5473	76.6519	72.7150	

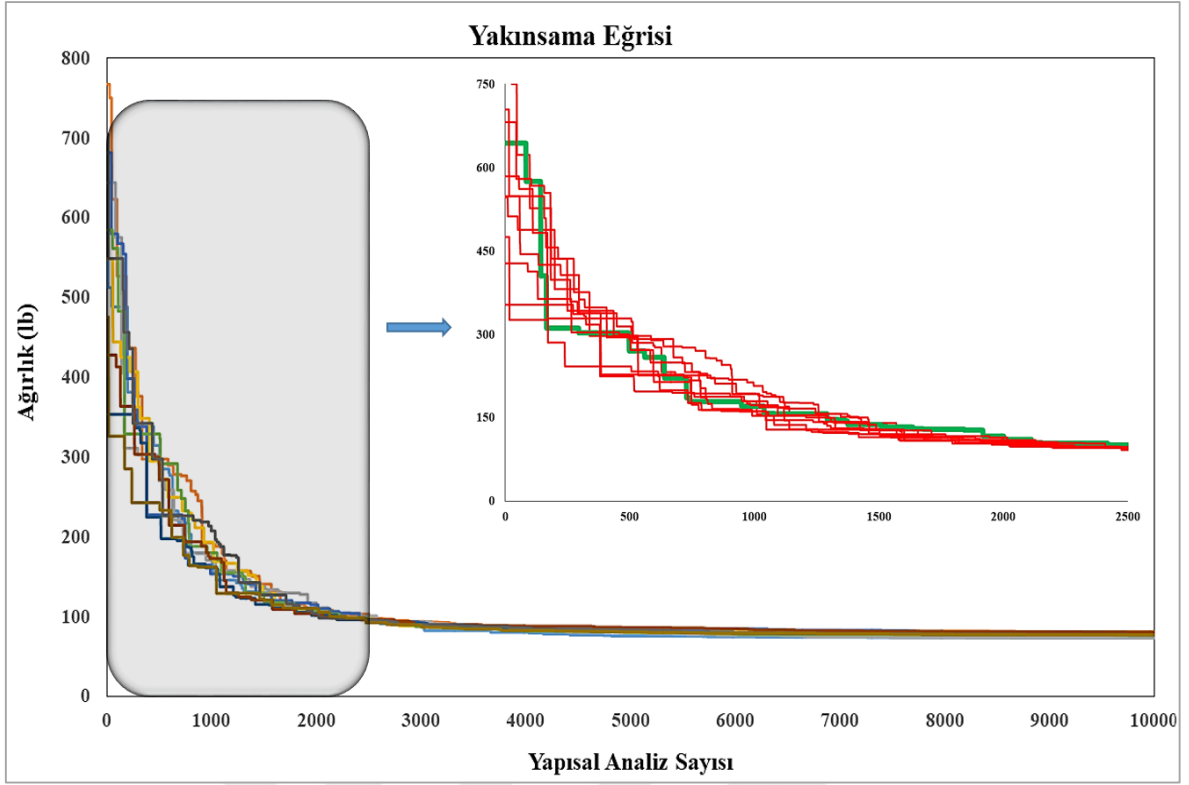
*1 lb=0,4536 kg

Şekil 25'te, LPO algoritmasıyla gerçekleştirilen optimizasyon süreci sonucunda kafes yapı elemanlarında oluşan gerilme değerleri ile sınır gerilme değeri birlikte gösterilmiştir. Elemanların büyük bir kısmı sınır gerilme değerine yaklaşıp da, hiçbir elemanda gerilme kısıtı ihlali gerçekleşmemiştir.



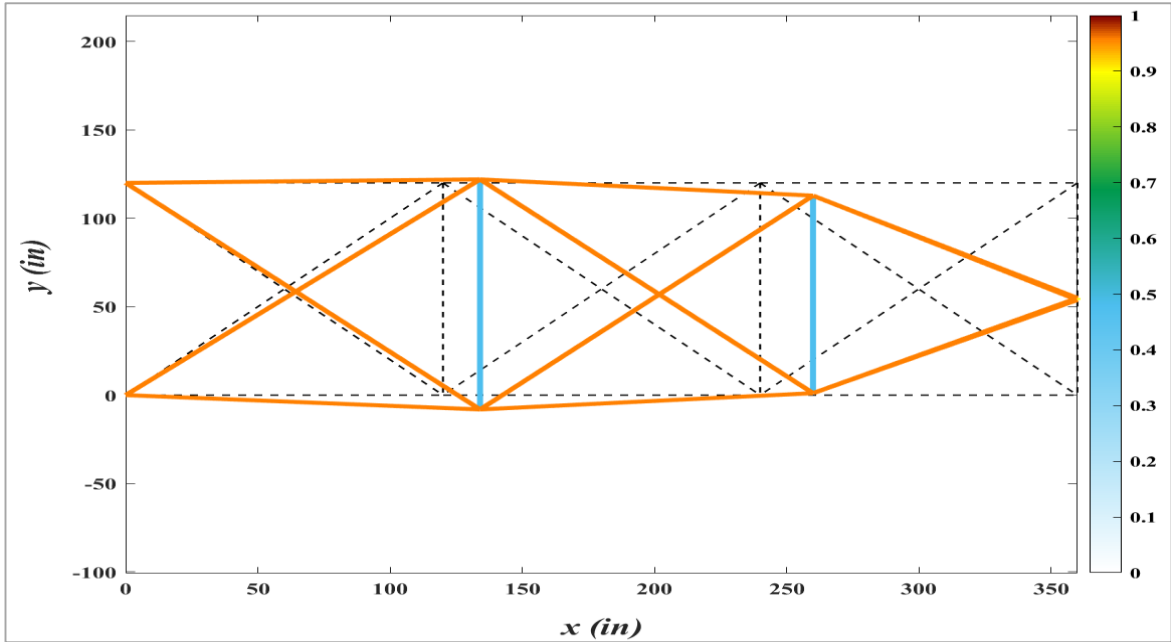
Şekil 25. 15 elemanlı düzlem kafes yapı eleman gerilme değerleri

Optimizasyon süreci boyunca analiz sayısına bağlı olarak yapının optimum ağırlığındaki değişimi gösteren grafik Şekil 26'da sunulmuştur. Yakınsama eğiliminin daha detaylı incelenebilmesi için, aynı şeklin üst bölümünde 0–2.500 analiz sayısını kapsayan yakınlaştırılmış grafik yer almaktadır. En hafif tasarımın elde edildiği optimizasyon süreci, görsel olarak ayırt edilebilmesi için yeşil renkli bir eğri ile gösterilmiştir. Buna göre, optimizasyon süreci başlangıçta 650 lb seviyesinde bir yapısal ağırlıkla başlamış ve 2.500 analiz sonunda bu değer yaklaşık 100 lb düzeyine kadar düşmüştür. 2.500-8.000 aralığındaki analiz sürecinde ise, yapının optimum ağırlığı 72,83 lb olarak belirlenmiştir.



Şekil 26. 15 elemanlı düzlem kafes yapı yakınsama süreci

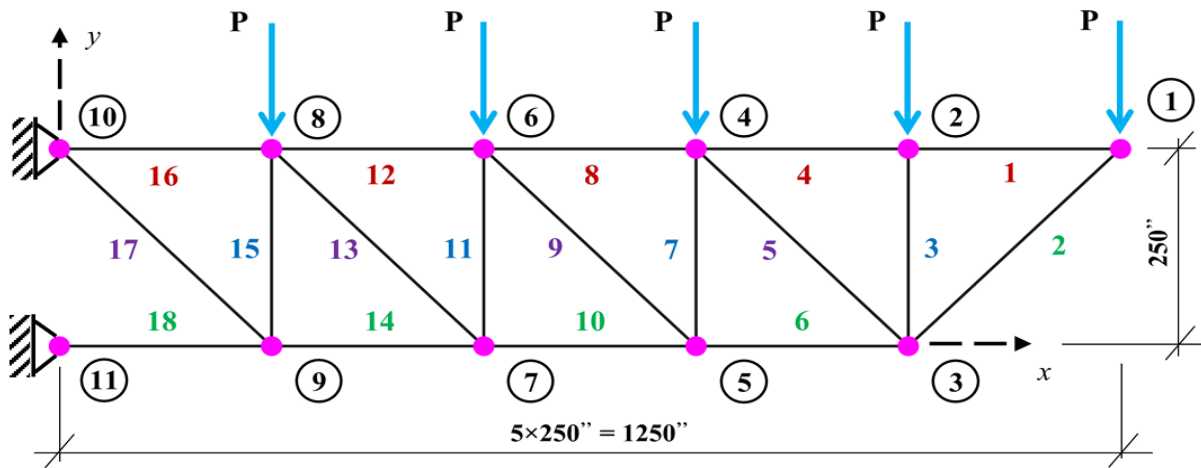
Şekil 27’de optimizasyon sonucunda elde edilen en hafif tasarıma ait yapı geometrisi ile her bir elemanın maruz kaldığı gerilme düzeyinin sınır gerilme değerine ne ölçüde yaklaştığını gösteren renk skalası verilmiştir. Dayanım kriteri açısından değerlendirildiğinde elemanların büyük bir kısmının taşıma kapasitelerine yaklaştığı görülmektedir.



Şekil 27. 15 elemanlı düzlem kafes yapıya ait nihai tasarım

2.2.2. 18 elemanlı düzlem kafes

Geometrisi ve yükleme durumu Şekil 28’de verilen 18 elemanlı düzlem kafes yapıda malzeme elastisite modülü ve malzeme özgül ağırlığı sırasıyla 10^4 ksi ve $0,1 \text{ lb/in}^3$ ve $L=250$ inç olarak verilmiştir. Yapıya şekilde gösterildiği gibi 1, 2, 4, 6 ve 8 no’lu düğüm noktalarında düşey yönde $P=20$ kips büyüklüğünde tekil yük uygulanmıştır. Yük etkisi altında elemanların maruz kalacağı basınç ve çekme gerilmesi sınır değerleri ± 25 ksi’dir. Ek olarak basınç elemanları için burkulma dayanımı $4EA/L^2$ formülüyle kontrol edilecektir.



Şekil 28. 18 elemanlı kafes yapı geometrisi (Awad, 2021)

3, 5, 7 ve 9 no’lu düğüm noktalarının x ve y koordinatları şekil değişkeni olarak belirlenmiş, enkesit alanları için ise elemanlar aşağıdaki gibi dört farklı gruba ayrılmıştır:

- (1) $A_1=A_4=A_8=A_{12}=A_{16}$
- (2) $A_2=A_6=A_{10}=A_{14}=A_{18}$
- (3) $A_3=A_7=A_{11}=A_{15}$
- (4) $A_5=A_9=A_{13}=A_{17}$

Dolayısıyla kafes yapı için 4 enkesit ve 8 şekil değişkeni olmak üzere toplam 12 tasarım değişkeni belirlenmiştir. Enkesit optimizasyonu için ayrık tasarım değişkenleri, şekil optimizasyonu için ise sürekli tasarım değişkenleri kullanılacak olup bunlara ait sınır değerler Çizelge 14’te verilmiştir.

Çizelge 14. 18 elemanlı kafes yapı tasarım değişkenleri

Tasarım Değişkeni	Alt Sınır (inc2)	Üst Sınır (inc2)	Artış
(1), (2), (3), (4)	2	22	0.25
x3	775	1,250	Sınırsız
x5	525	1,000	
x7	275	750	
x9	25	500	
y3, y5, y7, y9	-225	250	

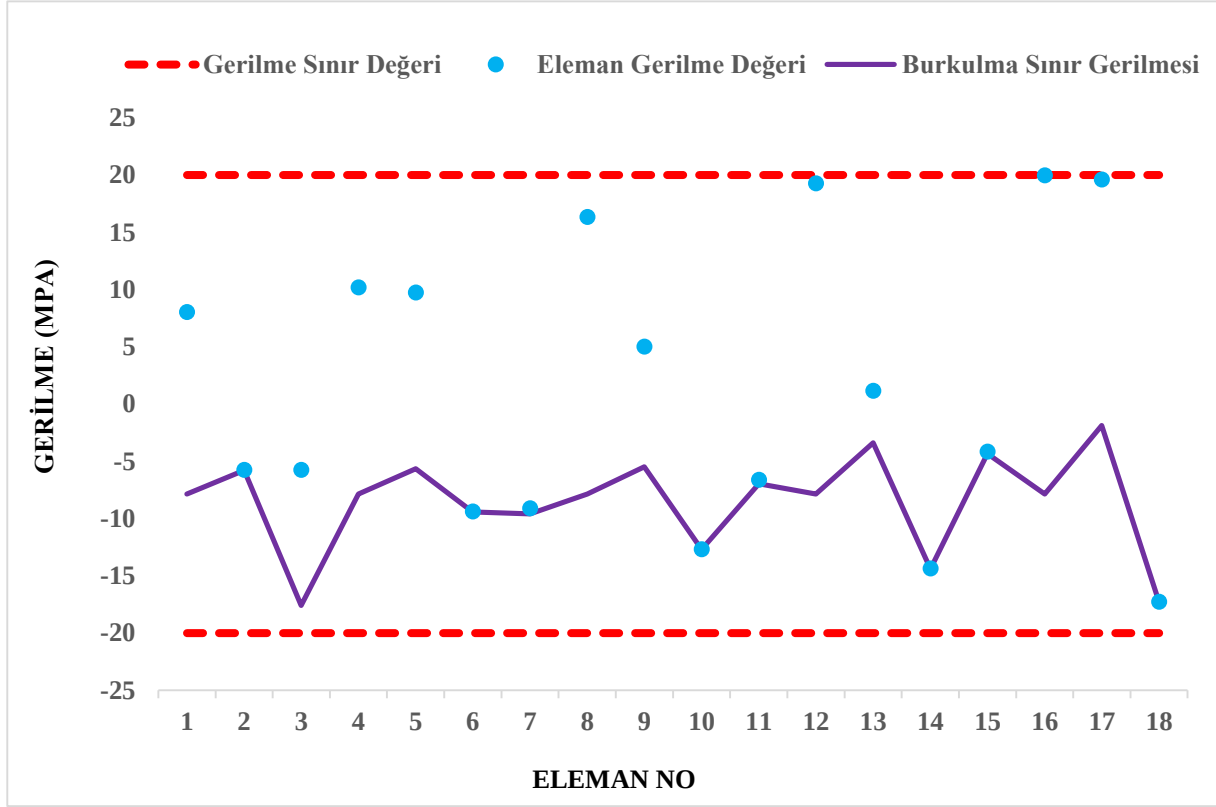
LPO algoritmasıyla gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları, literatürde yer alan SA (Hasançebi ve Erbatur, 2002), GA (Kaveh ve Kalatjari, 2004), FM-GA (Rahami vd. 2008), PSO ve CPSO (Gholizadeh, 2013), GSO (Li ve Liu, 2011), D-ICDE (Ho-Huu vd. 2015) ve ABC (Jawad vd. 2021) algoritmalarıyla elde edilen bulgular ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 15’te sunulmuştur. İlgili verilere göre, mevcut çalışmada kullanılan LPO algoritması ile en hafif yapısal tasarım elde edilmiştir. LPO algoritması ile 8.000 analiz sonunda elde edilen minimum, ortalama ve maksimum ağırlık değerleri sırasıyla 4.529,83 lb, 4.574,48 lb ve 4.648,96 lb olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara en yakın optimum ağırlık değeri, aynı analiz sayısı ile FM-GA yöntemi (Rahami vd. 2008) kullanılarak elde edilen 4.530,68 lb’dir. Analiz sayısı bilinen diğer çalışmalardan D-ICDE (Ho-Huu vd. 2015) yöntemi ile 8.025 analiz sonucunda 4.554,29 lb, CPSO (Gholizadeh, 2013) yöntemi ile 4.500 analiz sonucunda 4.561,13 lb minimum ağırlık değeri elde edilmiştir. Analiz sayısı belirtilmeyen diğer yöntemler ise optimal ağırlık değerleri bakımından daha düşük performans sergilemiş olup, Çizelge 15’te açıkça görülebilmektedir. Sonuç olarak, LPO algoritması literatürdeki güçlü algoritmalarla kıyaslandığında en hafif yapısal tasarımı elde ederek üstün bir optimizasyon başarısı göstermiştir.

Çizelge 15. 18 elemanlı kafes yapı optimizasyon sonuçları

	Hasançebi ve Erbatur	Kaveh ve Kalatjari	Rahami vd.	Gholizadeh		Li ve Liu	Ho-Huu vd.	Jawad vd	Mevcut Çalışma
	2002	2004	2008	2013		2011	2015	2021	
ALG Ai (in2)	SA	GA	FM-GA	PSO	CPSO	GSO	D-ICDE	ABC	LPO
G1	12.25	12.25	12.75	12.00	12.00	12.25	13.00	12.50	12.25
G2	17.50	18.00	18.50	18.50	17.25	18.25	17.50	17.75	17.50
G3	5.75	5.25	4.75	5.25	6.25	4.75	6.50	5.75	5.75
G4	4.25	4.25	3.25	4.50	4.75	4.25	3.00	3.75	4.25
X3	910.0	913.00	917.4475	903.9806	902.9141	916.900	914.06	912.9974	909.0095
Y3	179.0	186.80	193.7899	185.7807	174.7201	191.971	183.46	183.6806	180.7686
X5	638.0	650.00	654.3243	644.9170	632.7129	654.224	640.53	642.7143	639.1830
Y5	141.0	150.50	159.9436	144.9692	141.2956	156.100	133.74	143.8920	141.8641
X7	408.0	418.80	424.4821	428.2196	407.1323	423.500	406.12	411.6918	409.6778
Y7	91.0	97.40	108.5779	100.5623	85.9332	102.571	92.63	97.1476	92.2536
X9	198.0	204.80	208.4691	209.5415	197.6720	207.519	196.69	200.9087	199.6602
Y9	24.0	26.70	37.6349	24.3748	19.8093	28.579	37.06	30.2191	25.0716
Wmin (lb)	4,533.2400	4,547.90	4,530.68	4,609.0010	4,561.1310	4,538.7676	4,554.29	4,537.0642	4,529.8321
Wort (lb)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	4,574.4809
Wmaks (lb)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	4,648.9633
Sd	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	9.7971	37.437893
Gerilme İhlali (%)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Burkulma İhlali (%)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Analiz Sayısı	N/A	N/A	8,000	4,500	4,500	N/A	8,025	N/A	8,000
Wkontrol (lb)	4,533.2426	4,547.9042	4,530.6842	4,609.0025	4,561.1307	4,538.7676	4,554.2952	4,537.0642	

*1 lb=0,4536 kg

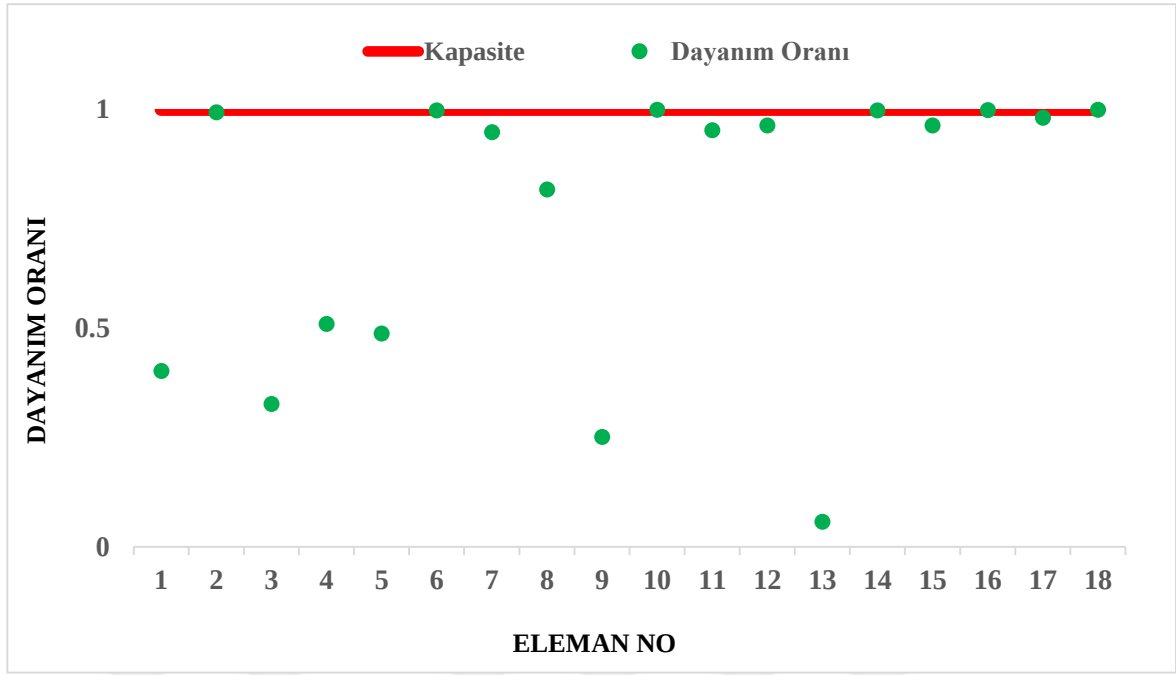
Optimizasyon süreci sonunda elde edilen sonuçlara göre, kafes yapı elemanlarında oluşan gerilme değerleri ile burkulma ve izin verilen gerilme sınır değerleri Şekil 29’da gösterilmiştir. Buna göre 12, 16 ve 17 numaralı elemanların çekme etkisi altında; 2, 6, 10, 14 ve 18 numaralı elemanların ise basınç etkisi altında en yüksek zorlanmaya maruz kalan kesitler olduğu görülmektedir.



