T. C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

METASEZGİSEL ALGORİTMALAR İLE PETEK KİRİŞLERİN OPTİMİZASYONU

Doktora Tezi

Marwan Abdulkareem Shakir ALBAYATI

Danışman
Dr.Öğr.Üyesi Ahmad Reshad NOORI

İstanbul – 2025

TEZ TANITIM FORMU

Yazar Adı Soyadı : Marwan Abdulkareem Shakir ALBAYATI

Tezin Dili **:** Türkçe

Tezin Adı **:** Metasezgisel algoritmalar ile petek kirişlerin optimizasyonu

Enstitü **:** İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Anabilim Dalı **:** İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tezin Türü **:** Doktora

Tezin Tarihi **:** 03/07/2025

Sayfa Sayısı **:** 257

Tez Danışmanları **:** Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad NOORI

Dizin Terimleri **:** Metasezgisel algoritmalar ile petek kirişler optimizasyonu

Türkçe Özet **:** Bu tez çalışmasında, petek kirişlerin toplam maliyetini minimize etmek amacıyla, dairesel, altıgen ve sinüzoidal boşluklara sahip kirişlerin optimizasyonu için CPA, IRO, TWO, VPS ve ICA olmak üzere beş gelişmiş algoritma kullanılmıştır. Farklı kiriş uzunlukları (300–800 cm) için yapılan analizlerde, amaç fonksiyonunun 10.000 iterasyona kadar olan değişimi incelenerek her algoritmanın yakınsama hızı ve stabilitesi değerlendirilmiştir. Ayrıca, algoritmaların işlem süresi, standart sapma ve korelasyon katsayısı gibi istatistiksel ölçütleri analiz edilmiştir. Sinüzoidal boşluklu kirişler ilk kez detaylı biçimde modellenmiş ve diğer boşluk tipleriyle karşılaştırılmıştır. Optimum kesit boyutlarının mühendislik açısından geçerliliği ANSYS sonlu eleman analizleriyle doğrulanmıştır. Elde edilen

sonuçlar, petek kiriş tasarımında algoritmaların performansını çok yönlü değerlendiren özgün bir yaklaşım sunmaktadır.

Dağıtım Listesi **:** 1. İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsüne
2. YÖK Ulusal Tez Merkezine

İmzası

Marwan Abdulkareem Shakir ALBAYATİ

T. C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

METASEZGİSEL ALGORİTMALAR İLE PETEK KİRİŞLERİN OPTİMİZASYONU

Doktora Tezi

Marwan Abdulkareem Shakir ALBAYATI

Danışman
Dr.Öğr.Üyesi Ahmad Reshad NOORI

İstanbul – 2025

BEYAN

Bu tezin hazırlanmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğu, kullanılan verilerde herhangi tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez olarak sunulmadığını beyan ederim.

Marwan Abdulkareem Shakir ALBAYATI

…/…/2025

İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Marwan Abdulkareem Shakir AL-BAYATI' nın Metasezgisel Algoritmalar İle Petek Kirişlerin Optimizasyonu adlı tez çalışması, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği anabilim dalı, İnşaat Mühendisliği bilim dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan	*Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN*
Üye	*Prof. Dr. Beytullah TEMEL*
Üye	*Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad NOORI* (Danışman)
Üye	*Dr. Öğr. Üyesi Aylin Ece KAYABEKİR*
Üye	*Dr. Öğr. Üyesi Ali ETE*

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

... / ... / 20..

İmzası

Prof. Dr. İzzet GÜMÜŞ

Enstitü Müdürü

ÖZET

Bu tez çalışması, petek kirişlerin tasarımında toplam maliyeti minimize etmek amacıyla, gelişmiş ve akıllı optimizasyon algoritmalarının kullanıldığı bilimsel bir yaklaşım geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, farklı boşluk türleri (daire, altıgen ve sinüzoidal) ve değişken kiriş uzunlukları (300 cm ile 800 cm arası) dikkate alınarak çok değişkenli ve karmaşık bir tasarım ortamı oluşturulmuştur. Önerilen yöntem çerçevesinde beş farklı optimizasyon algoritması (CPA, IRO, TWO, VPS ve ICA) kullanılmıştır. Bu algoritmalar ayrı ayrı çalıştırılmış ve her birinin performansı detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu beş algoritmanın birlikte ve entegre biçimde ilk kez bu alanda kullanılmış olması, çalışmanın önemli bir özgün katkısıdır. Mevcut literatürde bu algoritmaların tamamının aynı çalışmada petek kiriş tasarımı için birlikte değerlendirildiği herhangi bir akademik çalışmaya rastlanmamaktadır. Bu bütüncül yaklaşım, sadece çözüm çeşitliliği sağlamamış, aynı zamanda algoritmaların işlem süresi, stabilite düzeyi, istatistiksel güvenilirliği ve optimum çözüme ulaşma kapasiteleri açısından karşılaştırmalı değerlendirme yapılmasına da olanak tanımıştır. Ayrıca, sinüzoidal boşluklarla tasarlanan petek kirişler literatürde oldukça sınırlı düzeyde ele alınmışken, bu tezde bu boşluk tipi ilk kez detaylı biçimde modellenmiş ve analiz edilmiştir. Sinüzoidal boşluklara ait elde edilen sonuçlar diğer boşluk tipleriyle karşılaştırmalı olarak incelenmiş, özellikle 800 cm uzunluğundaki kirişlerde gerçek dışı sonuçlar gözlemlendiği için bu uzunluk analiz dışında bırakılmıştır. Bu durum, yalnızca algoritmik değerlendirmeyle değil, aynı zamanda mühendislik mantığıyla desteklenen özgün bir yaklaşımı da yansıtmaktadır. Çalışmada ayrıca, her bir algoritmanın performansına ilişkin trend analizi gerçekleştirilmiştir. Böylece boşluk tipi ve kiriş uzunluğu gibi tasarımsal değişkenlerin sonuçlar üzerindeki etkisi derinlemesine incelenmiş; hangi algoritmanın hangi koşullarda daha kararlı ve güvenilir sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Bu kapsamda, algoritmaların nihai çözümlerinin tutarlılığı ve dağılımı değerlendirilmiş, bu tür bir analiz literatürde petek kiriş tasarımı bağlamında daha önce yapılmamış olup çalışmanın özgün değerini artırmaktadır. Ek olarak, her algoritmanın 10.000 iterasyona kadar olan amaç fonksiyonu davranışı incelenerek duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Bu sayede algoritmaların optimum çözüme ne kadar hızlı ve stabil bir şekilde ulaştıkları

belirlenmiştir. Bu yaklaşım, yalnızca sonuca değil, aynı zamanda çözüm sürecine de odaklanmaktadır. Ayrıca standart sapma, işlem süresi ve korelasyon katsayısı gibi istatistiksel ölçütler de değerlendirilmiş; bu ölçütlerin algoritmalar, boşluk tipleri ve kiriş uzunlukları ile olan ilişkileri detaylı olarak analiz edilmiştir. Çalışmada, algoritmaların temel tasarım değişkenlerine (kesit yüksekliği, başlık genişliği, başlık kalınlığı ve gövde genişliği) verdiği tepkiler de değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, algoritmaların tasarım üzerindeki etkisini daha net ortaya koymuş ve tasarımın stabilitesi açısından önemli bulgular sunmuştur. Ayrıca, geliştirilen optimizasyon algoritmaları ile elde edilen kesit boyutlarının doğruluğu ANSYS sonlu elemanlar analizleri ile doğrulanmış, böylece çalışmanın mühendislik güvenilirliği pekiştirilmiştir.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasının hem kullanılan yöntemler hem de analiz düzeyi açısından yüksek bir özgünlüğe sahip olduğu ve modern mühendislik uygulamalarında petek kirişlerin akıllı tasarımına katkı sağlayacak nitelikte önemli bir bilimsel kaynak olduğu söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Petek Kiriş Tasarımı, Dairesel, Altıgen ve Sinüzoidal Boşluk, Metasezgisel Optimizasyon Algoritmaları, (CPA, IRO, TWO, VPS ve ICA) Algoritmaları , Amaç Fonksiyonu.

SUMMARY

This thesis aims to develop a scientific approach utilizing advanced and intelligent optimization algorithms to minimize the total cost in the design of castellated beams. A complex and multivariable design environment was established by considering different opening types circular, hexagonal, and sinusoidal as well as various beam lengths ranging from 300 cm to 800 cm. Five optimization algorithms were employed within the proposed framework: CPA, IRO, TWO, VPS, and ICA. Each algorithm was executed independently, and their performances were analyzed in detail. One of the most original contributions of this study is the integration and simultaneous application of these five algorithms, which has not been previously addressed in the literature. This comprehensive integration not only increases the diversity of solution methods but also enables a comparative evaluation in terms of computational time, stability, statistical reliability, and the ability to reach optimal solutions. Additionally, castellated beams designed with sinusoidal openings seldom addressed in existing research were modeled and analyzed in detail for the first time in this study. Results related to sinusoidal openings were evaluated comparatively with other opening types. Since unrealistic results were obtained for beams with a length of 800 cm, this case was excluded from the analysis. This approach reflects not only algorithmic assessment but also an original evaluation process supported by engineering rationale.

Furthermore, for the first time, a trend analysis was conducted for each algorithm's performance, examining the effects of design variables such as opening type and beam length in depth. The consistency and distribution of final solutions for the algorithms were assessed. A sensitivity analysis was also performed, observing the objective function behavior of each algorithm up to 10,000 iterations. This allowed the determination of how quickly and consistently each algorithm approached the optimal solution. The study also evaluated statistical metrics such as standard deviation, processing time, and correlation coefficient, analyzing their relationships with each algorithm, opening type, and beam length in detail. From a rarely examined perspective in the literature, the behavior of the algorithms toward key design variables was assessed. Four main dimensions web height, flange width, flange thickness, and

web width were chosen as the primary design variables, since other dimensions depend on these parameters. This approach helped reveal the algorithms' reactions to these variables and allowed a clearer evaluation of the design's stability. Moreover, the accuracy of the cross-sectional dimensions obtained through the optimization algorithms was validated using ANSYS finite element analyses, which reinforces the engineering reliability of the proposed approach.

In conclusion, the thesis demonstrates a high level of originality in terms of both methods used and the depth of analysis, making it a potentially valuable scientific resource for the intelligent design of castellated beams in modern engineering applications.

Keywords : Castellated Beam Design, Circular, Hexagonal, and Sinusoidal Openings, Metaheuristic Optimization Algorithms, CPA, IRO, TWO, VPS, and ICA Algorithms, Objective Function.

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **i**
SUMMARY ..... **iii**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
KISALTMALAR ..... **x**
TABLOLAR LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **xiii**
ÖNSÖZ ..... **xviii**
GİRİŞ **1**

BİRİNCİ BÖLÜM
ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

1.1. Petek Kirişlerle İlgili Mevcut Çalışmalar 4
1.2. İnşaat Mühendisliği Alanında Kullanılan Optimizasyon Algoritmaları Üzerine Yapılan Çalışmalar 11
1.3. Petek Kirişlerin Tasarımında Optimizasyon Algoritmalarının Kullanımına Yönelik Çalışmalar 23

İKİNCİ BÖLÜM
MATERYAL VE METOD

2.1. Materyal 32
2.2. Göçme Türleri 32
2.2.1. Eğilme Göçmesi 33
2.2.2. Kesme Göçmesi 35
2.2.2.1. Düşey Kesme Hesaplanması 35
2.2.2.1.1. Dairesel ve Sinüziodal Boşluklu 36
2.2.2.1.2. Altıgen Boşluklu 36
2.2.2.2. Yatay Kesme Hesaplanması 36
2.2.3. Gövdenin Kesme Kuvveti ile Burkulma Göçmesi 37
2.2.3.1. Altıgen Boşluklu ve Sinüziodal Boşluklu 38
2.2.3.2. Dairesel Boşluklu 39
2.2.4. Gövdenin Basınç kuvvet ile Burkulma Göçmesi 39
2.2.4.1. Dairesel Boşluklu 40
2.2.4.2. Sinüziodal Boşluklu 41
2.2.4.3. Altıgen Boşluklu 41
2.2.5. Vierendeel Mekanizma Göçmesi 41
2.2.5.1. Dairesel Boşluklu 43
2.2.5.2. Altıgen Boşluklu 43
2.2.5.3. Sinüziodal Boşluklu 43
2.3. Geometrik Kriterleri 44
2.3.1 Dairesel Boşluklu 44

2.3.2 Sinüziodal Boşluklu 44
2.3.3. Altıgen Boşluklu 44
2.4. Amaç Fonkisyon 45
2.4.1. Dairesel Boşluklu 46
2.4.2. Sinüziodal ve Altıgen Boşluklu 46
2.5. Tasarım Kısıtlamalar 46
2.5.1. Dairesel Boşluklu 47
2.5.2. Sinüziodal Boşluklu 47
2.5.3. Altıgen Boşluklu 48
2.6. Kullanılan Algoritmaları 49
2.6.1. Çiçek Tozlaşma Algoritması (FPA) 49
2.6.2. Ateşböceği Algoritması (FA) 50
2.6.3. Yarasa algoritması (BA) 51
2.6.4. Gri Kurt Optimizasyonu (GWO) 52
2.6.5. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) 53
2.6.6. Diferansiyel Evrim (DE) 54
2.6.7. İmparatorluk Rekabet Algoritması (ICA) 55
2.6.8. Şarj sistem arama (CSS) 56
2.6.9. Işın Optimizasyonu (IRO) 57
2.6.10. Çarpışan Cisimler Optimizasyon (CBO) 58
2.6.11. Halat Çekme Optimizasyon (TWO) 60
2.6.12. Su Buharlaşma Optimizasyonu (WEO) 61
2.6.13. Titreşimli Parçacıklar Sistemi (VPS) 62
2.6.14. Döngüsel Partenogenez Algoritması (CPA) 63
2.6.15. Termal Değişim Optimizasyonu (TEO) 64

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Algoritma Sonuçlarının Analiz Edilmesi 67
3.1.1. 300 cm’lik Petek Kiriş Analiz Edilmesi 67
3.1.1.1. Dairesel Boşluklu Durum 67
3.1.1.2. Altıgen Boşluklu Durum 68
3.1.1.3. Sinüziodal Boşluklu Durum 69
3.1.2. 400 cm’lik Petek Kiriş Analiz Edilmesi 71
3.1.2.1. Dairesel Boşluklu Durum 71
3.1.2.2. Altıgen Boşluklu Durum 72
3.1.2.3. Sinüziodal Boşluklu Durum 73
3.1.3. 500 cm’lik Petek Kiriş Analiz Edilmesi 74
3.1.3.1. Dairesel Boşluklu Durum 74
3.1.3.2. Altıgen Boşluklu Durum 75
3.1.3.3. Sinüziodal Boşluklu Durum 76
3.1.4. 600 cm’lik Petek Kiriş Analiz Edilmesi 78

3.1.4.1. Dairesel Boşluklu Durum 78
3.1.4.2. Altıgen Boşluklu Durum..... 79
3.1.4.3. Sinüziodal Boşluklu Durum 80
3.1.5. 700 cm'lik Petek Kiriş Analiz Edilmesi..... 81
3.1.5.1. Dairesel Boşluklu Durum.....81
3.1.5.2. Altıgen Boşluklu Durum..... 83
3.1.5.3. Sinüziodal Boşluklu Durum 84
3.1.6. 800 cm'lik Petek Kiriş Analiz Edilmesi..... 85
3.1.6.1. Dairesel Boşluklu Durum 85
3.1.6.2. Altıgen Boşluklu Durum..... 86
3.1.6.3. Sinüzoidal Boşluklu Durum 87
3.2. Yineleme Sayısının Amaç Fonksiyonuna Hassasiyet Analizi 89
3.2.1. 600 cm'lik Kiriş Dairesel Boşluklu Petek Kiriş..... 89
3.2.2. 800 cm'lik Kiriş Dairesel Boşluklu Durum 93
3.2.3. 600 cm'lik Kiriş Altıgen Boşluklu Durum..... 98
3.2.4 800 cm'lik Kiriş Altıgen Boşluklu Durum..... 103
3.2.5. 600 cm'lik Kiriş Sinüziodal Boşluklu..... 108
3.2.6. 700 cm'lik Kiriş Sinüzoidal Boşluklu..... 112
3.3. İşlem Süresi Analizi..... 117
3.4. Standart Sapma Tahkiki..... 126
3.4.1. Boşluk Tiplerine Göre Göreli Standart Sapma (RSD) Analizi 135
3.5. Algoritmaların Performansının Analizi ve Karşılaştırılması 135
3.5.1. CPA Değerlendirilmesi 136
3.5.1.1. CPA Dairesel Boşluklu..... 136
3.5.1.2. CPA Altıgen Boşluklu..... 137
3.5.1.3. CPA Sinüzoidal Boşluklu Kiriş..... 138
3.5.2. IRO Değerlendirilmesi 140
3.5.2.1. IRO Dairesel Boşluklu Kiriş..... 140
3.5.2.2. IRO Altıgen Boşluklu Kiriş..... 141
3.5.2.3. IRO Sinüzoidal Boşluklu Kiriş..... 142
3.5.3. TWO Değerlendirilmesi..... 144
3.5.3.1. TWO Dairesel Boşluklu Kiriş 144
3.5.3.2. TWO Altıgen Boşluklu..... 145
3.5.3.3. TWO Sinüzoidal Boşluklu Kiriş..... 147
3.5.4. VPS Değerlendirilmesi..... 148
3.5.4.1. VPS Dairesel Boşluklu Kiriş 148
3.5.4.2. VPS Altıgen Boşluklu Kiriş 149
3.5.4.3. VPS Sinüzoidal Boşluklu Kiriş 150
3.5.5. ICA Değerlendirilmesi 152
3.5.5.1. ICA Dairesel Boşluklu Kiriş..... 152
3.5.5.2. ICA Altıgen Boşluklu Kiriş..... 153
3.5.5.3. ICA Sinüzoidal Boşluklu Kiriş..... 154

3.6. Boşluk Geometrisi ve Kiriş Uzunluğunun Algoritma Performansına Etkisi: İşlem Süresi ve Standart Sapma Açısından Davranış Eğilimlerinin (Trend) İncelenmesi 156
3.6.1. CPA Algoritması ... 157
3.6.2. IRO algoritması ... 157
3.6.3. TWO Algoritması ... 158
3.6.4. VPS algoritması ... 159
3.6.5. ICA algoritması ... 159
3.7. İşlem Süresi ve Kararlılık Açısından Algoritmaların Performans Analizi ... 161
3.7.1. CPA Algoritması ... 161
3.7.2. IRO Algoritması ... 162
3.7.3. TWO Algoritması ... 164
3.7.4 VPS Algoritması ... 165
3.7.5. ICA Algoritması ... 166
3.8. Çözüm Stabilitesi ve İşlem Verimliliği Üzerine Değerlendirme ... 168
3.8.1. Amaç Fonksiyonunun Stabilite Yön, Uzunluk ve Yinelemeler Açısından Analizi ... 168
3.8.1.1. Boşluğun amaç fonkisyonyn stabilitesi üzerindeki yönünün, uzunluğuna etkisinin ve boşluğun tipinin analizi ... 169
3.8.1.1.1. 600 cm Dairesel, Altıgen ve Sinüzoidal Boşluklu ... 169
3.8.1.1.2. 700 cm (Yalnızca Sinüzoidal Boşluklu) ... 169
3.8.1.1.3. 800 cm Dairesel ve Altıgen Boşluklu ... 170
3.8.2. Trend Analizi ... 171
3.8.2.1. İşlem Süresi Analizi ... 171
3.8.2.2. Standart Sapma Analizi ... 171
3.8.2.3. Korelasyon Katsayısı Analizi ... 172
3.9. Ortalama Amaç Fonksiyonu Sonuçları, Standart Sapma ve İşlem Süresine Dayalı Olarak Algoritma Performanslarının Karşılaştırmalı Betimsel Analizi ... 173
3.10. Algoritmalarının Kesit Boyutlarını Belirleme Yaklaşımlarının Karşılaştırmalı Analizi ... 174
3.11. Tasarım Değişkenleri Açısından Algoritmaların Karşılaştırmalı Performans Analizi ... 184
3.11.1 Dairesel Boşluklu Kirişlerde Kesit Yüksekliğinin Algoritmalara Göre Analizi ... 184
3.11.2 Altıgen Boşluklu Kirişlerde Kesit Yüksekliğinin Algoritmalara Göre Analizi ... 185
3.11.3 Sinüzoidal Boşluklu Kirişlerde Kesit Yüksekliğinin Algoritmalara Göre Analizi ... 187
3.11.4 Dairesel Boşluklu Kirişlerde Başlık Genişliğinin Algoritmalara Göre Analizi ... 189
3.11.5 Altıgen Boşluklu Kirişlerde Başlık Genişliğinin Algoritmalara Göre Analizi ... 190

3.11.6 Sinüzoidal Boşluklu Kirişlerde Başlık Genişliğinin Algoritmalara Göre Analizi 191
3.11.7 Dairesel Boşluklu Kirişlerde Gövde Genişliğinin Algoritmalara Göre Analizi 192
3.11.8 Altıgen Boşluklu Kirişlerde Gövde Genişliğinin Algoritmalara Göre Analizi 194
3.11.9 Sinüzoidal Boşluklu Kirişlerde Gövde Genişliğinin Algoritmalara Göre Analizi 195
3.11.10 Dairesel Boşluklu Kirişlerde Başlık Kalınlığının Algoritmalara Göre Analizi 197
3.11.11. Altıgen Boşluklu Kirişlerde Başlık Kalınlığının Algoritmalara Göre Analizi 198
3.11.12. Sinüzoidal Boşluklu Kirişlerde Başlık Kalınlığının Algoritmalara Göre Analizi 199
3.12. Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulanması 199
3.13. Sehime Göre Optimizasyon 205
SONUÇLAR VE ÖNERİLER 210
KAYNAKÇA 219
ÖZGEÇMİŞ 230

KISALTMALAR

$\mathbf{M_D}$	:	Dıştan yükü gelen moment
$\mathbf{M_{kk}}$	:	Kestinin plastik moment kapasitesi
$\mathbf{E}$	:	Elastisite Modülü
$\boldsymbol{\rho}$	:	Kütlesel yoğunluk
$\mathbf{F_y}$	:	Çelik kayma dayanımı
$\mathbf{K_D}$	:	Dış yüklerinden gelen kesme
$\mathbf{K_{kk}}$	:	Petek kiriş kesitinin düşey kesme kapasitesi
$\mathbf{K_{Dy}}$	:	Yatay kesme kuvveti
$\mathbf{K_{ky}}$	:	Kesitin yatay kesme kuvvet kapasitesi
$\mathbf{M_{eg}}$	:	Göndenin kritik bölgesindeki elastik moment
$\mathbf{MR_g}$	:	Gövdenin kritik bölgesindeki elastik moment mukavemet
$\mathbf{N_D}$	:	Dış yüklerinden noktasal yüküdür
$\mathbf{B_g}$	:	Gövdenin basınç akma kapasitesi
$\mathbf{q}$	:	Yayılı yük
$\mathbf{B_m}$	:	Gövdenin basınç mukavemeti
$\mathbf{G_g}$	:	Gövdenin Euler burkulma gerilmesi
$\mathbf{M_V}$	:	Vierendeel momenti
$\boldsymbol{\phi_e}$	:	Eğilme mukavemet faktörü
$\mathbf{k_T}$	:	T kesitin kabul edebilir eğilme kapasitesi
TFY	:	Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi
$\mathbf{p_T}$	:	T kesitin plastik modülü
$\mathbf{P_{ğ}}$	:	Kesitin boşluğun orta uzunluğunda eğilme kapasitesi
$\mathbf{p_P}$	:	Petek kiriş kesitinin plastik modülü

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. Çelik malzemelerinin mekanik özellikleri.....32

Tablo 2. 300 cm dairesel boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri……...68

Tablo 3. 300 cm altıgen boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değer.....69

Tablo 4. 300 cm sinüzoidal boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri.....70

Tablo 5. 400 cm dairesel boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerler….....71

Tablo 6. 400 cm altıgen boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri..... 72

Tablo 7. 400 cm sinüzoidal boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri …..74

Tablo 8. 500 cm dairesel boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri…..... 75

Tablo 9. 500 cm altıgen boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri …..... 76

Tablo 10. 500 cm sinüzoidal boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri**..**.....77

Tablo 11. 600 cm dairesel boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri.....78

Tablo 12. 600 cm altıgen boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri …....80

Tablo 13. 600 cm sinüzoidal boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri**.**...81

Tablo 14. 700 cm dairesel boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri….. 82

Tablo 15. 700 cm altıgen boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerle.....83

Tablo 16. 700 cm sinüzoidal boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri**.**...84

Tablo 17. 800 cm dairesel boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri…....86

Tablo 18. 800 cm altıgen boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri……..87

Tablo 19. Boşluk tipi ve algoritmalara göre göreli standart sapma (RSD) yüzdeleri.135

Tablo 20. CPA dairesel boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları.....137

Tablo 21. CPA altıgen boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları.....138

Tablo 22. CPA sinüzoidal boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları.....139

Tablo 23. IRO dairesel boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları..... 140

Tablo 24. IRO altıgen boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları.....142

Tablo 25. IRO sinüzoidal boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları.....143

Tablo 26. TWO dairesel boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları.....145

Tablo 27. TWO altıgen boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları.....146

Tablo 28. TWO sinüzoidal boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları.....147
Tablo 29. VPS dairesel boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları..... 149
Tablo 30. VPS altıgen boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları..... 150
Tablo 31. VPS sinüzoidal boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları..... 151
Tablo 32. ICA dairesel boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları.....152
Tablo 33. ICA altıgen boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları.....154
Tablo 34. ICA sinüzoidal boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları.....155
Tablo 35. Üç Boşluk Tipleri ve Kiriş Uzunluklarına Göre Optimizasyon Algoritmalarının Performans Sınıflandırması.....160
Tablo 36. Kiriş uzunluğu ve boşluk tipine göre en uygun algoritma dağılımı.....168
Tablo 37. St-355 için optimum tasarım değerleri (L=200,300,400,500,600 cm).....205
Tablo 38. St-355 için optimum tasarım değerleri (L=700,750, 800, 900, 1000 cm)207
Tablo 39. St-355 için optimum tasarım değerleri (L=200,300,400,500,600 cm)....208
Tablo 40. St-355 için optimum tasarım değerleri (L=700,750, 800, 900, 1000 cm)..209

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Stamford Bridge Stadyumu – Londra. (Erdal, F. 2011).....1
Şekil 2. Altıgen, sinüzoidal ve dairesel boşluklu... (Pritykin, A. I. 2022).....2
Şekil 3. Eğilme göçmesi (Elaiwi, S. S. , 2019).....33
Şekil 4. Petek kiriş kesiti (Mashayekhi ve Mosayyebi, 2023).....34
Şekil 5. Yatay kesme göçmesi (Elaiwi, S. S. , 2019).....36
Şekil 6. Gövdenin kesme kuvveti ile burkulma göçmesi (Elaiwi, S. S. , 2019)..... 37
Şekil 7. Gövdenin basınç kuvveti ile burkulma göçmesi (Elaiwi, S. S. , 2019).....39
Şekil 8. Vierendeel mekanizma göçmesi (Elaiwi, S. S. , 2019).....41
Şekil 9. Vierendeel mekanizma 4 plastik mafsal (Elaiwi, S. S. , 2019).....42
Şekil 10. FPA algoritması akış diyagramı….....49
Şekil 11. FA algoritması akış diyagramı.....50
Şekil 12. BA algoritması akış diyagramı…….....51
Şekil 13. GWO algoritması akış diyagramı.....52
Şekil 14. PSO algoritması akış diyagramı.....53
Şekil 15. DE algoritması akış diyagramı.....55
Şekil 16. ICA algoritması akış diyagramı…….....55
Şekil 17. CSS algoritması akış diyagramı…….....57
Şekil 18. IRO algoritması akış diyagramı …….....58
Şrkil 19. CBO algoritması akış diyagramı …….....59
Şekil 20. TWO algoritması akış diyagramı …….....60
Şekil 21. WEO algoritması akış diyagramı …….....61
Şekil 22. VPS algoritması akış diyagramı …….....62
Şekil 23. CPA algoritması akış diyagramı ……..…….....63
Şekil 24. TEO algoritması akış diyagramı …….....65
Şekil 25. CPA – 600 cm dairesel petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi….....90
Şekil 26. IRO – 600 cm dairesel petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi ….....90
Şekil 27. VPS – 600 cm dairesel petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....91
Şekil 28. TWO – 600 cm dairesel petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....91
Şekil 29. ICA – 600 cm dairesel petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....92
Şekil 30. 600 cm dairesel petek kiriş – 5 algoritma amaç fonksiyonu stabilitesi.....93
Şekil 31. CPA – 800 cm dairesel petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....94
Şekil 32. IRO – 800 cm dairesel petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....94

Şekil 33. VPS – 800 cm dairesel petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....95
Şekil 34. TWO – 800 cm dairesel petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....96
Şekil 35. ICA – 800 cm dairesel petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....96
Şekil 36. 800 cm dairesel petek kiriş – 5 algoritma amaç fonksiyonu stabilitesi.....97
Şekil 37. CPA – 600 cm altıgen petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....98
Şekil 38. IRO – 600 cm altıgen petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....99
Şekil 39. TWO – 600 cm altıgen petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....100
Şekil 40. VPS – 600 cm altıgen petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....101
Şekil 41. ICA – 600 cm altıgen petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....101
Şekil 42. 600 cm altıgen petek kiriş – 5 algoritma amaç fonksiyonu stabilitesi.....102
Şekil 43. CPA – 800 cm altıgen petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....103
Şekil 44. IRO – 800 cm altıgen petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....104
Şekil 45. TWO – 800 cm altıgen petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....105
Şekil 46. VPS – 800 cm altıgen petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....106
Şekil 47. ICA – 800 cm altıgen petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....106
Şekil 48. 800 cm altıgen petek kiriş – 5 algoritma amaç fonksiyonu stabilitesi.....107
Şekil 49. CPA – 600 cm sinüzoidal petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....108
Şekil 50. IRO – 600 cm sinüzoidal petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....109
Şekil 51. TWO – 600 cm sinüzoidal petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi....110
Şekil 52. VPS – 600 cm sinüzoidal petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....111
Şekil 53. ICA – 600 cm sinüzoidal petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....111
Şekil 54. 600 cm sinüzoidal petek kiriş – 5 algoritma amaç fonksiyonu stabilitesi..112
Şekil 55. CPA – 700 cm sinüzoidal petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....113
Şekil 56. IRO – 700 cm sinüzoidal petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....114
Şekil 57. TWO – 700 cm sinüzoidal petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi....114
Şekil 58. VPS – 700 cm sinüzoidal petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....115
Şekil 59. ICA – 700 cm sinüzoidal petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi.....116
Şekil 60. 700 cm sinüzoidal petek kiriş – 5 algoritma amaç fonksiyonu stabilitesi..116
Şekil 61. 300 cm dairesel petek kiriş – işlem süresi (5 algoritma).....117
Şekil 62. 300 cm altıgen petek kiriş – işlem süresi (5 algoritma).....118
Şekil 63. 300 cm sinüzoidal petek kiriş – işlem süresi (5 algoritma).....118
Şekil 64. 400 cm dairesel petek kiriş – işlem süresi (5 algoritma).....119

Şekil 65. 400 cm altıgen petek kiriş – işlem süresi (5 algoritma).....119
Şekil 66. 400 cm sinüzoidal petek kiriş – işlem süresi (5 algoritma).....120
Şekil 67. 500 cm dairesel petek kiriş – işlem süresi (5 algoritma).....120
Şekil 68. 500 cm altıgen petek kiriş – işlem süresi (5 algoritma).....121
Şekil 69. 500 cm sinüzoidal petek kiriş – işlem süresi (5 algoritma).....121
Şekil 70. 600 cm dairesel petek kiriş – işlem süresi (5 algoritma).....122
Şekil 71. 600 cm altıgen petek kiriş – işlem süresi (5 algoritma).....122
Şekil 72. 600 cm sinüzoidal petek kiriş – işlem süresi (5 algoritma).....123
Şekil 73. 700 cm dairesel petek kiriş – işlem süresi (5 algoritma).....123
Şekil 74. 700 cm altıgen petek kiriş – işlem süresi (5 algoritma).....124
Şekil 75. 600 cm sinüzoidal petek kiriş – işlem süresi (5 algoritma).....124
Şekil 76. 800 cm dairesel petek kiriş – işlem süresi (5 algoritma).....125
Şekil 77. 800 cm altıgen petek kiriş – işlem süresi (5 algoritma).....125
Şekil 78. 300 cm dairesel petek kiriş – standart sapma (5 algoritma).....126
Şekil 79. 300 cm altıgen petek kiriş – standart sapma (5 algoritma).....127
Şekil 80. 300 cm sinüzoidal petek kiriş – standart sapma (5 algoritma).....127
Şekil 81. 400 cm dairesel petek kiriş – standart sapma (5 algoritma).....128
Şekil 82. 400 cm altıgen petek kiriş – standart sapma (5 algoritma).....128
Şekil 83. 400 cm sinüzoidal petek kiriş – standart sapma (5 algoritma).....129
Şekil 84. 500 cm dairesel petek kiriş – standart sapma (5 algoritma).....129
Şekil 85. 500 cm altıgen petek kiriş – standart sapma (5 algoritma).....130
Şekil 86. 500 cm sinüzoidal petek kiriş – standart sapma (5 algoritma).....130
Şekil 87. 600 cm dairesel petek kiriş – standart sapma (5 algoritma).....131
Şekil 88. 600 cm altıgen petek kiriş – standart sapma (5 algoritma).....131
Şekil 89. 600 cm sinüzoidal petek kiriş – standart sapma (5 algoritma).....132
Şekil 90. 700 cm dairesel petek kiriş – standart sapma (5 algoritma).....132
Şekil 91. 700 cm altıgen petek kiriş – standart sapma (5 algoritma).....133
Şekil 92. 700 cm sinüzoidal petek kiriş – standart sapma (5 algoritma).....133
Şekil 93. 800 cm dairesel petek kiriş – standart sapma (5 algoritma).....134
Şekil 94. 800 cm altıgen petek kiriş – standart sapma (5 algoritma).....134
Şekil 95. CPA Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi.....136
Şekil 96. CPA Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi.....137

Şekil 97. CPA sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi.....139
Şekil 98. IRO Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi.....140
Şekil 99. IRO Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi.....141
Şekil 100. IRO Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi.....143
Şekil 101. TWO Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi.....144
Şekil 102. TWO Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi.....146
Şekil 103. TWO Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi.....147
Şekil 104. VPS Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi.....148
Şekil 105. VPS Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi.....149
Şekil 106. VPS Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi.....151
Şekil 107. ICA Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi.....152
Şekil 108. ICA Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi.....154
Şekil 109. ICA Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi.....155
Şekil 110. Beş Algoritma ile Dairesel Boşluklu Petek Kirişlerin Kesit Yüksekliği Değerlendirmesi.....185
Şekil 111. Beş Algoritma ile Altıgen Boşluklu Petek Kirişlerin Kesit Yüksekliği Değerlendirmesi.....186
Şekil 112. Beş Algoritma ile Sinüzoidal Boşluklu Petek Kirişlerin Kesit Yüksekliği Değerlendirmesi.....187
Şekil 113. Beş Algoritma ile Dairesel Boşluklu Petek Kirişlerin Başlık Genişliği Değerlendirmesi.....189
Şekil 114. Beş Algoritma ile Altıgen Boşluklu Petek Kirişlerin Başlık Genişliği Değerlendirmesi.....190
Şekil 115. Beş Algoritma ile Sinüzoidal Boşluklu Petek Kirişlerin Başlık Genişliği Değerlendirmesi.....192
Şekil 116. Beş Algoritma ile Dairesel Boşluklu Petek Kirişlerin Gövde Genişliği Değerlendirmesi.....193
Şekil 117. Beş Algoritma ile Altıgen Boşluklu Petek Kirişlerin Gövde Genişliği Değerlendirmesi.....195
Şekil 118. Beş Algoritma ile Sinüzoidal Boşluklu Petek Kirişlerin Gövde Genişliği Değerlendirmesi.....196

Şekil 119. Beş Algoritma ile Dairesel Boşluklu Petek Kirişlerin Başlık Kalınlığı Değerlendirmesi.....197
Şekil 120. Beş Algoritma ile Altıgen Boşluklu Petek Kirişlerin Başlık Kalınlığı Değerlendirmesi.....198
Şekil 121. Beş Algoritma ile Sinüzoidal Boşluklu Petek Kirişlerin Başlık Kalınlığı Değerlendirmesi.....200
Şekil 122. IRO-600 için en büyük yer değiştirme değerleri.....202
Şekil 123. IRO-600 için en büyük von-Mises gerilme değerleri.....202
Şekil 124. IRO-600 için en büyük asal gerilme değerleri.....202
Şekil 125. ICA-600 için en büyük yer değiştirme değerleri.....203
Şekil 126. ICA-600 için en büyük von-Mises gerilme değerleri.....203
Şekil 127. ICA-600 için en büyük asal gerilme değerleri.....204
Şekil 128. CPA-600 için en büyük yer değiştirme değerleri.....204
Şekil 129. CPA-600 için en büyük von-Mises gerilme değerleri.....204
Şekil 130. CPA-600 için en büyük asal gerilme değerleri.....205

ÖNSÖZ

Hayatım boyunca karşılaştığım tüm zorluklara rağmen bu akademik yolculuğu tamamlayabilmemi mümkün kılan yüce Allah'a sonsuz hamd ve şükürlerimi sunarım. Bu çalışmanın ortaya çıkmasında emeği geçen, bana yol gösteren, destek olan herkese en içten teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Bu tez çalışmasının her aşamasında, bilgisi, deneyimi ve samimiyetiyle bana yol gösteren, değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi **Ahmad Reshad NOORI'ye** en içten teşekkürlerimi sunmak isterim. Kendisi, yalnızca bir akademisyen değil, aynı zamanda örnek bir insan, gerçek bir dost ve rehber olarak bana destek vermektedir.Bilgiyi paylaşma konusundaki cömertliği, alçakgönüllülüğü ve nezaketiyle akademik hayata dair birçok konuyu bana öğretmektedir.Sahip olduğum mesleki deneyime rağmen, akademik alanda karşılaştığım yenilikler konusunda bana sabırla rehberlik etmekte, yeni bakış açıları kazandırmaktadır. Ne söylesem, ne kadar teşekkür etsem de hakkını tam olarak ifade etmek mümkün değildir. Bu nedenle, kendisinin; ilmiyle, ahlakıyla, yardımseverliğiyle ve derin bakış açısıyla örnek bir akademisyen olduğu kanaatindeyim.