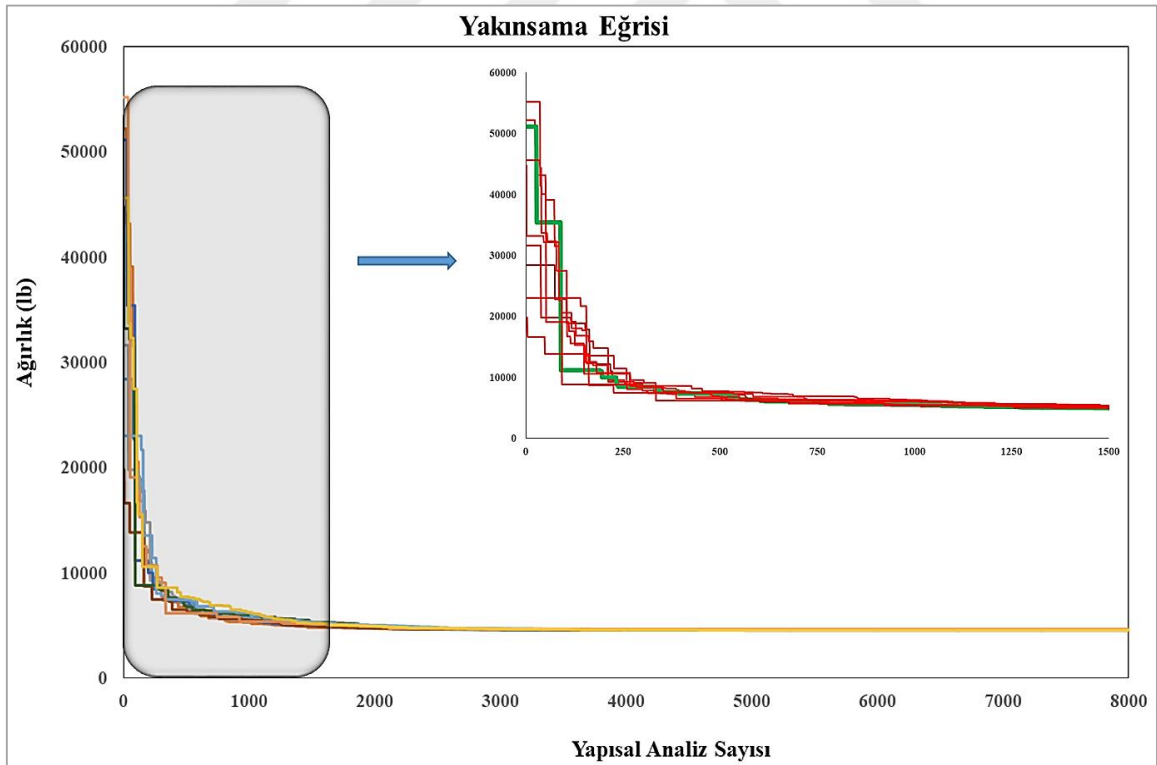
Şekil 29. 18 elemanlı kafes yapı burkulma ve gerilme sınır değerleri

Elemanların dayanım oranlarını gösteren Şekil 30’daki grafikte kafes yapı elemanlarının kapasitelerine göre dayanım oranları verilmiştir. Grafik incelendiğinde, önceki bölümde belirtilen elemanların tamamının taşıma kapasitelerine ulaştığı açıkça görülmektedir.

Analiz sayısına bağlı olarak yapının optimum ağırlığındaki değişim Şekil 31’deki grafikte gösterilmiştir. Yakınsama davranışının daha iyi gözlemlenebilmesi için sağ üstte 0-1500 analiz aralığı için yakınlaştırılmış grafik verilmiştir. Yeşil eğri ile simgelenen en hafif tasarımın optimizasyon süreci, yaklaşık 50.000 lb ile başlamış ve 1.500 analiz sonucunda 5.000 lb seviyesine gerilemiştir. 1.500-8.000 analiz arasındaki süreçte ise optimum yapısal ağırlık değeri 4.529,83 lb olarak elde edilmiştir.

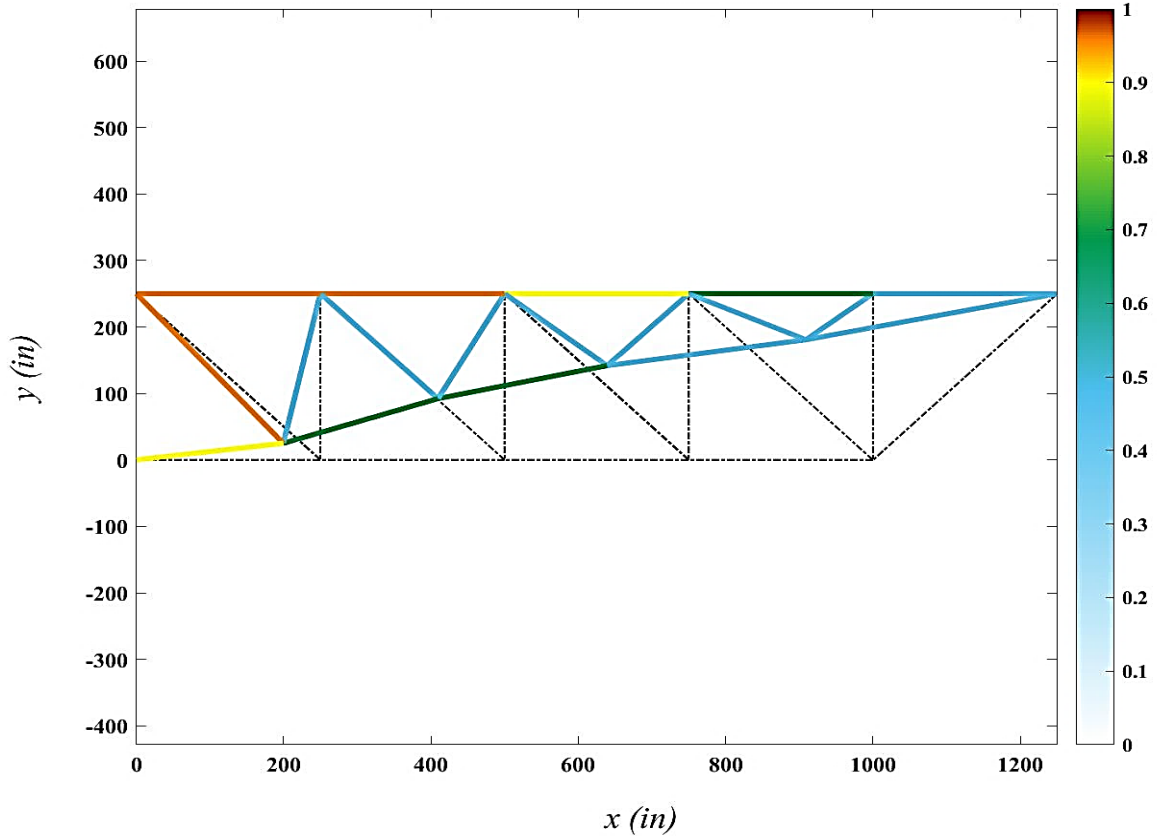


Şekil 30. 18 elemanlı düzlem kafes yapı elemanlarının dayanım oranları



Şekil 31. 18 elemanlı düzlem kafes yapı yakınsama süreci

Optimizasyon sonucunda ortaya çıkan en hafif yapı formu, elemanların maruz kaldığı gerilmelerin sınır değerlere yakınlık durumunu gösteren renk skalasıyla beraber Şekil 32’de verilmiştir. Grafikte turuncu renk ile gösterilen 12, 16 ve 17 numaralı elemanlarda, gerilme seviyelerinin dayanım kapasitesine yaklaşmakta olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 32. 18 elemanlı düzlem kafes yapıya ait nihai tasarım

2.2.3. 25 elemanlı uzay kafes

Eş zamanlı olarak enkesit ve şekil optimizasyonu yapılacak üçüncü örnek olan 25 elemanlı kafes yapının geometrisi bölüm 3.1.1’de verilmişti. Yapı elemanlarının malzeme elastisite modülü ve birim hacim ağırlıkları sırasıyla 10.000 ksi ve 0.1 lb/inç³’tür. Çizelge 16’da gösterilen tek yükleme durumu söz konusu olup bu yükleme koşulları altında izin verilen basınç ve çekme gerilme sınır değerleri ± 40 ksi, deplasman sınır değeri ise tüm düğüm noktaları için bütün yönlerde $\pm 0,35$ inç’tir.

Çizelge 16. 25 elemanlı kafes yapı yükleme durumu

Yükleme Durumu	Düğüm Noktası	Koordinat		
		x	y	z
1	1	1	-10	-10
	2	0	-10	-10
	3	0.5	0	0
	6	0.6	0	0

Şekil optimizasyonu için tasarım değişkeni olarak belirlenen düğüm noktaları koordinatları ve bunlara ilişkin sınır değerleri aşağıda verilmiştir:

$$20 \leq X_4 = X_5 = -X_3 = -X_6 \leq 60 \quad (in)$$

$$40 \leq Y_3 = Y_4 = -Y_5 = -Y_6 \leq 80 \quad (in)$$

$$90 \leq Z_3 = Z_4 = Z_5 = Z_6 \leq 130 \quad (in)$$

$$40 \leq X_8 = X_9 = -X_7 = -X_{10} \leq 80 \quad (in)$$

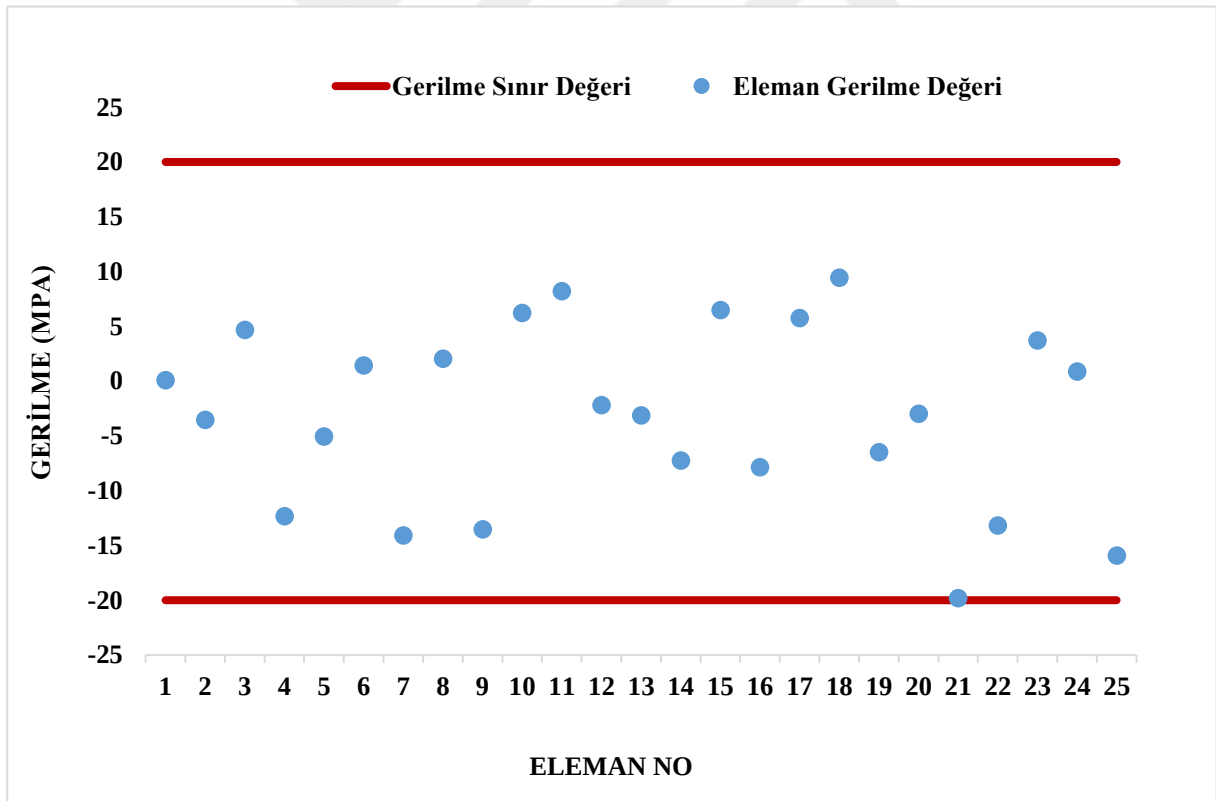
$$100 \leq Y_7 = Y_8 = -Y_9 = -Y_{10} \leq 140 \quad (in)$$

Enkesit optimizasyonu için ise elemanlar; (1) A_1 , (2) $A_2 \dots A_5$, (3) $A_6 \dots A_9$, (4) $A_{10} \dots A_{11}$, (5) $A_{12} \dots A_{13}$, (6) $A_{14} \dots A_{17}$, (7) $A_{18} \dots A_{21}$, (8) $A_{22} \dots A_{25}$ şeklinde 8 gruba ayrılmıştır. Eleman enkesit alanları [0.1 - 3.4] aralığında eşit olarak dağıtılmış 34 ayrık tasarım değişkeni arasından seçilecektir.

Çizelge 17’de LPO algoritmasıyla optimizasyon sonucu elde edilen sonuçlar ve diğer yöntemlerle bulunan sonuçlar gösterilmiştir. Gholizadeh’in PSO algoritması üzerinde hibrit optimizasyon yöntemleri geliştirerek yaptığı üç çalışmadan en iyi sonucu elde ettiği sıralı hücresel parçacık sürü optimizasyonu (SCPSO) yöntemiyle 4.500 analiz sonunda en düşük ağırlık 117.227 lb bulunsada deplasman kısıtlayıcıları ihlal edilmiştir. Mevcut çalışmada ise LPO algoritmasıyla gerilme ve deplasman sınırlayıcı koşulları sağlanarak 4.600 analiz sonucunda en yüksek ağırlık 119.018 lb, ortalama ağırlık 117.567 lb ve en düşük ağırlık 117.263 lb bulunmuştur. Bulunan bu değer, tablodaki optimum sonuçlar arasında en hafif tasarım olmuştur. Buna en yakın sonuç ise ABC (Jawad vd. 2021) algoritması kullanılarak 5.100 analiz sonucunda ulaşılan 117.33 lb’dir. GA (Kaveh ve Kalatjari 2004) metodu ile analiz sayısına ilişkin elimizde bir veri bulunmasa da tüm sınır değer koşulları sağlanarak en

düşük ağırlık 124.0015 lb bulunmuştur. Çizelgedeki diğer çalışmaların tümünde sınırlayıcı ihlali yapılmış olmasına rağmen mevcut çalışmadan daha ağır tasarımlar elde edilmiştir. D-ICDE (Ho-Huu vd. 2015) metoduyla 6.000 analiz sonucunda 118.77 lb, FM-GA (Rahami vd. 2008) metoduyla 8.000 analiz sonucunda 120.12 lb, analiz sayısı bilinmeyen iki çalışmadan FA (Miguel ve Lopez 2013) yöntemiyle 118.83 lb ve IGA (Tang vd. 2005) yöntemiyle 124.94 lb bulunmuştur. Yapılan karşılaştırmalar göz önüne alındığında; LPO algoritması optimizasyon etkinliği, sınırlayıcı koşullarının sağlanması ve analiz verimliliği açısından literatürdeki birçok yöneme kıyasla üstün ve güvenilir bir yöntem olarak değerlendirilebilir.

Analiz sonucunda kafes yapı elemanlarında oluşan gerilme değerlerinin, sınır değerler arasındaki durumu Şekil 33' teki grafikte gösterilmiştir. Buna göre, sadece 21 no'lu elemanın -19.8 MPa gerilme değeriyle basınç gerilmesi sınır durumuna yaklaştığı söylenebilir. Diğer tüm basınç ve çekme elemanlarında gerilme sınır değerleri açısından bir zorluk yaşanmamıştır.



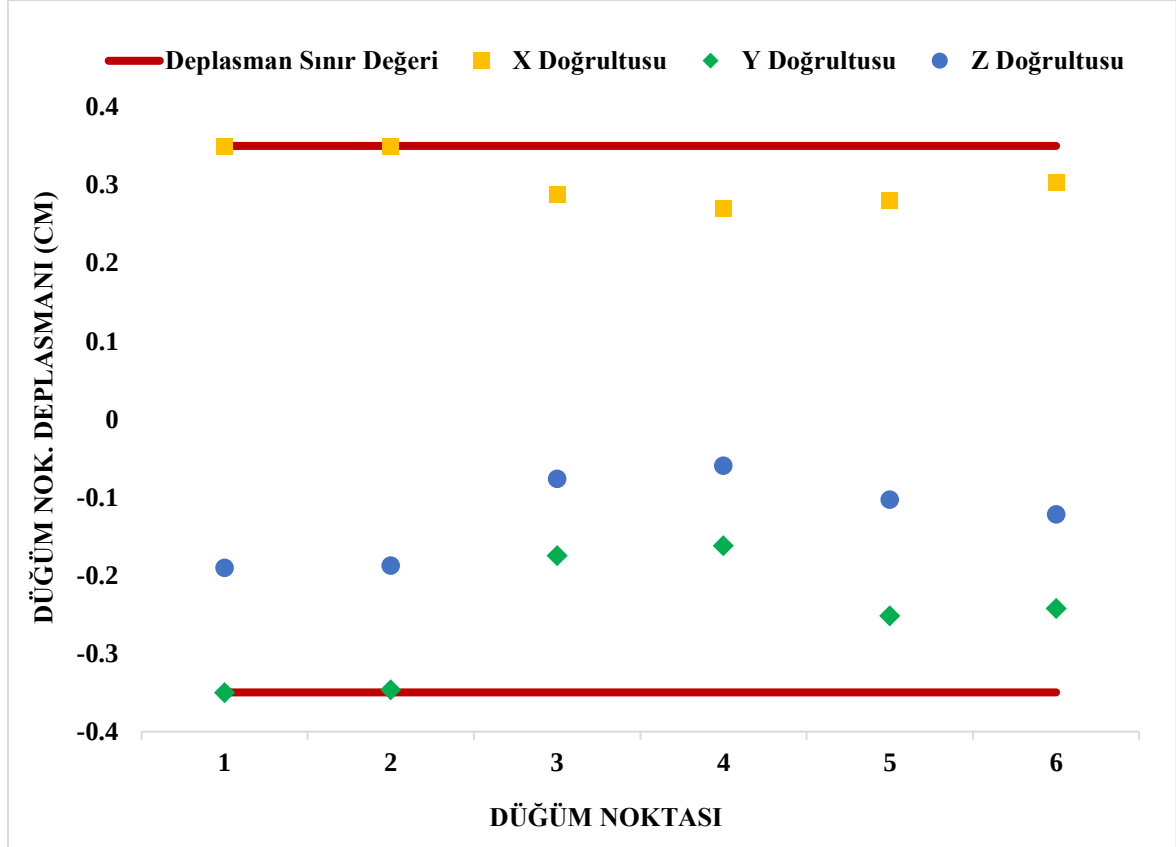
Şekil 33. 25 elemanlı kafes yapı eleman gerilme değerleri

Çizelge 17. 25 elemanlı kafes yapı optimizasyon sonuçları

	Kaveh ve Kalatjari	Tang vd.	Rahami vd.	Miguel ve Lopez	Ho-Huu vd.	Gholizadeh			Jawad vd.	Mevcut Çalışma
	2004	2005	2008	2013	2015	2013			2021	LPO
ALG Ai (in2)	GA	IGA	FM-GA	FA	D-ICDE	PSO	CPSO	SCPSO	ABC	
G1	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.30	0.10	0.10	0.10
G2	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
G3	1.10	1.10	1.10	0.90	0.90	1.10	1.00	1.00	1.00	1.00
G4	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
G5	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.40	0.10	0.10	0.1000	0.1000
G6	0.10	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.1000	0.1000
G7	0.10	0.20	0.20	0.10	0.10	0.40	0.20	0.10	0.1000	0.1000
G8	1.00	0.70	0.80	1.00	1.00	0.70	0.90	0.90	0.9000	0.9000
X4	36.23	35.47	33.0487	37.32	36.83	27.6169	33.4976	36.9520	36.2106	37.6170
Y4	58.56	60.37	53.5663	55.74	58.53	51.6196	62.3735	54.5786	54.6372	54.6231
Z4	115.59	129.07	129.9092	126.62	122.67	129.9071	114.5945	129.9758	129.9645	129.9732
X8	46.46	45.06	43.7826	50.14	49.21	42.5526	40.0531	51.7317	52.0742	51.8750
Y8	127.95	137.04	136.8381	136.40	136.74	132.7241	133.6695	139.5316	139.9799	139.4899
Wmin (lb)	124.00	124.94	120.11	118.83	118.76	129.2070	123.4510	117.2270	117.3332	117.2626
Wort (lb)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	117.5660
Wmaks (lb)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	119.0183
Sd	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	2.2212	0.5332
Gerilme İhlali (%)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Deplasman İhlali (%)	0.0000	0.0080	0.000085	0.000612	0.175597	0.083295	0.135936	0.527538	0.0000	0.0000
Analiz Sayısı	N/A	N/A	8,000	N/A	6,000	4,500	4,500	4,500	5,100	4,600
Wkontrol (lb)	124.0015	124.9428	120.1149	118.8329	118.7677	129.2076	123.5403	117.2271	117.3332	

*1 lb=0,4536 kg

Şekil 34'te gösterilen düğüm noktası deplasman grafiği, 1 ve 2 numaralı üst düğüm noktalarında +x ve -y yönlerinde oluşan deplasmanların sınır değerlere yaklaştığını ortaya koymaktadır. z yönünde ise analiz boyunca tüm düğüm noktaları sınır koşulları içerisinde kalmıştır.