Ayrıca, Dr. **Ahmad Reshad NOORI'nin** kıymetli **anne** ve **babasına** da en içten teşekkürlerimi sunmak isterim. Onların değerli emekleri ve özverili yetiştirme tarzları sayesinde, örnek alınacak bir bilim insanı yetişmiştir. Bu tez çalışmasını, kendilerine minnet ve vefa duygularımla bir armağan olarak sunuyorum. Sayın danışmanıma, yaşamının her alanında başarı ve esenlikler diliyorum.

Ayrıca, akademik gelişimime katkı sunan ve çalışmam süresince desteklerini esirgemeyen kıymetli hocalarım Prof. Dr. **Mustafa KARAŞAHİN**, Dr. Öğr. Üyesi **Yasin PAŞA**, Dr. Öğr. Üyesi **Mustafa NURİ**, Dr. Öğr. Üyesi **Aylin Ece KAYABEKİR** ve Dr. Öğr. Üyesi **Hamit ÖZTÜRK**'e teşekkür ederim.

Hayatımın ilham kaynakları olan değerli **annem ve babama**, verdikleri emek, sabır, sevgi ve dualarıyla bu başarıya ulaşmamda en büyük paya sahip oldukları için

minnettarım. Onlara ithaf edilecek bir başarı varsa, şüphesiz bu tez onların adanmışlığına adanmıştır.

Ayrıca sevgili kardeşlerim Dr. Öğr. Üyesi **Abuther** ve Dr. **Thoalnorain**'a verdikleri manevi destek, motivasyon ve her daim yanımda oldukları için teşekkür ederim. Kız kardeşim **Karwan**'a da varlığıyla bana güç kattığı için müteşekkirim.

Bu süreçte akademik ve manevi destekleriyle yanımda olan dostlarımdan, üniversitede görev yapan kıymetli arkadaşım Dr**. Muhammet Salih YİĞİT** ile akademi dışından değerli hocam Prof. Dr**. Beytullah TEMEL**'e özel olarak teşekkür ederim.Doğrudan ya da dolaylı şekilde katkı sunan, destek olan ve bu yolculukta yanımda yürüyen herkese kalpten teşekkür ederim. Bu çalışmanın, ilme ve insanlığa faydalı olması en büyük dileğimdir.

Bu doktora çalışmasını hazırlamam sürecinde, bilgi ve destekleriyle yoluma ışık tutan değerli danışman hocama, bana her zaman inanan ve sabırla yanımda olan aileme, değerli hocalarıma, kardeşlerime ve tüm dostlarıma içten teşekkür ederim.

Köklerimin ait olduğu, her zaman **kalbimde taşıdığım aziz vatanıma** en derin şükranlarımı sunarım. Ayrıca, yükseköğrenim yolculuğumda bana bu imkânı sunan **Türkiye** Cumhuriyeti'ne gönülden teşekkür ederim.

Son olarak, bu çalışmayı belki bir gün haberdar olacakları umuduyla – kıymetli çocuklarım **Hikmet**, **Rewan** ve **Abdülkerim**'e ithaf ediyorum.

Marwan ALBAYATİ

GİRİŞ

Son yıllarda mühendislik yapılarında hem ekonomik hem de yapısal verimliliği sağlama arayışı, çeşitli tasarım yaklaşımlarının geliştirilmesine neden olmuştur. Bu kapsamda, gövdesinde açılan boşluklar sayesinde kendi ağırlığını azaltan ve işlevselliğini artıran petek kirişler, özellikle endüstriyel ve altyapı projelerinde tercih edilen önemli yapısal elemanlar hâline gelmiştir. Petek kirişlerin sunduğu en önemli avantajlar arasında, malzeme tasarrufu sağlarken taşıma kapasitesinde anlamlı bir kayıp oluşturmaması yer almaktadır.

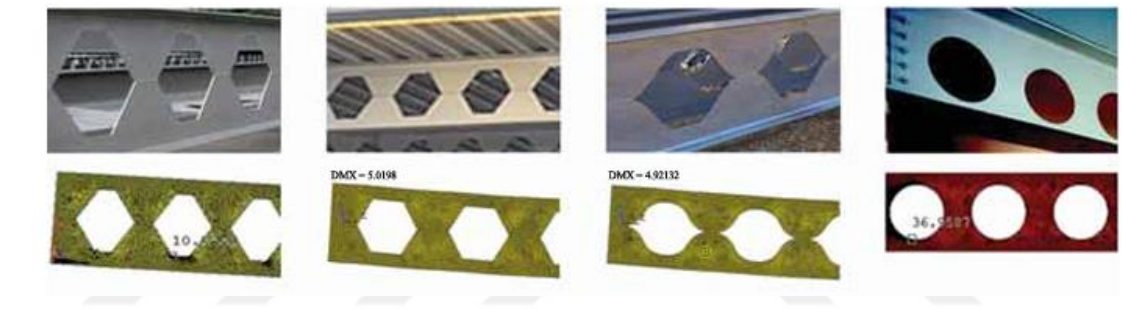
Bu tip kirişlerin tasarımında, gövde boyunca belirli geometrik şekillerde (dairesel, altıgen, sinüzoidal vb) boşluklar açılmakta ve bu boşluklar, tesisat sistemlerinin geçişine olanak tanırken, yapının taşıyıcı performansına doğrudan etki etmektedir. Ancak bu boşluklar yapısal davranış üzerinde karmaşık gerilme dağılımları, burkulma eğilimleri ve rijitlik değişimleri gibi etkiler doğurarak yeni mühendislik problemlerini de beraberinde getirmektedir.



Şekil 1. Stamford Bridge Stadyumu – Londra

Bu karmaşık yapısal davranışların analizinde, klasik mühendislik hesaplarının ötesine geçilmesi gerekmektedir. Son yıllarda gelişen hesaplama teknikleri ve bilgi işlem gücü, mühendislik problemlerinin çözümünde sezgisel tabanlı yaklaşımların da kullanılmasını mümkün kılmıştır. Özellikle meta-sezgisel algoritmalar, geniş çözüm

alanlarında en uygun sonuca ulaşmak amacıyla kullanılan, doğadan ilham alan güçlü optimizasyon yöntemleridir. Bu tez çalışmasının önemi, modern yapısal elemanlardan biri olan petek kirişlerin optimizasyonunda bu gelişmiş algoritmaların kullanılmasıyla ortaya çıkmaktadır. Çalışmada, farklı boşluk tiplerinin (sinüzoidal, altıgen ve dairesel) kirişin yapısal davranışı üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak incelenmekte, aynı zamanda algoritmalar yardımıyla maliyetin azaltılması ve tasarım performansın artırılması hedeflenmektedir. Tez kapsamında, amaç fonksiyonu (maliyet), işlem süresi, standart sapma ve korelasyon katsayısı gibi kriterler dikkate alınarak farklı algoritmalar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu analizler, yapı mühendisliğinde daha etkin, sürdürülebilir ve ekonomik çözümler üretebilmek açısından önemli bir katkı sunmaktadır.



Şekil 2. Altıgen, sinüzoidal ve dairesel boşluklu

Bu çalışma, malzeme bilimi, yapısal analiz ve bilgi işlem tabanlı hesaplama tekniklerinin bir araya geldiği bütüncül bir yaklaşımla, çağdaş mühendisliğin gereksinimlerine uygun, uygulamaya dönük bir tasarım süreci ortaya koymaktadır. Bu tez, CPA (Döngüsel Partenogenez Algoritması), IRO (Işın Optimizasyon Algoritması), TWO (Halat Çekme Optimizasyon Algoritması), VPS (Titreşimli Parçacıklar Sistemi Algoritması) ve ICA (İmparatorluk Rekabet Algoritması) olmak üzere beş güncel metasezgisel algoritmanın birlikte kullanıldığı ilk çalışmalar arasında yer almakta ve literatüre özgün bir katkı sunmaktadır. Genellikle yalnızca iki veya üç farklı uzunluğun incelendiği literatürün aksine, bu çalışmada 300 cm ile 800 cm arasında değişen altı farklı uzunluk ele alınmıştır. Literatürde sınırlı sayıda çalışmada yer verilen sinüzoidal boşluklar bu tezde optimize edilerek tasarıma entegre edilmiş ve bu yönüyle çalışmaya yenilikçi bir boyut daha kazandırılmıştır. Aynı anda maliyet, işlem süresi, standart sapma ve korelasyon katsayısını analiz eden ender çalışmalardan

biri olması bakımından dikkat çekici olduğu düşünülmektedir. Bu dört performans göstergesini petek kirişlerin optimizasyon için birlikte ele alan literatür. Bu yönüyle mevcut tez literatörde önemli bir bilimsel katkı yapmaktadır. Nicel göstergelerin karşılaştırmalı analiz yoluyla mühendislik karar sürecine entegre edilmesi, çalışmaya uygulamalı bir değer katmaktadır. Ayrıca, amaç fonksiyonunun 10.000 iterasyona kadar kararlılık şekilleri üretilmiş ve her algoritmanın farklı uzunluk ve boşluk türlerinde gösterdiği kararlılık detaylı şekilde test edilmiştir. Yeni bir tasarım yöntemi önerilmiş ve bu yaklaşımın mühendislik yazılımlarına entegrasyonu için teorik bir altyapı oluşturulmuştur. İstatistiksel analizlerin çok değişkenli yöntemlerle genişletilmesi önerilmiş ve bu durum çalışmanın akademik derinliğini artırma potansiyeline sahiptir.

Son olarak, bu tezde hassasiyet analizi ile parametre değişimlerinin sonuçlar üzerindeki etkisi değerlendirilmiş; eğilim analizi ile işlem süresi, standart sapma ve korelasyon katsayısının değişim yönü detaylı olarak incelenmiştir. Bu kapsamlı analizler çalışmaya hem analitik hem de metodolojik derinlik kazandırmaktadır. Bu tezde parametrik sonuçların elde edilmesi için MATLAB programında kodlar hazırlanmıştır. Hazırlanan kodlar ile 690 adet parametrik çalıma sunularak literatöre her katkı daha sağlanmıştır.

BİRİNCİ BÖLÜM

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

1.1. Petek Kirişlerle İlgili Mevcut Çalışmalar

Morkhade ve ark. (2021) çalışmalarında petek kirişlerin gövde burkulması ve Vierendeel göçme mekanizmelerini deneysel olarak incelemiştir. Boşluk eksantiristesini 25 mm ve 50 mm kabul ederek eksantiristenin petek kirişlerin davranışını üzerinde etkilediğini araştırmıştır. Ertürkmen ve Noori (2023) üç boyutlu Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanarak, boşluk geometrisinin etkisi aracılığıyla petek eğri kirişlerin davranışını sabit bir şekilde doğrulamıştır. Bu analizde, altıgen, kare, beşgen ve dairesel boşluklar kullanılarak, bu tür kirişlerin gerilme ve düşey yer değiştirme değerleri incelenmiştir. Farklı mesnet türleri dikkate alınmıştır: sabit-sabit, ankestre-ankestre. Boşluk geometrisinin yer değiştirme değerlerini de etkilediği belirlenmiştir.

Mehetre ve Talikoti (2020) petek kirişlerin, boşluklarındaki eğilme momenti ve yer değiştirme rijitliğinin yanı sıra, boşlukların köşelerinde oluşabilecek kesme gerilmeleri nedeniyle meydana gelebilecek olası göçme türleri incelenmiştir. Bu çalışmalarında, toplam 15 adet petek kiriş üretilmiş ve dört deneysel model üzerinde test edilmiştir. Üretilen tüm petek kirişlerin analizi, ANSYS programı kullanılarak SEY ile yapılmıştır. Analiz sırasında, çeyrek, altıda bir ve sekizde bir oranında yuvarlak köşe yarıçapı değerleri dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, daha önceki deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve bu sonuçlar, ANSYS programı ile elde edilen sonuçlarla da kıyaslanmıştır.bu modellerin birbirleriyle uyumlu olduğu gösteilrmiştir. Ayrıca, çeyrek yuvarlak köşe yarıçapı değerine sahip petek kirişlerin, altıgen petek kirişlere göre %20,78 daha yüksek eğilme momenti dayanımına ve %11,51 daha düşük yer değiştirmeye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Zaarour ve Redwood (1996), ince gövdeli 14 petek kiriş üzerinde deneysel bir deney gerçekleştirmektadir. Ayrıca, bu kirişlerin göçme mekanizmasını tahmin etmek amacıyla önceki deneylere dayalı olarak doğrusal olmayan SEY kullanılmıştır. Elde edilen sonuçların, iyi bir uyum göstererek gelecekte daha hassas çalışmalar yapılmasına olanak sağladığı vurgulanmıştır.

Sinüzoidal boşluklara sahip dairesel petek kirişler üzerinde deneysel testler Durif ve Bouchair (2012) tarafından yapılmıştır. Bu testlerde, ArcelorMittal tarafından geliştirilen yenilikçi bir Angelina petek kiriş tipinin neden olduğu yeni bir tipi tespit edilmiştir. Bu göçme, tasarım standartlarında yer almayan, boşluğun sinuzoidal kısmındaki yerel burkulma göçmelerinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, boşluklarda plastik mafsalların oluşumu ile ilgili ikinci bir göçme tipi de gözlemlenmiştir. Bu çalışmlarıada, boşluklardaki farklı çeyreklerle sinuzoidal boşluklar için bir deneysel program kullanılmış ve bu program doğrulanmıştır. Göçme durumlarının gözlemlenmesi ve mevcut varsayımlar ile sayısal sonuçlara dayalı yeni bir analitik model geliştirilmesi için parametrik bir araştırma içermektedir. Demir (1999), petek kirişler gövde burulma davranışını incelemek için elastik ve plastik analiz yöntemlerini kullanmıştır. Analizler, SEY ile gerçekleştirilmiş olup 45° ile 60° arasında değişen kesim açılarına sahip toplam 42 petek kiriş üzerinde uygulanmaktadır. Elde edilen sonuçlar, kesim açısı 60° olan kirişler için değişim katsayısının 0.17 ile 0.137 arasında kabul edilebileceğini gösterir.

Pachpor ve ark. (2011) iki farklı çalışma yapmıştır: ANSYS programını kullanarak petek kirişinin merkezindeki yer değiştirme modelini incelemek amacıyla altıgenin derinliğinin gövdeye oranı ve petek kiriş boyunca altıgenn konumu, mesnet koşulları ve sabit yükleme durumlarını incelemıştır. Ön iki petek kiriş üzerinde deneyler yapılmış ve sonuçlar, Hosain ve Speirs (1970) tarafından, meydana gelen göçme tipi ve bu kirişlerin maksimum dayanımına göre değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, boşluk geometrisine bağlı, kirişlerde meydana gelen Virendeel mekanizması kaynaklı göçme oranının, boşluk boğazın azaldıkça düştüğü tespit edilmiştir. Kirişin esnekliği nedeniyle, göçme ya kaynak yırtılması yoluyla ya da başılık yüksek moment etkisiyle eğilme mekanizması sonucunda meydana gelmiştir. Elde edilen sonuçlar, SEY ile elde edilen bulgularla uyumluluk göstermiştir. Kshirsagar ve Parek (2018) petek kirişlerde güçlendirme kullanımı ve bunların bu kirişlerin mukavemeti üzerindeki etkileri hakkında önceki literatüre ilişkin bir araştırma gerçekleştirmiştir; çünkü petek kirişlerin gövde kısmında takviyelerin kullanılması, çökmeye azaltır ve yük taşıma kapasitesini arttırmaktadır. Dairesel petek kirişlerin kesme dayanımını doğru bir şekilde tahmin etmek için Kang ve ark. (2021) tarafından etkin bir model geliştirilmiştir. Farklı boşluk boyutlarına, konumlarına ve sayılarına sahip dokuz çelik

kirişin deneysel analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlarla bir SEY modeli doğrulanmıştır. Bu model, parametrik çalışmalarla farklı geometrik parametrelerin etkilerini incelemek için kullanılmıştır.Sonuçlara dayanarak geliştirilen DSM tabanlı model, hem dairesel hem de uzatılmış boşluklara sahip kirişlerin kesme dayanımını tahmin edebilmekte ve tek veya çoklu boşluklara sahip kirişleri kapsayacak şekilde genelleştirilmiştir. Modelin tahminleri, deneysel ve sayısal sonuçlarla yüksek uyum göstermektedir ve geniş bir tasarım yelpazesine uygulanabilir.

Al-Thabhawee ve Al-Kannoon (2022) orta boşluk üzerindeki tekil yük altında petek kirişlerin deneysel test edilmesini ele almaktadır. Bu kirişler, standart I kesitlerinin gövde kısmının özel bir zigzag desenle kesilip, gövde arasına değişken genişleme plakaları yerleştirilip kaynakla birleştirilmesiyle oluşturulur. Deneysel sonuçlar, kirişlerin kabul edilen yük taşıma kapasitesinin, ana kesitin kapasitesinin %140'ına kadar artırılabileceğini göstermektedir. Bu kirişlerin üretimi, uluslararası inşaat kodu ile belirlenen deplasman sınırları dahilinde, uzun boşluklu elemanların yük taşıma kapasitesini artırmanın etkili bir yoludur. Ayrıca, gövde burkulması ve ek yerlerinde kesme göçmesi gözlemlenmiştir.

Petek kirişlerin distorsiyonel burkulma davranışı, moment gradyanı faktörü ve kalıntı gerilme gibi tasarım unsurları Zhou he ve ark. (2019) tarafından incelenmektedir. Petek kirişlerin distorsiyonel burkulmasıyla ilgili sınırlı araştırma ve tasarım önerilerinin eksikliği, bu alandaki daha fazla çalışmanın gerekliliğini ortaya koymaktadır. Deneysel olarak, sıcak haddelenmiş iki ana profilden üretilen petek kirişlerin distorsiyonel burkulma davranışları ölçülüp analiz edilmiştir. Gerilmelerin ölçülmesi, bu gerilmelerin dağılımını göstererek tasarım simülasyonları için veri sağlamaktadır. Sharifi ve Tohidi (2014) gövde boşluğu olan hasar görmüş çelik petek kirişlerinin eğilme yükleri altında burkulmasını incelemektedir. ABAQUS kullanılarak oluşturulan üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ile I-kirişlerinin gövde boşluğunun yanal burkulma moment kapasitesine etkisi değerlendirilmiştir. Ayrıca, Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemi kullanılarak, farklı boyutlardaki dikdörtgen gövde boşluklarına sahip çelik petek kirişleri için yan burkulma moment kapasitesinin tahmin edilmesine yönelik ampirik formüller geliştirilmiştir. Sonuçlar, önerilen formüllerin doğru tahminler sunduğunu göstermektedir.

Estrada ve ark. (2006) standart geniş başlıklı kirişler ile boşluklu gövde petek kirişlerin maliyet karşılaştırmasını yapmaktır. Aynı yük taşıma kapasitesine sahip olan petek kiriş ve geniş başlıklı kirişlerin, özellikle yüzlerce kirişin gerektiği büyük projelerde daha ekonomik olduğu ve bu nedenle yapıların kullanımı için cazip olduğu gözlemlenmiştir. Farklı yükseklik-kalınlık oranlarına ve takviye yerleşimlerine sahip altıgen boşluklu petek kirişler büyük eğilme altında Wenting ve ark. (2018) trafından test edilmiştir. Yerel stabillık ve genel performans analizleri yapılmış, kirişlerin gövde kısımlarındaki burkulma davranışları incelenmiştir. Sonuçlar, eğilme altında, burkulmanın genellikle boşlukların üstündeki köprü plakasında ve boşluklar arasındaki payanda plakalarında meydana geldiğini göstermektedir.

Showkati ve ark. (2012) dokuz tam ölçekli petek kirişin deneysel çalışması sunulmakta olup yanal desteklerin burkulma etkisi araştırılmıştır. Test sonuçları, mevcut deneysel, analitik ve sayısal çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Deneysel bulgular ve sonuçlar, AISC 360-05 kodunun gereksinimlerine göre değerlendirilmiştir. Redwood ve Demirdjian (1998) dört petek kiriş üzerinde yapılan testlerde, boşluklar arasındaki gövde burkulması ön planda tutmuştur. Gövde burkulması her test kirişinde gözlemlenirken, bir kiriş yanal deplasman da görülmüştür. SEY analizi, burkulma yüklerini tahmin etmek için kullanılmış ve test sonuçları, moment-kesme oranına duyarlılığın düşük olduğunu, test yüklerinin ise sonlu eleman tahminlerinin %4 ile %14 arasında değişen marjlarla aştığını göstermektedir. Aynı uzunluktaki dört kiriş üzerinde, orta boşlukta tek bir yük ile yapılan deneysel bir inceleme Al-Mawashee ve Al-Kannoon (2021) tarafından yapılmıştır. Yanal takviyeli ve takviyesiz, aynı profilli iki petek kirişle ilgilidir. Petek kirişlerinin yük taşıma kapasitesi, düz ve korugalı gövde petek kirişleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, takviye olmayan gövde petek kirişlerinin kapasitesinin düz ve korugalı gövde kirişlerine kıyasla daha düşük olduğunu göstermektedir. standart ingiltere modülüne göre 16 petek kiriş örneği üzerine yapılan deneysel testler Okubo ve Nethercot (1985) tarafından sunulmaktadır. Deneysel yük taşıma kapasitesinin, kesit geometrisi ve yük uygulama biçimi açısından nispeten duyarsız olduğu gözlemlenmiştir. Test sonuçları, katmanlı gövdeli kesitler için mevcut tasarım yaklaşımlarının genellikle uygun olmadığını göstermektedir.

Hashim ve De'nan (2024) gövde boşluklarının boyutlarının, şekillerinin ve yerleşimlerinin yan-burkulma davranışı üzerindeki etkileri, LUSAS uygulaması ile SEY kullanılarak analiz etmiştir. Petek kesitlerin, özellikle yayılı yüklerde iyi performans gösterdiği, ancak noktasal yüklerde zayıf kalabileceği gözlemlenmiştir. Farklı şekillerdeki boşluklar, kesit verimliliğini artırmak için kullanılabilmektedir. Panedpojaman ve ark. (2024) dairesel boşluklu petek kiriş kolonlarının aksiyel, kesme ve eğilme etkileşimleri altındaki dayanımını araştırmaktadır. Bu etkileşimler, sonlu elemanlar analizine dayanarak incelenmiş ve farklı çelik kesitlerinde parametre çalışmaları yapılmıştır.

Yüksek kesme kuvvetleri altında gövde burkulması ve Vierendeel mekanizmasının modları olduğu gözlemlenmiştir. Petek kirişlerin gövde boşluklarının şekillerinin, zorlanmış titreşim yanıtları üzerindeki etkisi Hashm ve ark. (2024) tarafından araştırılmaktadır. Üç farklı gövde boşluğu şekli değerlendirilmiş ve bu şekillerin titreşim genlikleri ile salınım periyotları üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Sonuçlar, gövde boşluğu şeklinin kirişlerin titreşim davranışında önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Basit eğilmeye maruz kalan petek kirişlerin elastik lokal burkulma kritik gerilmesini tahmin etmek için açık formüller de Oliveira ve ark. (2019) tarafından geliştirilmiştir. SEY kullanılarak yapılan öz değer analizleri, kritik gerilmeler ve burkulma modları hakkında bilgi sağlamaktadır. Önerilen yöntem, SEY sonuçlarıyla iyi bir uyum göstermektedir. Sotelino (2017) basit eğilme için petek kirişlerin yerel burkulma kritik gerilmesini tahmin etmek için enerji yöntemi kullanılarak basit bir denklem geliştirmiştir. Bu yöntem, doğru burkulma şekli varsayımlarına dayanarak, gövde-başlık etkileşiminin etkilediğini dikkate almaktadır. Parametrik çalışmalarla doğrulanan formüller, yerel stabilye dayalı olarak petek kirişlerin kritik gerilmesini hesaplamada etkili bir araçtır.

Doorı ve Noori (2021) farklı gövde boşlukları bulunan petek kirişlerin statik davranışı incelemiştir. Farklı şekillerdeki gövde boşlukları, düz altıgen şekil ile karşılaştırılmıştır. Aynı alan dikkate alınarak farklı şekillerin performansı analiz edilmiştir. Altıgen ve sekizgen boşluklu petek kirişlerin davranışı için Soltani ve ark. (2012) tarafından bir sayısal model geliştirilmiştir. Model, malzeme ve geometrik

nonlinear davranışı dikkate almaktadır ve gövdedeki başlangıç küçük deformasyonlar göz önünde bulundurulmuştur. Sonuçlar, modelin yüksek doğrulukla maksimum yük ve petek kiriş modlarını tahmin ettiğini göstermektedir. Altıgen boşluklu petek plakaya sahip kesitli çelik kirişlerin düşey kesme burkulma davranışları SEY ile incelenmiştir.

Etkili parametreler olarak boşluk yüksekliği-petek kalınlığı oranı h_0/tw, petek genişliği-kalınlığı oranı e/tw, T kesit yüksekliği-kalınlığı oranı hf/tw, petek kalınlığı tw ve boşluk kenar açısı α Wang ve ark. (2016) tarafından belirlenmiştir. SEY analiziyle bulunan düşey kesme burkulma dayanımından ters analizle kesme burkulma katsayısı k hesaplanmıştır. Sonuçlar, k'nin e/t_w ve hf/tw artışıyla azaldığını, α ve h_0/tw artışıyla arttığını göstermiştir. Parametre analizine dayalı pratik bir k hesaplama yöntemi önerilmiş, bu yöntem elastik burkulmada uyumlu sonuçlar vermiş ancak elastik-plastik burkulmada dayanımı fazla tahmin etmiştir. Kompozit dairesel boşluklu petek kirişlerin burkulma sonrası davranışlarını analiz etmeyi amaçlamaktadır. Sayısal model, deneysel testlerle burkulma sonrası analiz kullanılarak kalibre edilmiştir. Altı farklı kesit üzerinde yapılan parametrik çalışmada, boşluklu çapı ve petek uzunluğu değişkenleri incelenmiştir.

Elaiwi (2019), dijital ve analitik teorilere dayanarak, boşlukların yanal yer değiştitirme üzerindeki etkilediğini incelemiş ve bunu önceki çalışmalardaki petek kirişlerle karşılaştırmaktadır. Doğrusal olmayan etkiler, geometrik şekil ve petek kirişlerin üretim malzemelerinin esnek olmaması üzerine odaklanılır. Ayrıca, yayılı yüklere maruz kalan petek kirişlerin davranışı ile priyodik yüke maruz kaldıklarında meydana gelen kararsızlık incelenir. Bu bağlamda, statik ve dinamik burulma ile serbest titreşim analizleri gerçekleştirilmektedir.

Simetrik kesitler için yapılan burkulma analizlerinde, üç peteklerin, ince dairesel boşluklu petek kirişlerin dayanımında önemli bir parametre olduğu görülmüştür. Boşluk çapı küçüldükçe kritik kayma dayanımı artmıştır. Ferreira ve ark.(2021) dairesel boşluklu petek kiriş yüksekliği, büyük çap ve petek genişliklerinde sınırlı bir etkiye sahip olmuştur. Simetrik kesitlerde, ilk burkulma modunda petek burkulması gözlenmemiş, bunun yerine üst T-kesitinde lokal burkulma meydana gelmiştir. Kiriş yüksekliği arttıkça global kesme dayanımı artmış ve burkulma modu, yerel burkulma yerine petek burkulmasına dönüşmüştür.

Tsavdaridis ve D'mello (2011) birbirine yakın gövde boşluklarına sahip petek kirişlerin davranışını incelemektedir. Yedi fiziksel ve on dört sayısal test, gövde elemanlarının göçme modu ve yük taşıma kapasitesini değerlendirmek için gerçekleştirilmiştir. Gövde boşluk şekli, derinliği ve kalınlığı gibi parametrelerin etkileri analiz edilmiş, 225 elastik-plastik analizle düşey kesme yükü kapasitesini tahmin eden bir formül önerilmiştir. Standart dışı yenilikçi gövde boşluk şekillerinin yapısal performansı artırdığını ve üretim avantajı sağladığını göstermektedir.

Yalın eğilme altında derin 'tee' kesitli ince gövdeli petek kirişlerin burkulma yükü, tepe yükü, burkulma modu ve göçme modu Jia ve ark. (2024) tarafından incelenmektedir. 5 deney ve 417 sonlu eleman modeliyle, boşluk oranı, kesit özellikleri, döşeme plakası ve rijitlik elemanlarının etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar, gövde burkulmasının kiriş başlığında burulmaya yol açtığını, yerel burkulma sonrası taşıma kapasitesinin %27-32 artırılabildiğini ve döşeme plakası ile rijitlik elemanlarının burkulmayı sınırladığını göstermiştir. Ayrıca, burkulma yükü ve göçme modları için bir tahmin yöntemi önerilmiş, tasarım ve mühendislik için referans sunulmuştur.

Jadhav ve ark. (2024) sinüzoidal boşluklara sahip petek kirişlerin göçme yükünü, göçme yer değiştirmesini, yük-yer değiştirme eğrisini ve göçme tipini incelemektedir. Geometrik kusurlar ve nonlinear malzeme davranışı dikkate alınarak bir sonlu eleman modeli geliştirilmiş ve bu model, deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.

Model, kiriş uzunluğu, başlık inceliği ve gövde inceliğinin burkulma yükü üzerindeki etkilerini analiz etmek için kullanılmıştır. Sonuçlar, daha az ince gövde ve başlık kullanımının taşıma kapasitesini artırdığını ve kısa boşluklu kirişlerin uzun boşluklu kirişlere kıyasla yatay-burulma burkulmasına karşı daha dirençli olduğunu göstermiştir.

H ve T kesitli kafes çelik elemanlara sahip kısmen kaplanmış kompozit kirişlerin eğilme davranışını inceler ve yedi test numunesi saf eğilme altında Zhao ve ark. (2024) tarafından test edilmiştir. Kurlapkar ve ark. (2024), dairesel kirişlerdeki boşluk sayısının ve boşluklar arasındaki mesafenin etkilediğini incelemektedir. Petek kirişlerin burkulma davranışını deneysel çalışmalar ve doğrusal olmayan sonlu eleman modellemesi ile karşılaştırmıştır. Sonlu eleman analizi, dairesel kirişlerin göçme

yükü, göçme yer değiştirmesi, yük-yer değiştirme eğrisi ve göçme mekanizmalarını incelemek için kullanılmıştır. Ayrıca, kesit geometrisi, boşluk boyutu ve sayısı, boşluklar arası mesafe ve uç mesafesinin etkileri parametrik olarak araştırılmıştır. Sonuçlar, orta noktasına noktasal yük uygulanan basit mesnetli kirişlerin, *S/D0* oranı 1.4-1.2 arasında olduğunda yatay-burulma burkulması LTB, *S/D0* oranı 1.1 olduğunda ise yatay-şekil değiştirme burkulması LDB nedeniyle göçtüğünü göstermiştir. Ayrıca, *S/D0* oranı 1.3 olan kirişlerde göçme yükünde belirgin bir artış gözlemlenmiştir.

1.2. İnşaat Mühendisliği Alanında Kullanılan Optimizasyon Algoritmaları Üzerine Yapılan Çalışmalar

Kayabakir (2021), eksenel simetrik bir kubbeli silindirik duvarın optimum tasarımı için beş farklı algoritmanın performans karşılaştırması yapmıştır. Kullanılan algoritmalar; Jaya (JA), Çiçek Tozlaşması Algoritması (FPA), Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) ve bu algoritmaların iki farklı melez versiyonudur. Betonarme tasarımında ACI 318 yönetmeliği esas alınmış ve analizlerde esneklik esaslı bir yaklaşım benimsenmiştir. Duvar yüksekliğinin beş farklı durumda ele alındığı analizlerde, algoritmalar çok sayıda tekrar ile çalıştırılmış ve çeşitli istatistiksel veriler elde edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, optimum sonuca ulaşma hızı açısından Jaya algoritması bir miktar daha avantajlı görülmüş; ancak tüm algoritmalar bu tür mühendislik problemlerinin çözümünde oldukça etkili ve güvenilir sonuçlar üretmiştir.

Chou ve ark. (2016) çeşitli mühendislik problemlerini çözebilecek, doğadan esinlenilmiş bir meta-sezgisel regresyon sistemi önermektedir. Kullanıcı dostu arayüzü MATLAB ortamında (GUIDE) tasarlanmış ve MATLAB derleyicisi ile bağımsız bir yazılım olarak uygulanmıştır. Sistem, veri dosyalarının analizi, test seti seçimi, çapraz doğrulama ve tahmin gibi birçok işlevi basit manipülasyonlarla gerçekleştirebilir. Optimizasyon modülünün etkinliğini değerlendirmek için beş standart fonksiyon kullanılmıştır. Ayrıca, enerji verimli yapılar, beton dayanımı, köprü ayak kazısı ve toprak modülüne dair gerçek veri setleri ile yapılan karşılaştırmalar, sistemin geleneksel yöntemlere göre %8.24–91.76 oranında daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Bu sistemin hızlı, etkili ve doğru çözüm sunma yeteneği, mühendislik uygulamalarında kullanımını desteklemektedir.

Metasezgisel optimizasyon algoritmaları MOA'lar, mühendislik problemlerindeki karmaşıklık ve çok boyutluluk nedeniyle etkili çözümler Rezk ve ark. (2024) tarafından sunulmaktadır. Yapılan çalışma, özellikle elektrik ve inşaat mühendisliği alanlarında bu algoritmaların kullanımını detaylı bir şekilde incelemiş ve model optimizasyonu ile parametre çıkarımı konularına odaklanmıştır. Kashani ve ark. (2020) meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının inşaat mühendisliği problemlerindeki farklı uygulamalarını kapsamlı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, bu alanda yapılan çalışmaları sınıflandırarak, araştırmacılar için etkin bir referans sunmayı hedeflemiştir.

Yapısal optimizasyon alanındaki çalışmaları inceleyerek optimizasyon hedeflerini, süreçlerini ve mevcut kısıtlamaları Mei ve Wang (2021) tarafından analiz edilmektir. Sürdürülebilirlik ve verimliliğin önemini vurguladıktan sonra ilgili makalelerin istatistiksel analizi ile devam etmiş, optimizasyon hedeflerini zamansal ve mekânsal eğilimler çerçevesinde değerlendirmiştir. Ayrıca, yapısal analiz, problem formülasyonu, optimizasyon teknikleri ve tasarım platformları gibi dört ana adım detaylı bir şekilde tartışılmıştır. Mevcut boşlukları ve gelecekteki araştırma yönelimlerini de ortaya koymaktadır.

Lee ve ark. (2018) işlemlerinden esinlenerek geliştirilen bir meta-sezgisel optimizasyon algoritması olan Görme Düzeltme Algoritması (VCA), inşaat mühendisliği problemlerine uygulamıştır. Algoritma, küresel ve yerel arama olasılıklarını optimize edilmiş sonuçlara göre otomatik olarak ayarlamaktadır. Temsili mühendislik problemlerinde yapılan testler, algoritmanın mevcut yöntemlere kıyasla üstün sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Son yirmi yılda geliştirilen doğadan esinlenilmiş metasezgisel algoritmalar ve bunların uygulamaları Gandomi ve ark. (2013) tarafından incelenmektedir. Genetik algoritmalar, bulanık mantık, karınca ve arı algoritmaları gibi sürü zekasına dayalı yöntemler ve diğer teknikler kısaca tanıtılarak, bunların temel özellikleri ve son uygulamaları ele alınmıştır. Kayabekir ve ark. (2021) algoritma performansını artırmak amacıyla, parametreleri yinelemeler süresince otomatik olarak güncelleyebilen uyarlanabilir bir HS algoritması önermiştir. Geliştirilen bu yöntem, gerçek boyutlu bir yapı modeli üzerinde uygulanmış; optimizasyon sürecinde

sönümleyicinin yer değiştirme kapasitesi dikkate alınmıştır. Ayrıca, genel geçer ve güvenilir bir çözüm elde edebilmek amacıyla geniş bir deprem kaydı seti kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, uyarlanabilir HS algoritması, deprem etkisine maruz kalan yapılar için ayarlanmış kütle sönümleyici (TMD) sistemlerinin uygun ve uygulanabilir tasarımlarını elde etmede etkili bir yöntem olarak öne çıkmıştır.

Yang ve ark. (2016), metasezgisel algoritmaların inşaat mühendisliği problemlerindeki kullanımı ve yakın dönemdeki uygulamaları tartışmıştır. Örnek olaylar arasında, ayarlı kütle sönümleyicilerin optimizasyonu ve betonarme kirişlerin maliyet optimizasyonu yer almaktadır. İnşaat mühendisliği alanında çok düzeyli sınıflandırma öğrenme sistemi Chou ve ark. (2021) tarafından geliştirilmektir. Önerilen sistem, ateşböceği algoritması (FA), destek vektör makineleri (LSSVM) ve diğer meta-sezgisel yaklaşımları entegre ederek hiperparametrelerin otomatik olarak optimize edilmesini sağlar. Sistem, jeoteknik ve kentsel planlama gibi çeşitli veri setleri üzerinde test edilmiş ve diğer yöntemlere kıyasla yüksek doğruluk oranları elde edilmiştir.

Sattar ve Salim (2021) akıllı çiçek optimizasyon algoritması (SFOA) adlı yeni bir doğadan esinlenilmiş optimizasyon algoritması önermiştir. SFOA, hava durumuna bağlı olarak güneşli ve bulutlu/yağmurlu olmak üzere iki modda çalışmaktadır. Algoritmanın etkinliği, CEC 2015 test fonksiyonları, adaptif bir IIR sisteminin tasarımı ve mühendislik tasarım problemleri üzerinde değerlendirilmiştir. Sonuçlar, SFOA'nın diğer algoritmalara kıyasla üstün performans sergilediğini ve bilinmeyen arama alanlarına sahip gerçek dünya problemlerini çözme yeteneğini göstermektedir.