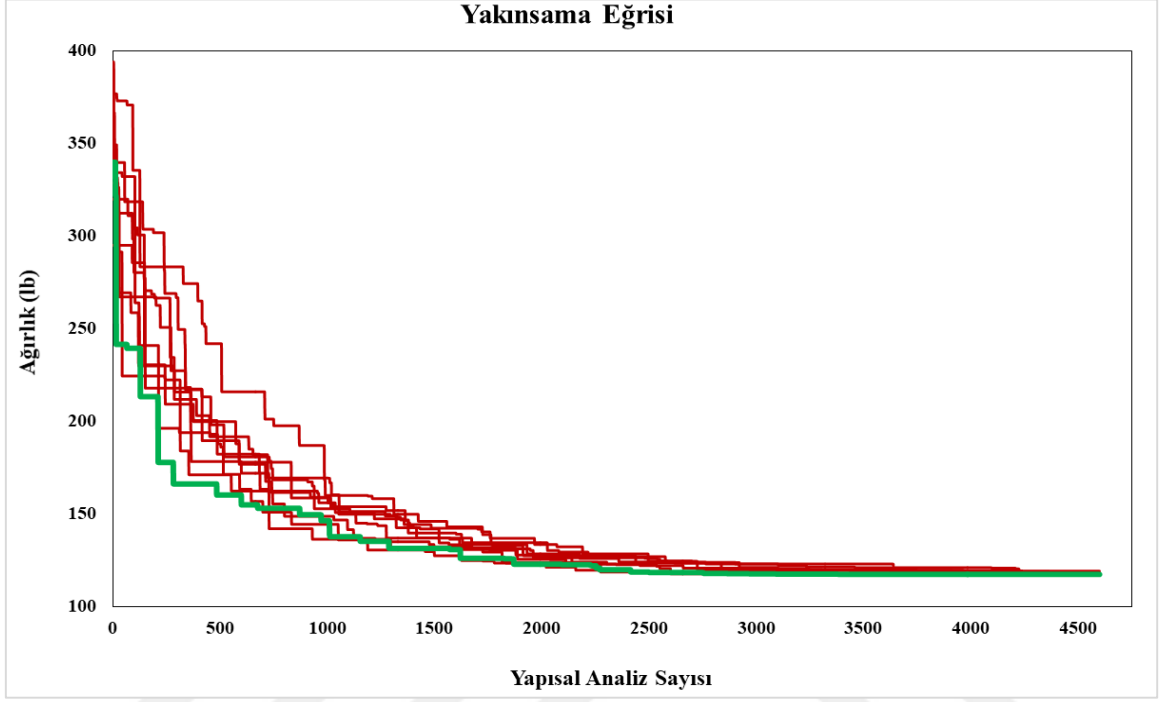


Şekil 34. 25 elemanlı kafes yapı düğüm noktası deplasman değerleri

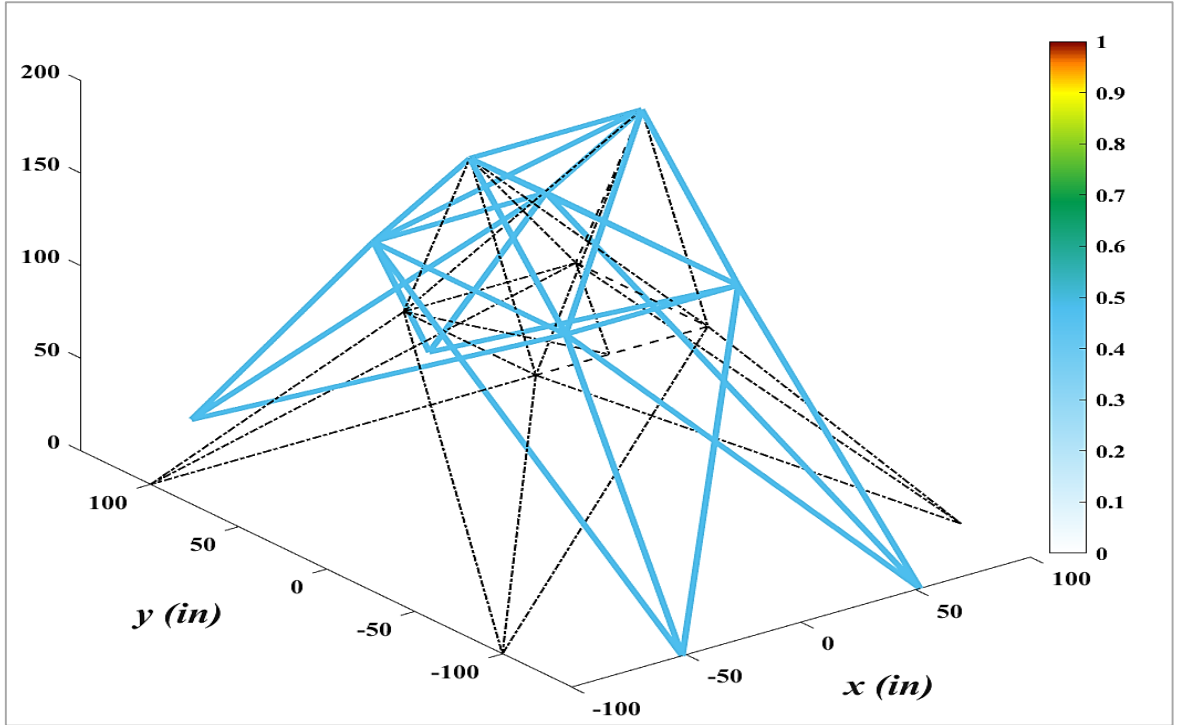
Şekil 35'te 25 elemanlı kafes yapının optimizasyon sürecinde analiz boyunca oluşan yakınsama eğrileri verilmiştir. Optimal ağırlık değerinin elde edildiği analiz süreci yeşil renkli eğriyle vurgulanmıştır. Bu süreçte, optimizasyon başlangıçta 340 lb yapı ağırlığı ile başlamış ve 4.500 analiz sonunda 117,26 lb ağırlığa ulaşılmıştır. Diğer tüm kafes yapılarındaki benzer eğilimlere paralel olarak, bu optimizasyon sürecinin ilk yarısına kadar hızlı bir ağırlık azalması gözlemlenirken, sonrasında ise daha hassas ve yavaş bir yakınsama süreci gerçekleşmiştir.

Optimizasyon süreci sonunda elde edilen en iyi tasarıma ait yapı geometrisi Şekil 36'da gösterilmiştir. Hiçbir elemanda gerilme dayanımı açısından bir zorluk yaşanmaması gerilme sınırlarının kritik sınıra ulaşmadığını, yani tasarımın gerilme açısından hala

iyileştirilebilir olduğunu göstermektedir. Ancak özellikle 1 ve 2 numaralı düğüm noktalarında deplasmanların sınır değerlere yaklaşması, deplasman kısıtlarının ihlal edilme riskini artırmış ve yapı ağırlığının daha fazla düşmesini engellemiştir. Bu durum, optimizasyon sürecinde belirleyici kistasın deplasman sınırlayıcıları olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 35. 25 elemanlı kafes yapı yakınsama süreci



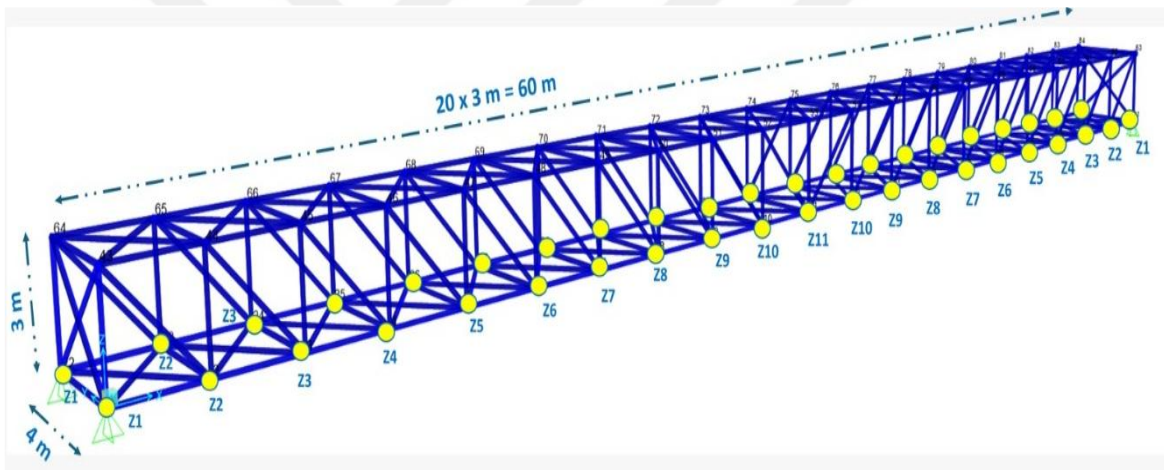
Şekil 36. 25 elemanlı kafes yapıya ait nihai tasarım

2.2.4. 288 elemanlı uzay kafes

Son olarak Şekil 37’de geometrisi gösterilen 288 eleman ve 84 düğüm noktasından oluşan üç boyutlu çelik kafes yapının enkesit ve şekil optimizasyonu yapılacaktır. Kafes malzemesinin birim hacim ağırlığı 7,85 ton/m³, elastisite modülü 200 GPa ve akma gerilmesi 235 MPa’dır. Kafes yapı, mesnetsiz tüm düğüm noktalarına uygulanan aşağıdaki yükler altında, birbirinden bağımsız üç yükleme durumu için tasarlanmıştır:

- (i) + x yönünde 4 kN’lik yatay yük
- (ii) + y yönünde 2 kN’lik yatay yük
- (iii) - z yönünde 5 kN’lik düşey yük

Bu yükleme durumları altında tüm düğüm noktalarında x, y ve z yönlerindeki yer değiştirmeler ± 40 mm ile sınırlandırılmıştır.



Şekil 37. 288 elemanlı kafes yapı geometrisi

Enkesit optimizasyonu için kafes yapının her bir elemanı değişken olarak tanımlandığından 288 enkesit değişkeni tanımlanmıştır. Bu değişkenler Çizelge 18’de verilen boru tip kesitlerinden seçilecektir.

Enkesit değişkenleri;

$$\mathbf{A} = [A_1; A_2; A_3; \dots A_{288}]_{288 \times 1}$$

Ayrıca Şekil 37’de görüldüğü üzere kafes yapıda sarı ile gösterilen 11 düğüm noktasının z koordinatı şekil değişkeni olarak tasarlanmıştır. Bu tasarım değişkenlerine ait alt ve üst sınır değerleri aşağıdaki gibidir:

$$-30000 \leq Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6, Z_7, Z_8, Z_9, Z_{10}, Z_{11} \leq 4000 \text{ (mm)}$$

Böylece optimizasyon problemi için toplamda 299 tasarım değişkeni belirlenmiştir.

Çizelge 18. 288 elemanlı kafes yapı için enkesit tablosu

Enkesit Tipi	Alan (mm ²)	Yarıçap (mm)
TUBO-D76.1X3.2'	732.90	25.7987
TUBO-D82.5X3.2'	797.20	28.0603
TUBO-D88.9X3.2'	861.60	30.3206
TUBO-D101.6X3.6'	1,108.00	34.6723
TUBO-D108X3.6'	1,181.00	36.9337
TUBO-D114.3X3.6'	1,252.00	39.1605
TUBO-D127X4'	1,546.00	43.5043
TUBO-D133X4'	1,621.00	45.6295
TUBO-D139.7X4'	1,705.00	48.0042
TUBO-D152.4X4'	1,865.00	52.4826
TUBO-D159X4'	1,948.00	54.8144
TUBO-D168.3X4'	2,065.00	58.1015
TUBO-D193.7X4.5'	2,675.00	66.9216
TUBO-D219.1X5'	3,363.00	75.7164
TUBO-D244.5X5.4'	4,056.00	84.5571
TUBO-D273X5.6'	4,704.00	94.5698
TUBO-D298.5X5.9'	5,423.00	103.4710
TUBO-D323.9X5.9'	5,894.00	112.4503
TUBO-D355.6X6.3'	6,913.00	123.5358
TUBO-D368X6.3'	7,159.00	127.8946
TUBO-D406.4X6.3'	7,919.00	141.4749
TUBO-D419X7.1'	9,188.00	145.6449
TUBO-D457.2X7.1'	10,040.00	159.1499

Yapı, AISC-LRFD 1994 yönetmeliklerine uygun olarak tasarlanmış olup elemanlar için çekme akması ve basınç burkulması sınır durumları dikkate alınarak kontrol edilmiştir. Buna göre;

- i. Çekme etkisindeki bir elemana etkiyen kuvvet elemanın çekme dayanımını aşmamalıdır.

$$\begin{aligned}
 P_u &\leq \phi_t P_n & P_u: \text{Uygulanan çekme kuvveti,} \\
 P_n &= A_g F_y & \phi_t = 0.9 \text{ (Çekme için dayanım katsayısı),} \\
 & & P_n: \text{Nominal çekme kuvveti,} \\
 & & F_y: \text{Çelik akma dayanımı,} \\
 & & A_g: \text{Brüt enkesit alanı}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

- ii. Basınç altındaki bir elemana etkiyen kuvvet elemanın basınç dayanımını aşmamalıdır.

$$\begin{aligned}
 P_u &\leq \phi_c P_n & P_u: \text{Uygulanan basınç kuvveti,} \\
 P_n &= A_g F_{cr} & \phi_c = 0.85 \text{ (Basınç için direnç katsayısı),} \\
 & & P_n: \text{Nominal basınç kuvveti,} \\
 & & A_g: \text{Brüt enkesit alanı,} \\
 & & F_{cr}: \text{Kritik basınç}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

$$F_{cr} = \begin{cases} (0.658^{\lambda_c^2}) F_y & \lambda_c \leq 1.5 \\ \left[\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right] F_y & \lambda_c > 1.5 \end{cases} \quad \lambda_c = \max \left\{ \left(\frac{K_x L_x}{r_x \pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \right); \left(\frac{K_y L_y}{r_y \pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \right) \right\} \tag{3.9}$$

Burada K_x etkin burkulma katsayısı, L_x uzunluk ve r_x x eksenini etrafındaki dönme yarıçapını ifade eder. Benzer şekilde, K_y , L_y ve r_y y eksenini için karşılık gelen değerleri ifade eder. Bu çalışmada, kafes elemanları için K_x ve K_y 1 olarak kabul edilmiştir.

- iii. Basınç ve çekme durumunda elemanlar için narinlik oranı aşağıdaki formülden hesaplanır.

$$\lambda_i = \left\{ \begin{array}{l} \frac{K_i L_i}{r_i} \leq 300 ; \text{ çekme durumu} \\ \frac{K_i L_i}{r_i} \leq 200 ; \text{ basınç durumu} \end{array} \right\} \quad (3.10)$$

288 elemanlı kafes yapının LPO algoritmasıyla optimizasyonu için toplamda 90.000 yapısal analiz gerçekleştirilmiş ve algoritma 10 bağımsız çalıştırma ile test edilmiştir. Bu analizler sonucunda, tasarım ağırlıklarının minimum, maksimum ve ortalama değerleri hesaplanmış; standart sapma ile çözüm sonuçlarının dağılımı değerlendirilmiştir. Elde edilen tasarımlar arasından, deplasman kısıtlayıcı koşullarını sağlayan en hafif yapıyı temsil eden kesitler Çizelge 19’da sunulmuştur. Optimizasyon süreci sonunda en düşük ağırlık 12.378,74 kg, ortalama ağırlık 13.099,55 kg ve en yüksek ağırlık ise 14.047,25 kg olarak belirlenmiştir.

Çizelge 19. 288 elemanlı kafes yapı optimizasyon sonuçları

Değişken No	Enkesit Adı	Değişken No	Enkesit Adı	Değişken No	Enkesit Adı
A1	D219.1X5	A45	D159X4	A89	D159X4
A2	D244.5X5.4	A46	D76.1X3.2	A90	D152.4X4
A3	D193.7X4.5	A47	D82.5X3.2	A91	D168.3X4
A4	D168.3X4	A48	D82.5X3.2	A92	D168.3X4
A5	D152.4X4	A49	D127X4	A93	D114.3X3.6
A6	D219.1X5	A50	D76.1X3.2	A94	D127X4
A7	D168.3X4	A51	D88.9X3.2	A95	D168.3X4
A8	D139.7X4	A52	D82.5X3.2	A96	D168.3X4
A9	D139.7X4	A53	D88.9X3.2	A97	D193.7X4.5
A10	D152.4X4	A54	D82.5X3.2	A98	D193.7X4.5
A11	D114.3X3.6	A55	D82.5X3.2	A99	D193.7X4.5
A12	D139.7X4	A56	D88.9X3.2	A100	D193.7X4.5
A13	D159X4	A57	D88.9X3.2	A101	D244.5X5.4
A14	D159X4	A58	D76.1X3.2	A102	D114.3X3.6
A15	D139.7X4	A59	D76.1X3.2	A103	D101.6X3.6
A16	D168.3X4	A60	D76.1X3.2	A104	D88.9X3.2
A17	D219.1X5	A61	D82.5X3.2	A105	D88.9X3.2
A18	D219.1X5	A62	D82.5X3.2	A106	D82.5X3.2
A19	D193.7X4.5	A63	D76.1X3.2	A107	D82.5X3.2
A20	D193.7X4.5	A64	D108X3.6	A108	D82.5X3.2
A21	D139.7X4	A65	D76.1X3.2	A109	D76.1X3.2
A22	D101.6X3.6	A66	D82.5X3.2	A110	D101.6X3.6
A23	D82.5X3.2	A67	D76.1X3.2	A111	D82.5X3.2
A24	D114.3X3.6	A68	D88.9X3.2	A112	D101.6X3.6
A25	D76.1X3.2	A69	D82.5X3.2	A113	D88.9X3.2
A26	D76.1X3.2	A70	D82.5X3.2	A114	D82.5X3.2
A27	D76.1X3.2	A71	D88.9X3.2	A115	D133X4
A28	D101.6X3.6	A72	D76.1X3.2	A116	D159X4
A29	D101.6X3.6	A73	D101.6X3.6	A117	D127X4
A30	D108X3.6	A74	D108X3.6	A118	D152.4X4
A31	D127X4	A75	D82.5X3.2	A119	D133X4
A32	D82.5X3.2	A76	D88.9X3.2	A120	D127X4
A33	D108X3.6	A77	D88.9X3.2	A121	D88.9X3.2
A34	D88.9X3.2	A78	D82.5X3.2	A122	D127X4
A35	D88.9X3.2	A79	D82.5X3.2	A123	D82.5X3.2
A36	D133X4	A80	D88.9X3.2	A124	D108X3.6
A37	D82.5X3.2	A81	D76.1X3.2	A125	D82.5X3.2
A38	D88.9X3.2	A82	D219.1X5	A126	D114.3X3.6
A39	D82.5X3.2	A83	D219.1X5	A127	D114.3X3.6
A40	D82.5X3.2	A84	D244.5X5.4	A128	D139.7X4
A41	D82.5X3.2	A85	D152.4X4	A129	D114.3X3.6
A42	D82.5X3.2	A86	D159X4	A130	D159X4
A43	D82.5X3.2	A87	D168.3X4	A131	D127X4
A44	D76.1X3.2	A88	D127X4	A132	D101.6X3.6

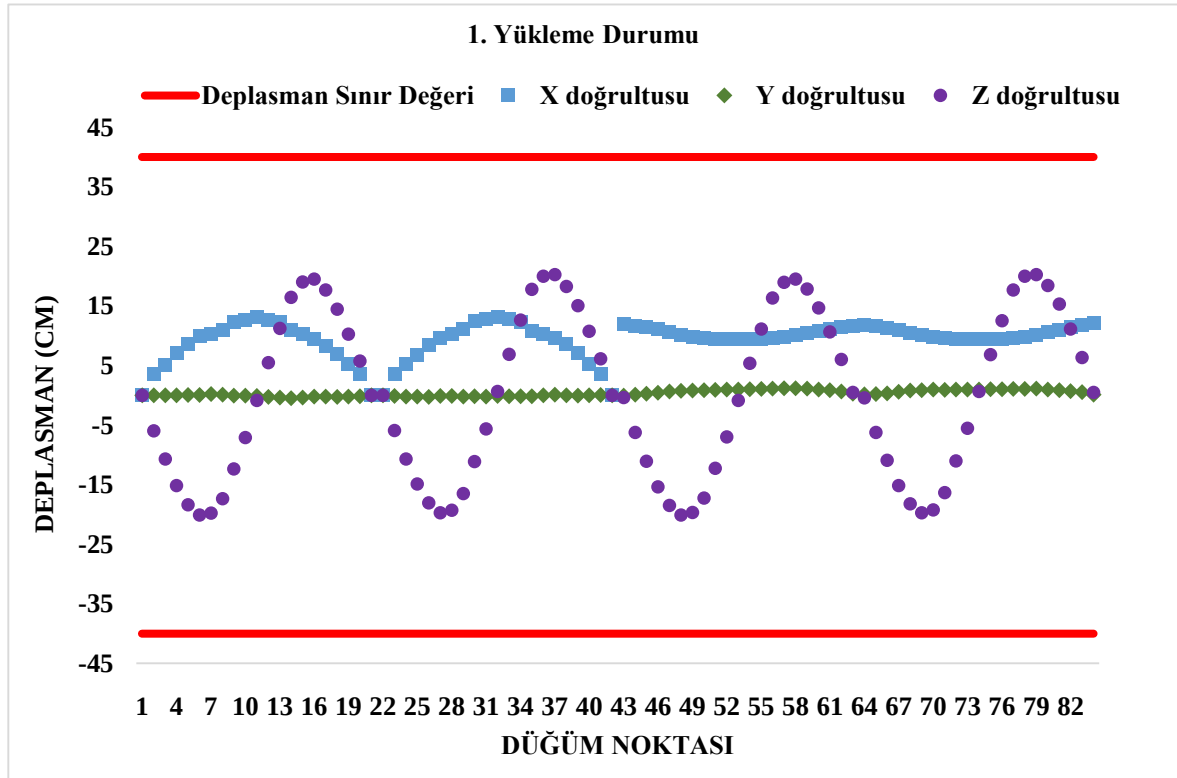
Çizelge 19. (Devam)

Değişken No	Enkesit Adı	Değişken No	Enkesit Adı	Değişken No	Enkesit Adı
A133	D88.9X3.2	A177	D88.9X3.2	A221	D82.5X3.2
A134	D101.6X3.6	A178	D101.6X3.6	A222	D114.3X3.6
A135	D76.1X3.2	A179	D76.1X3.2	A223	D108X3.6
A136	D88.9X3.2	A180	D76.1X3.2	A224	D82.5X3.2
A137	D88.9X3.2	A181	D82.5X3.2	A225	D88.9X3.2
A138	D76.1X3.2	A182	D82.5X3.2	A226	D82.5X3.2
A139	D88.9X3.2	A183	D76.1X3.2	A227	D76.1X3.2
A140	D88.9X3.2	A184	D114.3X3.6	A228	D133X4
A141	D108X3.6	A185	D114.3X3.6	A229	D82.5X3.2
A142	D101.6X3.6	A186	D101.6X3.6	A230	D82.5X3.2
A143	D133X4	A187	D108X3.6	A231	D76.1X3.2
A144	D139.7X4	A188	D82.5X3.2	A232	D82.5X3.2
A145	D88.9X3.2	A189	D152.4X4	A233	D88.9X3.2
A146	D127X4	A190	D152.4X4	A234	D88.9X3.2
A147	D108X3.6	A191	D159X4	A235	D114.3X3.6
A148	D101.6X3.6	A192	D159X4	A236	D76.1X3.2
A149	D88.9X3.2	A193	D219.1X5	A237	D76.1X3.2
A150	D76.1X3.2	A194	D273X5.6	A238	D88.9X3.2
A151	D114.3X3.6	A195	D298.5X5.9	A239	D76.1X3.2
A152	D88.9X3.2	A196	D323.9X5.9	A240	D88.9X3.2
A153	D88.9X3.2	A197	D355.6X6.3	A241	D88.9X3.2
A154	D82.5X3.2	A198	D368X6.3	A242	D88.9X3.2
A155	D82.5X3.2	A199	D355.6X6.3	A243	D82.5X3.2
A156	D101.6X3.6	A200	D298.5X5.9	A244	D76.1X3.2
A157	D88.9X3.2	A201	D244.5X5.4	A245	D76.1X3.2
A158	D139.7X4	A202	D244.5X5.4	A246	D82.5X3.2
A159	D101.6X3.6	A203	D219.1X5	A247	D82.5X3.2
A160	D108X3.6	A204	D159X4	A248	D76.1X3.2
A161	D108X3.6	A205	D139.7X4	A249	D82.5X3.2
A162	D108X3.6	A206	D133X4	A250	D101.6X3.6
A163	D152.4X4	A207	D159X4	A251	D82.5X3.2
A164	D101.6X3.6	A208	D88.9X3.2	A252	D88.9X3.2
A165	D127X4	A209	D82.5X3.2	A253	D133X4
A166	D76.1X3.2	A210	D88.9X3.2	A254	D76.1X3.2
A167	D82.5X3.2	A211	D76.1X3.2	A255	D76.1X3.2
A168	D76.1X3.2	A212	D76.1X3.2	A256	D88.9X3.2
A169	D152.4X4	A213	D82.5X3.2	A257	D82.5X3.2
A170	D88.9X3.2	A214	D114.3X3.6	A258	D76.1X3.2
A171	D108X3.6	A215	D152.4X4	A259	D108X3.6
A172	D108X3.6	A216	D88.9X3.2	A260	D82.5X3.2
A173	D168.3X4	A217	D101.6X3.6	A261	D88.9X3.2
A174	D133X4	A218	D88.9X3.2	A262	D101.6X3.6
A175	D152.4X4	A219	D76.1X3.2	A263	D76.1X3.2
A176	D88.9X3.2	A220	D82.5X3.2	A264	D108X3.6

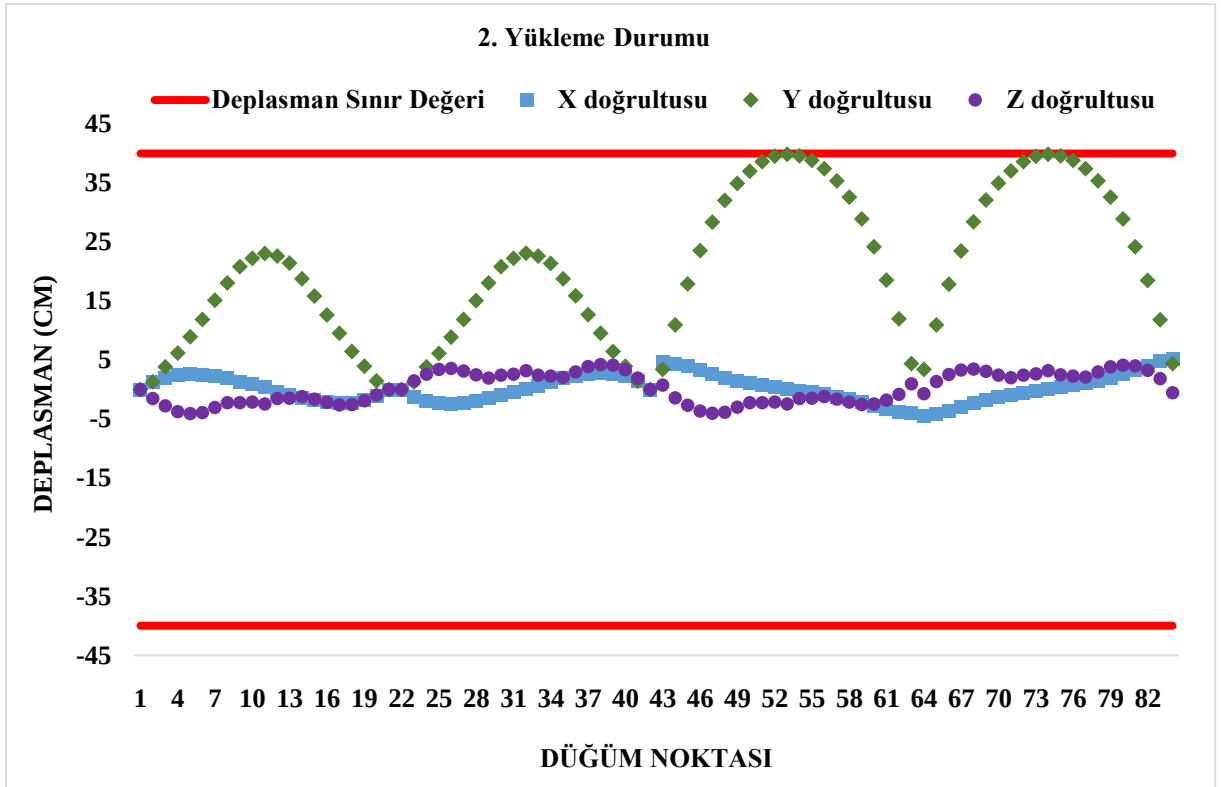
Çizelge 19. (Devam)

Değişken No	Enkesit Adı	Değişken No	Enkesit Adı	Değişken No	Düğüm No Koordinatı
A265	D82.5X3.2	A277	D298.5X5.9	Z1	-4071.560855
A266	D82.5X3.2	A278	D323.9X5.9	Z2	-2530.310593
A267	D88.9X3.2	A279	D368X6.3	Z3	-1750.818009
A268	D82.5X3.2	A280	D355.6X6.3	Z4	-844.3427111
A269	D82.5X3.2	A281	D298.5X5.9	Z5	-81.85204497
A270	D101.6X3.6	A282	D273X5.6	Z6	632.8836223
A271	D139.7X4	A283	D193.7X4.5	Z7	1036.83333
A272	D139.7X4	A284	D159X4	Z8	1251.216807
A273	D193.7X4.5	A285	D168.3X4	Z9	888.7242135
A274	D219.1X5	A286	D127X4	Z10	938.5105271
A275	D298.5X5.9	A287	D76.1X3.2	Z11	805.7085222
A276	D298.5X5.9	A288	D76.1X3.2		
Wmin (kg)				12,678.74	
Wort (kg)				13,099.55	
Wmaks (kg)				14,047.25	
Sd				432.35	
Analiz sayısı				90,000	

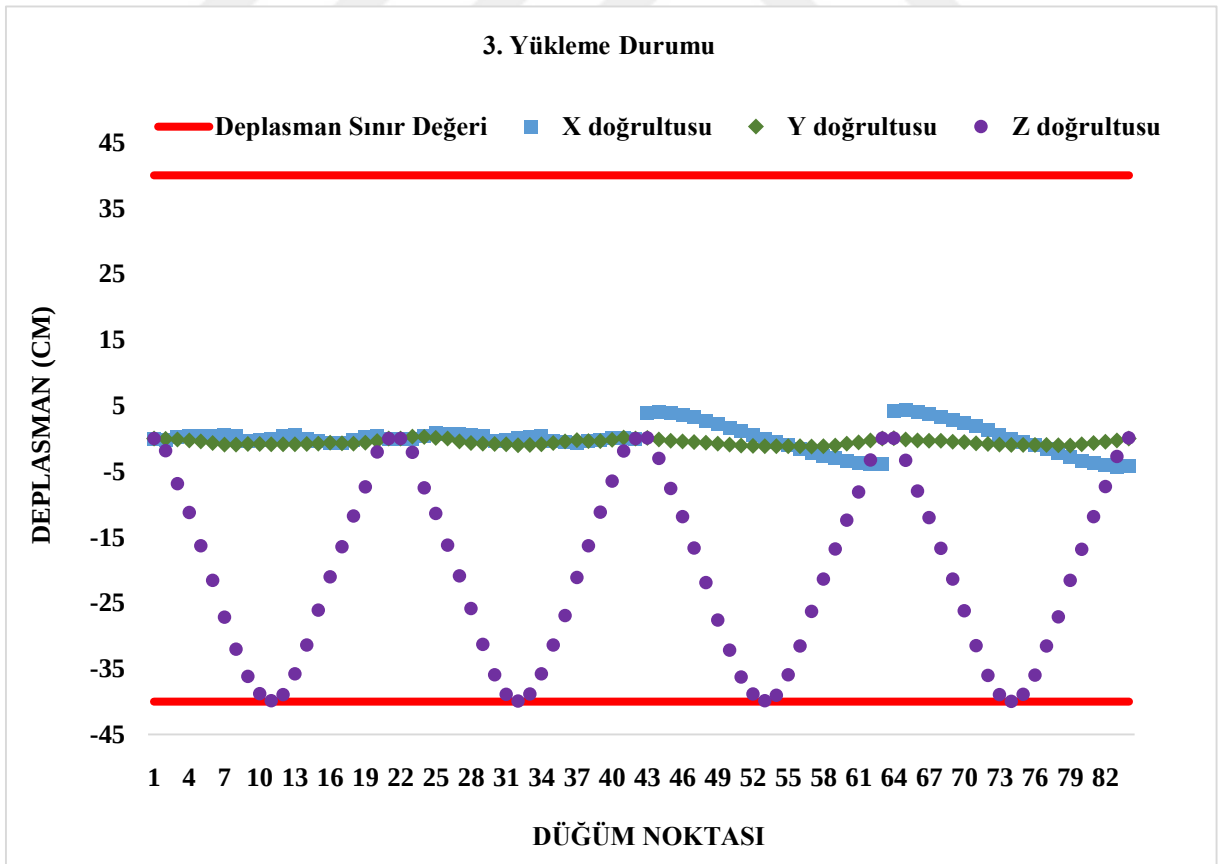
Şekil 38, Şekil 39 ve Şekil 40'taki grafiklerde sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü yükleme durumu altında düğüm noktalarında oluşan deplasman değerleri verilmiştir.



Şekil 38. 288 elemanlı kafes yapı düğüm noktası deplasman değerleri (1. yükleme durumu)

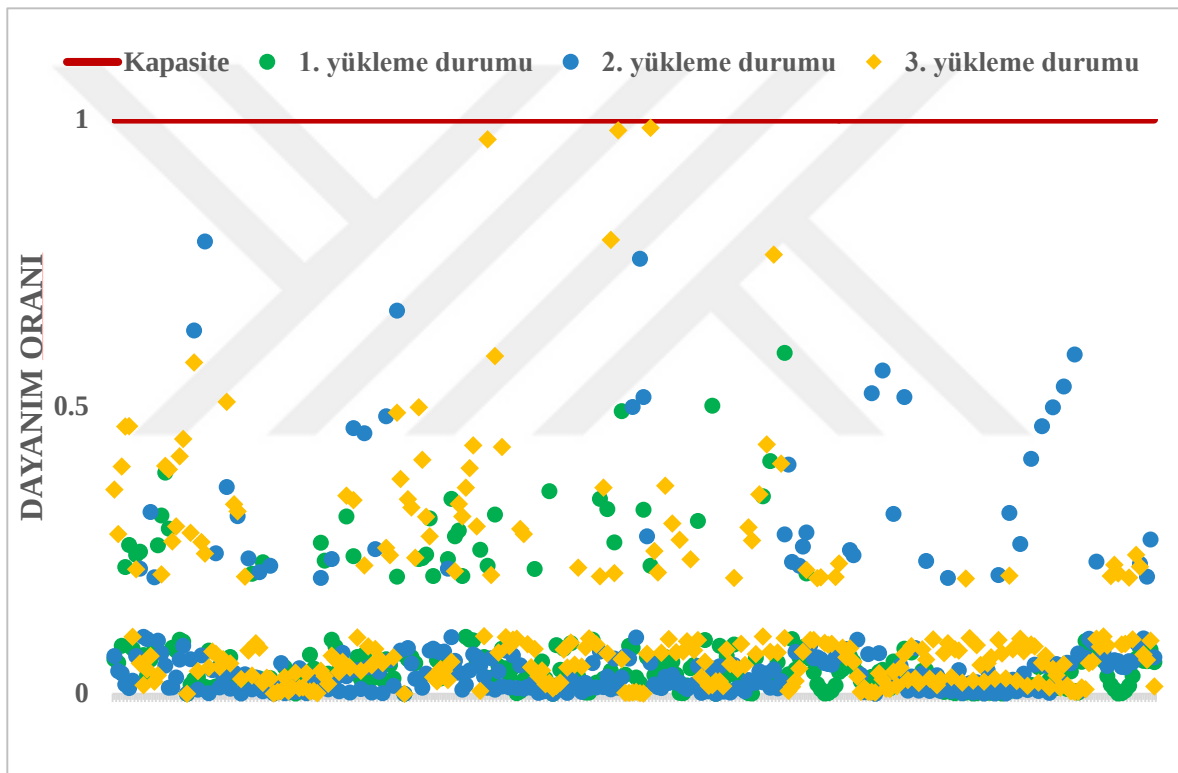


Şekil 39. 288 elemanlı kafes yapı düğüm noktası deplasman değerleri (2. yükleme durumu)



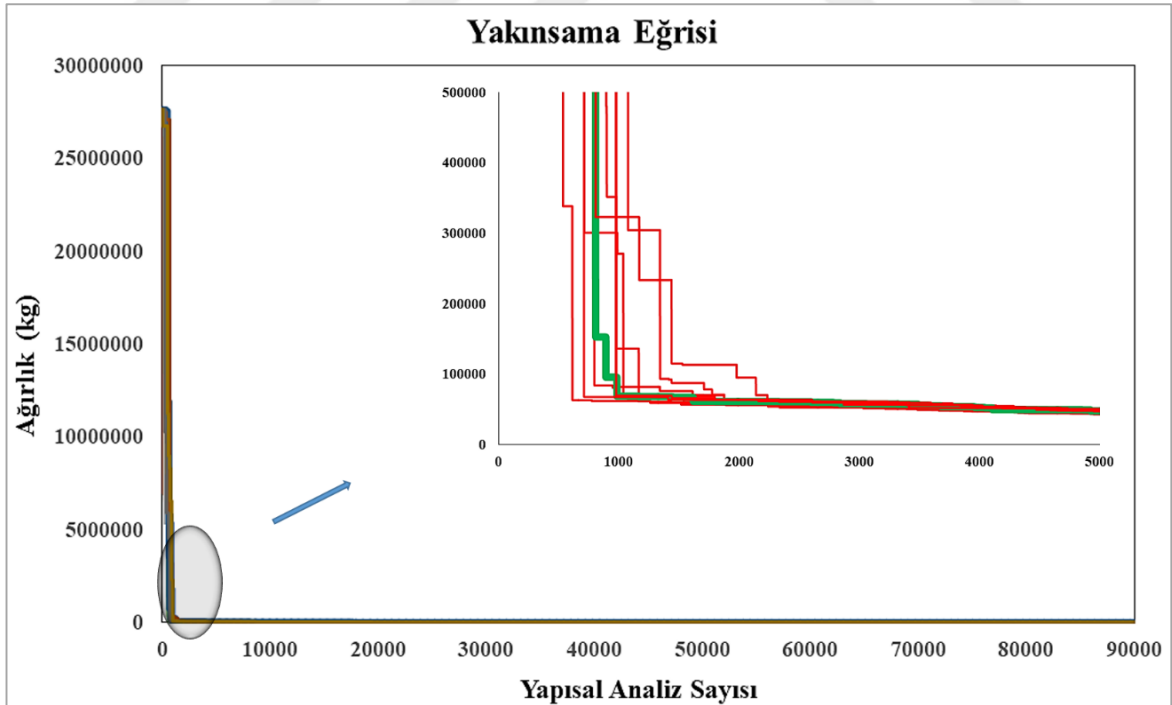
Şekil 40. 288 elemanlı kafes yapı düğüm noktası deplasman değerleri (3. yükleme durumu)

Şekil 41'deki grafikte, analiz sonucunda yapı elemanlarında oluşan gerilme düzeylerinin, bu elemanların taşıma kapasiteleriyle karşılaştırılması sonucu elde edilen dayanım oranları gösterilmiştir. Birinci ve ikinci yükleme durumlarında, analiz edilen tüm yapı elemanları, malzeme kapasitelerinin altında kalacak şekilde gerilmelere maruz kalmıştır. Bu durum, yapının genel güvenliğini koruduğunu ve yeterli taşıma gücüne sahip olduğunu göstermektedir. Üçüncü yükleme durumu ise önceki iki duruma kıyasla daha kritik bir tablo ortaya koymuştur. Bu yükleme senaryosunda, 104, 140 ve 149 numaralı elemanların dayanım oranları önemli ölçüde artmış ve bu elemanlar, taşıma kapasitelerine oldukça yaklaşmıştır.