YSA, laboratuvar çalışmalarını azaltmak ve betonun basınç dayanımını tahmin etmek için Hosseini ve ark. (2023) tarafından kullanılmıştır. Bu çalışmada, YSA 'nın eğitimi için Taguchi yöntemiyle yeni örnekler oluşturulmuş ve laboratuvar testleri gerçekleştirilmiştir. Eğitim sonrasında, gelişmiş titreşimli parçacıklar sistemi (EVPS) ve benzetimli tavlama - gelişmiş titreşimli parçacıklar sistemi (SA-EVPS) algoritmaları kullanılarak betonun maksimum basınç dayanımı hesaplanmıştır.

Kaveh ve Sabzi (2011) betonarme çerçeve sistemlerinin maliyet optimizasyonu için iki algoritmanın uygulamasını sunmaktadır: Heuristic Big Bang-Big Crunch

(HBB-BC) ve Heuristic Particle Swarm Ant Colony Optimization (HPSACO). HBB-BC, BB-BC ve harmony armoni yöntemi HS yöntemlerinin bir kombinasyonudur, HPSACO ise parçacık sürüsü optimizasyonunu, karınca kolonisi optimizasyonunu ve harmony search'ü birleştirir. Test edilen tasarım örneklerinde bu yöntemlerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Deprem etkisi altındaki yapılar için ayarlanmış kütle sönümleyicilerinin optimum tasarımında kullanılmak üzere, tasarım değişkenlerinin başlangıç değerlerinin oluşturulmasına yönelik alternatif Kayabakir ve ark. (2021) tarafından bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemde, başlangıç değerleri tasarım değişkenlerinin aralıkları nüfus büyüklüğüne göre eşit şekilde bölünerek sabit olarak atanmakta; böylece rastgele değer atama yöntemine alternatif bir yaklaşım sunulmuştur. Her iki yöntem, çoklu tekrarlar üzerinden standart sapma, ortalama değer ve minimum değer gibi istatistiksel ölçütlerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemin daha kararlı (robust) optimum çözümler üretmede ve hesaplama süresini azaltmada etkili olduğunu göstermiştir.

Optimizasyon süreçlerini ve kullanılan teknikleri derinlemesine Zaheer ve ark. (2023) tarafından incelenmektir. Çalışma, optimizasyonun mühendislikteki artan uygulamalarını vurgulayarak farklı algoritmaların ve yaklaşımların detaylı bir analizini sunmaktadır. Çalışmada, mevcut araştırma boşlukları ve gelecekteki çalışmalar için öneriler de ele alınmıştır. Nigdeli ve ark. (2018) betonarme temellerin maliyet optimizasyonu için bir meta-sezgisel yöntem önermiştir. Çalışma kapsamında, HS, öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyonu (TLBO) ve çiçek tozlaşma algoritması (FPA) gibi algoritmalar kullanılmıştır. Yöntem, temel boyutlarının, destek kolonlarının yöneliminin ve uygun donatı tasarımının optimizasyonunu kapsamaktadır. Yapısal sistemlerin analizinde, tanımlı serbestlik derecelerinin tasarım değişkenleri olarak kullanılması ve toplam potansiyel enerjinin en aza indirilmesiyle denge durumu elde edilebilmektedir. Bu yönteme, "Metasezgisel Algoritmalarla Toplam Potansiyel Optimizasyonu (TPO/MA)" adı verilmektedir. Daha önce kafes sistemleri ve gerilimli yapı elemanları gibi yapılarda etkinliği doğrulanmış olan bu yöntem, bu çalışmada düzlem gerilme altındaki plak elemanların analizinde uygulanmıştır. Karmaşık sistem doğasından dolayı, yerel arama sürecinde HS algoritması ile küresel arama aşamasında FPA birleşiminden oluşan yeni bir melez yaklaşım olan HHS Kayabekir ve ark. (2020) tarafından önerilmiştir. HHS algoritması

ile elde edilen sonuçlar, SEY ile doğrulanmış ve klasik HS algoritması ile kıyaslandığında daha düşük toplam potansiyel enerji değerlerine daha az iterasyon sayısıyla ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, önerilen yaklaşımın yeni nesil metasezgisel algoritmalara kıyasla daha verimli sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

BIM süreciyle bir projenin zaman ve maliyeti hesaplanmış ve bir baraj inşaatı projesi üzerinde zaman-maliyet-kalite-risk (TCQR) optimizasyonu Shishehgarkhaneh ve ark. (2022) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarında genetik algoritma (GA), benzetimli tavlama (SA) ve üç yeni algoritma (kara dul örümcek optimizasyonu, büuük kavga optimizasyonu, siyah çukur optimizasyonu) kullanılmıştır. Sonuçlar, GA'nın belirli senaryolarda daha etkili olduğunu, ancak tüm algoritmaların proje optimizasyonuna katkı sağladığını göstermektedir.

Abualigah ve ark. (2022) mühendislik tasarım problemlerinin çözümünde kullanılan metasezgisel optimizasyon yöntemlerinin kapsamlı bir incelemesini sunmaktadır. Bu çalışmalarında, temel, modifiye ve hibrit yöntemleri detaylı bir şekilde ele alınmış ve bu yöntemlerin performansını değerlendirmiştir. Gelecek çalışmalar için önemli araştırma yönelimleri de önerilmiştir. keşif ve sömürü olmak üzere iki ana adıma sahip basit bir optimizasyon algoritması (SOPT) Hasançebi ve Azad (2012) tarafından tanıtılmıştır. SOPT, hızlı yakınsama oranı, basit uygulanabilirliği ve az parametre bağımlılığı gibi avantajlara sahiptir. Algoritmanın mühendislik tasarım problemleri üzerindeki performansı test edilmiş ve diğer metasezgisel tekniklerle kıyaslanmıştır.

Yalçın ve ark. (2019) minimum maliyetle (MSEW) tasarımını optimize etmek için metasezgisel algoritmaların entegre edildiği yeni bir çerçeve sunmaktadır. Çerçeve, GA, PSO, Yapay Arı Kolonisi (ABC) ve Diferansiyel Evrim DE algoritmalarını içermektedir. Bu çalışmada, DE algoritmasının diğer yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır. Yapının analitik ve deneysel özellikleri arasındaki farklılıkları minimize eden doğrusal olmayan bir amaç fonksiyonu Casciati ve Elia (2017) tarafından tanıtılmıştır. Yapının hasar tespiti ve lokalizasyonu, ABC ve FA algoritmaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çelik yapı üzerinde yapılan testler, her iki aracın da etkinliğini göstermiştir. Talatahari ve ark. (2017) mühendislik problemlerinin optimum tasarımı için malzeme

üretim algoritması (MGA) geliştirilmiştir. MGA, kimyasal bileşiklerin konfigürasyonu ve reaksiyon süreçlerinden esinlenmiştir. Algoritma, farklı boyutlarda 10 kısıtlı optimizasyon problemi üzerinde test edilmiştir. Sonuçlar, MGA'nın diğer meta-sezgisel algoritmalardan daha iyi performans gösterdiğini ve rekabetçi sonuçlar ürettiğini ortaya koymaktadır.

LEGO robotunun tek bir kamera ile vizyon tabanlı navigasyonu Cercevik ve ark. (2014) tarafından sunulmuştur. Robot, bilinen bir kamera pozisyonu ile hedefleri tespit eder ve robotun konumunu hesaplar. Hedefler, robot tarafından önceden tanımlanan renk özelliklerine göre tespit edilir ve üç boyutlu koordinatları, bilinen kamera pozisyonu ile triangülasyon kullanılarak hesaplanır. Csébfalvi (2009) angel algoritması, kafes yapılarının boyut optimizasyonu için geliştirilen yeni bir hibrit metasezgisel yönetim önermiştir. Karınca kolonisi optimizasyonu (ACO) ve GA birbirleriyle sırasıyla ve işbirlikli bir şekilde çözüm uzayında arama yaparken, yerel arama algoritması (LS) daha iyi ve geçerli çözümler üretmek için kullanılır. Yapılan testler, ANGEL'in geleneksel deterministik gradyan tabanlı ve diğer popülasyon tabanlı yöntemlerden daha verimli ve sağlam olduğunu göstermektedir.

Çeşitli MOAs ile yapılan yapı optimizasyonları üzerine bir inceleme Lagaros ve ark. (2022) tarafından yapılmıştır. Farklı karmaşıklık seviyelerinde 11 tek hedefli benchmark yapı problemi çözülmüş ve 24 popülasyon tabanlı metasezgisel algoritma dört ana sınıfta kullanılmıştır: kuşak tabanlı, fiziksel tabanlı, evrimsel tabanlı ve insan tabanlı. Yoo ve ark. (2014) HS algoritmasının inşaat mühendisliğinde uygulamaları incelemiştir. Su kaynakları, yapısal mühendislik, çevre mühendisliği gibi çeşitli mühendislik alanlarında HS'nin optimizasyon problemleri çözümdeki etkinliği gösterilmiştir.

Metasezgisel algoritmaların yapı optimizasyonlarına uygulanmasına yönelik yapılan karşılaştırmalar sonucunda, 11 farklı algoritmanın verimliliği Ghaemifard, S. ve Ghannadiasl, A. (2024) tarafından değerlendirilmiştir. Bu algoritmalar arasında PSO ve SNS genellikle daha üstün sonuçlar elde etmiştir. Zavala ve ark. (2014) çift hedefli metasezgisel algoritmaların yapı mühendisliği tasarım problemlerine uygulanması ele almıştır. Algoritmaların özellikleri ile tasarım problemleri arasındaki ilişki analiz edilmiştir. Simülasyon-optimizasyon modellerinin inşaat alanındaki

durumu Hussien ve ark. (2021) tarafından araştırılmıştır. Beş farklı kuyruklu akıllı metasezgisel algoritma kullanılarak zaman-maliyet takası problemi çözülmüştür. Sonuçlar, GWO ve BA en iyi performansı gösterdiğini ortaya koymuştur.

Üstüner ve ark. (2024) Kubbe yapılarına özgü zorluklar incelemiştir. Bu yapılar büyük sayıda eleman ve doğrusal olmayan kısıtlamalar içerdiğinden, optimizasyon algoritmalarının bu karmaşık mühendislik problemlerine karşı gösterdiği güçlü performanslar gözlemlenmiştir. Proje yönetimi ile ilgili metasezgisel algoritmaların kullanımını inceleyen bir literatür taraması Liao ve ark. (2011) tarafından yapılmıştır. Büyük ölçekli projelerde, global optimum yerine yaklaşık çözümler elde edilmesinin daha uygun olduğu vurgulanmıştır. Betonarme kirişlerinin tasarımında çeşitli metasezgisel algoritmalar kullanılarak maliyet minimizasyonu sağlanmıştır. Farklı beton dayanımlarına göre optimum sonuçlar sunulmuştur. Analizler, her mühendislik probleminin kendi özel çözüm yöntemini gerektirdiğini göstermektedir. Ulusoy ve ark. (2020) betonarme kirişlerinin tasarımında çeşitli metasezgisel algoritmalar kullanılarak maliyet minimizasyonu sağlamıştır. Farklı beton dayanımlarına göre optimum sonuçlar sunulmuştur. Analizler, her mühendislik probleminin kendi özel çözüm yöntemini gerektirdiğini göstermektedir.

Dört yeni metasezgisel algoritma ile sürekli rastlantısal değişkenlere sahip mühendislik optimizasyon problemleri Kaveh ve Ghazaan (2015) tarafından çözülmüştür. Performans testleri, her algoritmanın probleme nasıl yaklaştığını incelemiştir. Podolski ve Sroka (2019) Proje maliyeti üzerine yapılan bir modelde, direkt ve endirekt maliyetler, gecikme maliyetleri ve iş gücü kesintileri dikkate alınarak optimizasyon yapmıştır. Sonuçlar, önerilen modelin verimli bir şekilde alt optimum çözümler sunduğunu göstermektedir.

Ağır betonun yerini bulan algoritmalar kullanılarak beton slump tahmini Moayedi ve ark. (2019) tarafından yapılmıştır. Karınca aslanı optimizasyonu (ALO), biyocoğrafya tabanlı optimizasyon (BBO) ve çekirge optimizasyon algoritması (GOA) algoritması ile karşılaştırıldığında, daha düşük hata oranları ve daha iyi sonuçlar vermiştir. Tayfun (2018) CBO algoritması ile Haraz Barajı operasyonu optimize etmiştir. FA ve GA algoritmalarına kıyasla yıllık su eksikliklerinin önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir.

CBO metasezgisel algoritmasının uygulanmasıyla, İran'ın kuzeyinde bulunan Haraz baraj rezervuarının işletimine yönelik optimizasyon sonuçları, daha önce FA, GA algoritmaları ve standart işletim sistemi (SOP) ile yapılan çalışmalarla Saberi ve Shayegan, D. (2021) tarafından incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. CBO algoritmasının uygulanması sonucunda, çalışma süresi, yıllık su kıtlıkları ve kırılganlıklar gibi tüm sonuçlar ve ana çıktılar, önceki hesaplamalara göre çok daha iyi sonuçlar vermiştir. Makale metninde tüm sonuçlar belirtilmiştir, ancak örnek vermek gerekirse, yıllık su kıtlığı FA algoritmasına göre yaklaşık %38, GA algoritmasına göre yaklaşık %25 ve SOP yöntemine göre yaklaşık %13 seviyesine düşmüştür. Sayısal sonuçlar, CBO algoritmasının zorlu optimizasyon problemlerini çözmedeki üstünlüklerini ortaya koymakta ve bu yenilikçi algoritmanın kullanımı, dünya genelinde baraj rezervuarlarının işletiminde önemli bir başlangıç noktası olabileceğini göstermektedir.

Prayogo ve ark. (2020) HSOS-LO algoritması kullanılarak yapı yerleşim planlaması problemleri çözmüştür. Algoritma, ayırılmış tabanlı çözüm alanında üstün performans sergileyerek diğer metasezgisel yöntemlere karşı daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Beton-çelik kompozit yapıların tasarımında dinamik yükler altında optimum maliyet hesaplamaları Kaveh ve Ardebili (2023) tarafından yapılmıştır. Sonuçlar, bu tür yapıların tasarımında dinamik analiz gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Mahjoubi ve Bao (2021) oyun teorisi tabanlı stratejiler metasezgisel algoritmalarla birleştirilerek mühendislik yapı optimizasyonu sağlamıştır. Oyun teorisi stratejileri, hesaplama maliyetlerini %50 oranında düşürmüş ve yapı ağırlıklarını %4 oranında azaltmıştır. Köprü iskelesi yakınındaki köprü aşındırma derinliğini tahmin etmek için yeni bir hibrit akıllı ateşböceği koloni algoritması (SAFCA) tabanlı destek vektör regresyonu SVR modeli Chou, J. S. ve Pham, A. D. (2017) tarafından geliştirilmiştir. İlk olarak, FA'ya adaptif yaklaşımlar ve rastgeleleştirme yöntemleri entegre edilerek küresel optimizasyon için yeni bir metasezgisel algoritma oluşturulmuştur. Ardından, SAFCA ile bir SVR modeli optimize edilerek genel performansı artırılmıştır. Literatürdeki laboratuvar ve saha verileri, önerilen hibrit modelin etkinliğini değerlendirmek için kullanılmıştır. Model sonuçları, SAFCAS ile elde edilen tahminlerin, sayısal modeller ve ampirik yöntemlerle karşılaştırıldığında 3.99–87.12% daha iyi hata oranları gösterdiğini ortaya koymuştur.

Yang ve Hussain (2012), yarasaların doğal davranışına dayanan bir metasezgisel algoritma olan BA sunmaktadır. Bu algoritma, önceki literatürden alınan sekiz doğrusal olmayan optimizasyon problemini çözmek için kullanılır. Elde edilen sonuçlar, bu algoritma tarafından bulunan optimal çözümlerin diğer çözümlerden daha iyi olduğunu gösterir. Ayrıca, algoritmanın gelecekteki etkileri de değerlendirilmektedir.

Kaveh ve ark. (2021) metasezgisel algoritmalar kullanarak gerçekleştirilen optimizasyon tabanlı hasar tespiti süreçlerinde yeni bir strateji olan Sınır Stratejisi'ni (BS) önermektedir. BS, optimizasyon sürecinde sağlıklı yapısal elemanların etkilerini kademeli olarak azaltarak, algoritmaların optimum çözüme ulaşmasını geleneksel yöntemlere göre daha etkili hale getirir. Bu strateji, hasarın tespiti ve miktarının belirlenmesinde hem doğruluk hem de yakınsama hızını artırır. Geliştirilen stratejinin performansını değerlendirmek için, yapının titreşim verilerine dayalı olarak tanımlanan yeni bir hasara duyarlı maliyet fonksiyonu, Karışık Çoban Optimizasyon Algoritması (SSOA) ile optimize edilmiştir. Teknik, kafes, kiriş ve çerçeve gibi farklı yapı tipleri üzerinde sayısal olarak test edilmiş ve uygulanabilirliği gösterilmiştir. Ayrıca, TLBO, GWO ve MFO gibi diğer bilinen optimizasyon algoritmalarına da uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen yaklaşımın, gürültü içeren verilerde bile, hasarlı elemanların tespiti ve miktarının belirlenmesinde algoritmaların performansını artırdığını göstermektedir.

Yapısal optimizasyon görevlerini çözmek için yeni bir metasezgisel algoritma olan bülbül arama CS Gandomi ve ark. (2013) tarafından tanıtılmıştır. Yeni CS algoritması, Lévy uçuşları ile birleştirilerek ilk olarak bir kıyaslama doğrusal olmayan kısıtlamalı optimizasyon problemiyle doğrulanmıştır. Sonra, CS, literatürdeki 13 tasarım problemi üzerinde doğrulanmış ve çeşitli yöntemlerle karşılaştırılmıştır. CS'nin elde ettiği optimal çözümler, mevcut yöntemlerin en iyi çözümlerinden genellikle çok daha iyidir. CS'nin benzersiz arama özellikleri ve gelecekteki araştırmalar için olan etkileri detaylı bir şekilde tartışılmıştır.

Gholizadeh ve Seyedpoor (2011) doğal frekans kısıtlamalarına tabi olarak kemer barajlarının şekil tasarımının optimal bir şekilde gerçekleştirilmesi için verimli bir yumuşak hesaplama metodolojisi önermektir. GA ve PSO gibi iki popüler

metasezgisel algoritma, optimizasyon işlemini gerçekleştirmek için kullanılmıştır. Bu çalışmada sıvı-yapı etkileşimi göz önünde bulundurulmuş, ancak doğal frekansların hesaplamalı YSA ile hesaplanması zaman alıcıdır. Hesaplama yükünü azaltmak için Geri Yayılım BP ve Radial Tabanlı Fonksiyon (RBF)ye, YSA kullanılmıştır. Sonuçlar, PSO'nun BP ile entegre edildiğinde en iyi sonuçları verdiğini göstermektedir.

Beş yeni metasezgisel yöntem, Kritik Başarı Yüzeyi (CFS) ve karşılık gelen Güvenlik Faktörünü FOS belirlemek için Kaveh ve Seddighian (2021) tarafından kullanılmıştır. (FOS) hesaplamalarında, SEY kullanılarak ana diferansiyel denklemin güçlü formu zayıf forma dönüştürülmüştür. Genel yüklemelere ek olarak, sismik kuvvetler ve sızıntı etkileri de dikkate alınmıştır. Sonuçlar, önerilen optimizasyon prosedürünün diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında etkinliğini göstermektedir. Pérez ve ark. (2020) bir makine öğrenme tekniği YSA ve bir istatistiksel araç (temel bileşen analizi) kullanmıştır. Önerilen algoritmanın uygulama detayları, gerçek bir çelik yaya köprüsünün model güncellenmesi üzerine yapılan bir vaka çalışması ile gösterilmiştir. Bu algoritmanın iki ana avantajı bulunmaktadır: (i) simülasyon süresinde belirgin bir azalma sağlamakta ve (ii) en iyi güncellenmiş modelin sağlam bir şekilde seçilmesini sağlamaktadır.

Gerçek boyutlu bir çelik çerçevenin optimal tasarımı için üç farklı metasezgisel arama tekniği üzerinde karşılaştırmalı Carbas ve ark. (2013, May) tarafından bir çalışma yapılmıştır. Seçilen teknikler, FA, ABC ve CS algoritmalarıdır. Metasezgisel arama teknikleri, daha iyi çözümler bulmak için rastgele veya olasılık parametreleri kullanır. Bu tekniklerin arkasındaki sezgiler doğadan veya fiziksel süreçlerden alınmıştır. Tasarım örneğinde, tasarım kısıtlamaları, yer değiştirme sınırlamaları, katlar arası kayma kısıtlamaları, kirişlerin ve kiriş-kolonların dayanım gereksinimleri, LRFD-AISC standartlarına göre formüle edilmiştir.

Katebi ve ark. (2020) Gelişmiş metasezgisel algoritmalarla yapılan karşılaştırmalı analiz, yapıların aktif kontrolü için optimal çözümler elde edilmesinde kullanmıştır. Doğrusal kareler düzenleyicisi LQR, dışsal uyarılmayı göz ardı ederek Riccati denkleminde yeterli optimal sonuçlar sağlamamaktadır. LQR'nin etkinliğini artırmak ve optimal olmayan durumu aşmak için, BAT, BEE, DE, FA, armoni arama ve imparatorluk rekabetçi algoritmalar gibi altı akıllı optimizasyon yöntemi wavelet

tabanlı LQR'ye eklenmiştir. Bu yöntemler, farklı depremler altında üç katlı ve sekiz katlı yapılar için karşılaştırılmış ve her birinin çözüm hızı, yakınsama oranı ve hesaplama çabası değerlendirilmiştir.

Metasezgisel algoritmalar, mühendislik tasarım optimizasyon problemlerinde optimum çözümler elde edilmesinde etkili araçlar Saka ve ark. (2016) tarafından sunulmaktadır. Bu yöntemlerin çoğu, doğadan veya başka süreçlerden alınan metaforlara dayanmaktadır. Bu teknikler, karmaşık mühendislik tasarım optimizasyon problemlerine sağladıkları çözümlerle son yıllarda önemli bir gelişim göstermektedir. Ancak, bu yöntemler matematiksel bir temele sahip olmadıkları ve alakasız metaforlara dayandıkları için bazı eleştiriler almıştır. Yine de, bu yöntemlerin hesaplamalı verimlilik ve sağlamlık sağladığı sürece, hangi metaforlara dayandıkları önemsizdir.

Chou ve Nguyen (2021), betonarme malzemelerinin mekanik dayanımını tahmin etmek için inşaat mühendislerine önemli ölçüde yardımcı olacak yeni bir yapay zeka (AI) tabanlı yaklaşım olan metasezgisellerle optimize edilmiş toplu sistem MOES modelini geliştirmektedir. MOES, bir metasezgisel optimizasyon algoritması ve verimli AI modellerini birleştirerek hibrit ve toplu modellerin avantajlarını entegre eder. Metasezgisel algoritma, bireysel AI tekniklerinin optimal hiperparametrelerini bulur ve aynı anda en iyi optimize edilmiş ağırlıklı topluluk modelini oluşturmaktadır.

Yol yapımında görevlerin akış-tesis sistemi ile zamanlanmasına dair yapılan Bożejko ve ark. (2014) tarafından bir çalışma ele alınmıştır. Bu çalışmada, inşaat sürecinin hızlandırılmasını sağlayarak çalışmanın paralel yapılmasına izin veren yeni bir matematiksel model ve optimizasyon algoritması sunulmuştur. Bu yeni yöntem, inşaat süreçlerinin süresini kısaltarak maliyetleri azaltmaya yardımcı olmaaktadır. Zavala ve ark. (2016) dünya yapısal tasarım probleminin iki varyantını çözmek için çoklu hedefli metasezgisellerin uygulanması ele almıştır. Yapılan çalışma, inşaat mühendislerine benzer problemlerde kullanabilecekleri optimizasyon tekniklerine dair ipuçları sunmaktadır.

Kaveh ve Vazirinia (2019) dört metasezgisel algoritmanın inşaat alanındaki performansları karşılaştırmıştır. Sonuçlar, Geliştirilmiş Vibrasyonlu Parçacık Sistemi (EVPS)'nin diğer üç yöntemden daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

Kristal Yapı Algoritması (CryStAl) adı verilen yeni algoritma Talatahari ve ark. (2021) tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem, kristal yapılarının oluşum ilkelerinden ilham alır. Algoritma, çeşitli matematiksel fonksiyonlarla değerlendirilmiş ve diğer metasezgisellerle karşılaştırılarak çok rekabetçi sonuçlar elde edilmiştir.

Zhang ve ark. (2020) beton karışım oranlarının optimizasyonu, çoklu hedeflerle (örneğin dayanım, maliyet, slamp) ve birçok değişkenle (örneğin beton bileşenleri) yapmıştır. Bu çalışmalarında, beton karışım oranlarını optimize etmek için makine öğrenmesi ve metasezgisel algoritmalar kullanılan bir yöntem önerilmektedir. Mühendislik tasarımlarında, problemin değişkenleri genellikle çeşitli kısıtların dikkate alınmasıyla tanımlanmaktadır. Bu durum, çözüm sürecini doğrusal olmayan bir yapıya dönüştürmekte ve en uygun sonuca ulaşmak için çok sayıda yineleme yapılmasını gerektirmektedir. Literatürde, bu tür problemlerin çözümünde optimum sonuca ulaşmak amacıyla çeşitli algoritmaların iteratif arama süreçlerinde kullanıldığı görülmektedir. Söz konusu algoritmalar genellikle doğadaki olaylardan veya süreçlerden esinlenerek geliştirilmiş olsa da, günümüzde tekil metaforlar yerine farklı algoritmaların birleştirildiği melez meta-sezgisel yöntemler (hibrit metaheuristikler) tercih edilmektedir. Bu çalışmalarındada, Kayabekir ve ark. (2023) yapısal mühendislik uygulamalarında meta-sezgisel algoritmaların kullanımı üzerine kapsamlı tarafından bir inceleme sunulmaktadır.

Sorkhabi ve ark. (2014) toplam maliyet optimizasyon için amaç fonksiyon olarak ele alınmıştır ve kaynak ile kesme parametrelerinin etkileri incelemiştir. AISC-ASD düzenlemelerine uygun olarak, kirişlerin tasarımında gerekli sınırlar dikkate alınmıştır. Sonuç olarak, tasarım değişkenleri ve kısıtlar doğrultusunda parçacık sürüsü optimizasyon algoritması ile kirişlerin optimizasyonu sunulmuştur. Kaynak, kesim ve kiriş ağırlığındaki maliyet değişikliklerinin amaç fonksiyon ve değişken üzerindeki etkisi nedeniyle bu parametrelerin her birinin dikkate alınmasının, optimum tasarım için önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Petek kirişlerin optimizasyonunda PSO ve GA algoritmalarının her ikisi de kullanılmıştır. Her iki algoritmanın sonuçları birbirine yakın olmakla birlikte, genel olarak PSO'nun GA'ya kıyasla daha iyi sonuçlar ürettiği görülmüştür. Ayrıca, PSO algoritmasının ortalama sonuçları optimum çözüme daha yakındır ve standart sapması daha düşüktür.

Harris Şahin Optimizasyonu HHO ve PSO dayalı bir hibrit metasezgisel algoritma geliştirilmiş ve petek kirişlerin tasarımı için Mashayekhi ve Mosayyebi (2023) tarafından uygulanmıştır. Malzeme ve inşaat maliyetleri dâhil toplam maliyet amaç fonksiyon olarak alınmış, kod gereksinimleri ve geometrik sınırlamalar kısıtlama fonksiyonları olarak ele alınmıştır. Önerilen yöntem, üç farklı örnekte optimum çözümü elde etmek için kullanılmış ve sonuçlar beş bilinen yöntemle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, önerilen algoritmanın daha yüksek bir yakınsama hızına sahip olduğunu ve daha iyi sonuçlar elde ettiğini göstermiştir.

Kaveh ve Shokohi (2016) petek kirişlerin tasarımı için yakın zamanda geliştirilen GWO yöntemi kullanmıştır. Bu tip boşluklu gövde kirişleri, özellikle malzeme ve inşaat maliyetlerinden büyük tasarruf sağladıkları için binalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Minimum maliyet, tasarım amaç fonksiyonu olarak ele alınmış ve tasarım problemini çözmek için gri kurt optimizasyonu yöntemi uygulanmıştır. Yöntemin etkinliğini göstermek için literatürden çeşitli tasarım örnekleri seçilmiştir. Sonuçlar, GWO algoritmasının petek kiriş problemlerini çözmek için potansiyel bir alternatif olduğunu göstermektedir.

1.3. Petek Kirişlerin Tasarımında Optimizasyon Algoritmalarının Kullanımına Yönelik Çalışmalar

Petek kirişlerin optimum tasarımı için yakın zamanda geliştirilen metasezgisel "Tug of War" (Çekme Yarışı) algoritması Kaveh ve Shokohi (2016) tarafından uygulanmıştır. Tasarım problemleri olarak, altıgen ve dairesel boşluklu kirişler olmak üzere iki yaygın kiriş tipini ele alınmıştır. Tasarım problemlerini çözmek için TWO algoritması kullanılmıştır. Bu amaçla, minimum maliyet amaç fonksiyon olarak alınmış ve literatürdeki bazı örnek problemler çözülmüştür.

Kaveh ve Shokohi (2015) petek kirişi optimize etmek amacıyla, bazı durumlarda bağlantılara yakın yüksek kesme kuvvetlerini desteklemek için kiriş boşluklarının doldurulması gerekebilir. Bu işlem, çelik plakalar eklenerek ve her iki taraftan kaynak yapılarak gerçekleştirilir. Bu tip kirişlerin optimizasyonu, CSS, CBO ve CBO-PSO algoritmalarını içeren üç metasezgisel yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Algoritmaların performansını karşılaştırmak için minimum maliyet, tasarım amaç fonksiyonu olarak alınmıştır. Ayrıca, tasarım problemleri olarak altıgen ve dairesel

boşluklu iki yaygın kiriş tipi ele alınmıştır. Çok sayıda tasarım örneği bu kapsamda incelenmiştir. Optimum çözüm sonuçları, altıgen boşlıklu kirişlerin dairesel boşlıklu kirişlere kıyasla daha düşük maliyetli olduğunu göstermiştir. Ayrıca, CBO-PSO algoritmasının daha fazla tasarım örneği için daha düşük maliyet sonuçları verdiği görülmüştür.

Petek kirişlerin optimum tasarımı için TWO adlı yeni geliştirilen metasezgisel algoritma Kaveh (2016) tarafından kullanılmıştır. Algoritmanın sağlamlığını ve etkinliğini değerlendirmek amacıyla üç örnek problem çözülmüştür. Bu kirişler, dolu ve dolu olmayan boşluklar olmak üzere iki durumda tasarlanmıştır. Sonuçlar, TWO algoritmasının diğer optimizasyon yöntemlerine kıyasla daha iyi performans gösterdiğini ve optimum çözümü bulma yeteneğinin daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, bu algoritmanın yakınsama oranı oldukça iyidir ve daha az analizle daha iyi çözümler üretebilmesi, Çekme Yarışı algoritmasını hesaplama açısından daha verimli kılmaktadır.

Erdal (2015) altıgen boşluklara sahip kirişler ile dairesel boşluklu kirişler olmak üzere iki yaygın gövde genişletilmiş kiriş türünün optimum tasarımı karşılaştırmıştır. Her iki kiriş tipi için minimum ağırlık amaç fonksiyon olarak alınmıştır. Problem, yukarıda belirtilen sınırlamalar dikkate alınarak bir ayrık programlama problemi olarak formüle edilmiştir.

Dairesel boşluklara sahip 12 petek kiriş örneğinin taşıma kapasitesi test Erdal ve Saka (2013) tarafından edilmektedir. Her bir petek kiriş örneği için dört test uygulanmış ve test sonuçları, petek kirişlerin bazı göçme tiplerindeki doğrusal olmayan davranışlarını belirlemek amacıyla SEY ile doğrulanır. Deneysel ve analitik çalışmalar arasındaki fark %10 olup elde edilen sonuçlar iyi bir uyum göstermiş ve her iki çalışmadan elde edilen verilerle örtüşmektedir. Optimum tasarımın karşılaştırılması için geliştirilmiş arama armoni algoritması önerilmiştir. Tasarım algoritması, optimum I kiriş kesitlerini, boşlukların boyutsal özelliklerini ve kiriş boyunca boşluk sayısını tasarım değişkenleri olarak seçmektedir.

Sinüzoidal boşluklara sahip petek kirişlerin minimum ağırlık tasarımı için FA Yöntemi metasezgisel bir arama tekniği Erdal (2017) tarafından kullanılmıştır. Önerilen algoritma ayrıca sinüzoidal boşluklu kirişlerin optimum tasarım sonuçlarını,

çelik boşluklu ve dairesel kirişlerle karşılaştırmak için kullanılmıştır. Tüm kirişlerin optimum tasarım problemi, çelik yapı enstitüsü tarafından belirlenen tasarım kısıtlamalarına göre formüle edilmiştir. Problem, ayrık bir programlama problemi olarak ifade edilmiştir. Numerik örneklerle algoritmanın, yük kombinasyonlarına maruz kalan bu kirişlerin minimum ağırlık tasarımını sağladığı gösterilmiştir.

Ciftcioglu ve ark. (2024) dairesel boşluklu petek kirişlerin optimal tasarımını elde etmek için optimizasyon tekniklerinin kapsamlı bir karşılaştırmalı analizini sunmaktadır. Bu kirişlerde boşlukların dahil edilmesi, kirişin ağırlığını azaltmakta ve kesit yüksekliğini artırarak daha hafif ve daha güçlü kesitlerin üretilmesini sağlamaktadır. GWO parametrelerini hassas bir şekilde ayarlamak için Taguchi yöntemi kullanılmış ve sağlam bir tasarım elde edilmiştir. Her algoritmanın performansı, yedi algoritma arasında kapsamlı karşılaştırmalar yapılmasını sağlayan üç tasarım örneği ile değerlendirilmiştir. Ayrıca, optimum tasarıma sahip dairesel boşluklu petek kirişlerin sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak modellenmesi ve analizi de çalışmaya dahil edilmiştir.

Rabi ve ark. (2024), petek kirişin gövde burkulma göçmesini tahmin etmek için bir sayısal model geliştirmiş ve bu modeli internet ağı üzerinde 10.764 işlemle test etmiştir. Modelin doğruluğunu doğrulamak amacıyla makine öğrenmesi (ML) algoritmaları ve YSA kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, yöntemin bu tür öçmenin tahmini için güvenilir ve etkili bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir.

Dairesel boşluklu petek kirişlerin tasarım problemi, optimum tasarım problemi olarak formülsyon Erdal ve ark. (2011) tarafından elde edilmiştir. Minimum ağırlık, tasarım amacı olarak alınmış ve tasarım kısıtlamaları AISC'ın 100 numaralı yayınına dayandırılmıştır. Bu yayında benimsenen tasarım yöntemleri, BS5950'nin 1. ve 3. bölümleri ile uyumludur. Tasarım probleminin formülasyonu, yukarıdaki sınırlamalar göz önüne alındığında ayrık bir programlama problemi haline gelmiştir. Tasarım probleminin çözümü için HS ve PSO yöntemleri kullanılmıştır. Bu tekniklere dayalı tasarım algoritmaları, genel yükleme durumlarına maruz kalan hücresel bir kirişin üretiminde kullanılacak optimum UB kesitini, optimum boşluk çapını ve sayısını seçmektedir. Ayrıca, bu seçim, tasarım sınırlamalarını karşılarken dairesel petek

kirişin ağırlığının minimum olmasını sağlayacak şekilde yapılmaktadır. Algoritmanın etkinliğini göstermek için çok sayıda tasarım örneği incelenmiştir.

De aguıar ve ark. (2024) dairesel boşluklu petek kirişlerin optimizasyonunu PSO algoritması ile incelemektedir. Maliyet olarak amaç fonksiyonu, minimum ağırlığı hedeflerken tasarım kısıtlamaları AISC'ın 100 numaralı yayınına ve ASCI tasarım kılavuzu 31'e dayanmaktadır. Ağırlık minimizasyonu tekniği PSO ile uygulanırken kısıtlamalar, bu petek kirişlerin karakteristik arıza modlarını içermektedir: Vierendeel mekanizması oluşumu (FVM), gövde burkulması (WPB), Kaynak bağlantılarının göçmesi (RWJ), eğilme mekanizması oluşumu (FFM) ve sehim sınırlaması. Programlama problemi python dilinde uygulanmış ve gövde boşlukları çapı, sayısı ve başlangıç kesitleri gibi sonuçlar elde edilmiştir. Ek olarak, optimize edilmiş petek kirişlerin kapasiteleri, başlangıç geometri kusurları dikkate alınarak SEY ile analiz edilmiştir. SEY analiz sonuçları, optimize edilen kirişin sınırlılama gereksinimlerini karşıladığını ve çelik yapı projelerinde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Dairesel boşluklu petek kirişlerin optimizasyon problemini DE algoritması kullanarak Hieu ve Tuan (2018) tarafından ele alınmıştır. Tasarım değişkenleri, petek kirişin üretileceği sıcak haddelenmiş profil, boşluk boyutu ve aralığıdır. Amaç fonksiyonu, petek kirişin minimum ağırlığını hedeflemektedir ve tasarım kısıtlamaları ise en yüksek sınırları durumlarını, hizmet edilebilirlik sınır durumlarını ve geometrik sınırları kapsamaktadır. Bu çalışmada benimsenen tasarım yöntemi EN 1994-1-1'e dayanmaktadır. Bu doğrultuda, petek kirişler için optimum aralıklar önerilmektedir.

Kaveh ve ark. (2023) dairesel ve altıgen boşluklara sahip kırışların maliyet olarak amaç fonksiyonunu optimize etmek için dört yeni metasezgisel algoritmanın performansını incelemektedir. Kullanılan algoritmalar, karışık çoban optimizasyon algoritması, iyileştirilmiş karma Jaya algoritması, plazma jenerasyon optimizasyonu ve küme teorisine dayalı Jaya algoritmasıdır. Bu algoritmaların, optimizasyon problemlerinde iyi performans gösterdiği ve altıgen delikli kirişlerin ekonomik avantaj sağladığı ortaya konmuştur. Literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmış ve yeni algoritmaların çoğu durumda en iyi sonuçları ürettiği görülmüştür.

Petek kirişlerin doğal orman gençleşme algoritması ile optimal tasarımını belirlemek için Kaveh ve Shokohi (2016) tarafından uygulanmıştır. Bu kirişler,

malzeme ve inşaat maliyetlerinden sağlanan önemli tasarruf nedeniyle yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Altıgen ve dairesel boşluklara sahip iki kiriş tipi tasarım problemi olarak ele alınmıştır. Minimum maliyet, tasarımın amaç fonksiyonu olarak alınmış ve literatürden seçilen üç karşılaştırma problemi çözülmüştür. Sonuçlar, doğal orman yenileme NFR algoritmasının güçlü performans sergilediğini ve altıgen boşluklu kirişlerin durumlarda daha az çelik malzemeye göstermiştir.

Dogan ve Ciftcioglu (2020) avlanma arama yöntemine dayalı bir algoritma kullanarak çelik çerçeveleri ile dairesel boşluklu petek kirişi ağırlık optimizasyonunu incelemiştir. Kiriş ve kolonlar için farklı bölümler atanarak, kirişler yerleşik bölümler yerine özel olarak üretilmiştir. Tasarım, AISC standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, kirişlerdeki boşluk sayısı ve çapları optimize edilmiştir. Algoritmaya Levy uçuşu da eklenerek daha iyi tasarımlar elde edilmiştir. Optimizasyon sonuçları, SEY analizi ile karşılaştırılmış ve dairesel boşluklu petek kirişlerin kullanımı ile çerçeve ağırlığında önemli azalmalar sağlandığı gözlemlenmiştir.

S235, S255 ve S355 malzemelerinden yapılmış altıgen boşluklu petek kirişlerin performansı Albayati ve Noori (2024) tarafından optimize edilmiştir. Kirişlerin optimum boyutları, maksimum düşey yer değiştirme fonksiyonuna göre belirlenmiştir. FPA, FA ve BA kullanılmıştır. Sonuçlar, FPA'nın mühendislik uygulamaları için en uygun algoritma olduğunu ortaya koymuştur.

Nguyen ve ark. (2020) dairesel boşluklu petek kirişlerin burkulma kapasitesini belirlemek için adaptif bulanık çıkarım sisteminin (ANFIS) performansını geliştirmek amacıyla PSO kullanılan en uygun parametreleri araştırmayı amaçlamaktadır. Çalışmada, 3645 veri örneğinden oluşan bir veri tabanı kullanılmış ve model performansı çeşitli istatistiksel ölçütlerle değerlendirilmiştir. Sonuçlar, ANFIS-PSO'nun bu tür mühendislik problemleri için uygun olduğunu, ancak seçilen parametrelere oldukça duyarlı olduğunu göstermektedir. Geniş başlık petek kirişlerin derinliğini artırmak için ek plaka kullanımı Ahmed ve Said (2024) tarafından araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, ABAQUS yazılımıyla oluşturulan SEY modeli ile doğrulanmış ve farklı boşluk genişliklerinde kirişlerin performansı değerlendirilmiştir.

Mela ve Heinisuo (2014) petek kirişlerde yüksek mukavemetli çeliklerin ekonomik kullanımı incelemiştir. S355, S500 ve S700 çelik sınıflarının ağırlık ve maliyet açısından performansı karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, yüksek mukavemetli çeliklerin önemli ağırlık tasarrufları sağladığını, ancak maliyet açısından sınırlı faydalar sunduğunu göstermektedir. Hibrit kesitlerin ise daha ekonomik bir çözüm sunduğu belirlenmiştir. Sinüzoidal boşluklara sahip petek kirişlerin boşluk boyutlarının (derinlik ve genişlik) optimizasyonu Kurlapkar ve Patil (2021) tarafından ele alınmaktadır. Sinüzoidal boşlukların optimizasyonu, SEY kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SEY analizi sonuçları, 150 mm yüksekliğindeki petek kiriş numunelerinin laboratuvar testleriyle doğrulanmıştır. Tüm petek kiriş numuneleri, 100 mm yüksekliğindeki I kirişlerden dönüştürülmüştür.

Albayati ve ark. (2025) tarafından petek kirişlerin performansı, maksimum düşey yer değiştirme esas alınarak optimize edilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak tanımlanan bu yer değiştirme değeri, kesit boyutlarının en uygun hale getirilmesiyle elde edilmiştir. Optimizasyon sürecinde üç farklı algoritma GWO, PSO ve DE) kullanılmıştır. Bu çalışmalarında, üç farklı çelik sınıfına S235, S255 ve S355 ait altıgen petek kiriş tipleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre PSO ve DE algoritmaları birbirine çok yakın sonuçlar verirken, GWO algoritması biraz daha farklı sonuçlar üretmiştir. Genel olarak, üç algoritmanın da mühendislik uygulamaları açısından etkili sonuçlar verdiği görülmüş; PSO ve DE algoritmaları ise bir miktar daha başarılı bulunmuştur.

Jandar ve Kumbhar (2015), sonlu elemanlar analizi programını kullanarak petek kirişlerin dairesel ve elmas şeklindeki boşluklarını optimize etmektedir. bu Çalışmada iki temel oran üzerinde durulur: birincisi, iki boşluk merkezi arasındaki mesafenin boşluk yüksekliğine oranı; ikincisi ise toplam kesit yüksekliğinin boşluk yüksekliğine oranıdır. Analizler, Eurocode 3 standartlarına dayanmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, baklava boşlukların en iyi dayanımı, boşluk yüksekliğinin toplam kesit yüksekliğinin %67'si olduğu durumlarda elde edilir. Ayrıca, yerel göçme davranışına eğilim gösterdiği tespit edilmektadir.

Goryachevskiy (2019) basit mesnetli petek kirişlerin geometrik parametrelerini optimize ederek taşıma kapasitelerini artırmayı ele almıştır. Boşluklu kirişlerin farklı

göçme tipleri, ideal elastik-plastik bir malzeme ile sayısal olarak modellenmiştir. Geometrik parametrelere bağlı olarak gövde burkulması, kaynak dayanımı ve başlık dayanımı analiz edilmiştir Kolon tasarımı için farklı boşluk şekilleri dikkate alınmıştır.

ANSYS Work Bench yazılımı kullanılarak kolonun çeşitli parametreleri için lineer burkulma Dhede ve Shirsat (2020) tarafından analizi yapılmıştır. Kolon gövdesinde altıgen boşluklar sağlanmış ve serbest uçtan birim yük uygulanmıştır. Düğümlerde toplam deformasyon ve Von-Nises hesaplanmış, özdeğer analizi ile burkulma yükü çarpanı elde edilmiştir. Analiz sonucunda kritik burkulma yükü 147,72 kN olarak bulunmuş ve bu değer hesaplanan kritik yük olan 122,90 kN'den daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu yük uygulandığında sistemde oluşan eşdeğer gerilme 26,336 MPa olarak belirlenmiştir. Sonuçlara göre, kısa kirişlerde kesit yüksekliği daha düşük, kaynak uzunluğu ise daha fazla olmalıdır. Buna karşılık, uzun kirişlerde durum tersidir.

Kaveh ve Shokohi (2016) petek kirişlerin optimum tasarımı için çarpışan CBO ve PSO algoritmalarının birleştirilmesiyle hibrit bir yöntem geliştirmiştir. Bu hibrit algoritmada (CBO-PSO), PSO'nun olumlu özellikleri CBO'ya eklenmiştir. Altıgen ve dairesel boşluklu iki yaygın petek kiriş tipi tasarım problemi olarak ele alınmıştır. Bu kirişler, malzeme ve inşaat maliyetlerindeki büyük tasarruflar nedeniyle yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Minimum maliyet, tasarımın amaç fonksiyonu olarak alınmış ve yeni hibrit yöntem bazı referans problemlerinin çözümünde kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, CBO-PSO'nun diğer metasezgisel yöntemlere göre daha düşük maliyet sağladığını göstermiştir. Ayrıca, altıgen boşluklu kirişlerin daha az çelik malzeme gerektirdiği ve bu nedenle dairesel boşluklu kirişlere göre daha üstün olduğu sonucuna varılmıştır.

Dairesel ve altıgen boşluklara sahip petek kirişlerin maliyet fonksiyonuna dayalı optimizasyonu, dört yeni metasezgisel algoritma kullanılarak Kaveh ve ark. (2023) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu algoritmalar; çoban karıştırma optimizasyon algoritması, geliştirilmiş karıştırma tabanlı jaya algoritması, plazma üretim optimizasyonu ve küme teorisine dayalı jaya algoritması olarak sıralanmıştır. Dairesel ve altıgen boşluklara sahip kirişlerin maliyetleri karşılaştırılmış ve sonuçlar, bu dört

yeni algoritmanın petek kiriş optimizasyonunda yüksek performans sergilediğini ortaya koymuştur.

Mashayekhi ve Mosayyebi (2023) HHO ve PSO tabanlı hibrit bir metasezgisel algoritma geliştirip petek kirişlerin tasarımında kullanmıştır. Malzeme ve inşaat maliyetlerini içeren toplam maliyet amaç fonksiyon olarak alınmış, kod gereksinimleri ve geometrik sınırlamalar ise kısıtlama fonksiyonlarına dahil edilmiştir. Önerilen yöntem, üç örnek problemin optimal çözümü için kullanılmış ve sonuçlar beş bilinen yöntemle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, önerilen algoritmanın daha yüksek bir yakınsama hızına ve daha iyi çözümlere ulaştığını göstermektedir.

Literatür incelendiğinde petek gereçlerin optimizasyonu çeşitli algoritmalar yardımıyla yapılacak yapılca çalışmalarından dairesel ve altıgen en boşluk tipi odaklanmaktadır. Bu tez, literatürdeki çalışmalardan önemli ölçüde ayrılmakta ve bilimsel katkı açısından özgün nitelikler taşımaktadır. Çalışmada CPA, IRO, TWO, VPS ve ICA olmak üzere beş modern metasezgisel algoritma, petek kirişlerin tasarımı amacıyla ilk kez sistematik ve karşılaştırmalı bir şekilde uygulanmış, bu yönüyle literatürdeki benzer araştırmalardan farklı ve öncü bir konumda yer almaktadır. Bahsi geçen algoritmaların, hem dairesel hem altıgen hem de sinüzoidal boşluk tiplerine sahip kirişlerin minimum maliyetle optimize edilmesinde eş zamanlı olarak kullanılması, özgünlük düzeyini artırmaktadır. Ayrıca, çalışmada 300 cm ile 800 cm arasında değişen altı farklı kiriş uzunluğuna yer verilmiş ve bu sayede daha kapsamlı ve çok boyutlu sonuçlara ulaşılır. CPA, IRO, TWO, VPS ve ICA petek kiriş problemlerini çözmek için potansiyel bir alternatif olduğunu göstermektedir.

Özellikle literatürde yeterince ele alınmamış olan sinüzoidal boşluk tipi, bu tez kapsamında ilk kez optimize edilerek tasarıma entegre edilmiş ve bu durum çalışmanın bilimsel değerini daha da yükseltir. Tezde yalnızca en düşük maliyeti elde etmeye yönelik sonuçlar değil, aynı zamanda işlem süresi, standart sapma ve korelasyon katsayısı gibi önemli performans göstergeleri de değerlendirme sürecine dâhil edilmiştir. İşlem süresi, algoritmanın mühendislik uygulamalarındaki pratik etkinliğini ve zamana duyarlılığını ortaya koymakta; standart sapma, elde edilen sonuçların kararlılığını ve algoritmanın tutarlılık düzeyini göstermekte; korelasyon katsayısı ise

değişkenler arası ilişki düzeyini yansıtarak tasarım çıktılarının matematiksel güvenilirliğini desteklemektedir.

Bu göstergelerin birlikte analiz edilmesi, yalnızca sayısal başarıyı değil, aynı zamanda yöntemlerin mühendislik bağlamındaki uygulanabilirliğini değerlendirmeyi mümkün kılmakta, teorik ve pratik dengeyi sağlayarak elde edilen tasarımların gerçek hayatta kullanılabilirliğini artırmaktadır. Tezde ayrıca amaç fonksiyonunun 10.000 iterasyona kadar olan davranışı incelenmiş ve bu sayede algoritmaların uzun vadeli istikrarı değerlendirilmiştir. Bu analiz, tekrarlı işlemler sonucunda çözümlerin hangi düzeyde sabitlendiğini ve sonuçların kararlı olup olmadığını ortaya koyarak, yöntemlerin güvenilirliğine dair güçlü göstergeler sunar. Bununla birlikte, hassasiyet analizi gerçekleştirilmiş ve bu analiz aracılığıyla hem kiriş uzunluğu hem de boşluk tipi gibi tasarım parametrelerindeki değişikliklerin sonuçlara olan etkisi gözlemlenir. Böylece, önerilen tasarım yaklaşımlarının farklı mühendislik koşulları altında nasıl tepki verdiği anlaşılır. Eğilim analizi kapsamında ise, farklı uzunluk ve boşluk tipleri için işlem süresi, maliyet, kararlılık ve diğer performans kriterlerinin yönelimi incelenmiş; hangi koşullarda hangi algoritmanın daha avantajlı sonuçlar verdiği tespit edilmektedir. Bu tez çalışmasında farklı boşluk türleri ve farklı kiriş uzunlukları için beş optimizasyon algoritması ile elde edilen temel boyutların (örneğin; kiriş kesit yüksekliği, gövde genişliği, başlık kalınlığı, başlık genişliği) karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Bu yönüyle çalışma, literatürde benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında, boyutsal analizlerin algoritmalar bazında detaylandırılması açısından özgün bir katkı sunmaktadır.

Tüm bu analizlerin birlikte ele alınması, önerilen algoritmaların kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlamış ve hangi kiriş uzunluğu ile boşluk tipinin hangi algoritma ile daha uyumlu sonuçlar verdiği ortaya konmaktadır. Sonuç olarak, işlem süresi, standart sapma, korelasyon katsayısı, duyarlılık analizi ve eğilim analizi gibi beş temel göstergenin birlikte kullanılması sayesinde, tasarım kararlarının daha bilinçli, kararlı ve uygulanabilir temellere dayandırılması sağlanmıştır. Bu bütünsel yaklaşım, tez çalışmasını hem bilimsel hem de mühendislik açısından güçlü ve referans alınabilir bir konuma taşımaktadır.

İKİNCİ BÖLÜM

MATERYAL VE METOD

2.1. Materyal

Farklı boşluk şekillerine sahip petek kirişlerin performansı, bu elemanların kullanıldığı yapının işlevsel gereksinimlerini karşılama ve karşılaştıkları yükleri ile çevresel koşulları etkin bir şekilde taşıma kapasitelerine bağlıdır. u bağlamda, petek kirişlerin tasarımında; Vierendeel mekanizması, eğilme göçmesi, kaynak göçmesi, kesme kuvvetleri ve basınç kuvvetleri nedeniyle oluşabilecek gövde burkulması gibi olası göçme modları dikkate alınmalıdır. Bu konudaki önceki çalışmalar arasında Erdal ve ark. (2011), Redwood ve Demirdjian (1998), Mashayekhi ve Mosayyebi (2023), Kaveh ve ark. (2023), ve Kaveh ve Shokohi (2016) yer almaktadır.

Bu çalışmada, farklı boşluk şekillerine sahip petek kirişlerde her bir göçme modunun davranışı ayrıntılı olarak incelenmektedir. İnceleme sürecinde, Bu bağlamda geliştirilen teorilere dayalı hesaplamalar kullanılarak boşluk şekillerinin etkisi detaylı olarak analiz edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan boşluk şekilleri; altıgen, dairesel ve sinüzoidal olarak belirlenmiştir. Kirişin yapıldığı malzeme ise S-355 olarak varsayılıp tasarım sonuçları elde edilmiştir. Bu malzemelerin mekanik özellikleri Albayati ve Noori (2024) Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Çelik malzemelerinin mekanik özellikleri

Çelik sınıfı	f_y (akma dayanımı) MPa	σ_{em} (Emniyet Gerilmesi) MPa	Elastisite modülü MPa
S – 52	355	210	200000

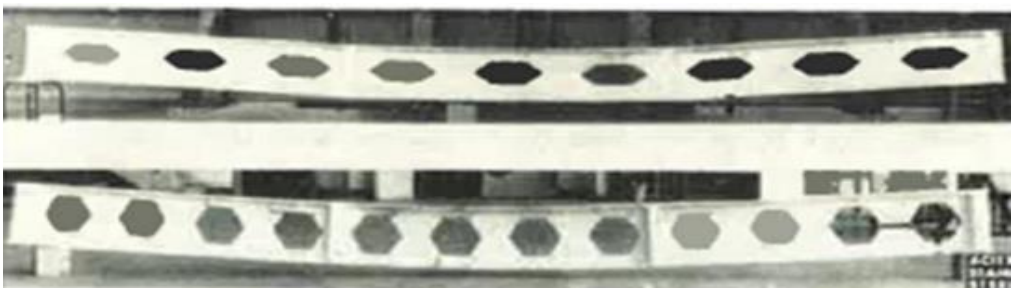
2.2. Göçme Türleri

Bu tez kapsamında, farklı boşluklara ve farklı boşluk tiplerine sahip petek kirişlerin yapısal davranışları kapsamlı bir şekilde analiz edilecektir. Araştırmanın temel amacı, bu kirişlerde meydana gelebilecek muhtemel göçme türlerinin sistematik olarak değerlendirilmesidir. Özellikle yükleme altındaki kirişlerin taşıma kapasitelerini sınırlayan çeşitli göçme mekanizmaları dikkate alınarak, güvenli ve

ekonomik tasarım kriterleri oluşturulacaktır. Bu kapsamda incelenecek başlıca göçme türleri şunlardır: eğilme göçmesi, düşey kesme göçmesi, yatay kesme göçmesi, Vierendeel mekanizmasına bağlı göçme, kesme burkulması ve basınç kuvvetlerine bağlı burkulma. Tezde, bu göçme türlerinin boşluk uzunluğu, boşluk geometrisi ve yükleme koşulları ile olan ilişkisi detaylı olarak değerlendirilerek, petek kiriş tasarımında dikkate alınması gereken temel yapısal kriterlerin ortaya konulması amaçlanmaktadır.

2.2.1. Eğilme Göçmesi

Bu göçme genellikle petek kirişlerin basit eğilme momenti etkisine maruz kalması durumunda meydana gelir; burada, yüksek bir moment, ihmal edilebilecek düzeyde düşük bir kesme kuvvetiyle birlikte bulunur (Pachpor ve ark. (2011)). Genellikle, bu tipi bir göçmenin oluşma olasılığı düzenli momente maruz kalındığında artar (Kerdal ve Nethercot (1984)), ancak kesit kalınlığının toplam kiriş uzunluğuna oranının artmasıyla birlikte bu olasılık azalır (Al-Thabhawee ve Al-Kannoon (2022)). Dıştan yükü gelen moment ,kesitin plastik moment kapasitesinden daha küçük olması gerekrmektedir.. Eğer plastik moment kapasitesi aşılırsa, bu göçme, boşluğun üst ve altındaki T kesitlerinin akma gerilmesine ulaşarak plastik hale gelmesi sonucu meydana gelecektir (Pachpor ve ark. (2011)). Yani, boşluğun üst kısmındaki T kesiti plastik basınca, alt kısmındaki T kesiti ise plastik gerilmeye maruz kalır ve bu durum basit eğilme momenti bölgesinde gerçekleşir (Hosain ve Spiers (1970)). Denklem (1), bu göçme durumunu doğrulamak için altıgen, dairesel ve sinüzoidal boşluklara sahip petek kirişlerin kullanımını temsil etmektedir (hepsinin aynı kesite sahip olduğu için). Şekil 3, eğilme göçmesini göstermektedir. Petek kirişin kesit boyutları ile Şekil4'te verilmektedir.



Şekil 3.Eğilme göçmesi

$$M_D \leq M_{kk} \quad (1)$$

M_D : Dış moment

M_{kk} : Kestinin plastik moment kapasitesi

$$M_{kk} = T_{alan} \times F_y \times d_u \quad (2)$$

T_{alan} : Alt T alanı

F_y : Çelik kayma dayanımı

d_u : Üst ve alt T Kesitlerin ağırlık merkezi arasındaki bir mesafedir.

$$T_{alan} = (b_f \times t_f) + (d_T - t_f) \times t_w \quad (3)$$

b_f : Başlık genlişliği

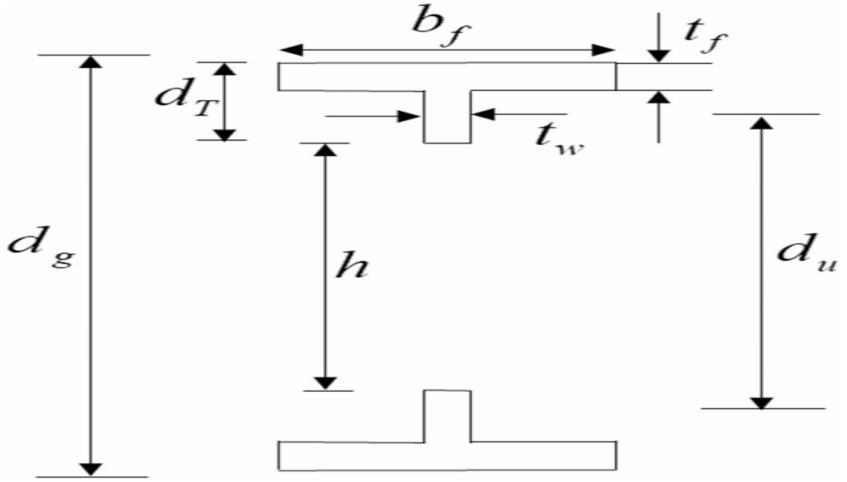
t_f : Başlık kalınlığı

d_T : T kesitin yüksekliği

h : Boşluk yüksekliği

d_g : Kesit yüksekliği

t_w : Gövde genişliği



Şekil 4.Petek kiriş kesiti

2.2.2. Kesme Göçmesi

Kesme kuvvetlerinin etkisiyle meydana gelen göçme, genellikle petek kiriş gövdesinin yükleri taşıyamamasından kaynaklanmaktadır. Boşluk derinliğinin artması, bu tipi göçmenin oluşma olasılığını artırmakta; buna karşılık, petek kirişin uzunluğunun ve gövde genişliğinin artması söz konusu riski azaltmaktadır. Genel olarak, kesme kuvvetleri petek kirişin taşıma kapasitesini etkileyerek, alt ve üst T kesitlerinde gerilmeler oluşturur (Elaiwi (2019)). T kesitlerinin alanı arttıkça kesme deformasyonları da artmaktadır (Yaun ve ark. (2014)). Bunun yanı sıra, kesme kuvvetleri kesit yüksekliği boyunca gerilmeler meydana getirir Elaiwi (2019). Gövde genişliği arttıkça kesme deformasyonları azalır (Yaun ve ark. (2014)). Etkili kesme kuvvetleri, düşey ve yatay olmak üzere iki tipe ayrılır. Bu nedenle, petek kirişin her iki tip kesme kuvvetine karşı taşıma kapasitesinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Gövdenin orta kısmından geçen yatay kesme kuvveti, yanında boşluklar nedeniyle etkilediğini artırmaktadır. Bu durumu değerlendirmek için gövde burkulmasının detaylı incelenmesi gerekmektedir.Düşey kesme kuvvetlerine gelince, bu kuvvetlerin etkisi kesitin üst kesitleri tarafından karşılanmaktadır. Bu nedenle, boşluklardaki dış yüklerden kaynaklanan düşey kesme kuvvetlerinin kullanılması, düşey kesme kuvvetlerinin etkilediğini değerlendirmek için gereklidir (Fares ve ark. (2016)).

2.2.2.1. Düşey Kesme Hesaplanması

Düşey kesme göçmesi olarak bilinen bu tip bir göçmeye neden olan düşey kesme kuvvetini doğrulamak için, dış yüklerden kaynaklanan bu kuvvet, petek kirişin kesitinin düşey kesme taşıma kapasitesini aşmamalıdır. Dolayısıyla genel olarak bu ilişki denklem (4) ile ifade edilebilir.

$$K_D \leq K_{kk} \tag{4}$$

K_D : Dış yüklerinden gelen kesme kuvveti (Statik denklemlerle hesaplanır)

K_{kk} : Petek kiriş kesitinin düşey kesme kapasitesi

2.2.2.1.1. Dairesel ve Sinüziodal Boşluklu

Kesitin düşey kesme kapasitesi K_{kk} hesaplanması için ilgili denklemler Erdal ve ark. (2011), Jamdar ve Kumbhr (2015), Kaveh ve ark. (2023) tarafından verilmektedir.

$$K_{kk} = 0.6 \times F_y \times A_{vg} \times \phi \quad (5)$$

$$A_{vg} = d_T \times 2 \times t_w \quad (6)$$

ϕ : Kesme azaltma faktörü (0,9)

2.2.2.1.2. Altıgen Boşluklu

Kesitin düşey kesme kapasitesi K_{kk} hesaplanması için ilgili denklemler (Kaveh ve ark. (2023), Mashayekhi ve Mosayyebi (2023)) tarafından verilmektedir.

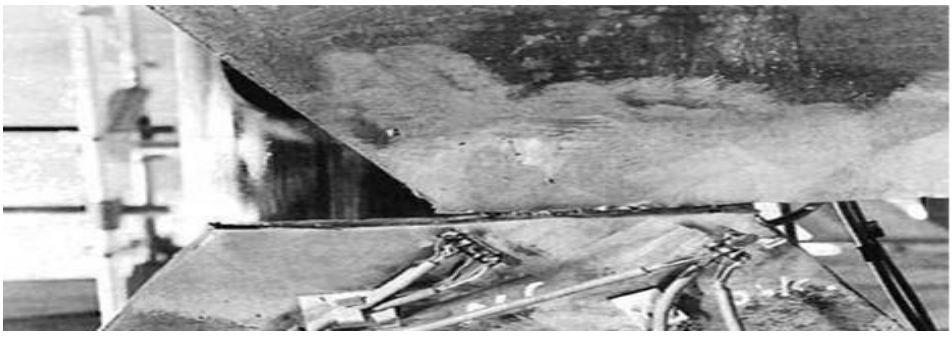
$$K_{kk} = 0.6 \times F_y \times d_T \times t_w \times a_k \times \phi \times 2 \quad (7)$$

$$a_k = \frac{\sqrt{6}.d_T}{a_{0+\sqrt{3}.d_T}} \leq 1 \quad (8)$$

a_0 : Boşluk genişliği

2.2.2.2. Yatay Kesme Hesaplanması

Yatay kesme göçmesi (bütün boşluk tipleri için), gövdenin üst ve alt kısmındaki başlık yerindeki eksenel kuvvetler arasındaki farktan kaynaklanan yatay kesme kuvvetlerinin varlığı nedeniyle meydana gelmektedir.(Şekil 5)



Şekil 5. Yatay kesme göçmesi

Bu durumda yatay kesme kuvvetlerinin yatay kesme kesitinin kapasitesini aşmaması gerekir. Dolayısıyla genel olarak bu ilişki denklem (9) ile ifade edilebilir.

$$K_{Dy} \leq K_{ky} \tag{9}$$

K_{Dy} : Yatay kesme kuvveti (Statik denklemlerle hesaplanır)

K_{ky} : Kesitin yatay kesme kuvvet kapasitesi

Kesitin yatay kesme kapasitesi K_{ky} hesaplanması için ilgili denklemler (Erdal ve ark. (2011), Jamdar ve Kumbhr (2015), Kaveh ve ark. (2023)) tarafından verilmektedir.

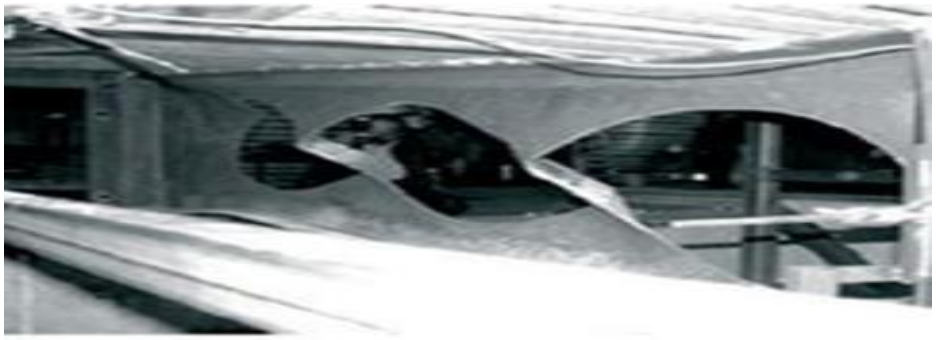
$$K_{ky} = 0.6 \times F_y \times A_{eas} \times \phi \tag{10}$$

$$A_{eas} = e \times t_w \tag{11}$$

e : Yatay kaynak uzunluğu

2.2.3. Gövdenin Kesme Kuvveti ile Burkulma Göçmesi

Bu göçme üç ana nedenden kaynaklanmaktadır. Birincisi, dış kesme kuvvetlerinden gelen yatay kesme kuvvetleridir. İkinci neden, gövdenin orta yüksekliğinde bulunan ve dış momentten kaynaklanan momenttir Kaveh ve ark. (2023). Üçüncü neden ise, gövdenin üzerinde basınç oluşturan vierendeel momentidir Elaiwi (2019).



Şekil 6. Gövdenin kesme kuvveti ile burkulma göçmesi

Bu göçmenin genellikle "S" harfi şeklinde burulma olarak ortaya çıkar (Şekil 6'da gibi) ve yanal yer değiştirme ile birlikte burulma eşlik eder. Bu durum çoğunlukla

gövdenin genişliğinin azaltılmasıyla meydana gelir, çünkü gövdeniin mukavemeti ve dayanımı genişliğine, kalınlığına ve boşluk yüksekliğine bağlıdır Rabi ve ark. (2024). Bu göçmenin mekanizması, gövdedeki momentin yatay kesme kuvvetleriyle etkileşime girmesi sonucu ortaya çıkar. Bu etkileşim, boşluğun eğimli kenarında çekme gerilmeleri oluştururken, karşı kenarda basınç gerilmeleri meydana getirmektedir. Bu durum, gövdenin yüksekliği boyunca burulmaya neden olmaktadır. Burkulma temelde kesme gerilmelerinden kaynaklanan diyagonal basınç gerilmeleri nedeniyle oluşur. Düşey kaynak, diyagonal basınç gerilmelerini taşıdığı için gövdenin burkulmasını önler, ancak gövde diyagonal çekme gerilmelerini iletir. Bununla birlikte, yatay kesme kuvvetlerinin varlığı gövdenin üzerine ek gerilmeler uygular Elaiwi (2019). Ayrıca boşlukların varlığı, çekme gerilmelerinin iletimini engelleyerek gövdede akma işleminden sonra burkulmaya neden olmaktadır (Pachpor ve ark. (2011)). Denklemlerin geliştirildiği (Anglan ve Redwood (1974)) tarafından gerçekleştirilen deneyler, gövdenin burkulma kapasitesinin kontrol edilmesinde referans olarak kabul edilmektedir (Fares ve ark. (2016)). Bu temelde, bu çalışmada, kesme kuvvetlerinin neden olduğu burkulmaya karşı gövdenin kapasitesini kontrol etmek için ilgili denklemleri (Erdal ve ark. (2011), Jamdar ve Kumbhr (2015), Kaveh ve ark. (2023)) tarafından verilmektedir.

$$\frac{M_{eg}}{MR_g} \leq \mathbb{C}_1 ¥ - \mathbb{C}_2 ¥^2 - \mathbb{C}_3 \quad (12)$$

M_{eg} : Göndenin kritik bölgesindeki elastik moment

$M_{eg} = K_{y\ddot{u}} \times (h)/2$

MR_g : Gövdenin kritik bölgesindeki elastik moment mukavemet

$K_{y\ddot{u}}$: Gövdenin yatay kesme kuvveti

$¥ : S / h$ (13)

2.2.3.1. Altıgen Boşluklu ve Sinüziodal Boşluklu

$$MR_g = F_y \times t_w \times (S - 2e)^2/6 \quad (14)$$

S : İki boşluk arasındaki bir mesafedir (merkezden merkeze)

e : Yatay kaynak uzunluğu

2.2.3.2. Dairesel Boşluklu

Gövdenin kritik bölgesindeki (0,9 × yarıçapı) elastik moment mukavemeti denklem 15'te temsil edilen Fares ve ark. (2016) tarafından verilmektedir .

$$MR_g = \frac{t_w(S - h + 0{,}564\,h)^2}{6} \times F_y \quad (15)$$

𝔊1, 𝔊2 ve 𝔊3: Geometrik sabıt parametreleri

$$\mathfrak{G}_1 = 5{,}09 + 0{,}1464\,þ - 0{,}00174\,þ^2 \quad (16)$$

$$\mathfrak{G}_2 = 1{,}441 + 0{,}0625\,þ - 0{,}000683\,þ^2 \quad (17)$$

$$\mathfrak{G}_3 = 3{,}645 + 0{,}0853\,þ - 0{,}00108\,þ^2 \quad (18)$$

Denklemler (16-18) birleşik krallık çelik yapılar enstitüsü geliştirilmiş, kritik kesitte petek kiriş gövdenin elastik kapasitesini hesaplamayı amaçlayan tahribat deneyleri yaparak, Fares ve ark. (2016) tarafından verilmektedir. Bu denklemler, Bölüm 2.2'de verilen geometrik kriterlere uygulanmaktadır.

$$þ = h \,/\, t_w \quad (19)$$

2.2.4. Gövdenin Basınç kuvvet ile Burkulma Göçmesi

Noktasal yükler, genellikle gövdenin kolonunun üzerinde bulunan konumları nedeniyle bu tip bir göçmeye neden olmaktadır (Elaiwi (2019)). Bu durumda, yalnızca gövdenin kendisinde burkulma meydana gelir, ancak burulma oluşmaz (Demir (1999)). Bu burkulma, dış noktasal yüklerden gelen basınç kuvvetlerini taşıyan kesitin üst kısmındaki T kesitinde Şekil (7) görülür. Noktasal yük, petek kirişe dik doğrultuda bir kesme kuvveti olarak iletilir (Zaarur ve Redwood (1996)).



Şekil 7. Gövdenin basınç kuvveti ile burkulma göçmesi

Bu göçme, bazen petek kirişin erken arızalanmasına yol açabilir (Sotelino (2017)). Dış noktasal yüklerin, kesitin basınç kuvvetlerini taşıma kapasitesini aşmaması gerekmektedir. Bu durum, aşağıdaki Denklem 20 ile ifade edilebilir.

$$N_D \leq B_g \tag{20}$$

N_D : Dış tekil yük

B_g : Gövdenin basınç akma kapasitesi

Gövdenin basınç akma kapasitesi elastik burkulma Euler gerilmesine göre hesaplanmalıdır. İlgili denklemler (Mashayekhi ve Mosayyebi (2023)) tarafından verilmektedir.

$$B_g = B_m \times t_w \times e \times 0.9 \tag{21}$$

B_m : Gövdenin basınç mukavemeti

$$B_m = G_g \tag{22}$$

G_g : Gövdenin Euler burkulma gerilmesi

$$G_g = \frac{\pi^2 . E}{(k_n)^2} \tag{23}$$

kn : kolon narinliği

2.2.4.1. Dairesel Boşluklu

$$kn = {e_z}/{0,3\ t_w} \tag{24}$$

e_z : Etkili uzunluğu

$0,3\ t_w$: Gövde kesitinin dönme yarıçapı

Dairesel boşluklunun etkili uzunluğu hesaplanması için ilgili denklem Wang ve ark. (2014) tarafından verilmektedir.

$$e_z = 0,5\sqrt{e^2 + h^2} \tag{25}$$

2.2.4.2. Sinüziodal Boşluklu

$$kn = {e_{zs}}/{0{,}3\ t_w} \tag{26}$$

Sinüziodal boşluklunun etkili uzunluğu hesaplanması için ilgili denklem Jamdar ve Kumbhr (2015) tarafından verilmektedir.

$$e_{zs} = 0{,}7\ h \tag{27}$$

2.2.4.3. Altıgen Boşluklu

Altıgen boşluklunun etkili uzunluğu hesaplanması için ilgili denklem Mashayekhi ve Mosayyebi (2023) tarafından verilmektedir.

$$kn : h/0{,}3\ t_w \tag{28}$$

E : Elastsite modülü

$$\text{Eğer } G_g \geq 0{,}44\ F_y \tag{29}$$

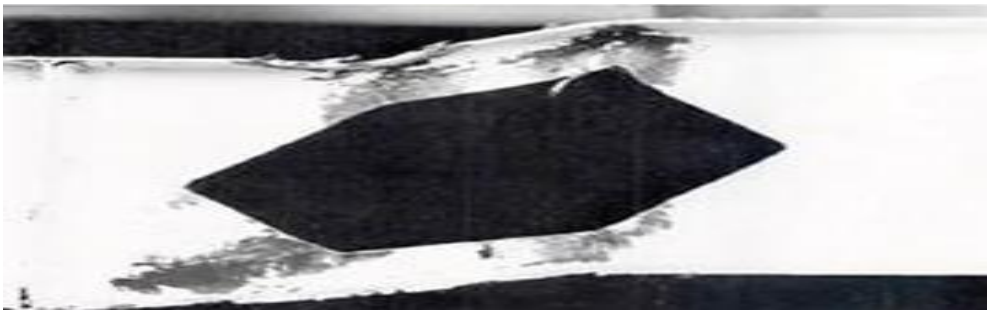
$$B_m = \left(0{,}658^{\frac{F_y}{G_g}}\right) F_y \tag{30}$$

$$\text{Eğer } G_g < 0{,}44\ F_y \tag{31}$$

$$B_m = 0{,}877\ F_y \tag{32}$$

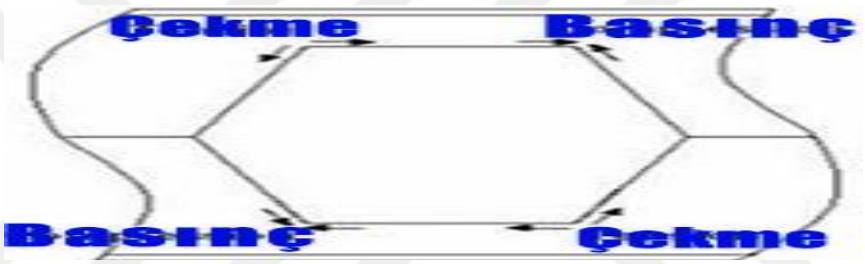
2.2.5. Vierendeel Mekanizma Göçmesi

Bu göçme, boşluğun etrafında T kesitinin üst ve alt kısmında dört adet plastik mafsal oluşturan yüksek kesme kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır (Şekil 9). Bu göçmenin şekli bir paralelkenara benzer.(Şekil 8)



Şekil 8. Vierendeel mekanizma göçmesi

Üst ve alt T kesitine etkiyen kesme kuvvetinin eşit olduğu varsayılmaktadır; Yani, toplam kesme kuvvetinin yarısı üst T şeklindeki bölüme, diğer yarısı da alt T şeklindeki bölüme etki etmektedir (Kaveh ve ark. (2023)). Üst ve alt T kesitinin taşıması gereken iki moment bulunmaktadır. Birincisi, dış yüklerden gelen temel moment olup üst ve alt T kesitinin başlığın ortasında iki eksenel kuvvete dönüşmektedir. İkincisi ise, düşey kesme kuvvetlerinin etkisinden kaynaklanan ve Veirendeel momenti olarak bilinen ikincil momenttir. Bu moment, yatay kaynak uzunluğunun artmasıyla birlikte büyümekte ve üst ile alt başlıklarda göçmeye neden olmaktadır (Elaiwi (2019)). Veirendeel mekanizmasıyla meydana gelen göçmenin fiziksel yorumu, T kesitlerinin uçlarındaki çeliğin, kesme ve eksenel kuvvetlerden kaynaklanan yüksek gerilmeler nedeniyle akma durumuna ulaşmasıdır Ferreira ve ark. (2020).