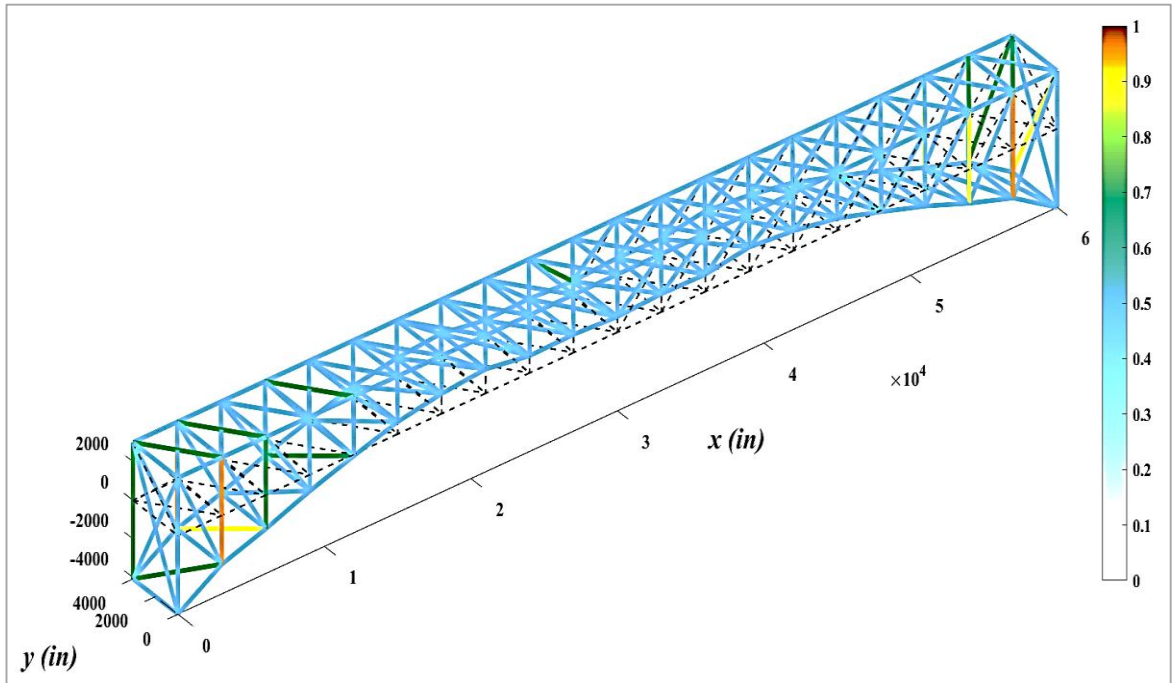
Şekil 41. 288 elemanlı kafes eleman dayanım oranları

Şekil 42’de verilen grafik, optimizasyon süreci boyunca analizler sırasında yapı ağırlığında meydana gelen değişimi göstermektedir. Bu kafes yapı özelinde toplamda 90.000 analiz gerçekleştirilmiş olup analiz sayısının bu denli yüksek olması, çözüm uzayının oldukça geniş bir aralıkta araştırıldığını ve algoritmanın hem global hem de yerel arama stratejilerini etkili biçimde uyguladığını göstermektedir. Yakınsama davranışının daha net gözlemlenebilmesi amacıyla algoritmanın en hızlı iyileşme sağladığı bölge, sağ üst köşede yer alan yakınlaştırılmış grafikte verilmiştir. Bu bölgedeki eğri, LPO algoritmasının ilk aşamalarda çözüm uzayında yüksek hızla hareket ederek kaba arama yaptığı, ardından optimal bölgeye yaklaştıkça çözümleme hızının yavaşladığı hassas arama fazına geçtiğini göstermektedir. Bu sürece göre, optimizasyon başlangıcında yapı yaklaşık 27.500 ton gibi oldukça yüksek bir başlangıç ağırlığına sahipken, yalnızca 5.000 analiz sonrasında ağırlık önemli ölçüde azalarak 50.000 kg seviyelerine gerilemiştir. Bu hızlı düşüş, algoritmanın erken evrede yüksek verimlilikle yakınsamaya ulaştığını ve etkin bir çözüm üretme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. 5.000 analiz sonrasındaki süreçte ise, ağırlıktaki değişim oranının belirgin şekilde azaldığı, dolayısıyla algoritmanın artık çözüm uzayının optimum bölgesinde daha hassas bir arama gerçekleştirdiğini göstermektedir. Optimizasyon sürecinin sonunda ise yapı ağırlığı 12.678,75 kg bulunmuştur.



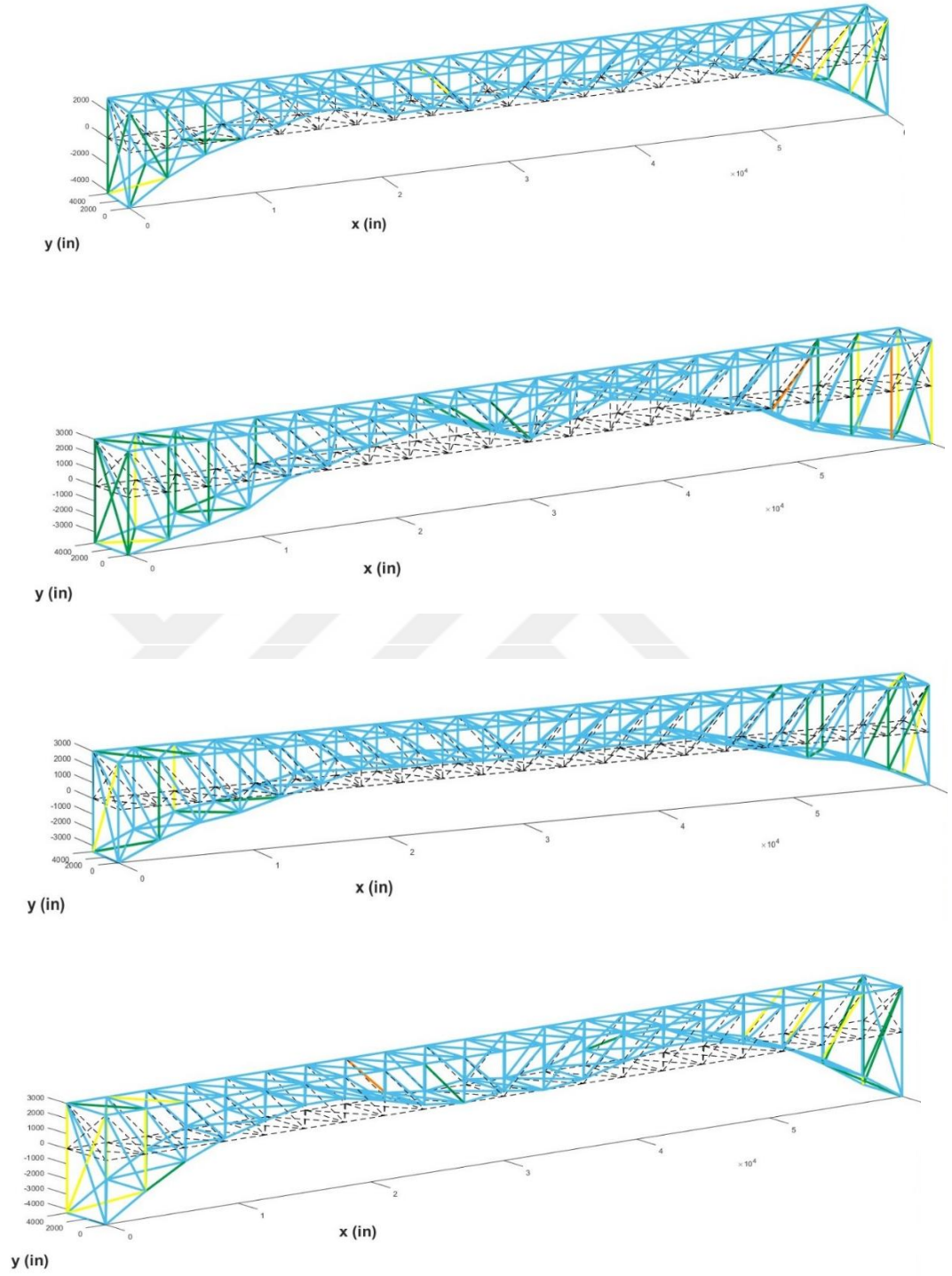
Şekil 42. 288 elemanlı kafes yapı yakınsama süreci

Şekil 43'te, optimizasyon süreci sonucunda elde edilen en iyi yapısal tasarıma ait nihai geometri sunulmuştur. Her bir elemanın maruz kaldığı gerilme düzeylerinin, sınır gerilme değerlerine ne ölçüde yaklaştığını gösteren renk skalası incelendiğinde, yapı genelinde yalnızca birkaç eleman dışında tüm elemanların izin verilen sınır değerlerin altında kaldığı ve yapısal dayanım açısından herhangi bir aşırı zorlanmanın oluşmadığı görülmektedir. Bu sonuç, LPO algoritmasının yalnızca çözüm uzayında hızlı bir şekilde optimum tasarıma ulaşma kapasitesine sahip olmadığını, aynı zamanda elde edilen çözümlerin yapısal güvenlik ve performans kriterlerini de başarıyla karşıladığını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, LPO algoritması hem hesaplama verimliliği hem de güvenli mühendislik tasarımı açısından dengeli ve etkili bir optimizasyon yaklaşımı sunmaktadır.



Şekil 43. 288 elemanlı kafes yapıya ait nihai tasarım

Analiz sonucu elde edilen alternatif optimum tasarımlar Şekil 44'te verilmiştir.



Şekil 44. 288 elemanlı kafes yapı için alternatif optimum tasarımlar

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, çelik kafes yapıların enkesit ve şekil optimizasyonu üzerine Akciğer Performansına Dayalı Optimizasyon (LPO) algoritmasının etkinliği kapsamlı bir biçimde değerlendirilmiş; elde edilen bulgular, literatürde yer alan farklı optimizasyon yöntemleri ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen sayısal uygulamalar neticesinde, LPO algoritmasının çelik kafes yapı tasarımında hem yapısal verimliliği hem de mühendislik performansını artırmada önemli avantajlar sunduğu ortaya konmuştur. Enkesit optimizasyonu kapsamında, farklı karmaşıklık düzeylerindeki yapılar üzerinde yapılan analizler — 25 elemanlı uzay kafes, 72 elemanlı uzay kafes, 200 elemanlı düzlem kafes ve 942 elemanlı uzay kafes sistemleri — LPO algoritmasının taşıma kapasitesini artırırken aynı zamanda yapısal güvenliği koruduğunu göstermiştir. Özellikle büyük ölçekli sistemlerde (200 ve 942 elemanlı modeller), LPO algoritması, daha düşük yapısal ağırlıklar elde ederek literatürdeki diğer algoritmalara kıyasla daha verimli çözümler üretmiştir. Şekil optimizasyonuna yönelik olarak 15 ve 18 elemanlı düzlem kafesler ile 25 ve 288 elemanlı uzay kafes sistemleri üzerinde yapılan çalışmalar, LPO algoritmasının geometrik düzeni iyileştirerek daha dengeli, yüksek performanslı ve malzeme kullanım açısından daha etkin tasarımlar elde edilmesini mümkün kıldığını göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, LPO'nun yapısal dayanıklılığı artırırken gereksiz malzeme kullanımını da minimize edebildiğini açıkça ortaya koymuştur.

Genel olarak değerlendirildiğinde, LPO algoritması çözüm uzayında hızlı bir şekilde optimum tasarıma ulaşabilen ve yapısal güvenlik, taşıma kapasitesi gibi mühendislik kriterlerini başarıyla karşılayan bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Hem enkesit hem de şekil optimizasyonu süreçlerinden elde edilen bulgular, LPO algoritmasının çok sayıda parametreyi eşzamanlı olarak dikkate alabilme becerisi sayesinde, mevcut optimizasyon yöntemlerine kıyasla üstün bir tasarım stratejisi sunduğunu ortaya koymaktadır. Yapılan karşılaştırmalı analizler, LPO'nun özellikle büyük ölçekli ve yüksek karmaşıklıkta sistemlerde küresel-optimuma yakın sonuçlar üretme potansiyelinin yüksek olduğunu ve güçlü bir küresel-yerel arama yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir. Yerel minimumlara takılmadan ilerleyebilmesi, algoritmayı mühendislik tasarımı açısından oldukça cazip ve etkili bir çözüm aracı haline getirmektedir. Bu bağlamda, akciğerlerin biyolojik performansından ilham alan LPO algoritması, gelecekte hem teorik çalışmalar hem de pratik mühendislik uygulamaları açısından önemli katkılar sağlayabilecek yenilikçi ve esnek bir optimizasyon yaklaşımı olarak öne çıkmaktadır.

Gelecek araştırmalarda LPO algoritması, elik ereve sistemlerin optimum tasarımı, istinat duvarlarının geometri eniyilemesi veya maliyet minimizasyonu, su dağıtım şebekelerinde optimum boru çapı seçimi gibi farklı inşaat mühendisliği problemlerine uygulanabilir. Ayrıca adaptif parametre ayarlama, yerel arama teknikleri ve çok-ölçekli popülasyon stratejileri gibi iyileştirmelerle mevcut algoritmanın yakınsama hızı ve çözüm kalitesi artırılabilir.



KAYNAKÇA

- Awad, R. (2021). Sizing optimization of truss structures using the political optimizer (PO) algorithm. *Structures*, 33, 4871-4894.
- Azizi, M., Khorsidi, H., & Shishehgarkhaneh, M. B. (2022). Shape and size optimization of truss structures by Chaos Game Optimization considering frequency constraints. *Journal of Advanced Research*, 41, 89-100.
- Azizi, M., Shishehgarkhaneh, M. B., & Basiri, M. (2022). Optimum design of truss structures by Material Generation Algorithm with discrete variables. *Decision Analytics Journal*, 3, 100043.
- Bekdaş, G., Niğdeli, S. M., & Yang, X.-S. (2015). Sizing optimization of truss structures using Flowers Pollination Algorithm. *Applied Soft Computing*, 37, 322-331.
- Bekdaş, G., Yücel, M., & Niğdeli, S. (2021). Evaluation of Metaheuristic-Based Methods for Optimization of Truss Structures via Various Algorithms and Lévy Flight Modification. *Buildings*, 11(2), 49.
- Bureerat, S., & Pholdee, N. (2016). Optimal Truss Sizing Using an Adaptive Differential Evolution Algorithm. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 30(2), 04015019.
- Camp, C., & Farshchin, M. (2014). Design of space trusses using modified teaching–learning based optimization. *Engineering Structures*, 62, 87-97.
- Cao, H., Sun, W., Chen, Y., Kong, F., & Liuyang, F. (2023). Sizing and shape optimization of truss employing a hybrid constraint-handling technique and manta ray foraging optimization. *Expert Systems with Applications*, 213, 118999.
- Dede, T., Bekiroğlu, S., & Ayvaz, Y. (2011). Weight minimization of trusses with genetic algorithm. *Applied Soft Computing*, 11(2), 2565-2575.
- Degertekin, S. O., Minooei, M., Santoro, L., Trentadue, B., & Lamberti, L. (2021). Large-Scale Truss-Sizing Optimization with Enhanced Hybrid HS Algorithm. *Applied Sciences*, 11(7), 3270.
- Değertekin, S. Ö. (2012). Improved harmony search algorithms for sizing optimization of truss structures. *Computers & Structures*, 92, 229-241.

- Değertekin, S. Ö., & Bayar, G. (2021). Parameter free Jaya algorithm for truss sizing-layout optimization under natural frequency constraints. *Computers & Structures*, 245, 106461.
- Değertekin, S. Ö., & Hayalioğlu. (2013). Sizing truss structures using teaching-learning-based optimization. *Computers & Structures*, 119, 177-188.
- Değertekin, S., Lamberti, L., & Uğur, İ. B. (2018). Sizing, layout and topology design optimization of truss structures using the Jaya algorithm. *Applied Soft Computing*, 70, 903-928.
- Dehghani, M., Mashayekhi, M., & Sharifi, M. (2021). An efficient imperialist competitive algorithm with likelihood assimilation for topology, shape and sizing optimization of truss structures. *Applied Mathematical Modelling*, 93, 1-27.
- Fleck Fadel Miguel, L., Lopez, R. H., & Fleck Fadel Miguel, L. (2013). Multimodal size, shape and topology optimisation of truss structures using the Firefly algorithm. *Advances in Engineer Software*, 56, 23-37.
- Fuat Erbatur, O. H. (2000). Optimal design of planar and space structures with genetic algorithms. *Computers & Structures*, 75(2), 209-224.
- Gandomi, A. H., & Talatahari, S. (2013). Design optimization of truss structures using cuckoo search algorithm. *The structural design of tall and special buildings*, 22(17), 1330-1349.
- Ghasemi, M., Zare, M., Zahedi, A., Trojovsky, P., Abualigah, L., & Trojovska, E. (2024). Optimization based on performance of lungs in body: Lungs performance-based optimization (LPO). *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 419, 116582.
- Gholizadeh, S. (2013). Layout optimization of truss structures by hybridizing cellular automata and particle swarm optimization. *Computers and Structures*, 125, 86-99.
- Gholizadeh, S., Barzegar, & Gheyratmand. (2011). Shape optimization of structures by modified harmony search. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 1(3), 485-494.
- Grzywinski, M. (2020). Size and shape design optimization of truss structures using the Jaya algorithm. *Computer Assisted Methods in Engineering and Science*, 27(2-3), 177-184.