Şekil 9. Vierendeel mekanizma 4 plastik mafsal

Bu göçme genellikle en yüksek kesme kuvvetine maruz kalan boşluğun üst kısmında veya en yüksek kesme kuvvetine sahip bir grup boşlun üstünde meydana gelir. Kritik boşluk ise en yüksek momente sahip olandır (Demirjan (1999)). Bu tip göçme mekanizmasına etki eden diğer faktörler, boşluk çapı ve gövde genişliğidir (Ferreira ve ark. (2020)). Aşağıda verilen denklemleri, petek kirişlerde (boşluğun şekline göre) bu göçme mekanizmasının hesaplanması için ilgili denklemler (Erdal ve ark. (2011), Jamdar ve Kumbhr (2015), Kaveh ve ark. (2023), Mashayekhi ve Mosayyebi (2018)) tarafından verilmektedir.

$$\frac{M_V}{\phi_e k_T} + \frac{M_D}{\phi_e P_{\check{g}}} \leq 1 \qquad (33)$$

M_V : Vierendeel momenti

$$M_V = K_D \times k_V \quad (34)$$

k_V : Etkili kolu

Etkili kolu k_V dairesel ve altıgen boşluklu hesaplanması için ilgili denklemler Fares ve ark. (2016) tarafından verilmektedir.

2.2.5.1. Dairesel Boşluklu

$$k_V = {}^{h}/_{4} \quad (35)$$

2.2.5.2. Altıgen Boşluklu

$$k_V = {}^{e}/_{2} \quad (36)$$

Etkili kolu k_V sinüziodal boşluklu hesaplanması için ilgili denklem Wang ve ark. (2014) tarafından verilmektedir.

2.2.5.3. Sinüziodal Boşluklu

$$k_V = F_1(\frac{h}{t_w}) + F_2\,(\frac{h}{t_w})^2 \quad (37)$$

F_1 ve F_2 : Sonlu eleman simülasyon sonuçlarının eğri uyumu yoluyla katsayılar

$$F_1 = 0{,}007 \quad (38)$$

$$F_2 = -0{,}154 \quad (39)$$

ϕ_e : Eğilme mukavemet faktörü (0,9)

k_T : T kesitin kabul edebilir eğilme kapasitesi

$$k_T = p_T \times F_y \quad (40)$$

p_T : T kesitin plastik modülü

$P_{\check{g}}$: Petek kiriş kesitinin boşluğun orta uzunluğunda eğilme kapasitesi

$$P_{\check{g}} = p_P \times F_y \quad (41)$$

p_P : Petek kiriş kesitinin plastik modülü

2.3. Geometrik Kriterleri

Temel geometrik ve farklı boşlukların boyut sınırları ile kullanılan notasyonları, bu araştırma bölümünde tartışılacaktır. Bu bağlamda, aşağıdaki sınırların dikkate alınması gerekmektedir.

2.3.1 Dairesel Boşluklu

İlgili denklemler (Erdal ve ark. (2011) Kaveh ve ark. (2023)) tarafından verilmektedir.

$$1{,}25 \leq \frac{d_g}{h} \leq 1{,}75 \tag{42}$$

$$1{,}08 \leq \frac{S}{h} \leq 1{,}6 \tag{43}$$

2.3.2 Sinüziodal Boşluklu

İlgili denklemler (Jamadar ve Kumbhar (2023)) tarafından verilmektedir.

$$1{,}25 \leq \frac{d_g}{h} \leq 1{,}75 \tag{44}$$

$$1{,}08 \leq \frac{S}{h} \leq 1{,}5 \tag{45}$$

$$e \leq 0{,}4\, h \tag{46}$$

$$h \leq 0{,}8\, d_g \tag{47}$$

$$u_g \geq 0{,}5\, h \tag{48}$$

u_g : Gövde kenarının mesnetten boşluğa kadar uzunluğu

2.3.3. Altıgen Boşluklu

İlgili denklemler (Mashayekhi1 ve Mosayyebi (2023)) tarafından verilmektedir.

$$45° \leq \theta \leq 64° \tag{49}$$

$$0{,}25 \leq \frac{e}{a_0} \leq 0{,}5 \tag{50}$$

$$\frac{a_0}{h} \leq 2 \tag{51}$$

$$(d_g - 2\, t_f) - 10(d_T - t_f) \leq 0 \tag{52}$$

$$h - 0{,}7\,(d_g - 2\, t_f) \leq 0 \tag{53}$$

$$h \cot\theta - 3\, e \leq 0 \tag{54}$$

2.4. Amaç Fonkisyon

Petek kirişlerin tasarımı, tasarlandıkları amaca uygun performans göstermelerini sağlamak için belirlenen tasarım kriterlerine uygun olmalıdır. Bu tasarım kriterleri, petek kirişlerin iyi bir performans sergilemesini garanti altına almak için belirlenmesi gereken çeşitli parametreleri içermektedir (Kaveh ve ark. (2023), Kayabekir ve ark. (2021)) . Bu bağlamda, petek kirişlerin tasarımında optimizasyon yöntemlerinin kullanılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Geleneksel tasarım süreci, hem kesin olmayan hem de ekonomik açıdan verimsiz sonuçlar verebilir. Ayrıca, zaman açısından oldukça maliyetli olabilir. Bu durum, mühendislik ilkeleriyle çelişmektedir; çünkü mühendislik, zamanı, emeği ve maliyeti minimize etmeyi ve kaliteye odaklanmayı amaçlamaktadır. Bu nedenle, petek kirişlerin tasarım problemleri optimizasyon problemleri olarak değerlendirilebilir (Kaveh ve ark. (2023), Albayati ve Noori (2024)).

Optimizasyon sürecinin temel prensibi, mevcut parametreler ve kısıtlamalar doğrultusunda minimum malzeme miktarını ve maliyeti belirlemektir. Petek kirişlerin tasarımındaki optimizasyon sürecinde, karar değişkenleri kesit parametreleri, kesme işlemleri ve kaynak gibi unsurları içermektedir. Bu değişkenler, amaç fonksiyonları olarak ifade edilir (Kaveh ve ark. (2023), Kayabekir ve ark. (2021)). Bu çalışmada, amaç fonksiyonu, farklı boşluklara sahip petek kirişlerin toplam maliyetini minimize etmeye yöneliktir. Bu maliyet, kesme ve kaynak işlemlerinin yanı sıra malzeme maliyetlerini de kapsamaktadır. Toplam maliyet, amaç fonksiyonunu temsil eden bir denklem ile ifade edilir ve amaç fonksiyonunun bazı parametreleri, boşlukların geometrik şekline bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Amaç fonkisyonu (Kaveh ve ark. (2023), Mashayekhi1 ve Mosayyebi (2023)) tarafından verilmektedir.

$$A_f = U_{ks} \times Ç_1 + U_{ky} \times Ç_2 + A_P \times Ç_3 \tag{55}$$

A_f: Amaç fonkisyonu

$U_{ks} \times Ç_1$: Petek kiriş kesme maliyeti (56)

U_{ks} : Petek kiriş kesme uzunluğu

2.4.1. Dairesel Boşluklu

$$U_{ks} = \pi \times h \times B_S + 2\,e\,(B_S + 1) + \frac{\pi h}{2} + e \quad (57)$$

B_S : Kiriş boşluk sayısı

2.4.2. Sinüziodal ve Altıgen Boşluklu

$$U_{ks} = 2B_S\,(e + \frac{d_T - t_f}{\sin\theta}) + 2\,e + \frac{d_T - t_f}{\sin\theta} \quad (58)$$

$Ç_1$: Kesme uzunluğu birim fiyat katsayısı (0,3)

$U_{ky} \times Ç_2$: Petek kiriş kaynak maliyeti (59)

U_{ky}: Petek kiriş kaynak uzunluğu

$$U_{ky} = e\,(B_S + 1) \quad (60)$$

Denklem 56 bu çalışmada ele alan bütün durumlar için geçerlidir.

$Ç_2$: Kaynak uzunluğu için birim fiyat katsayısı (1,0)

$A_P \times Ç_3$: Petek malzeme maliyeti (61)

A_P : Petek ağırlığı

$$A_P = \wp \times A_{oj} \times (L + \frac{S}{2}) \quad (62)$$

$\wp$: Çelik yoğunluğu

A_{oj} : Dolu kesit alanı

L : Petek kiriş uzunluğu

$Ç_3$: Kiriş ağırlığı için birim fiyat katsayısı (0,85)

2.5. Tasarım Kısıtlamalar

Bu bölümde, tüm petek kiriş tipleri için tasarım kısıtlamaları, boşluk tiplerine göre belirlenmektedir. Optimum tasarımın elde edilmesi amacıyla, önceki bölümlerde belirtilen göçme tipleri, geometrik kriterler ve boyutlar gibi kısıtlamalar dikkate alınmaktadır. Bu kısıtlamalar, optimizasyon sürecinde çözüm araçları olarak kullanılarak, sonraki bölümlerde ele alınacak farklı algoritmalar ile iyileştirme

sağlanmaktadır. Optimizasyon optimum petek kirişler tasarımlanması için minimize eden temsil etmektedir.

2.5.1. Dairesel Boşluklu

İlgili denklemler (Erdal ve ark. (2011), Wang ve ark. (2014), Kaveh ve ark. (2023)) tarafından verilmektedir.

$$W_1 = M_D - M_{kk} \leq 0 \quad (63)$$

$$W_2 = K_D - K_{kk} \leq 0 \quad (64)$$

$$W_3 = \frac{K_D}{2} - K_{kk} \leq 0 \quad (65)$$

$$W_4 = K_{Dy} - K_{ky} \leq 0 \quad (66)$$

$$W_5 = \frac{M_{eg}}{MR_g} - \mathfrak{C}_1 \, ¥ - \mathfrak{C}_2 \, ¥^2 - \mathfrak{C}_3 \leq 0 \quad (67)$$

$$W_6 = N_D - B_g \leq 0 \quad (68)$$

$$W_7 = \frac{M_V}{\phi_e k_T} + \frac{M_D}{\phi_e P_{ğ}} - 1 \leq 0 \quad (69)$$

$$W_8 = E_{Ğ} - \frac{L}{360} \leq 0 \quad (70)$$

$$W_9 = k_V - 0{,}45\, h \leq 0 \quad (71)$$

$$W_{10} = d_g - 1{,}75\, h \leq 0 \quad (72)$$

$$W_{11} = 1{,}25\, h - d_g \leq 0 \quad (73)$$

$$W_{12} = S - 1{,}6\, h \leq 0 \quad (74)$$

$$W_{13} = 1{,}08\, h - S \leq 0 \quad (75)$$

2.5.2. Sinüziodal Boşluklu

İlgili denklemler (Erdal ve ark. (2011), Wang ve ark. (2014), Kaveh ve ark. (2023), Jamadar ve Kumbhar (2023)), tarafından verilmektedir.

$$W_1 = M_D - M_{kk} \leq 0 \quad (76)$$

$$W_2 = K_D - K_{kk} \leq 0 \quad (77)$$

$$W_3 = \frac{K_D}{2} - K_{kk} \leq 0 \quad (78)$$

$$W_4 = K_{Dy} - K_{ky} \leq 0 \quad (79)$$

$$W_5 = \frac{M_{eg}}{MR_g} - \mathfrak{C}_1 \, ¥ - \mathfrak{C}_2 \, ¥^2 - \mathfrak{C}_3 \leq 0 \quad (80)$$

$$W_6 = N_D - B_g \leq 0 \quad (81)$$

$$W_7 = \frac{M_V}{\phi_e k_T} + \frac{M_D}{\phi_e P_{ğ}} - 1 \leq 0 \quad (82)$$

$$W_8 = E_{\check{G}} - \frac{L}{360} \leq 0 \quad (83)$$

$$W_9 = k_V - 0{,}5\ h \leq 0 \quad (84)$$

$$W_{10} = d_g - 1{,}75\ h \leq 0 \quad (85)$$

$$W_{11} = 1{,}25\ h - d_g \leq 0 \quad (86)$$

$$W_{12} = 1{,}08\ h - S \leq 0 \quad (87)$$

$$W_{13} = e - 0{,}4\ h \leq 0 \quad (88)$$

$$W_{14} = h - 0{,}8\ d_g \leq 0 \quad (89)$$

$$W_{15} = 0{,}5h - u_g \leq 0 \quad (90)$$

2.5.3. Altıgen Boşluklu

İlgili denklemler Mashayekhi1 ve Mosayyebi (2023), Kaveh ve ark. (2023) tarafından verilmektedir.

$$W_1 = M_D - M_{kk} \leq 0 \quad (91)$$

$$W_2 = K_D - K_{kk} \leq 0 \quad (92)$$

$$W_3 = \frac{K_D}{2} - K_{kk} \leq 0 \quad (93)$$

$$W_4 = K_{Dy} - K_{ky} \leq 0 \quad (94)$$

$$W_5 = \frac{M_{eg}}{MR_g} - \mathfrak{C}_1\ ¥ - \mathfrak{C}_2\ ¥^2 - \mathfrak{C}_3 \leq 0 \quad (95)$$

$$W_6 = N_D - B_g \leq 0 \quad (96)$$

$$W_7 = \frac{M_V}{\phi_e k_T} + \frac{M_D}{\phi_e P_{\check{g}}} - 1 \leq 0 \quad (97)$$

$$W_8 = E_{\check{G}} - \frac{L}{360} \leq 0 \quad (98)$$

$$W_9 = k_V - 0{,}55\ h \leq 0 \quad (99)$$

$$W_{10} = \theta - 64^{\circ} \leq 0 \quad (100)$$

$$W_{11} = 45^{\circ} - \theta \leq 0 \quad (101)$$

$$W_{12} = e - 0{,}5a_0 \leq 0 \quad (102)$$

$$W_{13} = 0{,}25\ a_0 - e \leq 0 \quad (103)$$

$$W_{14} = a_0 - 2h \leq 0 \quad (104)$$

$$W_{15} = (d_g - 2\ t_f) - 10(d_T - t_f) \leq 0 \quad (105)$$

$$W_{16} = h - 0{,}7\ (d_g - 2\ t_f) \leq 0 \quad (106)$$

$$W_{17} = h \cot\theta - 3\ e \leq 0 \quad (107)$$

2.6. Kullanılan Algoritmaları

Bu çalışmada petek kirişlerin tasarımında kullanılan algoritmalar açıklanmaktadır. Açıklamalar, algoritmaların esinlendiği temel prensipleri, çalışma mekanizmalarını, iyileştirme adımlarıyla ilgili detayları ve amaç fonksiyonunu kapsamaktadır.

2.6.1. Çiçek Tozlaşma Algoritması (FPA)

Bu algoritma, erkekten dişiye polen transferi fikrine dayanmaktadır, bu süreç tozlaşma süreci olarak bilinmektedir. Bu, kendi kendine tozlaşma (yerel tozlaşma olarak adlandırılır) veya karışık tozlaşma (küresel tozlaşma olarak adlandırılır) şeklinde olabilir ve anahtar olasılık ile çözülecek sorunun alt ve üst sınırları ile nüfus sayısı tarafından kontrol edilmektedir. Algoritma, arama alanı içinde değerlerin dağıtılmasıyla başlar. Daha sonra amaç fonksiyonu hesaplanır ve seçilen anahtar olasılık katsayısına bağlı olarak arama işlemi küresel veya yerel olabilmektedir. Ardından adım boyutu belirlenir ve amaç fonksiyonu değeri yeni değerlere göre güncellenmektedir. Bu işlem, belirli bir yineleme sayısı tamamlanana kadar tekrar edeceği için burada bir döngü oluşturulmaktadır (Yang ve ark. (2016)).

$$x_i^{i+1} = x_t^i + L(g^* - x_i^t) \tag{108}$$

L: Lévy uçuş dağılımına göre hesaplanan adım büyüklüğüdür

.



Şekil 10. FPA algoritması akış diyagramı

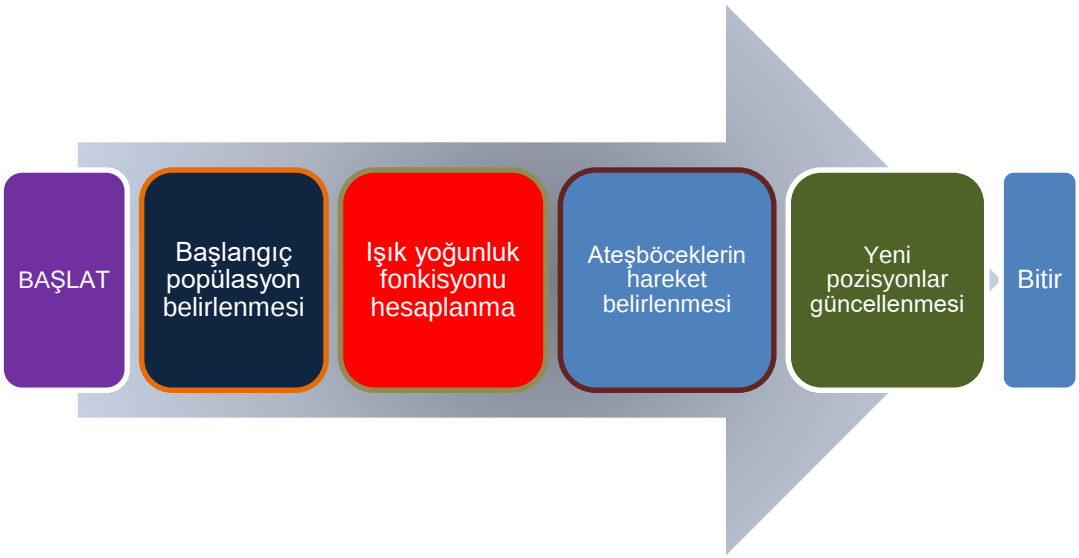
2.6.2. Ateşböceği Algoritması (FA)

Bu algoritma ateşböceklerinin yaydığı ışığın işlevine dayanmaktadır. Bu ışığın yoğunluğu, ateşböcekleri arasındaki mesafe arttıkça azalır ve ışığı emen hava, mesafe arttıkça bu yoğunluğu azaltmaya yardımcı olmaktadır. Bu algoritma, ters kare yasasına dayalı olarak sabit bir ışık emme katsayısını belirtir ve tüm ateşböceklerinin tek cinsiyette olduğunu ve ışık yoğunluğu ile birbirlerine çekildiğini, yani daha az parlak bir ateşböceğinin daha parlak olana doğru hareket ettiğini vurgular. Parlaklık arasında fark yoksa, ateşböcekleri rastgele hareket etmektedir. Parlaklık, amaç fonksiyonu ile yakından ilişkilidir ve her ateşböceğinin belirli bir konumu ve parlaklığı olmaktadır. Bu algoritma, rastgele bir çözüm kümesi oluşturarak, parlaklık yoğunluğunu hesaplayarak ve ardından grubun her bir ateşböceğinin yeni konumunu güncelleyerek başlamaktadır. Bir sonraki adım, yeni amaç fonksiyonunu hesaplamak ve eski fonksiyonla karşılaştırmaktır. Yeni olan daha iyiyse, veriler güncellenir ve sonlandırma kriterleri karşılanırsa işlem sona erer; aksi takdirde işlem tekrarlanmaktadır (Yang ve ark. (2016)).

$$x_t^{i+1} = x_t^i + \beta e^{-\gamma r_{ij}^2}(x_j^t - x_i^t) + \alpha\epsilon_i \tag{109}$$

β: Çekim katsayısıdır.

γ: I şık yoğunluğunun sönümleme katsayısıdır.



Şekil 11. FA algoritması akış diyagramı

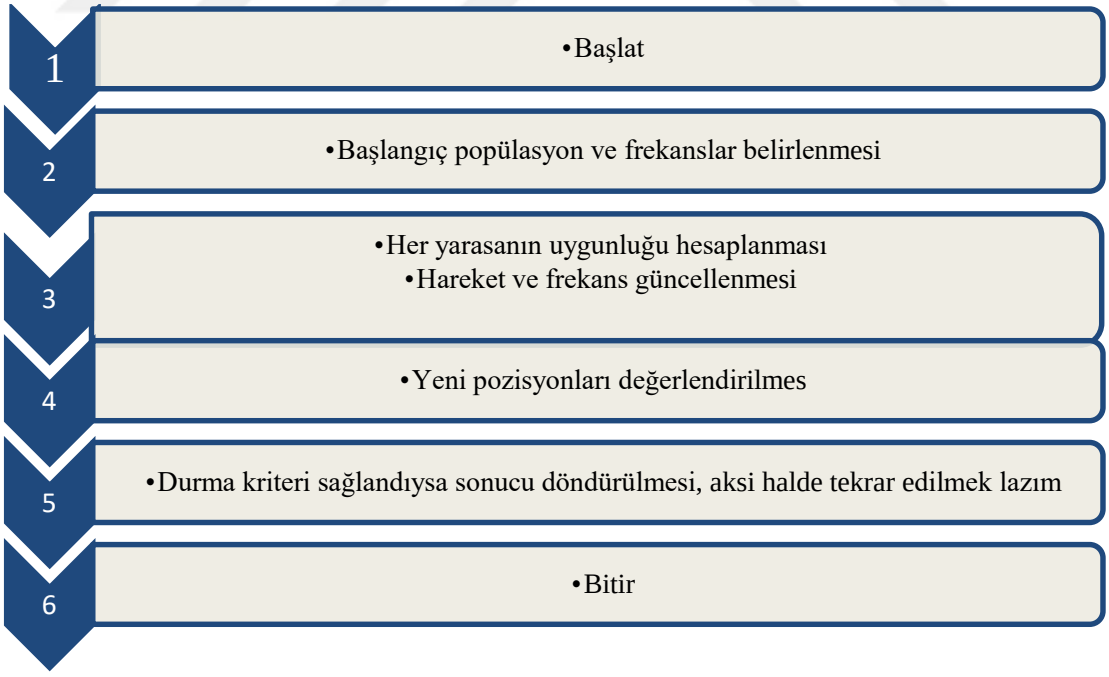
2.6.3. Yarasa algoritması (BA)

Bu algoritma, bir yarasanın belirli bir konumu olduğunu, belirli bir hızda uçtuğunu ve dalga boyu ve yoğunluğuna göre değişen bir frekansa sahip olduğunu varsayamaktadır. Dalga boyu veya frekans, yarasanın hedefe yakınlığına göre ayarlanır; burada amaç fonksiyonu, problem alanındaki en iyi çözümleri seçerek çözüm kalitesini değerlendiren bir araç olarak işlev görmektedir. Birincil fonksiyon değeri, ses ve darbe oranı kullanılarak yakınsama hızını kontrol eder. Yerel arama süreci, yeni konumların tekrarlanan güncellenmesi olarak kendini gösterir, çünkü yarasalar ile avlar arasındaki mesafeler güncellenmiş konumlara göre değişmektedir. Arama, belirli kriterler ve belirli yinelemeler doğrultusunda en iyi amaç fonksiyonu değerini bulmak için devam etmektedir (Yang ve Gndomi (2012), Bekdaş ve ark. (2021)).

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^{t-1} - g^*)\, f_i \tag{110}$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \tag{111}$$

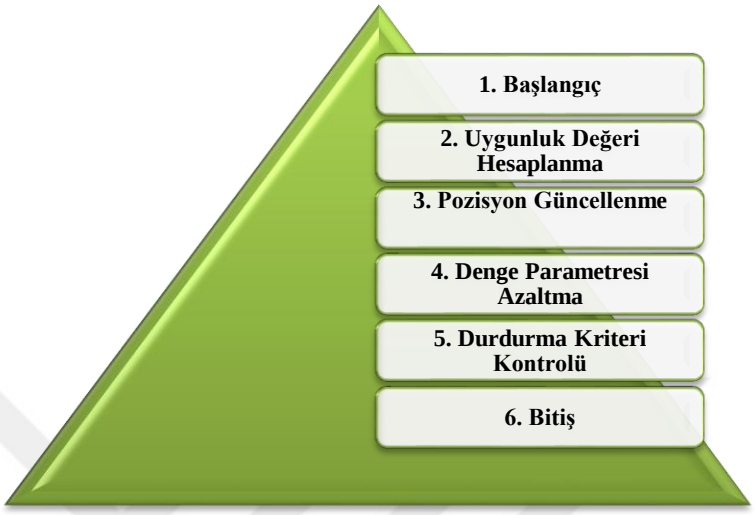
f_i : Frekans faktörüdür



Şekil 12. BA algoritması akış diyagramı

2.6.4. Gri Kurt Optimizasyonu (GWO)

Gri kurt optimizasyonu GWO, gri kurtların sergilediği hiyerarşik yapıya dayanan bir optimizasyon yöntemidir.



Şekil 13. GWO algoritması akış diyagramı

Bu hiyerarşi, lider konumundaki alfa ile başlar ve onu, liderin talimatlarını alıp delta kurtlarına iletmekten sorumlu olan beta takip eder delta kurtları, beta'dan daha düşük ancak en alt sırada bulunan Omega'dan daha yüksek yetkinliğe sahiptir. Alfa, beta ve delta kurtları birlikte avı bulmak için çalışır ve avın konumuna bağlı olarak rastgele hareket ederler Kurtların hareketi keşif, arama, kuşatma ve avlanma ile ilgili faktörlerden etkilenir. Bu algoritmada, her kurdun av ile olan mesafesi matematiksel olarak ifade edilir ve üç tür kurt, en iyi üç çözümü temsil eder. Bu çözümler, optimizasyon sürecini yönlendirir ve algoritma, yinelemeler boyunca en iyi çözümleri kaydederek ilerler. İşleyiş süreci şu adımlardan oluşur Tasarım sabitleri, kısıtlar ve değişken sınırlarını tanımlamak ve GWO parametrelerini ayarlamak (popülasyon büyüklüğü, maksimum yineleme sayısı) kurt konumlarını rastgele atamak ve en iyi üç tanesini alfa (α), beta (β) ve delta (δ) olarak belirlemek kuşatma ve avlanma aşaması, α, β ve δ'ye göre kurt konumlarını güncelleyerek optimal çözüme ilerlemeyi sağlar keşif ve sömürü aşaması, katsayı vektörlerini (A ve C) ayarlayarak yeni alanları arama ve iyi çözümleri iyileştirme dengesini sağlar Durdurma kriteri maksimum yineleme sayısına ulaşıldığında veya optimal çözüm bulunduğunda sürecin sonlandırılmasıdır

Alfa (α) en iyi nihai çözüm olarak kabul edilmektedir (Yang (2008), Erdal ve Saka (2013), Kshirsagar ve Parekar (2018)).

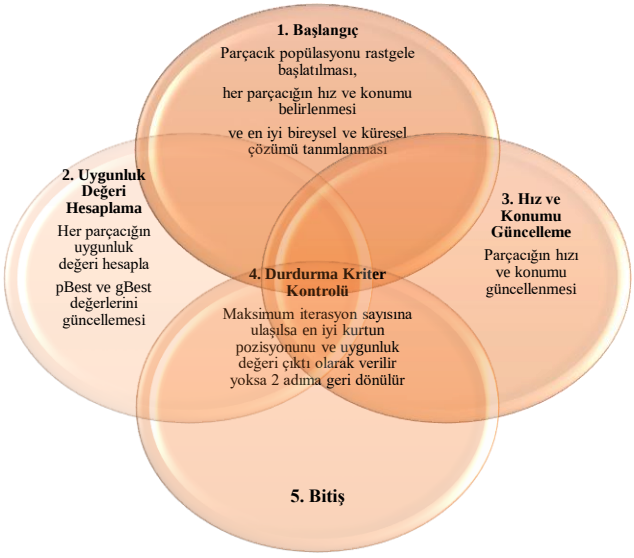
$$X(t+1) = X_p - A.D \quad (112)$$

$$D = |C.X_p - X| \quad (113)$$

A ve C : Doğrusal azalan faktörlerle belirlenen vektörlerdir.

2.6.5. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

Parçacık sürü optimizasyonu PSO algoritması, mühendislik tasarımında önemli bir rol oynar ve geometrik şekiller ile topolojinin optimize edilmesini sağlar. Bu algoritma, minimum fonksiyon değerlendirmesiyle iyi sonuçlar elde edebilir. Mekanizması, kuş sürülerinin kolektif zekasına dayanır; kuşlar, ihtiyaçlarına göre hareketlerini koordine edebilirler. Algoritmada her kuş bir parçacık olarak temsil edilir ve aynı zamanda bir çözüm görevi görür. Algoritma, sürüyü rastgele oluşturarak başlar ve yinelemelerle optimal çözüme ulaşır. Parçacıklar birbirleriyle iletişim kurarak en iyiyi belirler ve belirli bir hızda optimal çözüme doğru hareket eder. Her parçacık şu üç vektöre sahiptir. Hız, Mevcut, konum, önceki en iyi konum (pBest) işleyiş süreci şu şekildedir. Tasarım sabitlerini, değişken sınırlarını ve algoritma parametrelerini tanımlamak parçacık konumlarını ve hızlarını rastgele başlatmak, ardından kişisel en iyi (pBest) ve küresel en iyi (gBest) değerlerini belirlemek.



Şekil 14. PSO algoritması akış diyagramı

Her yinelemede hızları güncellemek, önceki değerlere, pBest'e ve gBest'e göre yeni konumları belirlemek uygunluk değerlendirmesi yapmak, pBest ve gBest değerlerini güncelleyerek iyileştirmeleri sağlamak, durdurma kriteri maksimum yinelemeye ulaşılması veya yakınsama sağlandığında süreci sonlandırmaktır En iyi çözüm gBest olarak kabul edilmektedir (Yang (2010), Kshirsagar ve Parekar (2018)).

$$v_i^{t+1} = wv_i^t + c_1 r_1(Pbest, i - x_i^t) + c_2 r_2(gbest - x_i^t) \quad (114)$$

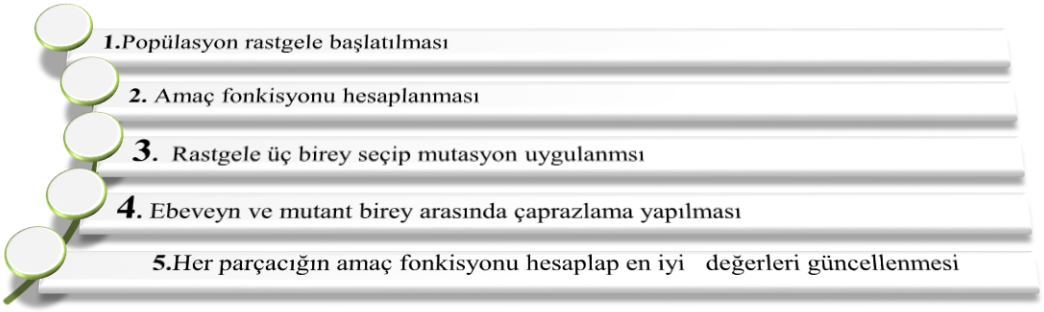
$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (115)$$

2.6.6. Diferansiyel Evrim (DE)

Diferansiyel evrim DE algoritması, genetik algoritmanın GA geliştirilmiş bir versiyonu olup etkili bir optimizasyon yöntemidir. Popülasyonun evrimini kullanarak karmaşık optimizasyon problemlerini çözer ve rastgele seçim, mutasyon ve çaprazlama mekanizmalarına dayanmaktadır. Bu güçlü algoritma, minimum kontrol parametreleriyle iyi sonuçlar sunar ve popülasyon evriminin başarı oranını artırır Çalışma prensibi, rastgele bir grup seçerek başlar ve bu gruptan iki birey rastgele seçilir. Bu iki bireyin farkı bir vektör oluşturur ve üçüncü bireyin varyasyon kaynağı olarak kullanılır. Bu vektör, algoritma içinde belirlenen kurallara göre ağırlıklandırılır ve ilk kromozom ile yeni çözüm arasında bir çaprazlama olasılığına CR göre çaprazlama işlemi gerçekleştirilir. İşleyiş süreci şu şekildedir Sabitleri, kısıtları, değişken sınırlarını ve DE parametrelerini tanımlamak (popülasyon büyüklüğü, mutasyon faktörü, çaprazlama oranı, maksimum yineleme) Arama alanında rastgele aday çözümler oluşturmak (Başlatma) Mutasyon aşaması, rastgele seçilen üç bireyin kombinasyonu ile mutant vektörler oluşturmak ve çeşitliliği artırmak Çaprazlama aşaması, mutant ve orijinal vektörleri çaprazlama oranına göre karıştırarak yeni deneme vektörleri üretmek seçim aşaması, deneme ve orijinal vektörleri karşılaştırarak daha iyi olanı seçmek Durdurma kriteri, maksimum yineleme sayısına ulaşıldığında veya en iyi çözüm bulunduğunda sürecin sonlandırılmasıdır (Yang ve ark. (2016), Kshirsagar ve Parekar (2018)).

$$v_i = xr_1 + F(xr_2 - xr_3) \quad (116)$$

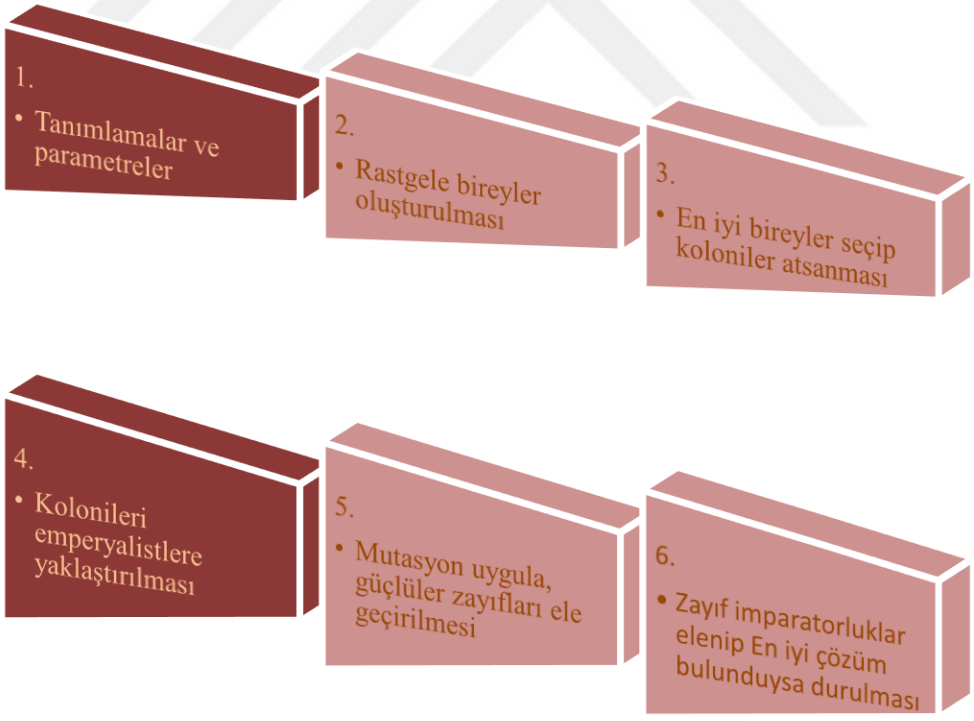
F : Ölçeklendirme faktörüdür.



Şekil 15. DE algoritması akış diyagramı

2.6.7. İmparatorluk Rekabet Algoritması (ICA)

Sosyo-politik ilhamlı bir optimizasyon algoritmasıdır. İlk olarak (Kaveh ve Talatahari (2015)) tarafından çelik yapı optimizasyonunda kullanılmıştır. diğer popülasyon tabanlı metasezgisel yöntemler gibi, ICA rastgele başlangıç çözümleriyle başlar ve en iyi ülkeler imparator olarak seçilir, geri kalanlar ise koloniler olarak atanır.



Şekil 16. ICA algoritması akış diyagramı

ICA'nın temel mekanizmaları kolonilerin geliştirilmesini koloniler, imparatorlarından öğrenerek iyileştirilir ve imparator olma şansı elde etmektedir. İkinci temeli imparatorluk rekabeti güçlü imparatorluklar zayıf olanların kolonilerini ele geçirirken, en zayıf imparatorluk çökene kadar süreç devam eder ICA, emperyalizm ve sömürgecilikten ilham alan bir optimizasyon yöntemidir. Ülkeler popülasyon üyeleri olarak ele alınır, en iyi ülkeler imparator, geri kalanlar ise koloniler olarak sınıflandırılır. Süreç dört aşamadan oluşur: Öncelikle en iyi ülkeler imparator olarak seçilir ve kalan ülkeler kolonilere dönüştürülerek imparatorluklara dağıtılır. Daha sonra koloniler, imparatorlarına doğru rastgele yönlenerek gelişir ve daha iyi bir konuma ulaşırsa imparatorun yerini alabilir. Ardından daha iyi bir konuma ulaşan koloni imparator olur ve imparator eski konumuna düşer. Son olarak güçlü imparatorluklar zayıf olanların kolonilerini ele geçirir, en zayıf imparatorluk çöker ve süreç en güçlü imparatorluk kalana kadar devam eder. Son aşamada tüm ülkeler en güçlü imparatorluğun kontrolüne girer ve algoritma en iyi çözümü bulabilmektedir (Kaveh ve Bakhshpoori (2019)).

$$X_{koloni}^{t+1} = X_{koloni}^{t} + \beta . d . u \tag{117}$$

β : Emperyalist gücü temsil eden bir katsayıdır.