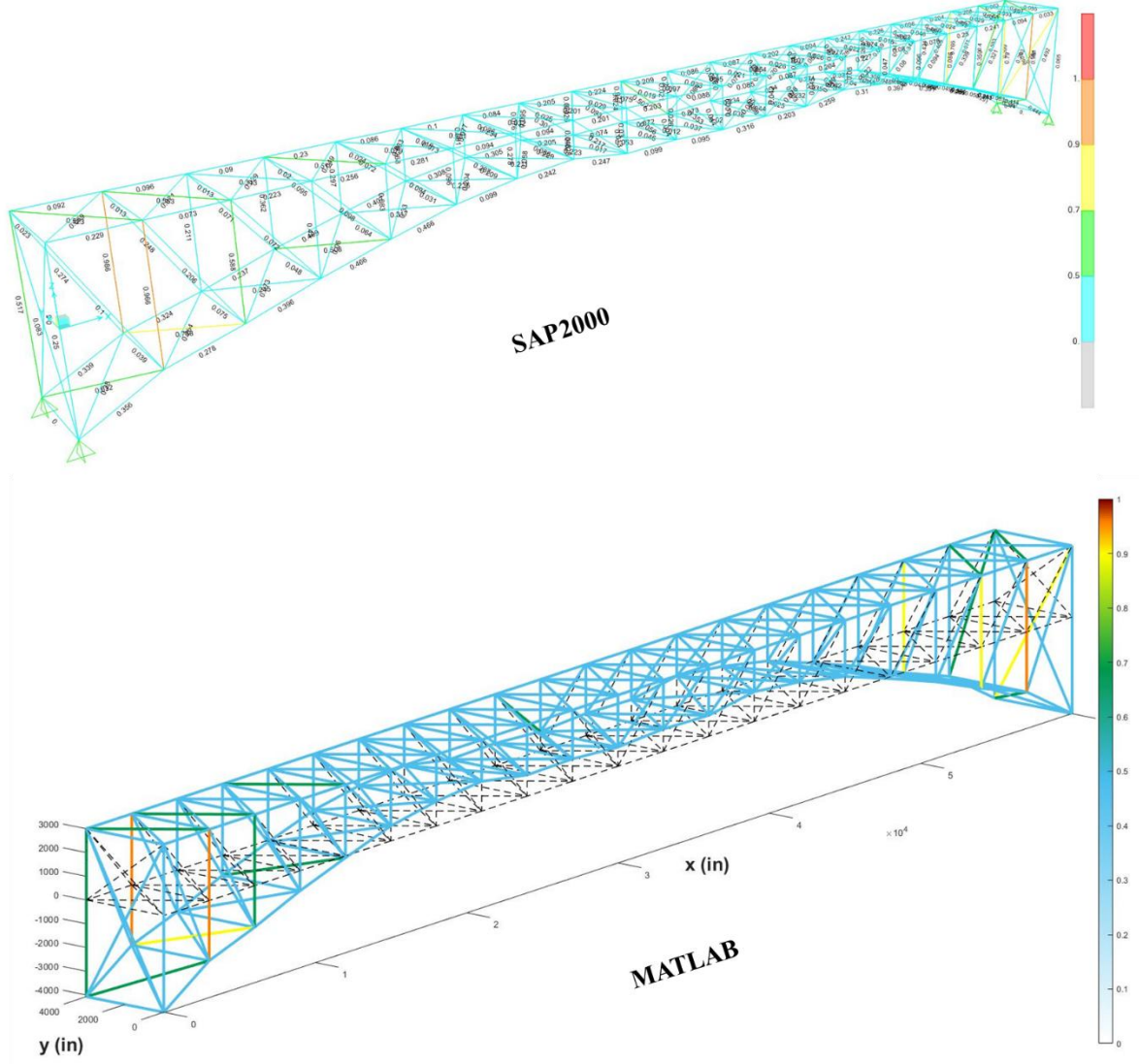
- Ho-Huu, Nguyen-Thoi, & Le-Anh. (2015). An improved constrained differential evolution using discrete variables (D-ICDE) for layout optimization of truss structures. *Expert Systems with Applications*, 42(20), 7057-7069.
- Hwang, S.-F., & He, R.-S. (2006). A hybrid real-parameter genetic algorithm for function optimization. *Advanced Engineering Informatics*, 20(1), 7-21.
- Ingrid Delyová, P. F. (2021). Sizing and topology optimization of trusses using Genetic Algorithm. *Materials*, 14(4), 715.
- Jawad, F., Öztürk, C., Dansheng, W., Mahmood, M., Al-Azawi, O., & Al-Jamaley, A. (2021). Sizing and layout optimization of truss structures with artificial bee colony algorithm. *Structures*, 30, 546-559.
- Kaveh, A., & Bakhshpoori, T. (2016). A new metaheuristic for continuous structural optimization: water evaporation optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 54(1), 23-43.
- Kaveh, A., & Hosseini, S. M. (2022). Discrete and Continuous Sizing Optimization of Large-Scale Truss Structures Using Doppler Effect-Mean Euclidian Distance Threshold (DE-MEDT) Algorithm. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 12(3), 335-364.
- Kaveh, A., & Kalatjari. (2004). Size/geometry optimization of trusses by the force method and genetic algorithm. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 84(5), 347-357.
- Kaveh, A., & Talatahari, S. (2009). Particle swarm optimizer, ant colony strategy and harmony search scheme hybridized for optimization of truss structures. *Computers & Structures*, 87(5-6), 267-283.
- Kaveh, A., Bakhshpoori, T., & Afshari, E. (2014). An efficient hybrid Particle Swarm and Swallow Swarm Optimization Algorithm. *Computers & Structures*(143), 40-59.
- Kaveh, A., Ghazaan, M., & Bakhshpoori, T. (2013). An improved ray optimization algorithm for design of truss structures. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 57(2), 97-112.
- Kaveh, A., Zaerreza, A., & Zaerreza, J. (2023). Enhanced Dandelion Optimizer for Optimum Design of Steel Frames. *Iranian Journal of Science and Technology*, 47(5), 2591-2604.

- Khodadadi, N., Harati, E., De Caso, F., & Nanni, A. (2023). Optimizing Truss Structures Using Composite Materials under Natural Frequency Constraints with a New Hybrid Algorithm Based on Cuckoo Search and Stochastic Paint Optimizer (CSSPO). *Buildings*, 13(6), 1551.
- Lamberti, L. (2008). An efficient simulated annealing algorithm for design optimization of truss structures. *Computers & Structures*, 86(19-20), 1936-1953.
- Lee, K. S., & Geem, Z. W. (2004). A new structural optimization method based on the harmony search algorithm. *Computers & Structures*, 82(9-10), 781-798.
- Li, Huang, & Wu. (2007). A heuristic particle swarm optimizer for optimization of pin connected structures. *Computers & Structures*, 85(7-8), 340-349.
- Li, L., & Liu, F. (2011). *Group Search Optimization for Applications in Structural Design*. Berlin: Springer.
- Oğuzhan Hasançebi, F. E. (2002). On efficient use of simulated annealing in complex structural optimization problems. *Acta Mechanica*, 157(1), 27-50.
- Omidinasab, F., & Goodarzimehr, V. (2020). A Hybrid Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm for Truss Structures with Discrete Variables. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 6(3), 593-604.
- Perez, R., & Behdinan, K. (2007). Particle swarm approach for structural design optimization. *Computer & Structures*, 85(19-20), 1579-1588.
- Pham, H.-A., & Tran, T.-D. (2022). Optimal truss sizing by modified Rao algorithm combined with feasible boundary search method. *Expert Systems with Applications*, 191, 116337.
- Pham, V. S., Dang, N. N., & Nguyen, V. N. (2024). Geometric mean optimizer for achieving efficiency in truss structural design. *Evolutionary Intelligence*, 17(4), 2453-2466.
- Pirezani, J., Coelho, L., & Mariani, V. (2021). Chaotic coyote algorithm applied to truss optimization problems. *Computers & Structures*, 242, 106353.
- Rahami, H., Kaveh, A., & Gholipour, Y. (2008). Sizing, geometry and topology optimization of trusses via force method and genetic algorithm. *Engineering Structures*, 30(9), 2360-2369.

- Rahami, H., Kaveh, A., Aslani, M., & Asl, R. (2011). A hybrid modified Genetic-Nelder Mead Simplex algorithm for large-scale truss optimization. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 1(1), 29-46.
- Serpik, I. (2020). Discrete size and shape optimization of truss structures based on job search inspired strategy and genetic operations. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64(3), 801-814.
- Sönmez, M. (2011). Artificial Bee Colony algorithm for optimization of truss structures. *Applied Soft Computing*, 11(2), 2406-2418.
- Talatahari, S., Gandomi, A., & Yun, G. (2012). Optimum design of tower structures using firefly algorithm. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(5), 350-361.
- Tang, W., Tong, L., & Gu, Y. (2005). Improved genetic algorithm for design optimization of truss structures with sizing, shape and topology variables. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 62(13), 1737-1762.
- Tayfun Dede, Y. A. (2015). Combined size and shape optimization of structures with a new meta-heuristic algorithm. *Applied Soft Computing*, 28, 250-258.
- Uğur, İ. B. (2017, Haziran). Ayrık ve Sürekli Tasarım Değişkenli Kafes Yapıların Jaya Algoritması ile Optimizasyonu. *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*.
- Van, T., Tangaramvong, S., Moun, S., & Van, T. P. (2022). Combined Gaussian Local Search and Enhanced Comprehensive Learning PSO Algorithm for Size and Shape Optimization of Truss Structures. *Buildings*, 12(11), 1976.
- Wang, H., Wang, W., & Wu, Z. (2013). Particle swarm optimization with adaptive mutation for multimodal optimization. *Applied Mathematics and Computation*, 221, 296-305.
- Yassami, M., & Ashtari, P. (2024). Optimal Design of Truss Using a Hybrid Method Based on Particle Swarm Optimizer and Harris Hawk Algorithm. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 18(1).

EKLER

Ek 1. Kafes Yapılar İçin Geliştirilen MATLAB Tabanlı Analiz Programının SAP2000 ile Karşılaştırmalı Doğrulaması (AISC-LRFD93'ye Göre Tasarım Kontrolü)



Ek 2. Kafes Yapılar İçin Geliştirilen MATLAB Tabanlı Analiz Programının SAP2000 ile Karşılaştırmalı Doğrulaması (Eleman Uç Kuvvetleri)

Eleman No.	MATLAB			SAP2000		
	1. Yükleme Durumu (N)	2. Yükleme Durumu (N)	3. Yükleme Durumu (N)	1. Yükleme Durumu (N)	2. Yükleme Durumu (N)	3. Yükleme Durumu (N)
1	85432.57	93121.13	-216475.43	85432.57	93121.13	-216475.43
2	92390.97	67172.10	-210818.46	92390.97	67172.1	-210818.46
3	94076.86	39792.61	-189546.43	94076.86	39792.61	-189546.43
4	96392.11	14044.19	-166712.40	96392.11	14044.19	-166712.4
5	102236.13	-6289.83	-146218.79	102236.13	-6289.83	-146218.79
6	111512.70	-28213.03	-122535.43	111512.7	-28213.03	-122535.43
7	105527.17	-47357.28	-78105.75	105527.17	-47357.28	-78105.75
8	89183.47	-60949.64	-29451.65	89183.47	-60949.64	-29451.65
9	48686.68	-55457.35	10857.66	48686.68	-55457.35	10857.66
10	24885.38	-60270.50	33084.77	24885.38	-60270.5	33084.77
11	-22121.13	-59046.44	34764.63	-22121.13	-59046.44	34764.63
12	-46009.70	-56809.67	14962.66	-46009.7	-56809.67	14962.66
13	-86543.59	-61805.90	-21290.06	-86543.59	-61805.9	-21290.06
14	-103969.12	-47430.46	-69651.41	-103969.12	-47430.46	-69651.41
15	-107505.12	-27315.46	-110850.78	-107505.12	-27315.46	-110850.78
16	-103084.69	-7391.29	-140023.80	-103084.69	-7391.29	-140023.8
17	-98675.07	15909.69	-163892.83	-98675.07	15909.69	-163892.83
18	-92643.96	40152.02	-179701.80	-92643.96	40152.02	-179701.8
19	-90250.05	67396.31	-198655.05	-90250.05	67396.31	-198655.05
20	-85477.30	94408.93	-208985.17	-85477.3	94408.93	-208985.17
21	0.00	0.00	0.00	0	0	0
22	7375.89	28122.22	-20055.51	7375.89	28122.22	-20055.51
23	8321.04	-21338.05	-19473.66	8321.04	-21338.05	-19473.66
24	-8519.43	-2049.37	20740.37	-8519.43	-2049.37	20740.37
25	2730.04	20700.02	-7404.23	2730.04	20700.02	-7404.23
26	3644.16	-22076.18	-6841.49	3644.16	-22076.18	-6841.49
27	-6726.67	249.49	14166.21	-6726.67	249.49	14166.21
28	4886.05	19310.57	-11126.39	4886.05	19310.57	-11126.39
29	5803.98	-18562.57	-10561.30	5803.98	-18562.57	-10561.3
30	-12604.79	-2928.64	23278.02	-12604.79	-2928.64	23278.02
31	10161.23	19650.21	-18921.88	10161.23	19650.21	-18921.88
32	11074.88	-12988.48	-18359.43	11074.88	-12988.48	-18359.43
33	-16864.87	-2353.31	26451.51	-16864.87	-2353.31	26451.51
34	10235.78	13416.69	-15066.40	10235.78	13416.69	-15066.4
35	11148.17	-14126.14	-14504.72	11148.17	-14126.14	-14504.72
36	-13678.35	86.38	17459.85	-13678.35	86.38	17459.85
37	6081.70	11413.09	-7490.37	6081.7	11413.09	-7490.37
38	6987.85	-10925.13	-6932.54	6987.85	-10925.13	-6932.54
39	-12064.27	-869.99	10706.25	-12064.27	-869.99	10706.25
40	8122.64	9485.84	-6478.73	8122.64	9485.84	-6478.73
41	9026.68	-7795.69	-5922.20	9026.68	-7795.69	-5922.2
42	-13216.98	-506.08	6369.73	-13216.98	-506.08	6369.73
43	7522.53	5936.67	-2050.77	7522.53	5936.67	-2050.77
44	8428.11	-6361.19	-1493.29	8428.11	-6361.19	-1493.29
45	-9927.81	404.60	471.37	-9927.81	404.6	471.37
46	4003.92	3338.95	900.21	4003.92	3338.95	900.21
47	4907.17	-3927.08	1456.27	4907.17	-3927.08	1456.27
48	-5287.85	-108.97	-3342.85	-5287.85	-108.97	-3342.85

49	1703.49	1563.65	2723.33	1703.49	1563.65	2723.33
50	2607.02	-702.82	3279.55	2607.02	-702.82	3279.55
51	101.71	1179.55	-5315.19	101.71	1179.55	-5315.19
52	-2734.19	-3273.02	3366.78	-2734.19	-3273.02	3366.78
53	-1830.67	-537.72	3923.01	-1830.67	-537.72	3923.01
54	5462.46	256.04	-4148.33	5462.46	256.04	-4148.33
55	-4998.30	-2282.63	1263.85	-4998.3	-2282.63	1263.85
56	-4095.05	5452.08	1819.91	-4095.05	5452.08	1819.91
57	9274.58	-1764.79	366.26	9274.58	-1764.79	366.26
58	-7518.06	-5760.91	-2283.62	-7518.06	-5760.91	-2283.62
59	-6612.48	7006.85	-1726.14	-6612.48	7006.85	-1726.14
60	10803.29	-676.96	5278.91	10803.29	-676.96	5278.91
61	-6915.30	-8650.24	-4881.50	-6915.3	-8650.24	-4881.5
62	-6011.26	9100.39	-4324.97	-6011.26	9100.39	-4324.97
63	12554.28	1367.06	11749.72	12554.28	1367.06	11749.72
64	-9718.68	-13344.20	-10399.92	-9718.68	-13344.2	-10399.92
65	-8812.53	9464.21	-9842.09	-8812.53	9464.21	-9842.09
66	12360.36	757.66	15357.89	12360.36	757.66	15357.89
67	-6734.31	-13011.48	-9482.66	-6734.31	-13011.48	-9482.66
68	-5821.92	15004.78	-8920.99	-5821.92	15004.78	-8920.99
69	8499.24	-921.96	13442.55	8499.24	-921.96	13442.55
70	-4916.91	-16388.64	-8064.13	-4916.91	-16388.64	-8064.13
71	-4003.26	16724.14	-7501.68	-4003.26	16724.14	-7501.68
72	8009.98	-179.76	15244.35	8009.98	-179.76	15244.35
73	-6153.67	-19114.89	-11829.23	-6153.67	-19114.89	-11829.23
74	-5235.74	19234.55	-11264.14	-5235.74	19234.55	-11264.14
75	8430.14	241.07	17999.03	8430.14	241.07	17999.03
76	-5450.98	-21989.83	-11553.21	-5450.98	-21989.83	-11553.21
77	-4536.86	21260.70	-10990.47	-4536.86	21260.7	-10990.47
78	8850.84	-1591.12	21307.38	8850.84	-1591.12	21307.38
79	-6886.40	-22517.16	-16507.37	-6886.4	-22517.16	-16507.37
80	-5941.26	27433.53	-15925.53	-5941.26	27433.53	-15925.53
81	0.00	0.00	0.00	0	0	0
82	85105.84	-96588.87	-206072.57	85105.84	-96588.87	-206072.57
83	90865.64	-65265.11	-200461.47	90865.64	-65265.11	-200461.47
84	91400.54	-39001.56	-179270.27	91400.54	-39001.56	-179270.27
85	92558.96	-16592.57	-156192.08	92558.96	-16592.57	-156192.08
86	97345.57	8622.79	-135302.28	97345.57	8622.79	-135302.28
87	105772.51	30346.35	-110929.70	105772.51	30346.35	-110929.7
88	99793.95	49250.08	-66682.60	99793.95	49250.08	-66682.6
89	84333.87	64486.02	-19164.61	84333.87	64486.02	-19164.61
90	45803.74	58508.26	17044.35	45803.74	58508.26	17044.35
91	23007.46	62519.16	37061.04	23007.46	62519.16	37061.04
92	-20873.47	64099.80	34608.55	-20873.47	64099.8	34608.55
93	-43741.64	57605.83	12502.94	-43741.64	57605.83	12502.94
94	-82441.61	64335.36	-27045.48	-82441.61	64335.36	-27045.48
95	-98898.76	50068.48	-77056.74	-98898.76	50068.48	-77056.74
96	-102318.23	32084.62	-119102.82	-102318.23	32084.62	-119102.82
97	-98627.10	8073.99	-148315.98	-98627.1	8073.99	-148315.98
98	-95190.29	-14586.40	-172301.55	-95190.29	-14586.4	-172301.55
99	-90253.06	-38973.46	-188247.97	-90253.06	-38973.46	-188247.97
100	-88967.22	-65885.65	-207542.18	-88967.22	-65885.65	-207542.18
101	-85356.93	-96672.65	-218137.23	-85356.93	-96672.65	-218137.23
102	-14148.81	25755.72	2596.79	-14148.81	25755.72	2596.79
103	29944.77	14031.04	-9890.67	29944.77	14031.04	-9890.67
104	-8485.08	3853.75	-36808.30	-8485.08	3853.75	-36808.3
105	10035.21	-4557.79	37619.34	10035.21	-4557.79	37619.34
106	-12771.88	2391.17	-24069.12	-12771.88	2391.17	-24069.12
107	16200.53	-3033.08	24188.28	16200.53	-3033.08	24188.28
108	-9801.75	4167.67	-26858.96	-9801.75	4167.67	-26858.96

109	13678.92	-5816.23	30505.49	13678.92	-5816.23	30505.49
110	-9530.28	5228.26	-24673.80	-9530.28	5228.26	-24673.8
111	15385.46	-8440.38	31760.93	15385.46	-8440.38	31760.93
112	370.76	4617.40	-33658.80	370.76	4617.4	-33658.8
113	-677.11	-8432.58	52338.40	-677.11	-8432.58	52338.4
114	7944.49	2941.98	-34724.02	7944.49	2941.98	-34724.02
115	-15775.10	-5841.78	59021.95	-15775.1	-5841.78	59021.95
116	27095.33	-7649.71	-34226.30	27095.33	-7649.71	-34226.3
117	-47079.46	13291.75	50782.12	-47079.46	13291.75	50782.12
118	14939.87	1008.64	-20774.48	14939.87	1008.64	-20774.48
119	-26379.67	-1780.98	27853.35	-26379.67	-1780.98	27853.35
120	16942.36	-2574.56	-9044.37	16942.36	-2574.56	-9044.37
121	-28698.13	4360.97	6850.62	-28698.13	4360.97	6850.62
122	0.00	0.00	-5000.00	0	0	-5000
123	28496.78	4755.84	4706.57	28496.78	4755.84	4706.57
124	-16823.49	-2807.68	-7778.59	-16823.49	-2807.68	-7778.59
125	26456.50	-1383.00	25922.66	26456.5	-1383	25922.66
126	-14983.38	783.25	-19681.05	-14983.38	783.25	-19681.05
127	46414.88	13788.86	47146.12	46414.88	13788.86	47146.12
128	-26712.85	-7935.81	-32133.70	-26712.85	-7935.81	-32133.7
129	16175.22	-5407.03	58142.54	16175.22	-5407.03	58142.54
130	-8146.00	2723.03	-34281.14	-8146	2723.03	-34281.14
131	1252.17	-8130.06	52598.25	1252.17	-8130.06	52598.25
132	-685.65	4451.76	-33801.09	-685.65	4451.76	-33801.09
133	-14694.61	-8270.44	33244.22	-14694.61	-8270.44	33244.22
134	9102.34	5122.99	-25592.60	9102.34	5122.99	-25592.6
135	-13168.18	-5700.74	31705.74	-13168.18	-5700.74	31705.74
136	9435.77	4084.91	-27719.01	9435.77	4084.91	-27719.01
137	-15753.94	-2944.57	25539.38	-15753.94	-2944.57	25539.38
138	12419.81	2321.39	-25134.27	12419.81	2321.39	-25134.27
139	-9727.62	-4499.76	38299.76	-9727.62	-4499.76	38299.76
140	8225.00	3804.68	-37383.61	8225	3804.68	-37383.61
141	-29487.25	14198.81	-7199.55	-29487.25	14198.81	-7199.55
142	15692.35	30544.95	695.29	15692.35	30544.95	695.29
143	-12563.84	41825.88	941.12	-12563.84	41825.88	941.12
144	-13985.00	-43760.16	1260.44	-13985	-43760.16	1260.44
145	10328.42	35595.88	1046.68	10328.42	35595.88	1046.68
146	11749.58	-49431.90	727.37	11749.58	-49431.9	727.37
147	-15198.06	-24485.88	223.44	-15198.06	-24485.88	223.44
148	29731.20	-13560.31	-6874.42	29731.2	-13560.31	-6874.42
149	-8482.28	-4121.34	-37568.43	-8482.28	-4121.34	-37568.43
150	10031.91	4874.26	38518.35	10031.91	4874.26	38518.35
151	-12683.12	-2753.40	-25384.47	-12683.12	-2753.4	-25384.47
152	16087.95	3492.57	25856.74	16087.95	3492.57	25856.74
153	-9844.36	-4544.22	-27979.09	-9844.36	-4544.22	-27979.09
154	13738.39	6341.72	32068.69	13738.39	6341.72	32068.69
155	-9650.53	-5668.55	-25896.71	-9650.53	-5668.55	-25896.71
156	15579.60	9151.18	33735.16	15579.6	9151.18	33735.16
157	-319.00	-4941.38	-34024.86	-319	-4941.38	-34024.86
158	582.58	9024.24	53006.91	582.58	9024.24	53006.91
159	6785.69	-3149.30	-34424.33	6785.69	-3149.3	-34424.33
160	-13474.11	6253.45	58426.88	-13474.11	6253.45	58426.88
161	24972.87	8043.24	-31861.89	24972.87	8043.24	-31861.89
162	-43391.58	-13975.51	46673.85	-43391.58	-13975.51	46673.85
163	13503.49	-1053.41	-19711.97	13503.49	-1053.41	-19711.97
164	-23843.42	1860.03	25977.26	-23843.42	1860.03	25977.26
165	15390.08	2696.86	-7694.12	15390.08	2696.86	-7694.12
166	-26068.78	-4568.13	4563.49	-26068.78	-4568.13	4563.49
167	0.00	0.00	-5000.00	7.902E-12	0	-5000
168	25914.65	-4963.00	6707.54	25914.65	-4963	6707.54