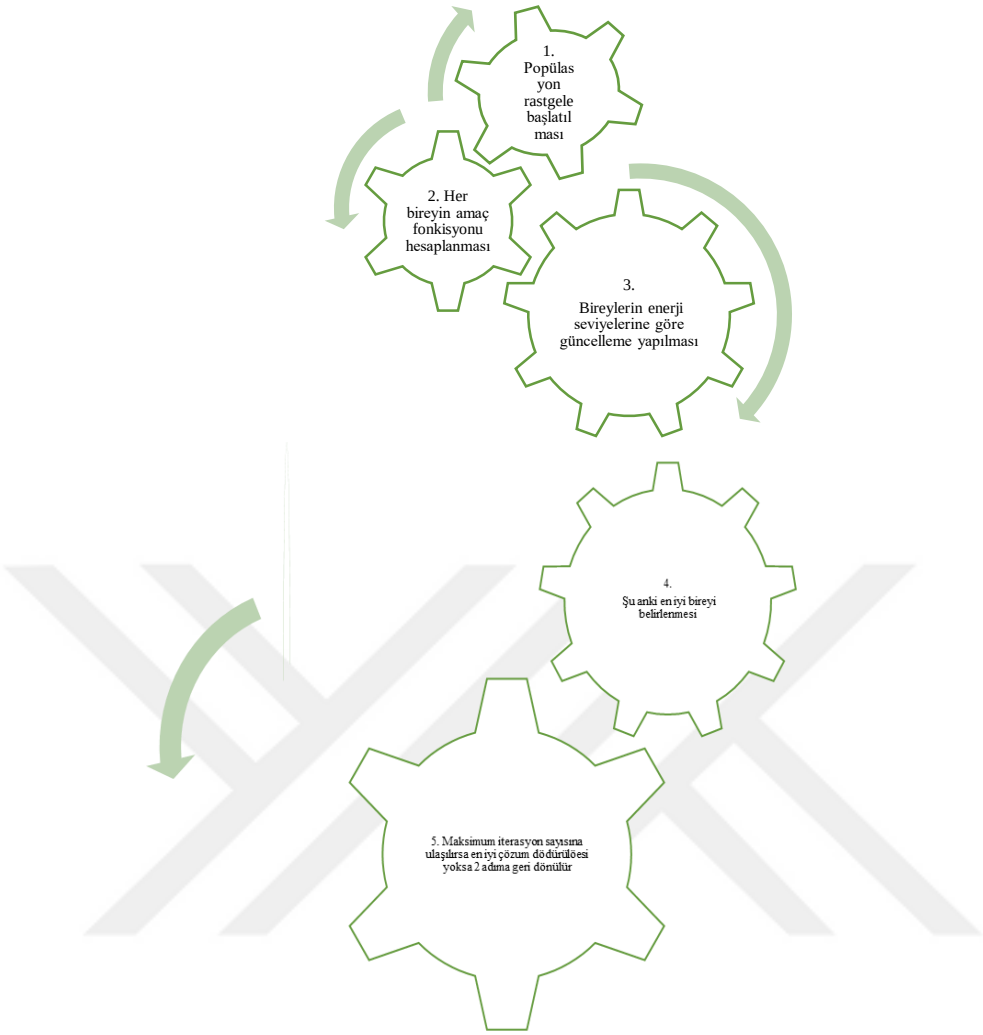
d : Koloni ile imparatorluk arasındaki mesafedir.

u : $[-1,1]$ aralığında rastgele bir sayıdır.

2.6.8. Şarj sistem arama (CSS)

CSS algoritması, elektriksel yükler ve Newton mekaniğine dayalı bir optimizasyon yöntemidir. Başlangıçta parçacıklar rastgele oluşturulur ve her parçacığa çözüm kalitesine göre yük atanır. Yüksek yüke sahip parçacıklar daha iyi çözümleri temsil eder ve Coulomb kuvvetleri sayesinde düşük kaliteli parçacıklar bu çözümlere doğru çekilir.

$$Q_i^{t+1} = Q_i^t + k\,(Q_{best} + Q_i^t) \tag{118}$$



Şekil 17. CSS algoritması akış diyagramı

Newton'un hareket yasalarına göre hız ve konum güncellenir, böylece parçacıklar zamanla daha iyi çözümler üretir. En iyi çözümler bir bellek sisteminde saklanarak yönlendirme için kullanılır. Algoritma keşif ile sömürü dengesini koruyarak en uygun sonucu bulmaya çalışır ve özellikle yapısal tasarım ile mühendislik problemlerinde etkili şekilde uygulanır (Kaveh ve Bakhshpoori (2019)).

2.6.9. Işın Optimizasyonu (IRO)

Işın Optimizasyon IRO algoritması, Snell'in ışık kırınım yasasına dayalı olarak geliştirilen yenilikçi bir nüfus tabanlı meta-sezgisel yaklaşımdır ve ışığın daha açık bir

ortamdan daha koyu bir ortama geçerken kırılması prensibini temel alır. Bu algoritma, yapısal optimizasyon problemlerine başarıyla uygulanmıştır. Snell yasasına göre, ışık bir ortamdan diğerine geçerken, geliş açısı ve ortamların kırılma indis oranına bağlı olarak yön değiştirir ve koyu ortama geçerken normal vektöre yaklaşır. IRO algoritmasında, ajanlar ışık ışınlarının başlangıç noktaları olarak ele alınır ve arama uzayında Snell yasasına uygun olarak güncellenir. Her ışın, önceki konumu başlangıç noktası, arama adım büyüklüğü olarak yönü ve uzunluğu belirlenen bir vektör olup yeni konum bu adım eklenerek elde edilir. Normal vektör ve kırılma indis oranı dikkate alınarak, Snell yasasına göre kırılma vektörü hesaplanır ve ajanların yeni konumları belirlenerek küresel veya yerel optimuma yakınsama sağlanır.

$$X_i^{t+1} + \lambda(X_{best} - X_i^t) \tag{119}$$



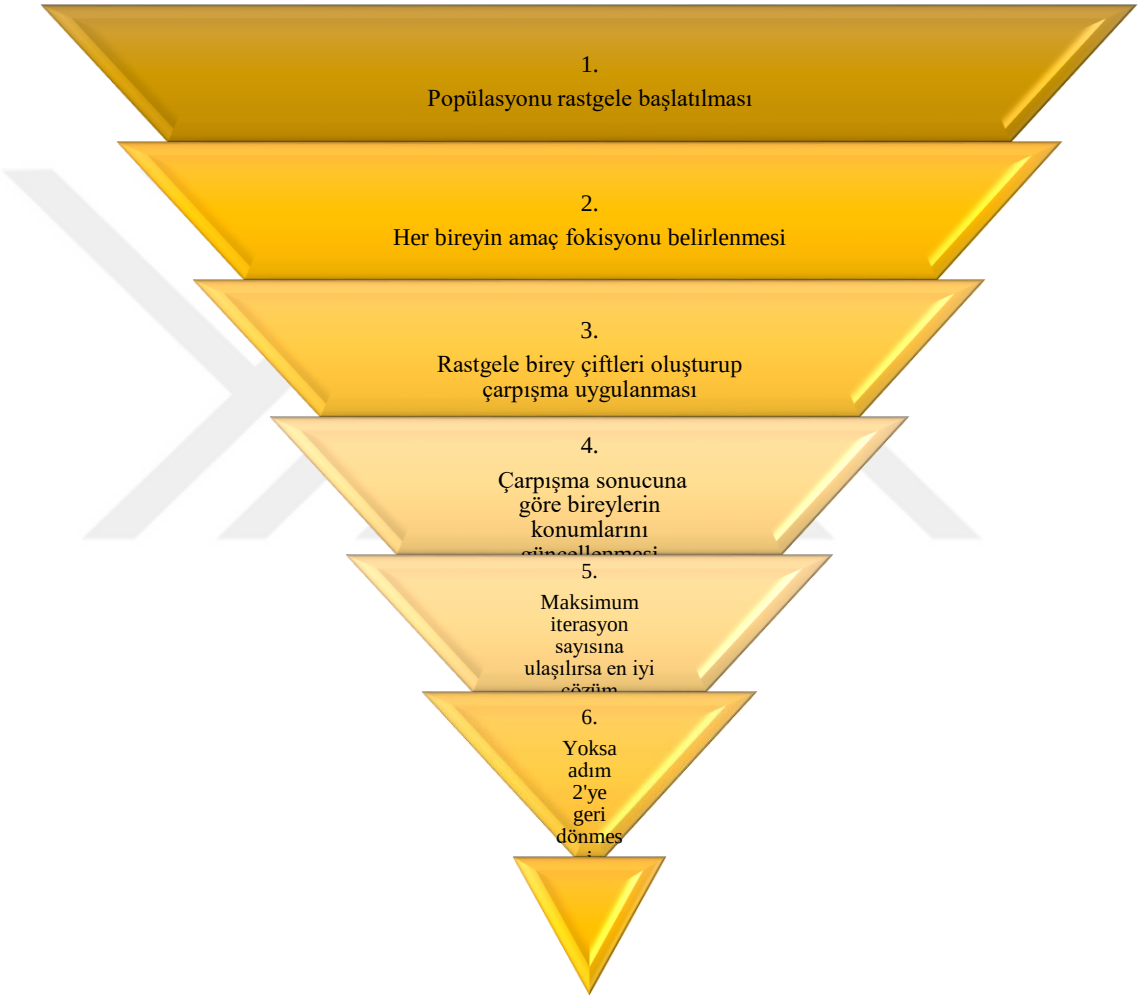
Şekil 18. IRO algoritması akış diyagramı

IRO, başlangıçta rastgele üretilmiş aday çözümler ve arama adım büyüklükleriyle başlar ve ajanların bireysel ve kolektif bilgisine dayanarak normal vektörü belirleyerek keşif ve sömürü arasında denge kurar. (Kaveh ve ark. (2021)), IRO algoritmasının doğruluk ve yakınsama hızını artırmak için Geliştirilmiş Işın Optimizasyon IRO algoritmasını geliştirmiş olup IRO'nun daha verimli ve basit olması nedeniyle tercih edildiği belirtilmektedir (Kaveh ve Bakhshpoori (2019)).

2.6.10. Çarpışan Cisimler Optimizasyon (CBO)

CBO algoritması, (Kaveh ve Mahdavi (2014)) tarafından geliştirilen ve katı cisimler arasındaki çarpışmaları yöneten momentum ve enerji yasalarına dayanan yeni

bir meta-sezgisel arama algoritmasıdır. Kavramsal olarak basit olup iç parametrelere bağlı değildir ve çeşitli optimizasyon problemlerinin çözümünde etkili bir şekilde kullanılmıştır. CBO'nun temel prensibi, çarpışan nesnelerin minimum enerji seviyesine doğru hareket etmesidir. Algoritma, rastgele oluşturulmuş başlangıç çözümleriyle başlar, her iterasyonda aday çözümleri değerlendirir ve en iyi yarısını durağan cisimler, diğer yarısını hareketli cisimler olarak belirler.



Şekil 19. CBO algoritması akış diyagramı

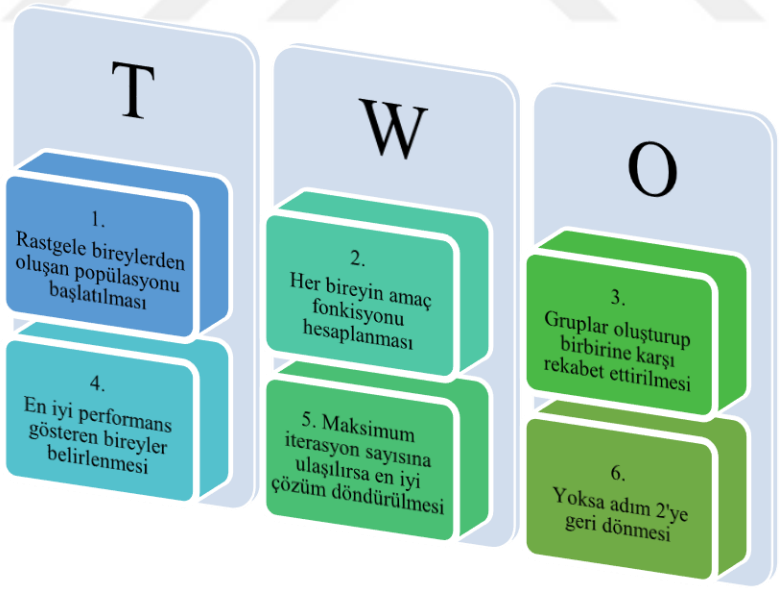
Hareketli cisimler durağan olanlarla çarpışarak daha iyi konumlara ulaşmayı amaçlar ve yeni konumlar momentum ve enerji yasalarına göre hesaplanan hızlarla belirlenir. Çarpışma sürecinde nesneler iki gruba ayrılır, daha iyi çözümler durağan cisimler olarak kabul edilirken, diğerleri hareketli cisimler olarak belirlenir. Hareketli

cisimlerin yeni hızları çarpışma sonrası hız denklemleriyle hesaplanır ve bu hızlar adım büyüklüğü olarak kullanılarak nesnelerin yeni konumları güncellenir. Çarpışma katsayısı (COR), keşif ve sömürü oranını kontrol etmek için iterasyon sayısına bağlı olarak doğrusal bir şekilde azaltılır. Böylece CBO, optimizasyon sürecinde çözümleri iyileştirmek için dinamik bir arama mekanizması sağlar (Kaveh ve Bakhshpoori (2019)).

$$v_i^{t+1} = v_i^t + F_i.\Delta_t \tag{120}$$

2.6.11. Halat Çekme Optimizasyon (TWO)

TWO algoritması, her aday çözümü bir halat çekme yarışmasına katılan bir takım olarak değerlendirir ve takımlar çözümlerinin kalitesine göre birbirlerine çekme kuvveti uygular. Newton mekaniği yasalarına dayanarak, yarışan takımlar yeni konumlarına hareket eder. Diğer birçok sezgisel algoritmadan farklı olarak, TWO etkileşime giren her iki çözümün kalitesini dikkate alarak formüle edilmiştir ve süreksiz, çok modlu, pürüzsüz olmayan ve konveks olmayan fonksiyonların küresel optimizasyonuna uygulanabilir.



Şekil 20. TWO algoritması akış diyagramı

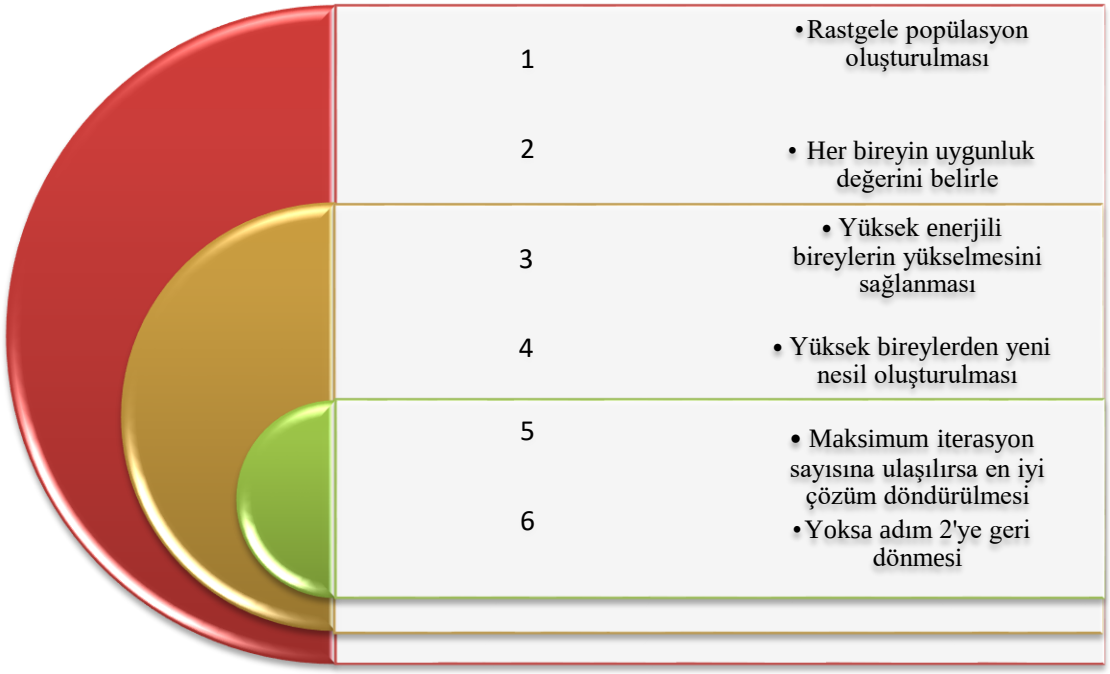
Mühendislik optimizasyon problemlerinin çözümünde etkinliği test edilmiş olup basit yapısı ve ölçeklenebilirliği sayesinde büyük boyutlu problemlere uygulanma

potansiyeline sahiptir. Algoritma, rastgele oluşturulan aday çözümlerle başlar ve her iterasyonda çözümler başarılarına göre ağırlıklandırılır; en iyi çözüm en yüksek, en kötü ise en düşük ağırlığa sahip olur. İki takım halat çekme yarışmasında karşılaştığında, daha hafif olan takım kaybederek daha ağır olan tarafa doğru hareket eder. TWO, bu süreçte Newton'un ikinci yasasına dayalı ivme ve yer değiştirme hesaplamalarını kullanarak kaybeden takımın hareketini belirler. Ayrıca, rastgelelik unsuru eklenerek arama sürecinin keşif yeteneği artırılmıştır. Her iterasyonda, takımlar optimum çözüme doğru yönlendirilirken, arama alanı dışına çıkan takımlar sezgisel bir strateji ile yeniden oluşturularak çeşitlilik korunur ve küresel çözüme yakınsama sağlanmaktadır (Kaveh ve Bakhshpoori (2019)).

$$X_i^{t+1} + T(X_{best} - X_i^t) \tag{121}$$

2.6.12. Su Buharlaşma Optimizasyonu (WEO)

Su buharlaşması, biyolojik ve çevresel bilimlerde büyük öneme sahiptir. Moleküler dinamik simülasyonlarına göre, yüzeyin hidrofobikten hidrofilik hale geçmesiyle buharlaşma hızı sezgisel olarak monoton bir azalma göstermez; önce artar ve maksimum bir değere ulaştıktan sonra azalır.



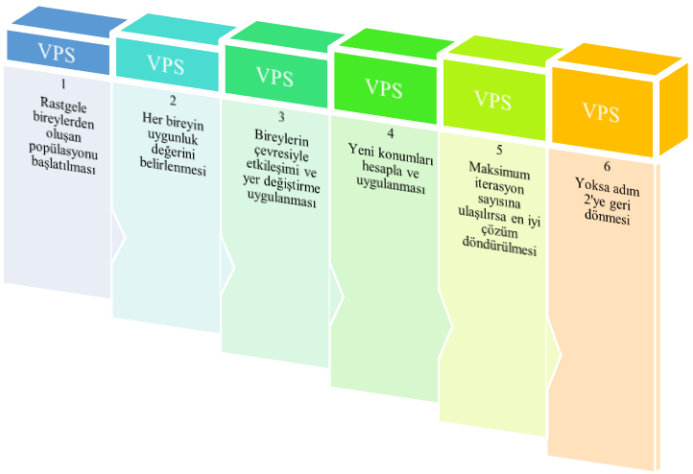
Şekil 21. WEO algoritması akış diyagramı

Yüzey ıslanabilirliği düşük olduğunda, su molekülleri küresel bir damlacık şeklinde birikir ve buharlaşma hızını belirleyen temel faktör, suyun geometrik şeklidir. Ancak, yüzey ıslanabilirliği yeterince yüksek olduğunda, su molekülleri monolayer olarak yayılır ve bu durumda geometri etkilediğini kaybederken, buharlaşma hızını belirleyen ana faktör yüzeyin sağladığı enerji bariyeri olur. WEO algoritması, su moleküllerini bireyler olarak ele alır ve değişken ıslanabilirliğe sahip katı yüzeyi arama alanı olarak kabul eder. Yüzeyin ıslanabilirliğinin azalması, suyun monolayer yapıdan damlacık formuna dönüşmesine neden olur ve bu durum, algoritmanın ilerlemesi sırasında bireylerin düzenindeki değişimle tutarlıdır. Yüzeyin ıslanabilirliğinin azalması, minimizasyon problemlerinde amaç fonksiyonunun azalmasını temsil eder. Su moleküllerinin buharlaşma akı hızı, bireylerin güncellenmesi için en uygun ölçüt olarak kabul edilir ve algoritmanın yerel ve küresel arama yetenekleriyle uyumlu bir değişim modeli sunarak WEO'nun hızlı yakınsamasını ve basit yapısını sağlamada etkili olmaktadır (Kaveh ve Bakhshpoori (2019)).

$$X_i^{t+1} = X_i^t - E\,(X_i^t - X_{best}) \tag{122}$$

2.6.13. Titreşimli Parçacıklar Sistemi (VPS)

Viskoz sönümlemeli tek serbestlik dereceli sistemlerin serbest titreşiminden esinlenerek geliştirilmiş olup yapısal optimizasyon problemlerinin çözümünde başarıyla uygulanmıştır.



Şekil 22. VPS algoritması akış diyagramı

VPS, rastgele başlatılan çözümleri viskoz sönümlemeye sahip serbest titreşen parçacıklar olarak ele alır ve her parçacık, sönümlü titreşim denklemlerine dayalı olarak denge konumuna yönlendirilir. Optimizasyon süreci ilerledikçe, parçacıklar rastgelelik ve geçmiş çözümlerden yararlanarak daha iyi konumlara doğru salınım yapar. VPS, üç temel bileşenden oluşur: en iyi konum HP, iyi parçacık GP ve kötü parçacık BP. Parçacıkların yeni konumları, bu üç referans noktaya göre hesaplanır ve HP'ye yönelim, kendini uyarlama mekanizmasını temsil ederken, GP ve BP'nin etkisi iş birliği ve rekabet dinamiklerini oluşturur. GP'nin etkisi BP'ye kıyasla daha fazladır, böylece parçacıklar daha iyi çözümlere yönlendirilir. Ayrıca VPS, harmoni arama stratejisini temel alan bir bellek mekanizması kullanarak arama alanının dışına çıkan parçacıkları düzelterek algoritmanın stabilitesini artırır. Bu bellek kullanımı, ek hesaplama maliyeti getirmeden algoritmanın performansını iyileştirmeye katkı sağlamaktadır (Kaveh ve Bakhshpoori (2019)).

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V \sin wt \tag{123}$$

2.6.14. Döngüsel Partenogenez Algoritması (CPA)

Yapısal optimizasyon problemlerinin çözümünde başarıyla uygulanmış olup bazı zoolojik türlerin üreme ve sosyal davranışlarından esinlenerek geliştirilmiştir. CPA, başlangıçta rastgele oluşturulan aday çözümleri birer organizma olarak ele alır ve bunları belirli sayıda koloniye ayırır. Her koloni, sahip olduğu bireylerin kalitesini geliştirmek için eşeyli ve eşeysiz üreme mekanizmalarından yararlanır ve bilgi değişim süreciyle diğer kolonilerden fayda sağlayabilir.



Şekil 23. CPA algoritması akış diyagramı

Kolonideki en iyi bireyler dişi olarak kabul edilerek yalnızca kendi genetik özelliklerini aktaran eşeysiz üreme gerçekleştirirken, daha zayıf bireyler erkek olarak değerlendirilip rastgele seçilen bir dişiyle eşeyli üreme yapar. Ek olarak, elverişsiz koşullar altında kanatlı bireyler üretme yeteneğinden ilham alan CPA, belirli bir olasılıkla rastgele iki koloni seçerek bir koloninin en iyi bireyini diğerinin en kötü bireyiyle değiştirir.

Kolonilerin iyileştirilmesi ve bilgi değişimi süreçleri döngüsel olarak tekrar edilerek her koloninin arama uzayında daha iyi bir konuma yönelmesi sağlanır (Kaveh ve Bakhshpoori (2019)).

$$X_i^{t+1} = X_p + r\,(X_{best} + X_i^t) \tag{120}$$

2.6.15. Termal Değişim Optimizasyonu (TEO)

Newton'un soğuma yasasına dayanarak geliştirilmiş ve bazı yapısal optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılmıştır. TEO, her parçacığı bir ısıtma veya soğutma nesnesi olarak ele alır ve bir başka ajanı çevre olarak kabul ederek aralarında ısı transferi gerçekleştirir. Her iterasyonda popülasyon, nesnelerin amaç fonksiyon değerlerine göre sıralanarak iki gruba ayrılır. Tüm nesneler çevresel sıcaklıktan etkilenir; birinci yarıda bulunan nesneler ikinci yarıdaki karşılık gelen nesne tarafından soğutulurken, ikinci yarıda bulunan nesneler daha sıcak nesnelere doğru hareket ederek ısıtılır.

Bu süreç, nesneleri sıcaklık farkı olmadan daha iyi konumlara yönlendirmek amacıyla döngüsel olarak tekrar edilir. TEO ayrıca belirli bir hafıza mekanizması kullanarak en iyi çözümleri kaydeder ve her iterasyonda en kötü çözümlerle değiştirerek algoritmanın genel performansını artırmaktadır (Kaveh ve Bakhshpoori (2019)).

$$T_i^{t+1} = T_i^t + k\,(T_{best} + T_i^t) \tag{124}$$



Şekil 24. TEO algoritması akış diyagramı

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada kullanılan tasarım çözümleri, ikinci bölümde belirtilen standart kriterlere dayanmaktadır. Her bir boşluk şekli için, önce orijinal haddeleme işlemiyle üretilmiş bir petek kiriş seçilmekte ve bu kiriş oksi-kesme yöntemiyle istenen boşluk şekline getirilerek işlenmektedir. Bu çalışmada, dairesel, sinüzoidal ve altıgen boşluklara sahip petek kirişlerin en düşük maliyetle ve en uygun şekilde tasarlanabilmesi amacıyla, literatürde ilk defa kullanılan beş yeni optimizasyon algoritması uygulanmaktadır. Bu algoritmalar şunlardır: CPA, IRO, TWO, VPS ve ICA. Bu algoritmalar, amaç fonksiyon olarak minimum maliyeti temsil etmekte olup aynı zamanda optimum tasarımı ve petek kirişin en uygun boyutlarını belirlemek için de kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, kiriş boyları 300 cm ile 800 cm arasında, 100 cmlik artışıla toplam altı farklı uzunlukta değerlendirilmektedir. Kirişlerleki tekil yük ve üniform yük olmak üzere, iki farklı yükleme yapılmıştır. Basit kiriş mesnet için ise koşulu dikkate alınmıştır. MATLAB yardımı ile elde edilen sonuçlar, aşağıdaki tablolarda sunulmakta ve tartışılmaktadır. Tablolar, her algoritma için (her boşluk şekli ve her kiriş uzunluğu özelinde) en uygun boyutları, en düşük maliyetleri ve işlem sürelerini (CPU zamanı, saniye cinsinden) göstermektedir. Ayrıca, verilerin yayılımını değerlendirmek amacıyla standart sapma hesaplamaları da sunulur. Beş farklı algoritma için iterasyon sayısı 250 olarak sabitlenmiştir. Bu değer, her algoritmaya özgü birinci parametre değeri ile maksimum amaç fonksiyonu değerlendirme sayısı olan 10000'in bölünmesiyle elde edilmiştir. İkinci parametre (maksimum değerlendirme sayısı) tüm algoritmalarda ortak olup 10000 olarak belirlenmiştir. Birinci parametre ise her algoritma için isimsel olarak farklılık göstermekte, ancak değeri 400 olarak sabit tutulmuştur. Aşağıda her algoritmanın ilgili parametresi ve değeri verilmiştir:

ICA algoritması: Ülke sayısı = 400

TWO algoritması: Takım sayısı = 400

CPA algoritması: Sömürge sayısı = 400

VPS algoritması: Titreşen parçacık sayısı = 400

IRO algoritması: Işık ışını sayısı = 400

Bu durumda, iterasyon sayısı 10000 ÷ 400 = 250 hesaplanmaktadır: Bu yöntemle tüm algoritmalar eşit değerlendirme koşulları altında çalıştırılmış ve karşılaştırmalı analizler için dengeli ve adil bir temel oluşturulmuştur.

3.1. Algoritma Sonuçlarının Analiz Edilmesi

Bu bölümde, tüm uzunluklar ve boşluk tiplerin için petek kirişlerdeki kiriş tasarımlarının sonuçları incelenmektedir.

3.1.1. 300 cm'lik Petek Kiriş Analiz Edilmesi

300 cm uzunluğunda ve üç tip boşluğa sahip petek kirişlerdeki tasarımlarının sonuçları incelenmiştir.

3.1.1.1. Dairesel Boşluklu Durum

Tablo 2'de, 300 cm uzunluğa ve dairesel boşluklara sahip petek kirişin toplam üretim maliyetine ilişkin elde edilen optimum amaç fonksiyonu değerleri ile en uygun kesit boyutları ve beş farklı optimizasyon algoritmasına ait karşılaştırmalı sonuçlar sunulmaktadır. Tablo 1'de elde edilen verilere göre, bu geometri ve uzunluktaki kiriş tasarımı için en düşük üretim maliyeti CPA algoritması tarafından sağlanır. Buna karşılık, en yüksek maliyet değeri ICA algoritmasıyla elde edilir. Ancak dikkat çeken önemli bir husus, tüm algoritmaların üretim maliyeti açısından oldukça yakın ve karşılaştırılabilir sonuçlar vermiş olmasıdır. Bu durum, algoritmaların benzer tasarım çözümleri üretebildiğini ve sonuçların genel olarak tutarlı olduğunu göstermektedir. İşlem süresi (CPU zamanı) açısından yapılan değerlendirmede ise, CPA algoritması en kısa işlem süresiyle öne çıkarken, en uzun işlem süresi ise TWO algoritmasında gözlemlenmektedir. Bu fark, algoritmaların yapısal farklılıkları ve arama stratejilerinden kaynaklanmakta olup problem çözümünde harcanan süre bakımından algoritmalar arasında anlamlı farklar bulunduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 2. 300 cm'lik dairesel boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri

Tasarım Değişkeni	Kullanılan Algoritma				
	CPA	**IRO**	**TWO**	**VPS**	**ICA**
$\boldsymbol{d_g}$ (cm)	29.6296	57.0358	27.6109	22.4262	47.0473
$\boldsymbol{b_f}$ (cm)	25.0000	23.7392	19.7461	23.4451	10.4763
$\boldsymbol{t_w}$ (cm)	0.7000	0.7000	0.7715	1.0249	1.2445
$\boldsymbol{t_f}$ (cm)	0.5806	0.4081	1.0339	1.0414	1.1262
$\boldsymbol{h}$ (cm)	17.7778	34.2215	16.5665	13.4557	28.2284
$\boldsymbol{e}$ (cm)	4.4444	8.5554	4.1416	3.3639	7.0571
$\boldsymbol{S}$ (cm)	22.2222	42.7769	20.7081	16.8196	35.2855
Amaç Fonksiyonu ($/m)	336.7965	337.4320	336.9047	337.0612	339.5876
CPU Zamanı (S.)	1.4049	1.2477	30.9165	1.2787	1.3862
Standart Sapma	0.0127	0.4764	0.1958	0.1018	1.1171

Standart sapma değerleri incelendiğinde, VPS algoritmasının en düşük sapma değeri ile çözüm stabilitesi bakımından en istikrarlı sonuçları verdiği gözlemlenir. Öte yandan, ICA algoritmasının en yüksek standart sapma değerine sahip olması, bu algoritmanın çözüm sonuçlarında daha fazla dağılım gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, kullanılan algoritmalar arasında standart sapma bakımından da dikkate değer farklılıkların bulunduğu ifade edilebilmektedir.

3.1.1.2. Altıgen Boşluklu Durum

Tablo 3'te, altıgen boşluklara sahip ve 300 cm uzunluğunda tasarlanmış petek kirişin optimizasyonu amacıyla kullanılan beş farklı metasezgisel algoritma yardımıyla elde edilen en uygun kesit boyutlarını, işlem süresini (CPU zamanı), standart sapma değerlerini ve minimum üretim maliyeti sonuçlarını kapsamlı şekilde sunmaktadır. Tablo 3'te, standart sapma açısından değerlendirildiğinde, en düşük sapma değeri CPA algoritması ile elde edilir. Bu algoritmayı sırasıyla VPS ve TWO algoritmaları izlemektedir. Öte yandan, en yüksek sapma değerleri ICA ve IRO algoritmalarında raporlanır. Bu durum, bazı algoritmaların çözüm stabilitesi açısından

daha istikrarlı sonuçlar verdiğini, diğerlerinin ise daha geniş bir çözüm çeşitliliği sunduğunu göstermektedir.

Tablo 3. 300 cm altıgen boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri

Tasarım Değişkeni	Kullanılan Algoritma				
	CPA	**IRO**	**TWO**	**VPS**	**ICA**
d_g (cm)	20.5128	35.8219	21.7926	23.3237	19.2347
b_f (cm)	20.0617	18.2184	25.0000	24.0414	18.4954
t_w (cm)	0.7000	1.2371	0.8535	0.8566	1.1232
t_f (cm)	1.4652	1.2569	1.4661	1.4303	0.7198
h (cm)	12.3077	21.5531	13.0756	13.9942	11.5408
e (cm)	3.0769	5.3883	3.2689	3.4986	2.8852
S (cm)	15.3843	32.3294	16.3443	16.9033	15.3419
θ (derece)	53.1308	45.0004	53.1307	54.7064	50.3289
Amaç Fonksiyonu ($/m)	181.6920	186.9527	182.4233	182.9116	191.1498
CPU Zamanı (S.)	1.4449	1.5442	34.6233	1.4934	1.4850
Standart Sapma	0.0011	4.7370	0.4045	0.3423	5.6746

İşlem süresi (CPU zamanı) bakımından yapılan karşılaştırmada, CPA algoritması en kısa süre ile öne çıkarken, en uzun işlem süresi TWO algoritmasında kaydedilir. Bu farklılık, algoritmaların sahip olduğu çözüm stratejilerinin işlem yüküne etkilediğini ve probleme adaptasyon kapasitelerini yansıtmaktadır. Çalışmada kullanılan amaç fonksiyonu, söz konusu kiriş türlerinin üretim maliyetini minimize etmeyi hedeflemektedir. Bu bağlamda, en düşük üretim maliyeti CPA algoritması ile sağlanmıştır. Buna karşılık, en yüksek maliyet değeri ICA algoritması tarafından üretilmiştir. Bununla birlikte, genel olarak algoritmalar arasında elde edilen maliyet sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir; bu durum, çözümlerin karşılaştırılabilirliğini ve elde edilen sonuçların geçerliliğini desteklemektedir.

3.1.1.3. Sinüziodal Boşluklu Durum

Tablo 4'te, 300 cm uzunluğunda sinüzoidal boşluklu petek kiriş tasarımı için gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları değerlendirilir. İlgili tablo, kesit boyutları, işlem süreleri, amaç fonksiyonu değerleri ve standart sapma sonuçlarını içermektedir.

Tablo 4. 300 cm'lik sinüzoidal boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri

Tasarım Değişkeni	Kullanılan Algoritma				
	CPA	**IRO**	**TWO**	**VPS**	**ICA**
$\boldsymbol{d_g}$ (cm)	37.1355	67.2689	37.2203	53.1821	47.1631
$\boldsymbol{b_f}$ (cm)	23.4840	20.1909	25.0000	24.3936	12.5612
$\boldsymbol{t_w}$ (cm)	1.1314	0.7000	1.3458	1.4406	1.3325
$\boldsymbol{t_f}$ (cm)	1.2000	0.4000	1.3787	1.4568	1.1428
$\boldsymbol{h}$ (cm)	29.7084	53.8151	29.7762	42.5457	28.2979
$\boldsymbol{e}$ (cm)	11.8834	21.5260	11.9105	17.0183	7.0745
$\boldsymbol{S}$ (cm)	46.1537	83.6046	46.2590	66.0971	35.4730
Amaç Fonksiyonu ($/m)	174.2751	177.5860	174.3539	174.4677	183.8281
CPU Zamanı (S.)	14.7190	20.7713	43.7465	15.1366	1.1069
Standart Sapma	0.2515	0.9851	0.2249	0.1455	3.9564

Tablo 4'te elde edilen bulgulara göre, en düşük üretim maliyetine CPA algoritması ile ulaşılmaktadır. TWO ve VPS algoritmaları ise birbirine oldukça yakın maliyet değerleriyle orta seviyede sonuçlar üretmektedir. Buna karşın, en yüksek maliyet değeri ICA algoritması tarafından elde edilmektedir. Genel olarak, amaç fonksiyonu değerleri arasındaki farklılıkların sınırlı olduğu ve tüm algoritmaların ekonomik sonuçlar bakımından birbirine oldukça yakın çözümler sunduğu anlaşılmaktadır. İşlem süresi (CPU zamanı) açısından yapılan karşılaştırmada, en hızlı sonuçlara ICA algoritmasının ulaştığı gözlemlenmektedir. CPA ve VPS algoritmaları makul düzeyde işlem süreleri sunarken, en uzun işlem süresi TWO algoritmasında kaydedilmektedir. Bu durum, algoritmaların arama stratejilerindeki yapısal farklılıkların işlem süresi üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

Genel olarak, kesit boyutları arasındaki farkların orta düzeyde olduğu ifade edilebilmektedir. Standart sapma değerleri açısından yapılan değerlendirmede, VPS algoritmasının en düşük sapmayı sağlayarak çözüm stabilitesi bakımından en güvenilir performansı sergilediği belirlenmektedir. Öte yandan, ICA algoritması en yüksek standart sapma değerine sahip olup çözüm sonuçlarının daha fazla değişkenlik gösterdiği anlaşılmaktadır.

3.1.2. 400 cm'lik Petek Kiriş Analiz Edilmesi

400 cm uzunluğunda ve üç tip boşluğa sahip petek kirişlerdeki tasarımlarının sonuçları incelenmektedir.

3.1.2.1. Dairesel Boşluklu Durum

Sunulan Tablo 5'te, 400 cm uzunluğa ve dairesel boşluklara sahip petek kirişin üretim maliyetine ilişkin optimizasyon sonuçları verilir. Analiz edilen bulgulara göre, CPA algoritması, üretim maliyetini temsil eden amaç fonksiyonu açısından en düşük değeri sağlayarak bu tasarım senaryosunda en başarılı algoritma olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, söz konusu maliyet değeri, diğer algoritmaların mukayese edildiğinde yalnızca küçük bir farkla daha düşük olup tüm algoritmaların üretim maliyeti açısından benzer ve karşılaştırılabilir performanslar sergilediği görülmektedir. İşlem süresi açısından yapılan değerlendirmede ise CPA algoritması en kısa süreyi sağlayarak işlem verimliliği bakımından da üstünlük göstermektedir. CPA'yı ICA algoritması takip etmekte olup bu iki algoritma, diğer üç algoritmaya kıyasla daha düşük işlem süresiyle dikkat çekmektedir.

Tablo 5. 400 cm'lik dairesel boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri

Tasarım Değişkeni	Kullanılan Algoritma				
	CPA	**IRO**	**TWO**	**VPS**	**ICA**
$\boldsymbol{d_g}$ (cm)	32.3232	63.7079	39.6250	55.7629	53.2438
$\boldsymbol{b_f}$ (cm)	25.0000	23.4413	23.7316	21.1730	21.1652
$\boldsymbol{t_w}$ (cm)	0.7000	0.7534	0.7000	0.8089	0.8582
$\boldsymbol{t_f}$ (cm)	0.7439	1.1321	0.6919	0.5716	0.4094
$\boldsymbol{h}$ (cm)	19.3939	38.2247	23.7750	33.4578	31.9463
$\boldsymbol{e}$ (cm)	4.8485	9.5562	5.9437	8.3644	7.9866
$\boldsymbol{S}$ (cm)	24.2423	47.7809	29.7187	41.8222	39.9329
Amaç Fonksiyonu ($/m)	450.6104	451.0453	450.7085	450.8752	452.8611
CPU Zamanı (S.)	1.5869	1.2413	37.6291	1.2575	1.3600
Standart Sapma	0.0552	0.3868	0.1288	0.1920	2.0483

Bu durum, söz konusu algoritmaların problem çözümünde daha hızlı bir yakınsama yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir. Standart sapma değerleri açısından bakıldığında, en düşük değer TWO algoritmasında elde edilir. Ancak bu fark, diğer algoritmalarla karşılaştırıldığında oldukça küçüktür ve elde edilen düşük sapma farkları, algoritmaların çözüm stabilitesi bakımından birbirine yakın seviyelerde performans sunduğunu göstermektedir.

3.1.2.2. Altıgen Boşluklu Durum

Altıgen boşluklara sahip ve 400 cm uzunluğundaki petek kirişin üretim maliyetine ilişkin elde edilen sonuçlar, Tablo 6'da sunulmakta olup beş farklı metasezgisel algoritmanın performansları çeşitli kriterler açısından karşılaştırılır. Üretim maliyeti bakımından, TWO, VPS ve CPA algoritmaları oldukça benzer ve birbirine çok yakın sonuçlar üretir.

Tablo 6. 400 cm'lik altıgen boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri

Tasarım Değişkeni	Kullanılan Algoritma				
	CPA	**IRO**	**TWO**	**VPS**	**ICA**
d_g (cm)	21.7687	49.4791	23.3340	22.3385	34.9043
b_f (cm)	24.8604	16.7720	24.6250	22.1974	15.4193
t_w (cm)	0.7000	0.7176	0.8690	0.9380	1.2354
t_f (cm)	1.5000	0.4918	1.4949	1.4749	1.4119
h (cm)	13.0612	29.6875	14.0004	13.4031	20.3426
e (cm)	3.2653	7.4219	3.5001	3.3508	5.2756
S (cm)	16.3263	42.9244	17.1757	15.7319	26.0283
θ (derece)	53.1308	46.5933	53.9902	56.0299	52.7354
Amaç Fonksiyonu ($/m)	247.8276	258.6130	248.1080	249.1152	266.4400
CPU Zamanı (S.)	1.4558	1.3285	30.1228	1.4687	1.4067
Standart Sapma	0.0000	5.7583	0.5914	0.8050	6.2525

Bu üç algoritma arasında en düşük maliyet değeri CPA algoritması ile elde edilir. Ayrıca, bu algoritmaların sonuçları ile IRO ve ICA algoritmalarının maliyet değerleri arasında da yalnızca sınırlı düzeyde farkların bulunması, tüm algoritmaların

üretim maliyeti açısından genel olarak karşılaştırılabilir bir düzeyde çözüm sunduğunu göstermektedir. İşlem süresi açısından değerlendirildiğinde, IRO ve ICA algoritmaları arasında oldukça önemsiz sayılabilecek farklılıklar bulunmakta olup en kısa süre IRO algoritmasında kaydedilir. Ancak bu iki algoritma ile diğer üç algoritma arasında belirgin düzeyde işlem süresi farklılıkları gözlemlenmektedir. Bu durum, IRO ve ICA algoritmalarının daha hızlı yakınsama yeteneğine sahip olduğunu ve çözüm süreçlerinde daha verimli olduklarını ortaya koymaktadır. Standart sapma değerleri açısından ise algoritmalar arasında anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir. Bu bağlamda, en düşük standart sapma CPA algoritmasında elde edilmiş olup çözüm stabilitesi açısından bu algoritma en istikrarlı sonuçları üretmiştir. Diğer algoritmalar ise daha yüksek standart sapma değerleriyle, çözüm sonuçlarında daha fazla varyasyon sergilemiştir.

3.1.2.3. Sinüziodal Boşluklu Durum

Bu Tablo 7'de, 400 cm uzunluğunda sinüzoidal boşluklu petek kiriş tasarımı için gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları değerlendirilir. Elde edilen sonuçlara göre, en düşük üretim maliyeti CPA algoritması ile elde edilmektedir. TWO ve VPS algoritmaları birbirine oldukça yakın üretim maliyetleri sunmakta olup kesit boyutları arasında orta düzeyde farklılıkların bulunduğu söylenebilmektedir. Öte yandan, en yüksek maliyet değeri ICA algoritması tarafından üretilmektedir. Genel olarak, amaç fonksiyonu değerleri arasında büyük farklılıkların bulunmadığı ve sonuçların oldukça yakın olduğu gözlemlenmektedir. İşlem süresi açısından değerlendirildiğinde, en kısa işlem süresine ICA algoritması ile ulaşılmaktadır. CPA ve VPS algoritmaları orta düzeyde işlem süreleri sergilerken, en uzun işlem süresi TWO algoritmasında kaydedilmektedir. Bu durum, algoritmaların içsel yapıları ve arama mekanizmalarındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Kesit boyutları arasında orta düzeyde farklılıkların bulunduğu söylenebilmektedir. Standart sapma değerleri açısından yapılan analizde, VPS algoritmasının en düşük standart sapma ile en istikrarlı sonuçları sunduğu belirlenmektedir. Buna karşılık, ICA algoritmasının en yüksek standart sapma değerine sahip olduğu ve bu nedenle çözüm çeşitliliğinin daha fazla olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 7. 400 cm'lik sinüzoidal boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri

Tasarım Değişkeni	Kullanılan Algoritma				
	CPA	**IRO**	**TWO**	**VPS**	**ICA**
$\boldsymbol{d_g}$ (cm)	49.5140	67.9919	49.5581	53.7457	64.7776
$\boldsymbol{b_f}$ (cm)	20.5660	23.3693	25.0000	20.4453	23.7337
$\boldsymbol{t_w}$ (cm)	0.8957	0.7000	0.9096	0.8242	1.0580
$\boldsymbol{t_f}$ (cm)	1.5000	0.7367	1.4383	1.2854	0.9242
$\boldsymbol{h}$ (cm)	39.6112	54.3935	39.6465	42.1966	38.8666
$\boldsymbol{e}$ (cm)	15.8445	21.7574	15.8586	16.8786	9.7166
$\boldsymbol{S}$ (cm)	61.5382	84.5032	61.5930	65.5546	48.7213
Amaç Fonksiyonu ($/m)	235.2124	237.2043	235.2897	235.6724	256.2677
CPU Zamanı (S.)	14.2665	17.9801	43.8691	15.2416	1.1070
Standart Sapma	0.3031	1.0513	0.4854	0.1624	4.0000

Sonuç olarak, kullanılan algoritmaların üretim maliyeti, işlem süresi, kesit boyutları ve çözüm stabilitesi açısından farklı performanslar sergilediği, ancak genel anlamda amaç fonksiyonu değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu ifade edilmektedir.

3.1.3. 500 cm'lik Petek Kiriş Analiz Edilmesi

500 cm uzunluğunda ve üç tip boşluğa sahip petek kirişlerdeki tasarımlarının sonuçları incelenmiştir.

3.1.3.1. Dairesel Boşluklu Durum

Bu çalışmada kullanılan metasezgisel algoritmaların, 500 cm uzunluğunda ve dairesel boşluklara sahip petek kirişin tasarımına yönelik olarak ürettiği amaç fonksiyonu değerleri, Tablo 8'de sunulan verilere göre birbirine oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Bu yapısal optimizasyon problemi farklı algoritmalar tarafından benzer düzeyde başarıyla çözülebildiğini göstermektedir. Üretim maliyetini temsil eden en düşük amaç fonksiyonu değeri, bu uzunluk ve geometri için CPA algoritması ile elde edilmiştir. Standart sapma değerleri açısından yapılan değerlendirmede, en düşük sapma TWO algoritmasında gözlemlenmektedir.

Tablo 8. 500 cm dairesel boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri

Tasarım Değişkeni	Kullanılan Algoritma				
	CPA	**IRO**	**TWO**	**VPS**	**ICA**
$\boldsymbol{d_g}$ (cm)	38.0965	66.3181	38.2995	38.3670	19.3106
$\boldsymbol{b_f}$ (cm)	24.9580	21.8468	25.0000	24.1631	16.6221
$\boldsymbol{t_w}$ (cm)	0.7007	0.7001	0.7021	0.8456	1.0152
$\boldsymbol{t_f}$ (cm)	0.8109	0.7173	0.8186	0.8870	1.4691
$\boldsymbol{h}$ (cm)	22.8579	39.7909	22.9797	23.0202	11.5863
$\boldsymbol{e}$ (cm)	5.7145	9.9477	5.7449	5.7550	2.8966
$\boldsymbol{S}$ (cm)	28.0324	49.7386	28.7246	28.7752	14.4829
Amaç Fonksiyonu ($/m)	565.1848	565.8099	565.3009	565.4756	567.2765
CPU Zamanı (S.)	1.9312	1.4254	26.3163	1.5377	1.3697
Standart Sapma	0.0571	0.4837	0.2535	0.2177	2.8988

TWO algoritmasının daha stabil ve tutarlı çözümler sunduğunu göstermektedir. Diğer algoritmalarda ise standart sapma açısından belirli düzeyde farklılıklar mevcut olup bu durum çözüm çeşitliliği ve algoritmaların problem uzayındaki arama stratejilerinden kaynaklanmaktadır. İşlem süresi (CPU zamanı) bakımından ise algoritmalar arasında anlamlı farklar tespit edilir. En düşük işlem süresi CPA algoritmasında kaydedilmiş olup bu algoritma yalnızca en düşük maliyeti değil, aynı zamanda en hızlı çözüm sürecini de sağlayarak genel performans açısından en başarılı yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu sonuçlar, endüstriyel uygulamalarda kiriş tasarımı için algoritma seçiminde önemli ipuçları sunmaktadır.

3.1.3.2. Altıgen Boşluklu Durum

Tablo 9'da sunulan sonuçlara göre, altıgen boşluklara sahip ve 500 cm uzunluğundaki petek kirişin tasarımı kapsamında beş farklı metasezgisel algoritmanın performansı karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, üretim maliyetini temsil eden en düşük amaç fonksiyonu değeri CPA algoritması ile elde edilmiştir. Diğer algoritmalarla karşılaştırıldığında, CPA'nın ürettiği değerlerin büyük ölçüde benzer ve yakın sonuçlar sunduğu, yalnızca ICA algoritmasının belirgin şekilde daha yüksek bir maliyet değeri verdiği gözlemlenmektedir.

Tablo 9. 500 cm'lik altıgen boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri

Tasarım Değişkeni	Kullanılan Algoritma				
	CPA	**IRO**	**TWO**	**VPS**	**ICA**
d_g (cm)	26.1438	60.3493	26.9800	25.1318	40.8417
b_f (cm)	24.4338	16.1925	24.2189	24.5156	20.3179
t_w (cm)	0.7000	1.2296	0.8743	1.0218	0.8398
t_f (cm)	1.5000	0.4000	1.5000	1.4696	1.0898
h (cm)	15.6863	36.2096	16.1880	15.0791	24.5050
e (cm)	3.9126	9.0524	4.0470	3.7698	6.1263
S (cm)	19.5896	54.3139	19.9588	18.6590	31.1766
θ (derece)	53.1308	45.0004	53.7610	53.5948	52.3229
Amaç Fonksiyonu ($/m)	320.5650	331.6796	320.9900	321.6868	339.2682
CPU Zamanı (S.)	1.4589	1.2890	34.5792	1.4875	1.4325
Standart Sapma	0.0000	6.0281	0.6093	0.8728	6.4900

Bu durum, ICA algoritmasının bu probleme adaptasyonunun diğer algoritmalara göre daha az etkili olduğunu göstermektedir. Standart sapma değerleri açısından algoritmalar arasında belirli farklılıklar tespit edilir. En düşük standart sapma değeri CPA algoritması ile elde edilmiştir ve bu algoritma çözüm stabilitesi açısından en istikrarlı sonucu üretmektedir. Diğer algoritmaların standart sapma değerlerinde ise görece daha yüksek varyasyonlar bulunmakta olup bu farklılık algoritmaların arama stratejilerinden ve problem uzayındaki çeşitlilik düzeylerinden kaynaklanmaktadır.İşlem süresi (CPU zamanı) bakımından da algoritmalar arasında dikkate değer farklılıklar mevcuttur. En kısa işlem süresi yine IRO algoritması tarafından sağlanmaktadır.

3.1.3.3. Sinüziodal Boşluklu Durum

Bu Tablo 10'da, 500 cm uzunluğundaki sinüzoidal boşluklu petek kirişin tasarımına ilişkin elde edilen sonuçlar değerlendirilmektedir. Kiriş uzunluğunun artmasıyla birlikte, algoritmaların çözüm üretme yöntemleri arasındaki farkların daha görünür hâle geldiği gözlemlenmektedir.

Tablo 10. 500 cm'lik sinüzoidal boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri

Tasarım Değişkeni	Kullanılan Algoritma				
	CPA	**IRO**	**TWO**	**VPS**	**ICA**
$\boldsymbol{d_g}$ (cm)	61.8925	61.5645	53.7460	56.8869	67.2614
$\boldsymbol{b_f}$ (cm)	19.4191	22.4038	23.6080	23.7661	14.0917
$\boldsymbol{t_w}$ (cm)	0.7543	1.1081	0.9913	0.9167	1.2891
$\boldsymbol{t_f}$ (cm)	1.5000	1.3779	1.5000	1.4605	1.1455
$\boldsymbol{h}$ (cm)	49.5140	49.2516	42.9968	45.5095	40.3568
$\boldsymbol{e}$ (cm)	19.8056	19.7007	17.1987	18.2038	10.0892
$\boldsymbol{S}$ (cm)	76.9227	76.5151	66.7978	70.7015	50.5894
Amaç Fonksiyonu ($/m)	297.0211	298.7437	297.0662	297.2721	324.0219
CPU Zamanı (S.)	15.1436	17.2514	38.8883	15.3906	1.7704
Standart Sapma	0.0197	0.4866	0.0765	0.1155	5.3667

Sinüzoidal boşlukların karmaşık yapısı da tasarım sürecini daha hassas ve dikkat gerektirir bir hâle getirmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, en düşük üretim maliyeti CPA algoritması tarafından sağlanmakta, VPS ve TWO algoritmaları da benzer maliyetler sunmaktadır. IRO algoritması orta düzeyde bir maliyet değeri üretirken, en yüksek maliyet ICA algoritması tarafından elde edilmektedir. Ancak genel olarak amaç fonksiyonu değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. İşlem süresi bakımından incelendiğinde, ICA algoritması en kısa işlem süresine sahip olurken, CPA ve VPS algoritmaları da düşük sürelerle öne çıkmaktadır.IRO algoritması orta düzeyde bir işlem süresi gösterirken, en uzun süre TWO algoritmasında kaydedilmektedir.Tasarım değişkenleri açısından değerlendirildiğinde, boyutlar arasında yalnızca küçük ve orta düzeyde farklılıkların olduğu ifade edilebilmektedir. Diğer boyutlarda ise genel bir benzerlik korunmaktadır. Standart sapma analizine göre, CPA algoritması en düşük sapma ile en istikrarlı sonuçları verirken, VPS ve TWO algoritmaları da kabul edilebilir düzeyde kararlılık göstermektedir. IRO algoritması orta seviye değişkenlik sunarken, ICA algoritmasının daha yüksek bir dağılım sergilediği belirlenmektedir.

3.1.4. 600 cm'lik Petek Kiriş Analiz Edilmesi

600 cm uzunluğunda ve üç tip boşluğa sahip petek kirişlerdeki tasarımlarının sonuçları incelenmektedir.

3.1.4.1. Dairesel Boşluklu Durum

Sunulan Tablo 11'de sonuçlarına göre, 600 cm uzunluğa sahip ve dairesel boşluklarla tasarlanmış petek kirişin üretim maliyetini minimize etmeye yönelik olarak kullanılan farklı optimizasyon algoritmalarının amaç fonksiyonu değerleri birbirine oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Bu durum, ilgili mühendislik probleminin çözümüne yönelik olarak seçilen algoritmaların genel anlamda etkin bir performans sergilediğini göstermektedir. Özellikle CPA algoritması, hem en düşük üretim maliyetini sağlaması hem de en kısa işlem süresini elde etmesi bakımından dikkat çekici bir üstünlük gösteir. İşlem süreleri açısından algoritmalar arasında belirli düzeyde farklılıklar gözlemlenmektedir. CPA algoritması, minimum süreyi elde ederken, diğer algoritmalarda bu süre daha uzun olmuştur.

Tablo 11. 600 cm'lik dairesel boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri

Tasarım Değişkeni	Kullanılan Algoritma				
	CPA	**IRO**	**TWO**	**VPS**	**ICA**
$\boldsymbol{d_g}$ (cm)	45.7143	66.7188	41.2051	68.0878	28.8976
$\boldsymbol{b_f}$ (cm)	24.9686	16.7080	23.3562	24.2357	23.3986
$\boldsymbol{t_w}$ (cm)	0.7003	0.7000	0.7060	0.7613	0.9256
$\boldsymbol{t_f}$ (cm)	0.8156	1.0348	1.0288	0.7768	0.5140
$\boldsymbol{h}$ (cm)	27.4286	40.0313	24.7231	40.8527	17.3386
$\boldsymbol{e}$ (cm)	6.8571	10.0078	6.1808	10.2132	4.3346
$\boldsymbol{S}$ (cm)	34.2857	50.0391	30.9039	51.0659	21.6732
Amaç Fonksiyonu ($/m)	680.4970	680.8302	680.5810	680.6124	682.5391
CPU Zamanı (S.)	1.9145	1.3958	26.3426	1.4217	1.3273
Standart Sapma	0.0481	0.6252	0.2032	0.3063	2.6089

Bu farklılıklar, algoritmaların çözüm arama stratejilerinin doğasına ve probleme adaptasyon yeteneklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Karmaşık yapıya

sahip olan bu yapısal optimizasyon problemi, bazı algoritmaların daha fazla işlem süresi gerektirmesine neden olmmaktadır. Standart sapma değerleri incelendiğinde ise çoğu algoritmanın benzer sapmalar gösterdiği, dolayısıyla çözüm sonuçlarında stabillık sağlandığı görülmektedir. Ancak ICA algoritmasının standart sapma değeri nispeten yüksektir, bu da söz konusu algoritmanın çözümlerinde daha fazla değişkenlik olduğunu işaret etmektedir. Öte yandan, VPS algoritması bu açıdan en düşük standart sapma değerini elde ederek daha stabil sonuçlar üretmiştir.

Tüm bu değerlendirmeler ışığında, elde edilen optimizasyon sonuçlarının genel olarak kabul edilebilir ve mühendislik uygulamalarında kullanılabilir nitelikte olduğu sonucuna varılabilir. Amaç fonksiyonu değerlerinin ve kesit boyutlarının yüksek oranda benzeşmesi, çözüm güvenilirliğini artırmakta, buna karşılık işlem süresi ve standart sapma gibi metriklerdeki farklılıklar ise algoritmaların işlem yapısına ve problemin karmaşıklığına dayanmaktadır. Ayrıca, bazı algoritmaların problem uzayında daha geniş arama yapmasından dolayı standart sapma değerlerinde yükselmeler gözlemlenir.

3.1.4.2. Altıgen Boşluklu Durum

Tablo 12'de sunulan sonuçlara göre, 600 cm uzunluğunda, petek kirişlerin tasarımına yönelik olarak kullanılan beş optimizasyon algoritmasının amaç fonksiyonu değerleri birbirine oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Bu durum, seçilen algoritmaların mühendislik problemini çözme noktasında genel anlamda etkin bir performans sergilediğini göstermektedir. Özellikle CPA algoritması, en düşük üretim maliyetini sağlaması ve en kısa işlem süresini elde etmesi bakımından dikkat çekici bir üstünlük göstermektedir. Algoritmalar arasında işlem süresi açısından belirgin farklar gözlemlenir; IRO algoritması minimum işlem süresini elde ederken, diğer algoritmaların işlem süreleri daha uzun olmaktadır. Bu farklılıklar, algoritmaların çözüm arama stratejilerinin doğasına ve probleme adaptasyon yeteneklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Tablo 12. 600 cm'lik altıgen boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri

Tasarım Değişkeni	Kullanılan Algoritma				
	CPA	**IRO**	**TWO**	**VPS**	**ICA**
d_g (cm)	30.1887	69.3259	30.4600	37.0198	39.4769
b_f (cm)	24.7546	17.1701	24.8780	22.1708	22.7628
t_w (cm)	0.7000	0.7004	1.5000	0.9237	0.9399
t_f (cm)	1.5000	0.4000	1.4836	1.4001	0.6081
h (cm)	18.1132	41.5955	18.2760	22.2119	23.6862
e (cm)	4.5283	10.3989	4.5690	5.5530	5.9215
S (cm)	22.6412	62.3927	22.8964	27.4543	27.1957
θ (derece)	53.1308	45.0004	53.0272	53.6464	57.0498
Amaç Fonksiyonu ($/m)	394.3060	409.6911	394.7341	396.7753	413.0390
CPU Zamanı (S.)	1.4215	1.2912	35.2154	1.5097	1.4281
Standart Sapma	0.0007	4.9294	0.7777	0.8470	9.0656

Standart sapma değerlerine bakıldığında, çoğu algoritmanın benzer sapmalar gösterdiği ve çözüm sonuçlarında stabilite sağlandığı görülmektedir. Ancak, ICA algoritmasının standart sapma değeri nispeten yüksek olup bu da söz konusu algoritmanın çözümlerinde daha fazla değişkenlik olduğunu işaret etmektedir. Öte yandan, CPA algoritması en düşük standart sapma değerini elde ederek daha stabil sonuçlar üretmektedir.Tüm bu değerlendirmeler ışığında, elde edilen optimizasyon sonuçlarının genel olarak kabul edilebilir ve mühendislik uygulamalarında kullanılabilir nitelikte olduğu sonucuna varılabilir. Amaç fonksiyonu değerlerinin ve kesit boyutlarının yüksek oranda benzeşmesi, çözüm güvenilirliğini artırmaktadır. Buna karşılık, işlem süresi ve standart sapma gibi metriklerdeki farklılıklar, algoritmaların işlem yapısına ve problemin karmaşıklığına dayanmaktadır.

3.1.4.3. Sinüziodal Boşluklu Durum

Sunulan Tablo 13'te 600 cm uzunluğunda ve sinüzoidal boşluklara sahip petek kirişin tasarımına ilişkin elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, boyutsal değişkenler arasında genel olarak düşük ile orta seviyede farklılıkların bulunduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, tüm algoritmaların benzer geometrik çözümler

üretebildiğini ortaya koymaktadır. Amaç fonksiyonu değerleri incelendiğinde, tüm algoritmaların birbirine oldukça yakın sonuçlar ürettiği, ancak ICA algoritmasının diğerlerine kıyasla belirgin şekilde daha yüksek bir değer sunduğu belirlenmektedir.

Tablo 13. 600 cm'lik sinüzoidal boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri

Tasarım Değişkeni	Kullanılan Algoritma				
	CPA	**IRO**	**TWO**	**VPS**	**ICA**
$\boldsymbol{d_g}$ (cm)	64.3682	69.8694	64.4028	64.4560	68.6326
$\boldsymbol{b_f}$ (cm)	22.7728	22.3007	25.0000	22.1948	24.8731
$\boldsymbol{t_w}$ (cm)	0.7615	1.0276	0.7643	0.8074	1.0041
$\boldsymbol{t_f}$ (cm)	1.5000	0.5862	1.5000	1.4925	1.4508
$\boldsymbol{h}$ (cm)	51.4946	55.8955	51.5222	51.5648	41.1795
$\boldsymbol{e}$ (cm)	20.5978	22.3582	20.6089	20.6259	10.2949
$\boldsymbol{S}$ (cm)	79.9996	86.8367	80.0426	80.1087	51.6208
Amaç Fonksiyonu ($/m)	359.5024	360.7205	359.5726	359.6427	399.4069
CPU Zamanı (S.)	13.9883	15.0786	39.5314	15.0541	1.2690
Standart Sapma	0.0000	0.5026	0.0634	0.1189	5.1951

Bu farklılık, kullanılan algoritmaların arama mekanizmalarındaki yapısal ayrımlardan kaynaklanmaktadır. İşlem süresi (CPU zamanı) açısından bakıldığında, ICA algoritması en düşük işlem süresi ile öne çıkarken, en uzun işlem süresi TWO algoritmasında kaydedilmiştir. CPA, IRO ve VPS algoritmaları ise orta seviyede işlem süreleri ile benzer performanslar sergilemektedir. Standart sapma değerleri değerlendirildiğinde ise, CPA algoritmasının sıfıra yakın sapma değeriyle en istikrarlı sonuçları sağladığı; buna karşın ICA algoritmasının en yüksek sapma değeri ile çözüm kararlılığı bakımından en fazla dalgalanmayı gösterdiği anlaşılmaktadır. Diğer algoritmalar ise düşük ile orta düzeyde standart sapma değerleri sunmaktadır.

3.1.5. 700 cm'lik Petek Kiriş Analiz Edilmesi

700 cm uzunluğunda ve üç tip boşluğa sahip petek kirişlerdeki tasarımlarının sonuçları incelenir.

3.1.5.1. Dairesel Boşluklu Durum

Tablo 14'te sunulan sonuçlara göre, 700 cm uzunluğunda, dairesel boşluklu petek kirişlerin tasarımına yönelik olarak kullanılan beş optimizasyon algoritmasının amaç fonksiyonu değerleri birbirine oldukça yakın sonuçlar vermektedir. CPA algoritması, en düşük amaç fonksiyonu değerini sağlarken, VPS algoritması en yüksek amaç fonksiyonu değerine sahip olmaktadır. Diğer algoritmalar, bu iki uç değer arasında yer almaktadır. İşlem süresi açısından, CPA algoritması en hızlı çözümü sunarken, TWO algoritması en uzun işlem süresine sahiptir. Diğer algoritmalar, işlem süreleri bakımından orta düzeyde farklılıklar göstermektedir.

Tablo 14. 700 cm'lik dairesel boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri

Tasarım Değişkeni	Kullanılan Algoritma				
	CPA	**IRO**	**TWO**	**VPS**	**ICA**
$\boldsymbol{d_g}$ (cm)	50.4505	70.6062	43.4895	40.2143	55.7739
$\boldsymbol{b_f}$ (cm)	25.0000	21.5779	25.0000	23.0604	22.4583
$\boldsymbol{t_w}$ (cm)	0.7000	1.3462	0.7979	0.7305	1.3933
$\boldsymbol{t_f}$ (cm)	0.8777	1.2800	1.0648	1.0052	1.3873
$\boldsymbol{h}$ (cm)	30.2703	42.3637	26.0937	24.1286	33.4544
$\boldsymbol{e}$ (cm)	7.5676	10.5909	6.5234	6.0321	8.3661
$\boldsymbol{S}$ (cm)	37.8379	52.9546	32.6171	30.1607	41.8205
Amaç Fonksiyonu ($/m)	796.5307	797.6320	796.7026	796.9446	800.4512
CPU Zamanı (S.)	1.7367	1.3945	36.2899	1.4366	1.1566
Standart Sapma	0.0274	0.2871	0.2694	0.2467	0.9706

Bu farklılıklar, algoritmaların çözüm arama stratejilerine ve probleme uyum sağlama kapasitelerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Standart sapma değerlerine bakıldığında, çoğu algoritma stabil sonuçlar sunmakta olup ICA algoritması sıfır standart sapma değeri ile tamamen sabit çözümler üretmektedir. Diğer algoritmalar arasında, TWO algoritması daha düşük bir sapma değeri gösterirken, IRO algoritması daha yüksek bir sapma değerine sahip olup bu da çözümlerinde daha fazla değişkenlik olduğunu göstermektedir. Tüm bu değerlendirmeler ışığında, elde edilen

optimizasyon sonuçlarının genel olarak kabul edilebilir ve mühendislik uygulamalarında kullanılabilir nitelikte olduğu sonucuna varılabilir. Amaç fonksiyonu değerlerinin ve kesit boyutlarının yüksek oranda benzeşmesi, çözüm güvenilirliğini artırmaktadır. Buna karşılık, işlem süresi ve standart sapma gibi metriklerdeki farklılıklar, algoritmaların işlem yapısına ve problemin karmaşıklığına dayanmaktadır.

3.1.5.2. Altıgen Boşluklu Durum

Sunulan Tablo 15'te sunulan sonuçlara göre, 700 cm uzunluğunda ve altıgen boşluklu petek kirişlerin tasarımına yönelik olarak kullanılan beş optimizasyon algoritmasının amaç fonksiyonu değerleri birbirine oldukça yakın sonuçlar vermektedir. CPA algoritması, en düşük amaç fonksiyonu değerini elde ederken, ICA algoritması ise en yüksek değerle dikkat çekmektedir.

Tablo 15. 700 cm'lik altıgen boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri

Tasarım Değişkeni	Kullanılan Algoritma				
	CPA	**IRO**	**TWO**	**VPS**	**ICA**
d_g (cm)	35.2201	70.0563	35.1724	40.8053	38.4670
b_f (cm)	24.2702	23.6725	24.8919	24.3876	10.4550
t_w (cm)	0.7000	0.7000	0.7000	0.7393	0.8763
t_f (cm)	1.5000	0.4000	1.5000	1.4853	1.1204
h (cm)	21.1321	42.0338	21.1034	24.4832	23.0802
e (cm)	5.2830	10.5084	5.2759	6.1208	5.7700
S (cm)	26.4147	63.0500	25.9221	30.0099	28.7885
θ (derece)	53.1308	45.0004	53.9329	54.0303	53.2281
Amaç Fonksiyonu ($/m)	469.8783	483.7844	470.4468	471.1487	496.3591
CPU Zamanı (S.)	1.4541	1.5190	29.9550	1.3440	1.3015
Standart Sapma	0.0000	4.7865	0.6344	0.9904	10.1331

Diğer algoritmalar ise bu iki uç değer arasında yer almaktadır. İşlem süresi açısından ICA algoritması, en hızlı çözümü sunmakta olup TWO algoritması ise en uzun işlem süresine sahip olmaktadır. Bu farklılıklar, her algoritmanın çözüm arama stratejilerine ve problemin karmaşıklığına göre değişiklik göstermektedir. ICA

algoritması, en yüksek standart sapma değerine sahip olup bu da çözümlerinde daha fazla değişkenlik ve belirsizlik olduğunu göstermektedir. Diğer algoritmalar arasında TWO algoritması stabil sonuçlar sunmaktadır.

3.1.5.3. Sinüziodal Boşluklu Durum

Bu tablo 16'da, 700 cm uzunluğunda sinüzoidal boşluklara sahip petek kirişlerin tasarımına dair beş farklı algoritmanın performansını değerlendirmektedir. Öncelikle, amaç fonksiyonu değerleri ele alındığında, en yüksek değeri ICA algoritması elde ederken, diğer algoritmalar arasındaki farklar ise oldukça dar bir aralıkta kalmaktadır.

Tablo 16. 700 cm'lik sinüzoidal boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri

Tasarım Değişkeni	Kullanılan Algoritma				
	CPA	**IRO**	**TWO**	**VPS**	**ICA**
$\boldsymbol{d_g}$ (cm)	58.9164	66.0612	69.1989	69.4184	53.5781
$\boldsymbol{b_f}$ (cm)	25.0000	24.4115	24.9875	24.9819	16.6234
$\boldsymbol{t_w}$ (cm)	0.7517	0.7000	0.7720	0.7468	1.2426
$\boldsymbol{t_f}$ (cm)	1.5000	1.1668	1.4985	1.4985	0.9422
$\boldsymbol{h}$ (cm)	55.1331	52.8490	55.3591	55.5347	32.2068
$\boldsymbol{e}$ (cm)	22.0532	21.1396	22.1436	22.2139	8.0517
$\boldsymbol{S}$ (cm)	85.6522	82.1038	86.0033	86.2762	40.3730
Amaç Fonksiyonu ($/m)	437.3666	440.4095	437.3718	437.2284	481.7442
CPU Zamanı (S.)	13.6980	14.7944	42.9164	14.0820	1.3535
Standart Sapma	0.0000	2.0183	0.0238	0.1847	4.4354

Bu durum, algoritmaların genel olarak birbirine yakın sonuçlar ürettiklerini ancak ICA algoritmasının biraz daha yüksek bir değer sunduğunu göstermektedir. Standart sapma değerlendirildiğinde, CPA algoritması sıfıra yakın sapma değeriyle en stabil sonuçları vermektedir. ICA algoritması ise en yüksek sapma değeri ile çözümde daha fazla çeşitlilik sergilemektedir. Diğer algoritmalar ise düşük ile orta düzeyde sapma göstererek kararlılık açısından farklılıklar sunmaktadır. İşlem süresi (CPU zamanı) açısından bakıldığında, ICA algoritması en düşük işlem süresi ile öne çıkarken, en uzun işlem süresi TWO algoritmasında gözlemlenmektedir.

CPA, IRO ve VPS algoritmalarının işlem süreleri ise orta seviyelerde kalmaktadır. Bu durum, algoritmaların arama stratejilerindeki farklılıkların ve çözüm karmaşıklığının işlem süresine olan etkilerini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, 700 cm uzunluğundaki sinüzoidal boşluklu petek kirişlerin tasarımında, boyutsal değişkenler arasında küçük ile orta seviyede farklılıklar gözlemlenirken, algoritmaların performanslarında da bazı belirgin ayrımlar ortaya çıkmaktadır. Özellikle daha yüksek petek kiriş boyları ile birlikte çözümdeki çeşitlilik ve işlem sürelerindeki farklılıkların daha belirgin hale geldiği söylenebilir.

3.1.6. 800 cm'lik Petek Kiriş Analiz Edilmesi

800 cm uzunluğunda ve üç tip boşluğa sahip petek kirişlerdeki tasarımlarının sonuçları incelenmektedir.

3.1.6.1. Dairesel Boşluklu Durum

Tablo 17'de sunulan sonuçlara göre, 800 cm uzunluğunda ve dairesel boiluklu petek kirişlerin tasarımına yönelik olarak Amaç fonksiyonu değerleri açısından genel olarak birbirine yakın sonuçlar elde edilmektedir. Ancak detaylı incelendiğinde, ICA algoritması en düşük amaç fonksiyonu değerini sağlayarak en verimli çözümü üretmektedir. Onu sırasıyla CPA, TWO, VPS ve en yüksek değeri veren IRO algoritması takip etmektedir. İşlem süresi bakımından algoritmalar arasında dikkate değer farklar gözlemlenmiştir. CPA algoritması, en kısa sürede çözüme ulaşarak işlem verimliliği açısından öne çıkarken, TWO algoritması en uzun işlem süresine sahip olmaktadır. ICA algoritması, işlem süresi açısından CPA'ya yakın bir performans sergileyerek hem zaman hem de sonuç açısından dengeli bir algoritma olduğunu gösterir. Standart sapma değerlerine bakıldığında, ICA algoritmasının 0.0000 değerindeki standart sapması, çözüm sonuçlarında mutlak bir stabillık sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu algoritmanın her çalıştırmada aynı sonucu verdiğini ve istikrarlı bir optimizasyon süreci sunduğunu göstermektedir.

Tablo 17. 800 cm'lik dairesel boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri

Tasarım Değişkeni	Kullanılan Algoritma				
	CPA	**IRO**	**TWO**	**VPS**	**ICA**
$\boldsymbol{d_g}$ (cm)	57.6577	62.8478	54.9360	46.2201	65.8881
$\boldsymbol{b_f}$ (cm)	24.4197	19.3667	24.9044	22.8681	15.8443
$\boldsymbol{t_w}$ (cm)	0.7000	0.9102	0.7219	0.8524	1.2343
$\boldsymbol{t_f}$ (cm)	0.9154	0.4083	0.9543	1.1270	0.9766
$\boldsymbol{h}$ (cm)	34.5946	37.7087	32.9616	27.7321	39.5328
$\boldsymbol{e}$ (cm)	8.6486	9.4272	8.2404	6.9330	9.8832
$\boldsymbol{S}$ (cm)	43.0632	47.1359	41.2020	34.6651	49.7664
Amaç Fonksiyonu ($/m)	913.2852	913.6277	913.3880	913.6558	804.0000
CPU Zamanı (S.)	1.1992	1.3802	34.5856	1.4114	1.1584
Standart Sapma	0.0891	0.4210	0.2274	0.2814	0.0000

Diğer yandan, TWO algoritması düşük sapma değeri ile nispeten tutarlı sonuçlar üretmiş; IRO algoritması ise yüksek standart sapma değeriyle, çözümlerinde daha fazla değişkenlik göstermektedir.

Sonuç olarak, beş algoritma arasında ICA, en düşük amaç fonksiyonu değeri ve sıfır standart sapma ile öne çıkarken, işlem süresindeki makul değeri sayesinde genel anlamda oldukça güçlü bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

3.1.6.2. Altıgen Boşluklu Durum

Sunulan verilere göre Tablo 18'de, 800 cm uzunluğunda ve altıgen boşluklu petek kirişlerin tasarımına yönelik olarak kullanılan beş optimizasyon algoritmasının sonuçları, her bir algoritmanın problem çözme sürecindeki performansını farklı şekillerde yansıtmaktadır. Amaç fonksiyonu değerleri açısından, CPA algoritması en düşük değeri elde ederken, ICA algoritması en yüksek değeri ve diğer algoritmaların değeri çok yakın göstermektedir. İşlem süresi bakımından, VPS algoritması en hızlı sonuçları sunarken, TWO algoritması en uzun işlem süresine sahip olur.

Tablo 18. 800 cm'lik altıgen boşluklu petek kiriş için optimum tasarım değerleri

Tasarım Değişkeni	Kullanılan Algoritma				
	CPA	**IRO**	**TWO**	**VPS**	**ICA**
d_g (cm)	40.2516	67.1175	42.2630	44.9096	69.7131
b_f (cm)	24.0943	16.5903	24.2183	22.0175	13.5100
t_w (cm)	0.7000	0.7004	0.7973	0.7596	1.2875
t_f (cm)	1.5000	0.4008	1.4838	1.5000	1.3875
h (cm)	24.1509	40.2705	25.5738	26.9457	41.8279
e (cm)	6.0377	10.0676	6.3934	6.7364	10.4570
S (cm)	30.1881	56.6841	31.5111	32.2251	42.0870
θ (derece)	53.1308	47.7736	53.7897	55.1648	63.1518
Amaç Fonksiyonu ($/m)	546.2207	555.6996	546.8081	548.2942	574.6001
CPU Zamanı (S)	1.4524	1.4826	29.9633	1.3259	1.1874
Standart Sapma	0.0000	4.7990	0.5469	0.8345	8.8161

Bu fark, her algoritmanın çözüm arama sürecindeki etkinliği ve verimliliğiyle ilişkilidir. Diğer algoritmalar ise işlem süreleri açısından belirgin bir farklılık göstermektedir. Bu durum, algoritmaların problemin çözümü için kullandığı arama tekniklerinin etkinliğini ortaya koymaktadır. Standart sapma açısından, ICA algoritması en yüksek standart sapma değerine sahip olup bu durum, çözümlerindeki daha fazla dalgalanmayı ve değişkenliği işaret etmektedir. Buna karşın, CPA algoritması en düşük sapma değerini sunar. VPS algoritması ise orta seviyede bir sapma değeri sunmakta olup çözüm sonuçlarında belirli bir denge sağlamaktadır. Genel olarak, farklı algoritmaların standart sapma ve işlem süresi bakımından gösterdiği performans farkları, her bir algoritmanın çözüm stratejilerinin ve problem uzayına adaptasyon seviyelerinin bir yansımasıdır.

3.1.6.3. Sinüzoidal Boşluklu Durum

Bu çalışma, 800 cm uzunluğunda sinüzoidal boşluklara sahip petek kirişlerin tasarımı için beş farklı optimizasyon algoritmasının performanslarını incelemektedir. Ancak, yapılan analizler ve elde edilen sonuçlar, bu boyutta petek kirişlerin tasarımının gerçekçi ve geçerli çözümler üretmediğini göstermektedir. Özellikle ceza

fonksiyonu değerlerinin bir milyona kadar yükseldiği ve amaç fonksiyonu ile tutarsızlıklar içerdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, sonuçların pratikte uygulanabilir olmadığını ve algoritmaların yüksek uzunluklardaki tasarımlar için yeterince uyum sağlayamadığını ortaya koymaktadır. Bu gerçekçi sonuçları olmayan temel sebeplerinden biri, 800 cm uzunluğundaki petek kirişlerin tasarımının geometrik karmaşıklıkları ve kısıtlamaların yoğunluğudur. Sinüzoidal boşlukların şekli, yerleşimi ve boyutları, bu kadar uzun boyutlu bir kirişin tasarımında önemli zorluklar yaratmaktadır. Bu karmaşıklıklar, algoritmaların tasarımın optimum çözümünü bulmada ve çözüm uzayında gezinmede karşılaştığı engelleri artırmaktadır. Özellikle, kullanılan algoritmaların yapısal zayıflıkları ve arama stratejilerindeki eksiklikler, 800 cm uzunluğundaki petek kirişlerin tasarımında yüksek ceza fonksiyonu değerlerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Bu yüksek cezalar, algoritmaların arama sürecindeki yanlış çözümler veya yerel minimumlara takılmalarından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, tasarımda uygulanan kısıtlamaların ve çoklu parametrelerin etkisiyle, algoritmalar yüksek uzunluktaki tasarımlar için yeterince güçlü ve esnek sonuçlar üretememektedir.Bu çalışma, sinüzoidal boşluklar gibi karmaşık ve özgün geometrilerin, kiriş tasarımında önemli zorluklar yarattığını vurgulamaktadır. Maliyet, zaman ve karalılık gibi kritik parametreler, tasarımın başarıyla tamamlanabilmesi için belirleyici faktörlerdir. Bununla birlikte, mevcut algoritmaların bu parametrelerle başa çıkabilme kapasiteleri sınırlıdır, bu da yüksek uzunluktaki petek kirişlerin tasarımında gerçekçi ve verimli çözümler üretme noktasında eksiklikler olduğunu göstermektedir.

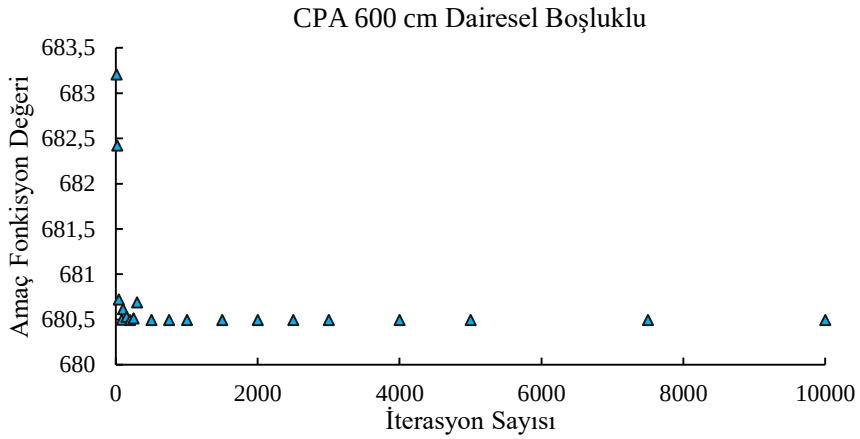
Sonuç olarak, bu çalışma, kullanılan algoritmaların 800 cm uzunluğunda petek kirişlerin tasarımı için yetersiz kaldığını ve bu tür karmaşık tasarımlar için daha gelişmiş, uyarlanabilir ve optimize edilmiş algoritmaların gerekliliğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, sinüzoidal boşlukların tasarımındaki zorluklar, gelecekteki araştırmaların bu alanda yenilikçi çözümler geliştirmesi gerektiğine işaret etmektedir. Bu, boşlukların geometrik yapısının ve kısıtlamaların optimizasyonu için yeni bir yaklaşım gerektirdiğini göstermektedir.

3.2. Yineleme Sayısının Amaç Fonksiyonuna Hassasiyet Analizi

Bu bölüm, her bir algoritmanın içsel dinamiklerini anlamaya yönelik bir hassasiyet analizini içermektedir. Hassasiyet analizi, algoritmaların farklı yineleme (iterasyon) sayıları altında gösterdiği performansı değerlendirerek, çözüm sürecinin ne kadar hızlı ve ne derece kararlı bir şekilde ilerlediğini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu analiz, özellikle amaç fonksiyonu açısından yapılmış olup her bir algoritmanın hedef çözüme ulaşmadaki hızını ve stabilitesini değerlendirme fırsatı sunmaktadır. Amaç fonksiyonu, algoritmaların sayısal değerlendirme sürecinde temel kriter olup her algoritmanın belirli tasarım koşulları altında ulaşmayı hedeflediği optimum değeri temsil etmektedir. Petek kirişlerin tasarımında, amaç fonksiyonu analizi; maliyetin düşürülmesi ve yapısal verimliliğin artırılması açısından özel bir öneme sahiptir. Bu bölümde, kullanılan algoritmaların elde ettiği amaç fonksiyonu değerlerinin stabilitesi, farklı yineleme (iterasyon) sayılarının etkisi altında analiz edilmiştir. Analizler, her bir durum için 10.000'e kadar yineleme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Dairesel ve petek şeklindeki boşluklara sahip kirişler için 600 cm ve 800 cm uzunluklarında değerlendirmeler; sinüzoidal boşluklu kirişler için ise 600 cm ve 700 cm uzunluklarında yapılmıştır. Bu analiz ile, yüksek yineleme sayısı altında sonuçların kararlılığı ve algoritmaların optimum çözüme ne ölçüde yakınsadığı ortaya konulmakta; farklı tasarım senaryoları altında hangi algoritmanın daha dengeli bir performans sergilediği belirlenmektedir.

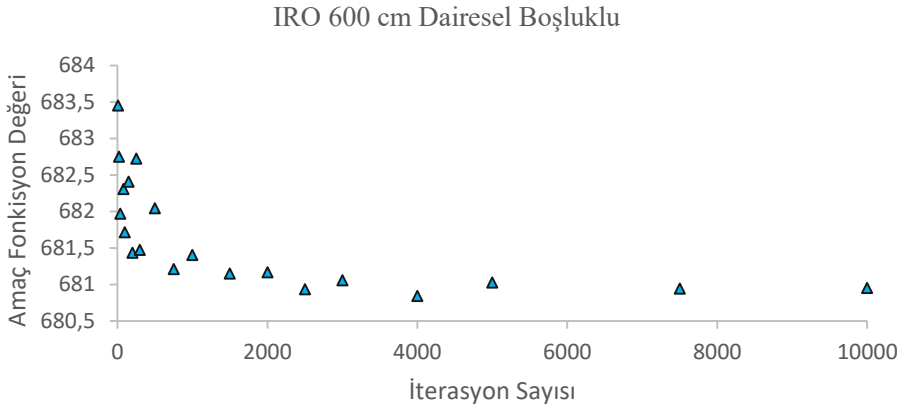
3.2.1. 600 cm'lik Kiriş Dairesel Boşluklu Petek Kiriş

CPA, IRO, VPS, TWO ve ICA algoritmaları kullanılarak 600 cm uzunluğunda dairesel boşluklu bir petek kiriş tasarımı için amaç fonksiyonunun kararlılığı değerlendirilir. Şekil 25'te, dairesel boşluklara sahip ve 600 cm uzunluğundaki bir petek kirişin optimizasyon sürecine aittir. Bu analiz, CPA algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizde, amaç fonksiyon değerinin iterasyon sayısına bağlı olarak başlangıçta dalgalanmalar gösterdiği, ancak belirli bir tekrar sayısından sonra istikrar kazandığı gözlemlenmektedir. Özellikle, 250 iterasyondan itibaren amaç fonksiyon değerinin büyük ölçüde sabit kaldığı ve sonraki yinelemelerde anlamlı bir iyileşme gözlenmediği tespit edilir.



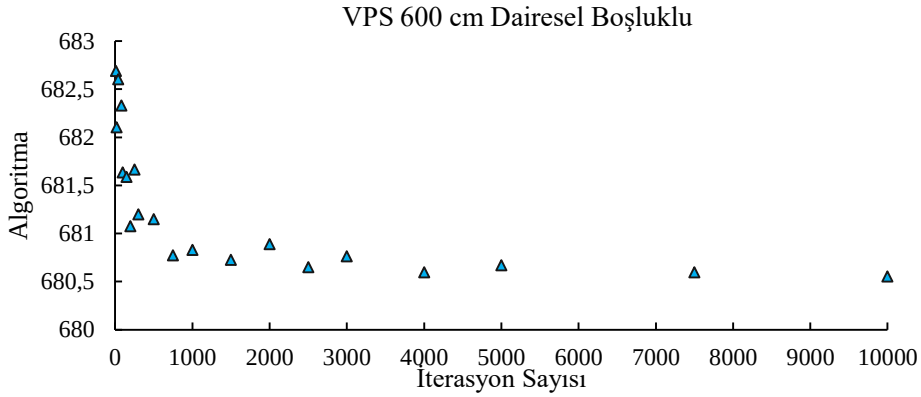
Şekil 25. CPA algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

Bu durum, algoritmanın bu noktadan itibaren yakınsadığını ve en uygun çözüme büyük ölçüde ulaştığını göstermektedir.



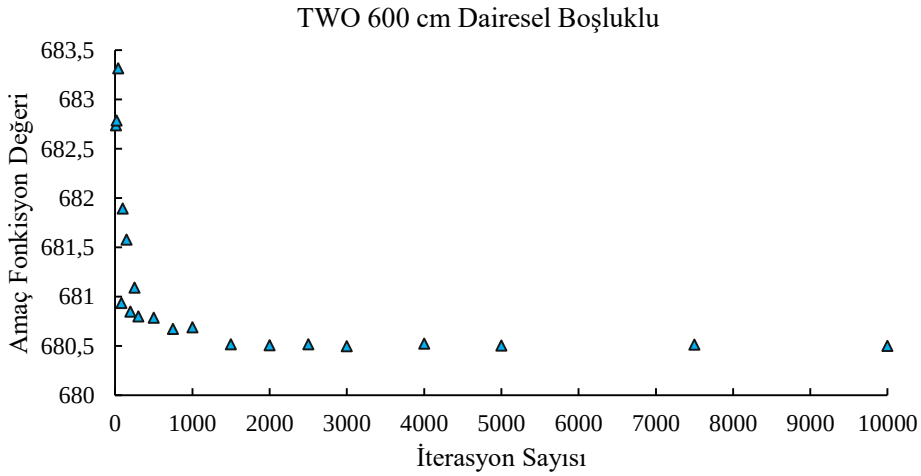
Şekil 26. IRO algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

Şekil 26'da, dairesel boşluklara sahip ve 600 cm uzunluğundaki bir petek kirişin optimizasyon sürecini yansıtmaktadır. Bu süreç, IRO algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk iterasyonlarda amaç fonksiyonu değerinde dalgalanmalar gözlemlenmektedir. Bu durum, algoritmanın çözüm arayışı içinde olduğunu göstermektedir. Yaklaşık 750. iterasyondan itibaren amaç fonksiyonu değerleri daha stabil bir seyir izlemektedir. Daha sonraki yinelemelerde ise yalnızca küçük oynamalar gözlemlenmektedir. Bu gözlemler doğrultusunda, algoritmanın bu noktadan itibaren yakınsamaya başladığı ve en uygun sonuca büyük ölçüde ulaşıldığı söylenebilir.



Şekil 27. VPS algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

Dairesel boşluklara sahip ve 600 cm uzunluğundaki bir petek kirişin Şekil 27'de optimizasyon sürecine aittir. İlgili analiz, VPS algoritması kullanılarak yapılmıştır. Başlangıçta amaç fonksiyonu değerlerinde belirgin dalgalanmalar gözlemlenmektedir. Ancak yaklaşık 1000. iterasyondan itibaren amaç fonksiyonu daha dengeli bir seyir izlemektedir. Bu iterasyondan sonraki artışlarda önemli bir iyileşme elde edilememekte, yalnızca küçük değişimler gözlenmektedir. Bu durum, algoritmanın bu noktadan sonra yakınsamaya başladığını ve çözüm uzayında en uygun değerlere ulaşmış olabileceğini göstermektedir.

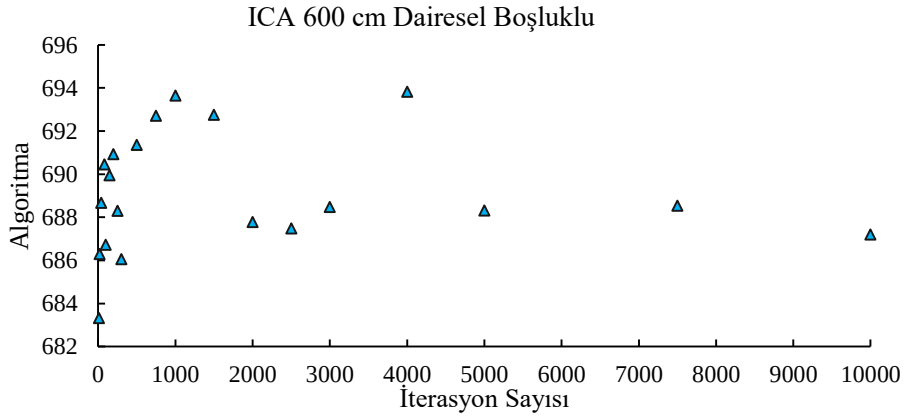


Şekil 28. TWO algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

Şekil 28'de, dairesel boşluklara sahip ve 600 cm uzunluğundaki bir petek kirişin optimizasyon sürecini temsil etmektedir. Çözümleme, TWO algoritması ile gerçekleştirilir. İlk iterasyonlarda amaç fonksiyonu değerlerinde dalgalı bir seyir

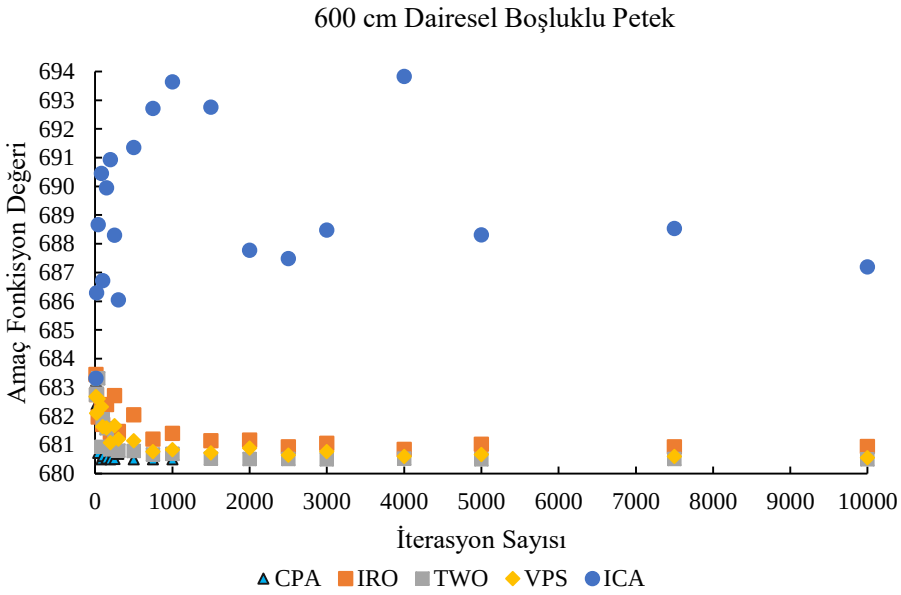
izlenmektedir. Ancak yaklaşık 1500. iterasyondan itibaren bu değerler belirli bir kararlılığa ulaşmakta ve sonraki yinelemelerde dikkate değer bir değişim gözlemlenmemektedir. Bu durum, algoritmanın çözüm uzayında verimli bir noktaya ulaştığını ve yakınsama sürecine girdiğini göstermektedir. İlerleyen iterasyonlarda yalnızca küçük oynamalar gözlemlenmekte, bu da sonuçların istikrarlı hâle geldiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 29'da, dairesel boşluklara sahip ve 600 cm uzunluğundaki bir petek kirişin optimizasyon sürecine aittir. Bu çözümleme, ICA algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta amaç fonksiyonu değerlerinde büyük dalgalanmalar gözlemlenmektedir. Ancak yaklaşık 1500 iterasyon sonrasında değerler daha sabit bir hale gelmekte, sonraki yinelemelerde ise sadece küçük değişiklikler gözlemlenmektedir.



Şekil 29. ICA algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

600 cm uzunluğunda, dairesel boşluklara sahip petek kirişlerin tasarımında kullanılan beş farklı algoritmanın (CPA, IRO, TWO, VPS, ICA) amaç fonksiyonu değerleri, Şekil 30'de çözüm süreçlerinde belirgin farklılıklar göstermektedir. CPA algoritması, 100 iterasyondan sonra 680.497 civarında değere ulaşırken, IRO algoritması 150. iterasyonla birlikte stabil bir yapıya kavuşmuş, ancak 10.000 iterasyon sonunda değerlerde çok az iyileşme görülür.

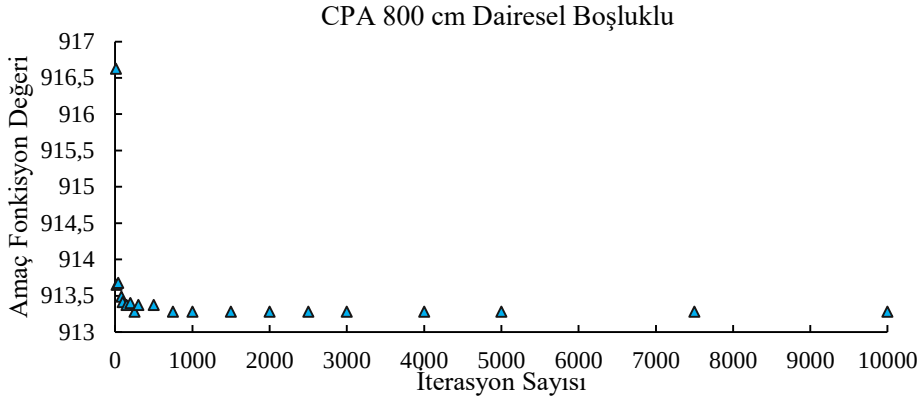


Şekil 30. 5 algoritmalar amaç fonksiyonu yakınsaması

TWO algoritması, 150. iterasyondan sonra daha hızlı bir şekilde kararlı olmuş ve 1000 iterasyondan sonra sabit bir değere yaklaşmıştır. VPS algoritması ise başlangıçtaki dalgalanmaların ardından 10.000 iterasyon sonunda 680.5534 değeriyle kararlı ulaşmış, ancak genel olarak çözümde çok büyük bir değişim gerçekleştirmemektedir. ICA algoritması, diğer algoritmalara göre daha fazla dalgalanma göstererek, uzun iterasyonlar sonrasında 687.2008 değerine ulaşır. Bu sonuçlar, her bir algoritmanın çözümdeki hızını, stabilitesini ve optimize etme yeteneğini farklı şekilde sergilemekte ve her algoritmanın uzun iterasyonlar sonrası daha stabil sonuçlar elde ettiğini, ancak bazı algoritmaların daha hızlı ve etkili çözüme ulaşırken bazılarının daha fazla iyileştirme yaptığı görülmektedir.

3.2.2. 800 cm'lik Kiriş Dairesel Boşluklu Durum

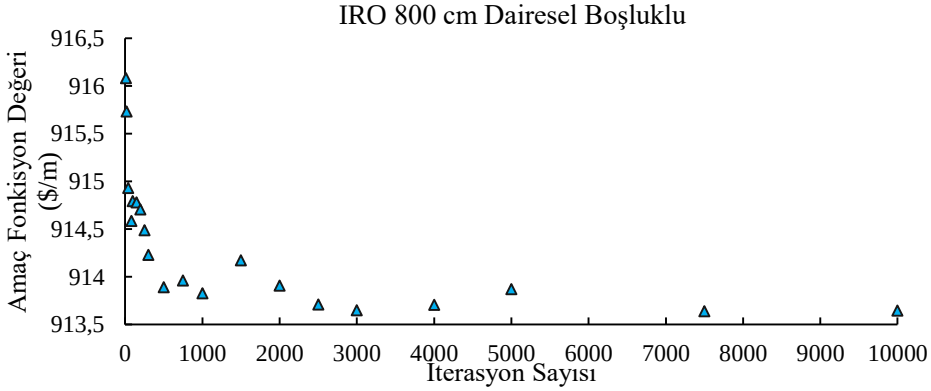
CPA, IRO, VPS, TWO ve ICA algoritmaları kullanılarak 800 cm uzunluğunda dairesel boşluklu bir petek kiriş tasarımı için amaç fonksiyonunun kararlılığı değerlendirilmektedir.



Şekil 31. CPA algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

Şekil 31'de, 800 cm uzunluğundaki dairesel boşluklu petek kirişin CPA algoritması ile yapılan optimizasyon sürecini göstermektedir. Algoritma, Bu çalışmada, algoritmanın farklı iterasyon sayıları (her seferinde 10.000 iterasyona kadar ulaşan) ile defalarca çalıştırılması sonucunda elde edilen veriler kullanılarak Şekil oluşturulur. 750. iterasyondan itibaren tam kararlı hale ulaşmış; bu noktadan sonra sonuçlar yüksek doğrulukla sabitlenmiştir. Önceki iterasyonlarda ise düşük seviyeli ve analizi etkilemeyecek düzeyde dalgalanmalar gözlemlenmektedir.

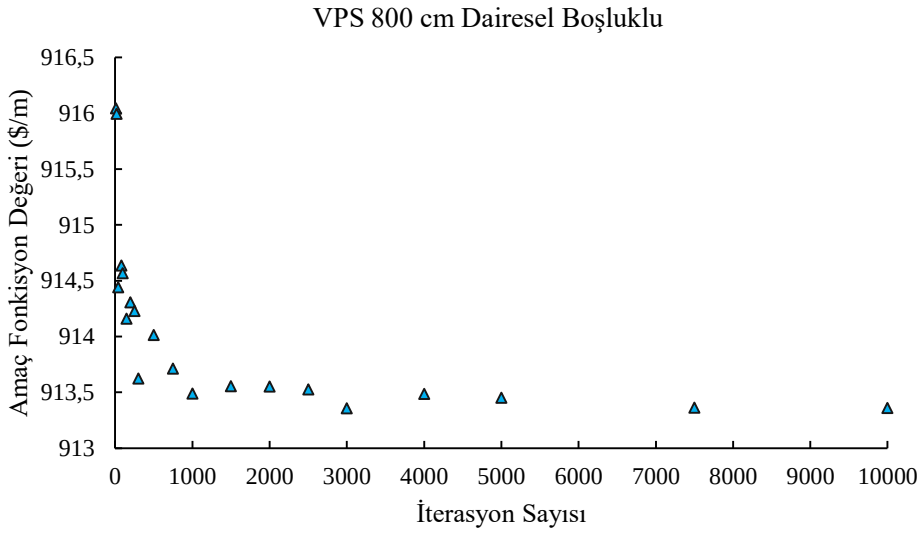
Şekil 32'de, 800 cm uzunluğundaki dairesel boşluklara sahip petek kirişin IRO algoritması ile gerçekleştirilen yapısal optimizasyon süreci sunulmaktadır. Bu çalışmada, algoritmanın farklı iterasyon sayıları (her seferinde 10.000 iterasyona kadar ulaşan) ile defalarca çalıştırılması sonucunda elde edilen veriler kullanılarak Şekil oluşturulmaktadır.



Şekil 32. IRO algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

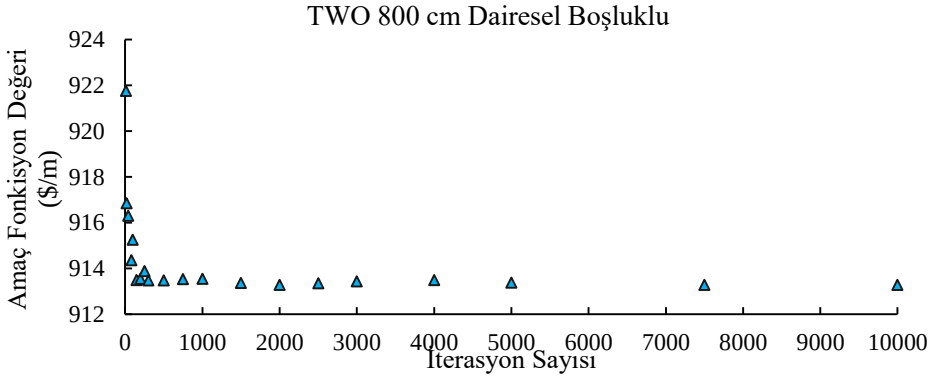
İlgili optimizasyon işleminde, algoritmanın yaklaşık 2000 iterasyonluk çalışması sonucunda performans eğrisi incelendiğinde, algoritmanın belirli bir stabil duruma ancak son evrelere doğru ulaştığı gözlemlenir. İlk iterasyonlardan itibaren sonuçlarda zaman zaman düzensizlikler ve sınırlı düzeyde varyasyonlar ortaya çıkmış, ancak bu dalgalanmalar algoritmanın genel yakınsama kabiliyetini olumsuz yönde etkilememektedir. Son iterasyonlarda ise çözüm uzayında daha dengeli ve tutarlı sonuçlar elde edilir.

Şekil 33'te, dairesel boşluklu ve 800 cm uzunluğundaki petek kirişin VPS algoritması ile gerçekleştirilen optimizasyon sürecine ilişkin sonuçlar sunulmaktadır. Bu çalışmada, algoritmanın farklı iterasyon sayıları (her seferinde 10.000 iterasyona kadar ulaşan) ile defalarca çalıştırılması sonucunda elde edilen veriler kullanılarak grafik oluşturulur.



Şekil 33. VPS algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

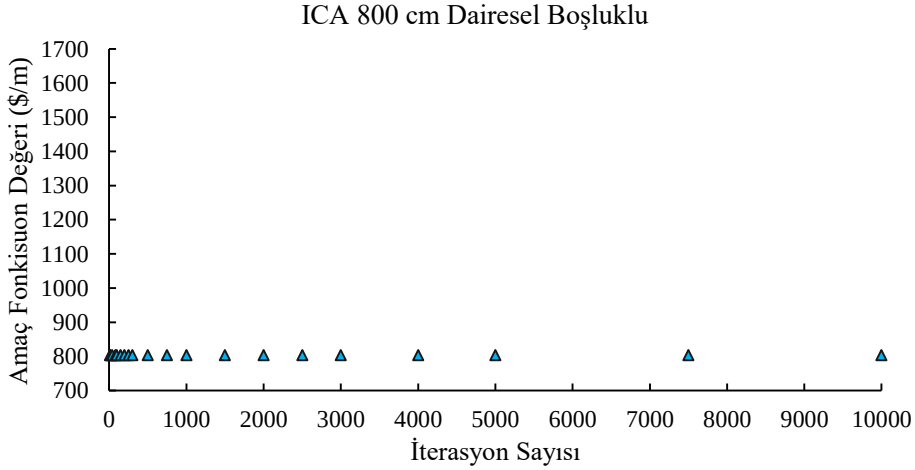
Elde edilen sonuçlara göre, VPS algoritması yaklaşık 3000. iterasyondan sonra anlamlı bir stabilitesine ulaşmış ve çözümler istikrarlı hale gelinmiştir. Önceki iterasyonlarda çeşitli düzeylerde dalgalanmalar gözlemlenmiş olsa da, bu durum algoritmanın genel yakınsama davranışını olumsuz yönde etkilememektedir. Sonuç olarak, Şekil üzerinden yapılan değerlendirme, algoritmanın geç evrede yüksek stabil çözüm üretebildiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 34. TWO – 800 cm dairesel petek kiriş için amaç fonksiyonu stabilitesi

Şekil 34'te, 800 cm uzunluğa ve dairesel boşluklara sahip petek kirişin TWO algoritması kullanılarak optimize edilmesine ilişkin deneysel bulgular sunulmaktadır. Bu çalışma kapsamında algoritma, her seferinde 10.000 iterasyona kadar çalıştırılmış ve her bir denemede farklı iterasyon sayıları uygulanmıştır. Elde edilen verilere göre,

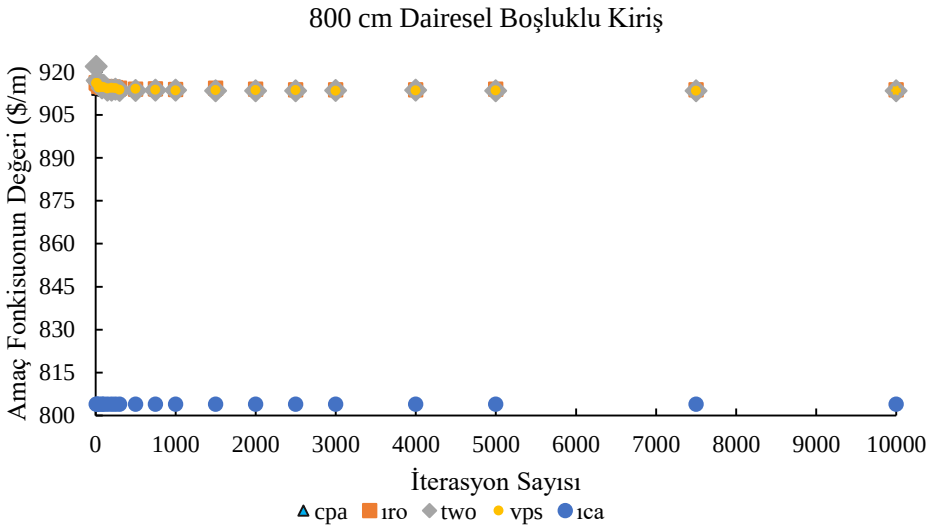
TWO algoritması yaklaşık 3500. iterasyondan itibaren çözüm uzayında belirgin bir denge durumuna ulaşmış ve bu noktadan sonra elde edilen sonuçlar yüksek düzeyde tutarlılık sergilemiştir. İlk iterasyon fazlarında sınırlı düzeyde değişkenlik gözlemlenmiş olsa da, bu dalgalanmalar algoritmanın genel performansına kayda değer bir olumsuzluk katmamaktadır. Yapılan analizler, algoritmanın geç konsolidasyon eğilimi gösterdiğini ve uzun süreli çalışmalarda daha güvenilir sonuçlar üretebildiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 35. ICA algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

Şekil 35'te, 800 cm uzunluğundaki dairesel boşluklu petek kirişin ICA algoritması ile gerçekleştirilen optimizasyon sürecine ilişkin bulgular yer almaktadır. Söz konusu analiz kapsamında algoritma, her biri 10.000 iterasyona kadar olacak şekilde farklı tekrarlarla çalıştırılır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, ICA algoritmasının yalnızca 10. iterasyonda optimum çözüm değerine ulaştığı ve bu noktadan itibaren, 10000. iterasyona kadar amaç fonksiyon değerinde herhangi bir değişim gözlemlenmediği tespit edilmektedir. Bu durum, algoritmanın çözüm uzayında son derece hızlı bir şekilde en iyi sonucu bulduğunu ve sonraki tüm iterasyonlarda bu sonucu muhafaza ettiğini gösterir. Amaç fonksiyon değerinin mutlak sabitliği, algoritmanın bu özel problemde erken yakınsama eğilimi gösterdiğini ve yüksek düzeyde stabil sergilediğini ortaya koymaktadır.

Bu tezde, 800 cm uzunluğa sahip ve dairesel boşluklarla tasarlanmış petek bir kirişin en düşük imalat maliyetini elde etmeye yönelik olarak tanımlanan amaç fonksiyonu, Şekil 36'da beş farklı optimizasyon algoritması kullanılarak değerlendirilir. Elde edilen sonuçlar, algoritmaların amaç fonksiyonu açısından istikrar düzeylerini karşılaştırmak amacıyla, her biri için eşit sayıda tekrar uygulanarak analiz edilmiştir. Yapılan analizde CPA algoritması, tekrar sayısı arttıkça amaç fonksiyonu değerini hızlı şekilde sabitleyerek erken stabilite sağlama açısından dikkat çekici bir performans sergilemektedir.

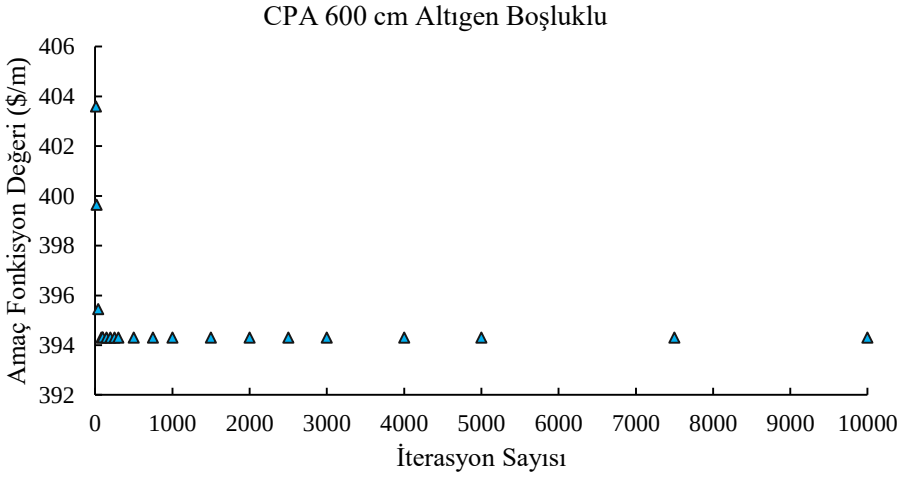


Şekil 36. 5 algoritmalar amaç fonksiyonu yakınsaması

TWO algoritması başlangıçta dalgalı sonuçlar üretmiş olsa da zamanla istikrar kazanan bir yapı göstermiş, özellikle karmaşık yapılar karşısında uyum yeteneği ile öne çıkar. IRO algoritması, daha geniş bir aralıkta seyreden ancak genel eğilim açısından dengeli sonuçlar sunmuş, keşif ve yakınsama arasında başarılı bir denge kurma eğilimi göstermektedir. VPS algoritması ise dar bir değişim aralığında seyrettiğinden dolayı stabil bir yakınsama eğilimi sergileyerek öne çıkmaktadır. Öte yandan ICA algoritması, tüm tekrar sayılarında sabit olarak 804 değerini üretmiştir. Bu durum, ICA'nın amaç fonksiyonu açısından son derece yüksek bir stabil sunduğunu ortaya koymakla birlikte, diğer algoritmalara göre oldukça düşük bir değer üretmiş olması nedeniyle Şekilsel temsilde, özellikle y ekseni bağlamında, gösterilememesine yol açar. Bu nedenle ICA algoritması Şekil dışı bırakılmış; ancak sabit ve istikrarlı çözüm üretme kapasitesi, metinsel analiz içerisinde ayrıca vurgulanmaktadır.

3.2.3. 600 cm'lik Kiriş Altıgen Boşluklu Durum