169	-15299.09	2929.98	-8959.89	-15299.09	2929.98	-8959.89
170	23902.23	1462.05	27907.95	23902.23	1462.05	27907.95
171	-13536.80	-828.02	-20805.40	-13536.8	-828.02	-20805.4
172	42882.83	-14472.63	50309.85	42882.83	-14472.63	50309.85
173	-24680.07	8329.34	-33954.50	-24680.07	8329.34	-33954.5
174	13780.41	5818.69	59306.29	13780.41	5818.69	59306.29
175	-6939.94	-2930.35	-34867.21	-6939.94	-2930.35	-34867.21
176	-142.36	8721.73	52747.06	-142.36	8721.73	52747.06
177	77.95	-4775.73	-33882.57	77.95	-4775.73	-33882.57
178	-15050.74	8981.23	32251.87	-15050.74	8981.23	32251.87
179	9322.94	-5563.28	-24977.90	9322.94	-5563.28	-24977.9
180	-13347.40	6226.23	30868.44	-13347.4	6226.23	30868.44
181	9564.19	-4461.46	-27119.04	9564.19	-4461.46	-27119.04
182	-15746.08	3404.05	24505.64	-15746.08	3404.05	24505.64
183	12413.61	-2683.63	-24319.31	12413.61	-2683.63	-24319.31
184	-9796.44	4816.23	37837.93	-9796.44	4816.23	37837.93
185	8283.18	-4072.27	-36993.12	8283.18	-4072.27	-36993.12
186	-29380.95	-13728.08	-9565.54	-29380.95	-13728.08	-9565.54
187	16835.90	-18915.81	2497.06	16835.9	-18915.81	2497.06
188	-17156.27	-20658.29	4128.95	-17156.27	-20658.29	4128.95
189	-26841.52	-45988.14	-14025.05	-26841.52	-45988.14	-14025.05
190	-40029.15	-70445.81	-27769.82	-40029.15	-70445.81	-27769.82
191	-54533.61	-85846.99	-48676.82	-54533.61	-85846.99	-48676.82
192	-70155.28	-94150.46	-72309.25	-70155.28	-94150.46	-72309.25
193	-75508.03	-104800.75	-116234.94	-75508.03	-104800.75	-116234.94
194	-67141.62	-109983.42	-167284.96	-67141.62	-109983.42	-167284.96
195	-34057.27	-131829.09	-208815.97	-34057.27	-131829.09	-208815.97
196	-16939.52	-136152.58	-230470.51	-16939.52	-136152.58	-230470.51
197	1321.74	-142937.79	-236746.90	1321.74	-142937.79	-236746.89
198	-3030.71	-142869.00	-237167.15	-3030.71	-142869	-237167.15
199	15139.88	-136025.84	-233230.59	15139.88	-136025.84	-233230.59
200	32242.94	-131501.32	-211459.44	32242.94	-131501.32	-211459.44
201	64754.95	-110965.95	-172472.41	64754.95	-110965.95	-172472.41
202	73002.47	-104886.88	-121414.84	73002.47	-104886.88	-121414.84
203	69423.16	-97022.27	-78572.47	69423.16	-97022.27	-78572.47
204	53606.06	-83834.55	-52919.01	53606.06	-83834.55	-52919.01
205	39846.22	-67689.17	-31170.19	39846.22	-67689.17	-31170.19
206	25417.16	-48942.83	-15490.93	25417.16	-48942.83	-15490.93
207	17607.88	-22071.29	2734.73	17607.88	-22071.29	2734.73
208	8381.59	920.96	-1403.46	8381.59	920.96	-1403.46
209	-1870.27	23279.89	978.62	-1870.27	23279.89	978.62
210	-2744.89	-24391.89	1175.14	-2744.89	-24391.89	1175.14
211	3955.59	9.21	695.77	3955.59	9.21	695.77
212	-2199.60	21880.38	-2044.85	-2199.6	21880.38	-2044.85
213	-3074.22	-20791.40	-1848.34	-3074.22	-20791.4	-1848.34
214	5957.58	-3831.98	4472.20	5957.58	-3831.98	4472.2
215	-4372.76	23081.38	-3741.91	-4372.76	23081.38	-3741.91
216	-5247.38	-14590.40	-3545.40	-5247.38	-14590.4	-3545.4
217	7111.75	-4599.57	6167.84	7111.75	-4599.57	6167.84
218	-3642.31	17839.86	-4164.40	-3642.31	17839.86	-4164.4
219	-4516.93	-14831.92	-3967.89	-4516.93	-14831.92	-3967.89
220	7835.98	1824.96	8083.88	7835.98	1824.96	8083.88
221	-5278.04	10050.72	-6136.97	-5278.04	10050.72	-6136.97
222	-6152.66	-17621.06	-5940.45	-6152.66	-17621.06	-5940.45
223	7285.16	2585.25	9330.14	7285.16	2585.25	9330.14
224	-2953.79	11889.51	-5722.23	-2953.79	11889.51	-5722.23
225	-3828.41	-10782.28	-5525.71	-3828.41	-10782.28	-5525.71
226	4442.53	1612.23	8762.34	4442.53	1612.23	8762.34
227	-1724.75	6266.99	-5427.21	-1724.75	6266.99	-5427.21
228	-2599.36	-11404.79	-5230.70	-2599.36	-11404.79	-5230.7

229	2270.27	1613.15	8366.26	2270.27	1613.15	8366.26
230	-238.47	6888.35	-5227.12	-238.47	6888.35	-5227.12
231	-1113.09	-5783.44	-5030.61	-1113.09	-5783.44	-5030.61
232	949.44	-468.26	9784.18	949.44	-468.26	9784.18
233	-73.71	3868.77	-7199.62	-73.71	3868.77	-7199.62
234	-948.33	-3803.01	-7003.10	-948.33	-3803.01	-7003.1
235	314.58	-268.93	10208.97	314.58	-268.93	10208.97
236	555.10	1639.18	-5758.11	555.1	1639.18	-5758.11
237	-319.51	-1032.61	-5561.59	-319.51	-1032.61	-5561.59
238	41.29	-256.11	8338.21	41.29	-256.11	8338.21
239	267.90	-1147.26	-4861.17	267.9	-1147.26	-4861.17
240	-606.72	1180.96	-4664.65	-606.72	1180.96	-4664.65
241	-136.19	116.54	7647.06	-136.19	116.54	7647.06
242	776.96	-3826.63	-4894.18	776.96	-3826.63	-4894.18
243	-97.66	3501.59	-4697.66	-97.66	3501.59	-4697.66
244	-779.27	-50.08	8058.16	-779.27	-50.08	8058.16
245	1071.74	-5938.99	-5375.04	1071.74	-5938.99	-5375.04
246	197.12	6389.23	-5178.53	197.12	6389.23	-5178.53
247	-2242.58	122.63	8861.15	-2242.58	122.63	8861.15
248	2606.10	-9042.51	-5897.91	2606.1	-9042.51	-5897.91
249	1731.48	8285.70	-5701.40	1731.48	8285.7	-5701.4
250	-5072.72	-923.31	10224.11	-5072.72	-923.31	10224.11
251	4609.42	-9631.57	-7078.73	4609.42	-9631.57	-7078.73
252	3734.80	12696.65	-6882.22	3734.8	12696.65	-6882.22
253	-6811.79	-2757.93	9451.79	-6811.79	-2757.93	9451.79
254	4779.93	-11749.24	-4932.52	4779.93	-11749.24	-4932.52
255	3905.32	15578.98	-4736.00	3905.32	15578.98	-4736
256	-6623.34	-685.81	6984.43	-6623.34	-685.81	6984.43
257	4373.85	-17221.72	-3994.53	4373.85	-17221.72	-3994.53
258	3499.23	15106.50	-3798.02	3499.23	15106.5	-3798.02
259	-6365.01	658.68	5587.78	-6365.01	658.68	5587.78
260	4457.03	-18429.84	-3186.70	4457.03	-18429.84	-3186.7
261	3582.41	18898.38	-2990.19	3582.41	18898.37	-2990.19
262	-6714.59	-4826.91	4740.48	-6714.59	-4826.91	4740.48
263	4810.83	-15364.74	-2935.41	4810.83	-15364.74	-2935.41
264	3936.21	26963.48	-2738.90	3936.21	26963.48	-2738.9
265	-4451.86	-6109.45	1417.39	-4451.86	-6109.45	1417.39
266	1628.61	-21826.66	967.16	1628.61	-21826.66	967.16
267	753.99	25501.56	1163.67	753.99	25501.56	1163.67
268	-6387.98	1936.05	-1289.05	-6387.98	1936.05	-1289.05
269	-16529.66	21101.04	2572.82	-16529.66	21101.04	2572.82
270	-25163.60	44941.31	-16297.00	-25163.6	44941.31	-16297
271	-37232.43	64675.12	-31304.05	-37232.43	64675.12	-31304.05
272	-50728.83	82999.57	-53537.25	-50728.83	82999.57	-53537.25
273	-65453.37	97092.00	-78955.37	-65453.37	97092	-78955.37
274	-70810.63	102040.66	-123676.26	-70810.63	102040.66	-123676.26
275	-63382.58	110614.69	-174447.99	-63382.58	110614.69	-174447.99
276	-32264.58	129273.92	-212855.14	-32264.58	129273.92	-212855.14
277	-16187.60	134155.75	-233199.27	-16187.6	134155.75	-233199.27
278	1000.96	140783.68	-237865.44	1000.96	140783.68	-237865.44
279	-2301.95	141058.61	-238521.51	-2301.95	141058.61	-238521.52
280	14834.05	134263.48	-233205.72	14834.05	134263.48	-233205.72
281	30881.49	129338.95	-210034.16	30881.49	129338.95	-210034.16
282	61554.59	108968.63	-168695.70	61554.59	108968.63	-168695.7
283	68782.70	100952.08	-116868.55	68782.7	100952.08	-116868.55
284	65086.04	93123.76	-74137.48	65086.04	93123.76	-74137.48
285	50038.90	84061.02	-49498.89	50038.9	84061.02	-49498.89
286	37203.59	66731.93	-28569.93	37203.59	66731.93	-28569.93
287	23828.90	41590.16	-13762.45	23828.9	41590.16	-13762.45
288	17032.43	19641.90	3980.80	17032.43	19641.9	3980.8

Ek 3. Kafes Yapılar İçin Geliştirilen MATLAB Tabanlı Analiz Programının SAP2000 ile Karşılaştırmalı Doğrulaması (Düğüm Noktası Deplasmanları)

MATLAB			SAP2000		
1. Yükleme Durumu			1. Yükleme Durumu		
x (mm)	y (mm)	z (mm)	x (mm)	y (mm)	z (mm)
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
3.53585	0.00405	-5.94495	3.53585	0.00405	-5.94495
5.14040	-0.01497	-10.71651	5.14040	-0.01497	-10.71651
7.05433	0.01482	-15.14542	7.05433	0.01482	-15.14542
8.61953	0.03032	-18.37083	8.61953	0.03032	-18.37084
9.90144	0.06654	-20.10420	9.90144	0.06654	-20.10420
10.36131	0.19374	-19.75865	10.36131	0.19374	-19.75865
10.96070	0.10027	-17.36476	10.96070	0.10027	-17.36476
12.36236	-0.03929	-12.35274	12.36236	-0.03929	-12.35274
12.70359	-0.08106	-7.09702	12.70359	-0.08107	-7.09702
13.18032	-0.13293	-0.85797	13.18032	-0.13293	-0.85797
12.63347	-0.29549	5.49647	12.63347	-0.29549	5.49647
12.32416	-0.36709	11.25545	12.32416	-0.36709	11.25545
11.01841	-0.48174	16.46619	11.01841	-0.48174	16.46619
10.39487	-0.36940	19.00086	10.39487	-0.36940	19.00086
9.49830	-0.20025	19.49381	9.49830	-0.20025	19.49382
8.27801	-0.19473	17.69320	8.27801	-0.19473	17.69320
6.99076	-0.25928	14.47207	6.99076	-0.25928	14.47207
5.26249	-0.21482	10.24472	5.26249	-0.21482	10.24472
3.54875	-0.15877	5.72833	3.54875	-0.15877	5.72833
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
3.53053	-0.13205	-5.93819	3.53053	-0.13205	-5.93819
5.19582	-0.19854	-10.68218	5.19582	-0.19854	-10.68218
6.84311	-0.19864	-14.91311	6.84311	-0.19864	-14.91311
8.43102	-0.25528	-18.04251	8.43102	-0.25528	-18.04251
9.61947	-0.10223	-19.70598	9.61947	-0.10223	-19.70598
10.34780	-0.10893	-19.30555	10.34780	-0.10893	-19.30555
11.12163	-0.23132	-16.51579	11.12163	-0.23132	-16.51579
12.43350	-0.14122	-11.11155	12.43350	-0.14122	-11.11155
12.71157	-0.21373	-5.66287	12.71157	-0.21373	-5.66287
13.15749	-0.13057	0.62771	13.15749	-0.13057	0.62771
12.72806	-0.15845	6.89673	12.72806	-0.15845	6.89673
12.29909	-0.15180	12.63555	12.29909	-0.15180	12.63556
10.86577	-0.18693	17.78124	10.86577	-0.18693	17.78125
10.30257	-0.02681	20.00433	10.30257	-0.02681	20.00433
9.57686	0.10985	20.23450	9.57686	0.10985	20.23450
8.52220	0.01850	18.26083	8.52220	0.01850	18.26083
7.14031	-0.04069	15.05964	7.14031	-0.04069	15.05964
5.28375	-0.00332	10.74312	5.28375	-0.00332	10.74313
3.55693	0.06328	6.14684	3.55693	0.06328	6.14684
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
11.97539	-0.02964	-0.39958	11.97539	-0.02964	-0.39958

11.65258	0.10281	-6.21727	11.65258	0.10281	-6.21727
11.43670	0.24095	-11.09707	11.43670	0.24095	-11.09707
11.11475	0.45016	-15.38176	11.11475	0.45016	-15.38176
10.69483	0.62558	-18.50337	10.69483	0.62558	-18.50338
10.15462	0.75975	-20.10024	10.15462	0.75975	-20.10024
9.81783	0.82867	-19.66083	9.81783	0.82867	-19.66083
9.60373	0.87323	-17.24314	9.60373	0.87323	-17.24314
9.50953	0.92148	-12.26818	9.50953	0.92148	-12.26818
9.46642	0.95813	-6.98406	9.46642	0.95813	-6.98406
9.46929	0.99094	-0.85797	9.46929	0.99094	-0.85797
9.46294	1.02140	5.34963	9.46294	1.02140	5.34963
9.49579	1.05781	11.12911	9.49579	1.05781	11.12911
9.58497	1.10731	16.32920	9.58497	1.10731	16.32920
9.82445	1.17721	18.95982	9.82445	1.17721	18.95982
10.09443	1.19950	19.48649	10.09443	1.19950	19.48649
10.40408	1.14121	17.81979	10.40408	1.14121	17.81979
10.81685	0.96424	14.68257	10.81685	0.96424	14.68257
11.16741	0.84280	10.64726	11.16741	0.84280	10.64726
11.40261	0.63939	5.99229	11.40261	0.63940	5.99229
11.53819	0.25823	0.50076	11.53819	0.25823	0.50077
11.86813	0.16491	-0.45501	11.86814	0.16492	-0.45501
11.55711	0.21075	-6.21041	11.55712	0.21075	-6.21041
11.21645	0.33612	-10.92282	11.21645	0.33612	-10.92282
10.88889	0.57853	-15.13273	10.88889	0.57853	-15.13273
10.44260	0.82216	-18.22905	10.44260	0.82216	-18.22905
10.07557	0.88312	-19.71037	10.07557	0.88312	-19.71037
9.75973	0.94012	-19.24543	9.75973	0.94012	-19.24543
9.58442	0.93019	-16.33089	9.58442	0.93019	-16.33089
9.49517	0.94530	-11.03511	9.49518	0.94530	-11.03511
9.45040	0.96315	-5.56026	9.45040	0.96315	-5.56026
9.45295	0.99190	0.62771	9.45295	0.99190	0.62771
9.44812	1.01823	6.81217	9.44812	1.01823	6.81217
9.48031	1.03654	12.51456	9.48031	1.03654	12.51456
9.56573	1.05105	17.67674	9.56573	1.05105	17.67674
9.76201	1.08565	19.96780	9.76201	1.08565	19.96780
10.14771	1.11545	20.23557	10.14771	1.11546	20.23557
10.64889	0.98747	18.45684	10.64889	0.98747	18.45684
11.01237	0.85645	15.29025	11.01237	0.85645	15.29025
11.37333	0.72159	11.14546	11.37333	0.72159	11.14546
11.86103	0.52771	6.32978	11.86103	0.52771	6.32978
12.20963	0.09797	0.50405	12.20963	0.09797	0.50405

MATLAB			SAP2000		
2. Yükleme Durumu			2. Yükleme Durumu		
x (mm)	y (mm)	z (mm)	x (mm)	y (mm)	z (mm)
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1.32091	1.30965	-1.54926	1.32091	1.30965	-1.54926
1.90088	3.81955	-2.76074	1.90088	3.81955	-2.76074
2.43770	6.19192	-3.73146	2.43770	6.19192	-3.73146
2.63812	8.94398	-4.09270	2.63812	8.94398	-4.09271
2.53743	11.86540	-3.89447	2.53743	11.86540	-3.89447
2.29324	15.10165	-3.03246	2.29324	15.10165	-3.03246
1.88880	18.05612	-2.21128	1.88880	18.05612	-2.21128
1.33954	20.81365	-2.25448	1.33954	20.81365	-2.25448
0.84935	22.24248	-2.12462	0.84935	22.24248	-2.12462
0.35030	23.03925	-2.42620	0.35031	23.03925	-2.42620
-0.39926	22.60938	-1.50570	-0.39926	22.60938	-1.50570
-0.89868	21.39689	-1.47551	-0.89868	21.39689	-1.47551
-1.41650	18.76960	-1.18625	-1.41650	18.76960	-1.18625
-1.81722	15.82515	-1.65687	-1.81722	15.82515	-1.65687
-2.13106	12.65064	-2.17054	-2.13106	12.65064	-2.17054
-2.29749	9.56028	-2.63097	-2.29749	9.56028	-2.63097
-2.20407	6.46530	-2.56065	-2.20407	6.46530	-2.56065
-1.80520	3.93570	-1.88741	-1.80520	3.93570	-1.88741
-1.15923	1.46838	-0.95398	-1.15923	1.46838	-0.95398
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
-1.30635	1.27692	1.48288	-1.30636	1.27692	1.48288
-1.90047	3.82636	2.57344	-1.90047	3.82636	2.57344
-2.30459	6.14233	3.38993	-2.30459	6.14233	3.38993
-2.48899	8.90413	3.55648	-2.48899	8.90413	3.55648
-2.31979	11.86646	3.14080	-2.31979	11.86646	3.14080
-2.00691	15.07983	2.48389	-2.00691	15.07983	2.48389
-1.48626	18.04342	1.91909	-1.48626	18.04342	1.91909
-0.92056	20.81780	2.43137	-0.92056	20.81780	2.43137
-0.45280	22.23975	2.60920	-0.45280	22.23975	2.60921
0.02825	23.06663	3.19711	0.02825	23.06663	3.19711
0.52796	22.61580	2.44754	0.52796	22.61580	2.44754
1.21519	21.35592	2.25900	1.21519	21.35592	2.25900
1.87295	18.75113	2.05677	1.87295	18.75113	2.05677
2.30577	15.86246	2.99818	2.30577	15.86246	2.99818
2.66532	12.66964	3.90617	2.66532	12.66964	3.90617
2.79361	9.53715	4.24383	2.79361	9.53715	4.24384
2.67361	6.46039	4.11432	2.67361	6.46039	4.11432
2.20115	3.94175	3.34001	2.20116	3.94175	3.34001
1.43730	1.42846	1.91810	1.43730	1.42846	1.91810
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
4.68228	3.40356	0.72737	4.68228	3.40356	0.72737
4.29358	10.96775	-1.42558	4.29358	10.96775	-1.42559
3.92370	17.86595	-2.68949	3.92370	17.86595	-2.68949
3.35711	23.53561	-3.63097	3.35712	23.53561	-3.63097

2.69608	28.36417	-4.01999	2.69608	28.36417	-4.01999
1.97110	32.03756	-3.84515	1.97110	32.03756	-3.84515
1.50365	34.90128	-2.99623	1.50365	34.90128	-2.99623
1.15294	36.98607	-2.24561	1.15294	36.98607	-2.24562
0.78830	38.59468	-2.24877	0.78830	38.59468	-2.24877
0.44180	39.51434	-2.14178	0.44180	39.51434	-2.14178
0.13165	39.83664	-2.42620	0.13165	39.83664	-2.42620
-0.16770	39.57719	-1.53020	-0.16770	39.57720	-1.53020
-0.46285	38.78894	-1.46890	-0.46285	38.78894	-1.46890
-0.82658	37.39213	-1.22695	-0.82658	37.39213	-1.22695
-1.23696	35.34932	-1.64315	-1.23696	35.34932	-1.64315
-1.62486	32.59953	-2.12299	-1.62486	32.59953	-2.12299
-2.05760	28.87949	-2.55972	-2.05760	28.87949	-2.55972
-2.70315	24.17574	-2.46952	-2.70315	24.17574	-2.46952
-3.29865	18.55316	-1.81217	-3.29865	18.55316	-1.81217
-3.75155	11.97900	-0.83187	-3.75155	11.97900	-0.83187
-3.92150	4.36136	0.97473	-3.92150	4.36136	0.97473
-4.58391	3.42494	-0.73308	-4.58391	3.42494	-0.73308
-4.18688	10.96800	1.35061	-4.18688	10.96800	1.35061
-3.57847	17.80474	2.52120	-3.57847	17.80474	2.52120
-3.00948	23.45259	3.28855	-3.00948	23.45259	3.28855
-2.27928	28.40995	3.44691	-2.27928	28.40996	3.44691
-1.73484	32.08134	3.07292	-1.73484	32.08134	3.07292
-1.27970	34.94172	2.45599	-1.27970	34.94173	2.45599
-0.97374	37.02654	1.97864	-0.97374	37.02654	1.97865
-0.61617	38.58293	2.42540	-0.61617	38.58293	2.42540
-0.24510	39.51005	2.62719	-0.24510	39.51005	2.62719
0.11319	39.83069	3.19711	0.11319	39.83069	3.19711
0.40875	39.57990	2.46373	0.40875	39.57990	2.46373
0.70007	38.78757	2.25160	0.70007	38.78758	2.25160
1.05782	37.39520	2.09204	1.05783	37.39520	2.09204
1.40530	35.33265	2.98276	1.40530	35.33265	2.98276
1.97139	32.56550	3.84056	1.97139	32.56550	3.84056
2.68846	28.86357	4.12687	2.68846	28.86357	4.12687
3.29907	24.18690	4.00675	3.29907	24.18690	4.00675
3.94654	18.46603	3.25303	3.94654	18.46603	3.25303
4.79775	11.82573	1.82816	4.79775	11.82573	1.82816
5.19975	4.40993	-0.56632	5.19975	4.40993	-0.56632

MATLAB			SAP2000		
3. Yükleme Durumu			3. Yükleme Durumu		
<i>x (mm)</i>	<i>y (mm)</i>	<i>z (mm)</i>	<i>x (mm)</i>	<i>y (mm)</i>	<i>z (mm)</i>
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
-0.26267	-0.07940	-1.86418	-0.26267	-0.07940	-1.86418
0.20723	-0.16220	-6.87585	0.20723	-0.16220	-6.87585
0.37093	-0.31494	-11.25639	0.37093	-0.31494	-11.25639
0.37217	-0.46147	-16.33367	0.37217	-0.46147	-16.33367
0.37612	-0.68156	-21.56659	0.37612	-0.68156	-21.56659
0.57477	-0.95857	-27.17451	0.57477	-0.95857	-27.17451
0.35024	-0.95349	-32.01245	0.35024	-0.95349	-32.01245
-0.41292	-0.83050	-36.15275	-0.41292	-0.83051	-36.15275
-0.27361	-0.82296	-38.79007	-0.27361	-0.82296	-38.79007
-0.05376	-0.89413	-39.84664	-0.05376	-0.89413	-39.84664
0.32419	-0.89245	-38.95716	0.32419	-0.89245	-38.95716
0.50854	-0.87979	-35.78307	0.50854	-0.87980	-35.78307
-0.18641	-0.85033	-31.40821	-0.18641	-0.85033	-31.40821
-0.34605	-0.79474	-26.09855	-0.34605	-0.79475	-26.09855
-0.65670	-0.67223	-21.03171	-0.65671	-0.67223	-21.03171
-0.64146	-0.73005	-16.45619	-0.64146	-0.73005	-16.45619
-0.23656	-0.81077	-11.80115	-0.23656	-0.81078	-11.80115
0.23533	-0.64732	-7.34459	0.23533	-0.64732	-7.34459
0.41559	-0.40232	-2.07414	0.41559	-0.40232	-2.07414
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
-0.08338	0.25192	-2.09901	-0.08338	0.25192	-2.09902
0.36721	0.22438	-7.50665	0.36721	0.22438	-7.50666
0.82636	0.07927	-11.42068	0.82636	0.07927	-11.42068
0.70926	-0.01352	-16.22189	0.70926	-0.01352	-16.22189
0.72537	-0.46614	-20.91075	0.72537	-0.46614	-20.91075
0.57277	-0.68997	-25.87025	0.57277	-0.68997	-25.87025
0.30952	-0.79369	-31.28634	0.30952	-0.79369	-31.28634
-0.40086	-0.82567	-35.92636	-0.40086	-0.82567	-35.92636
-0.21465	-0.90682	-38.88413	-0.21465	-0.90682	-38.88413
0.00972	-1.01751	-39.90890	0.00972	-1.01751	-39.90890
0.21419	-0.99652	-38.83783	0.21419	-0.99652	-38.83783
0.41450	-0.87129	-35.79630	0.41450	-0.87129	-35.79630
-0.38139	-0.70627	-31.41288	-0.38139	-0.70627	-31.41288
-0.62371	-0.47411	-26.93118	-0.62371	-0.47411	-26.93118
-0.72277	-0.28693	-21.12517	-0.72277	-0.28694	-21.12517
-0.46094	-0.39281	-16.33717	-0.46094	-0.39281	-16.33717
-0.19143	-0.39477	-11.22983	-0.19143	-0.39477	-11.22983
0.08351	-0.19576	-6.50744	0.08351	-0.19576	-6.50744
0.03297	0.13224	-1.92054	0.03297	0.13224	-1.92054
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
3.89795	0.06865	0.07334	3.89795	0.06866	0.07334
3.97564	-0.18058	-3.04548	3.97564	-0.18058	-3.04548
3.86284	-0.38408	-7.59303	3.86284	-0.38408	-7.59303

3.63949	-0.48103	-11.90400	3.63949	-0.48103	-11.90400
3.26467	-0.57206	-16.67682	3.26467	-0.57206	-16.67682
2.70787	-0.65687	-21.92613	2.70787	-0.65687	-21.92613
2.18943	-0.79112	-27.60206	2.18943	-0.79112	-27.60206
1.65599	-0.94947	-32.16608	1.65599	-0.94947	-32.16608
1.07841	-1.07540	-36.27034	1.07841	-1.07540	-36.27034
0.49187	-1.12458	-38.85037	0.49187	-1.12458	-38.85037
-0.02183	-1.17452	-39.88212	-0.02183	-1.17452	-39.88212
-0.51876	-1.18061	-39.02505	-0.51876	-1.18061	-39.02505
-1.02483	-1.19252	-35.94901	-1.02483	-1.19252	-35.94901
-1.60972	-1.20234	-31.57301	-1.60972	-1.20234	-31.57301
-2.24756	-1.23193	-26.27129	-2.24757	-1.23193	-26.27129
-2.69658	-1.20647	-21.39277	-2.69658	-1.20647	-21.39277
-3.04704	-1.06795	-16.81211	-3.04704	-1.06795	-16.81211
-3.45453	-0.80139	-12.41954	-3.45453	-0.80139	-12.41954
-3.72875	-0.59181	-8.15922	-3.72875	-0.59181	-8.15922
-3.87210	-0.32688	-3.27390	-3.87210	-0.32688	-3.27390
-3.85104	0.00041	0.02219	-3.85104	0.00041	0.02219
4.20768	0.03608	0.00669	4.20768	0.03608	0.00669
4.25609	-0.16159	-3.30471	4.25609	-0.16159	-3.30471
4.03546	-0.31264	-7.98827	4.03546	-0.31264	-7.98827
3.76006	-0.36969	-12.04488	3.76006	-0.36970	-12.04488
3.28906	-0.36925	-16.72245	3.28906	-0.36925	-16.72245
2.84632	-0.49886	-21.37814	2.84632	-0.49886	-21.37814
2.29469	-0.57129	-26.17521	2.29469	-0.57129	-26.17521
1.81216	-0.73958	-31.52223	1.81216	-0.73958	-31.52224
1.22341	-0.82993	-36.03793	1.22341	-0.82993	-36.03793
0.57838	-0.96150	-38.93542	0.57838	-0.96150	-38.93542
-0.02698	-0.98096	-39.97771	-0.02698	-0.98097	-39.97771
-0.52675	-1.00310	-38.88735	-0.52675	-1.00310	-38.88735
-1.03276	-0.97262	-35.98227	-1.03276	-0.97262	-35.98227
-1.61372	-0.98004	-31.55666	-1.61372	-0.98004	-31.55666
-2.15165	-1.04738	-27.11469	-2.15165	-1.04738	-27.11469
-2.80699	-1.08985	-21.59061	-2.80699	-1.08985	-21.59061
-3.37786	-0.90583	-16.86233	-3.37786	-0.90583	-16.86233
-3.73742	-0.70676	-11.88371	-3.73742	-0.70676	-11.88371
-4.01461	-0.50624	-7.29565	-4.01461	-0.50624	-7.29565
-4.29629	-0.29132	-2.73757	-4.29629	-0.29132	-2.73757
-4.21481	-0.03193	0.07476	-4.21481	-0.03193	0.07476

Ek 4. Kafes Yapılar İçin Geliştirilen MATLAB Tabanlı Analiz Programının SAP2000 ile Karşılaştırmalı Doğrulaması (Eleman Dayanım Oranları)

SAP2000			MATLAB		
Eleman No.	Dayanım Oranı	Dayanım Oranı	Eleman No.	Dayanım Oranı	Dayanım Oranı
1	0.355742	0.355742	145	0.097668	0.097668
2	0.27823	0.27823	146	0.757835	0.757835
3	0.395699	0.395699	147	0.516538	0.516538
4	0.465568	0.465568	148	0.273867	0.273867
5	0.466188	0.466188	149	0.985811	0.985811
6	0.098766	0.098766	150	0.248492	0.248492
7	0.241621	0.241621	151	0.211338	0.211338
8	0.247315	0.247315	152	0.070946	0.070946
9	0.098915	0.098915	153	0.362184	0.362184
10	0.095227	0.095227	154	0.095098	0.095098
11	0.316486	0.316486	155	0.296641	0.296641
12	0.202653	0.202653	156	0.071978	0.071978
13	0.258778	0.258778	157	0.267856	0.267856
14	0.310443	0.310443	158	0.073497	0.073497
15	0.396807	0.396807	159	0.09124	0.09124
16	0.390629	0.390629	160	0.233912	0.233912
17	0.265164	0.265164	161	0.075513	0.075513
18	0.291349	0.291349	162	0.300721	0.300721
19	0.413727	0.413727	163	0.028678	0.028678
20	0.443887	0.443887	164	0.093288	0.093288
21	0	0	165	0.023534	0.023534
22	0.280119	0.280119	166	0.50174	0.50174
23	0.632435	0.632435	167	0.021292	0.021292
24	0.039163	0.039163	168	0.083591	0.083591
25	0.264155	0.264155	169	0.022175	0.022175
26	0.787595	0.787595	170	0.076574	0.076574
27	0.074972	0.074972	171	0.051895	0.051895
28	0.073292	0.073292	172	0.201415	0.201415
29	0.244552	0.244552	173	0.043059	0.043059
30	0.047929	0.047929	174	0.086492	0.086492
31	0.060081	0.060081	175	0.050177	0.050177
32	0.508491	0.508491	176	0.289456	0.289456
33	0.064128	0.064128	177	0.266736	0.266736
34	0.329766	0.329766	178	0.068814	0.068814
35	0.317472	0.317472	179	0.347407	0.347407
36	0.030977	0.030977	180	0.343975	0.343975
37	0.204065	0.204065	181	0.433921	0.433921
38	0.235865	0.235865	182	0.405383	0.405383
39	0.208988	0.208988	183	0.764712	0.764712
40	0.087841	0.087841	184	0.071447	0.071447
41	0.211394	0.211394	185	0.40047	0.40047
42	0.228956	0.228956	186	0.593385	0.593385
43	0.0279	0.0279	187	0.399036	0.399036
44	0.222723	0.222723	188	0.229298	0.229298
45	0.016634	0.016634	189	0.072637	0.072637
46	0.012915	0.012915	190	0.222536	0.222536

47	0.053152	0.053152	191	0.256136	0.256136
48	0.0458	0.0458	192	0.280911	0.280911
49	0.004164	0.004164	193	0.093555	0.093555
50	0.012248	0.012248	194	0.093594	0.093594
51	0.036756	0.036756	195	0.201015	0.201015
52	0.044327	0.044327	196	0.202825	0.202825
53	0.019647	0.019647	197	0.08828	0.08828
54	0.03593	0.03593	198	0.08523	0.08523
55	0.067651	0.067651	199	0.086969	0.086969
56	0.043922	0.043922	200	0.20356	0.20356
57	0.025448	0.025448	201	0.22666	0.22666
58	0.263228	0.263228	202	0.079781	0.079781
59	0.231521	0.231521	203	0.078091	0.078091
60	0.034847	0.034847	204	0.250132	0.250132
61	0.234566	0.234566	205	0.24145	0.24145
62	0.081503	0.081503	206	0.093742	0.093742
63	0.040496	0.040496	207	0.032926	0.032926
64	0.070913	0.070913	208	0.022997	0.022997
65	0.345035	0.345035	209	0.069036	0.069036
66	0.045543	0.045543	210	0.523187	0.523187
67	0.462447	0.462447	211	0.012759	0.012759
68	0.097629	0.097629	212	0.070578	0.070578
69	0.039863	0.039863	213	0.56276	0.56276
70	0.453907	0.453907	214	0.012885	0.012885
71	0.082324	0.082324	215	0.029258	0.029258
72	0.049173	0.049173	216	0.312953	0.312953
73	0.251828	0.251828	217	0.020169	0.020169
74	0.061349	0.061349	218	0.048949	0.048949
75	0.053375	0.053375	219	0.516592	0.516592
76	0.483128	0.483128	220	0.023972	0.023972
77	0.241467	0.241467	221	0.083055	0.083055
78	0.063186	0.063186	222	0.079378	0.079378
79	0.667382	0.667382	223	0.018677	0.018677
80	0.374048	0.374048	224	0.077442	0.077442
81	0	0	225	0.231272	0.231272
82	0.338646	0.338646	226	0.025984	0.025984
83	0.324402	0.324402	227	0.094514	0.094514
84	0.236947	0.236947	228	0.032036	0.032036
85	0.498622	0.498622	229	0.02481	0.02481
86	0.407128	0.407128	230	0.070741	0.070741
87	0.30788	0.30788	231	0.201435	0.201435
88	0.3052	0.3052	232	0.029015	0.029015
89	0.204693	0.204693	233	0.077213	0.077213
90	0.074165	0.074165	234	0.075106	0.075106
91	0.071574	0.071574	235	0.019277	0.019277
92	0.073383	0.073383	236	0.200553	0.200553
93	0.234338	0.234338	237	0.096854	0.096854
94	0.339516	0.339516	238	0.022878	0.022878
95	0.274015	0.274015	239	0.084657	0.084657
96	0.330564	0.330564	240	0.050027	0.050027
97	0.308557	0.308557	241	0.020982	0.020982
98	0.358738	0.358738	242	0.052488	0.052488
99	0.392988	0.392988	243	0.063576	0.063576

100	0.432236	0.432236	244	0.025993	0.025993
101	0.291457	0.291457	245	0.206853	0.206853
102	0.250438	0.250438	246	0.070084	0.070084
103	0.099877	0.099877	247	0.026277	0.026277
104	0.965865	0.965865	248	0.314948	0.314948
105	0.206441	0.206441	249	0.07716	0.07716
106	0.588161	0.588161	250	0.022244	0.022244
107	0.071729	0.071729	251	0.260697	0.260697
108	0.429759	0.429759	252	0.073809	0.073809
109	0.098399	0.098399	253	0.015426	0.015426
110	0.082633	0.082633	254	0.409223	0.409223
111	0.094186	0.094186	255	0.082477	0.082477
112	0.09592	0.09592	256	0.045802	0.045802
113	0.287213	0.287213	257	0.46614	0.46614
114	0.278292	0.278292	258	0.066142	0.066142
115	0.086078	0.086078	259	0.024203	0.024203
116	0.046268	0.046268	260	0.49884	0.49884
117	0.217275	0.217275	261	0.051854	0.051854
118	0.030224	0.030224	262	0.029443	0.029443
119	0.055935	0.055935	263	0.53515	0.53515
120	0.025907	0.025907	264	0.053974	0.053974
121	0.352579	0.352579	265	0.052917	0.052917
122	0.00919	0.00919	266	0.590782	0.590782
123	0.084506	0.084506	267	0.069971	0.069971
124	0.041646	0.041646	268	0.055329	0.055329
125	0.078456	0.078456	269	0.091736	0.091736
126	0.045481	0.045481	270	0.095888	0.095888
127	0.089023	0.089023	271	0.089675	0.089675
128	0.050401	0.050401	272	0.230166	0.230166
129	0.219573	0.219573	273	0.085806	0.085806
130	0.046958	0.046958	274	0.099544	0.099544
131	0.080431	0.080431	275	0.083966	0.083966
132	0.096325	0.096325	276	0.204904	0.204904
133	0.094208	0.094208	277	0.224488	0.224488
134	0.08571	0.08571	278	0.209333	0.209333
135	0.339356	0.339356	279	0.085717	0.085717
136	0.358818	0.358818	280	0.08696	0.08696
137	0.321406	0.321406	281	0.202188	0.202188
138	0.790338	0.790338	282	0.094384	0.094384
139	0.263485	0.263485	283	0.241755	0.241755
140	0.980962	0.980962	284	0.226027	0.226027
141	0.492395	0.492395	285	0.096235	0.096235
142	0.065172	0.065172	286	0.204086	0.204086
143	0.083495	0.083495	287	0.268309	0.268309
144	0.499618	0.499618	288	0.063358	0.063358

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı-Soyadı: Mehmet ŞANLI

Uyruğu: T.C.

E-posta:

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR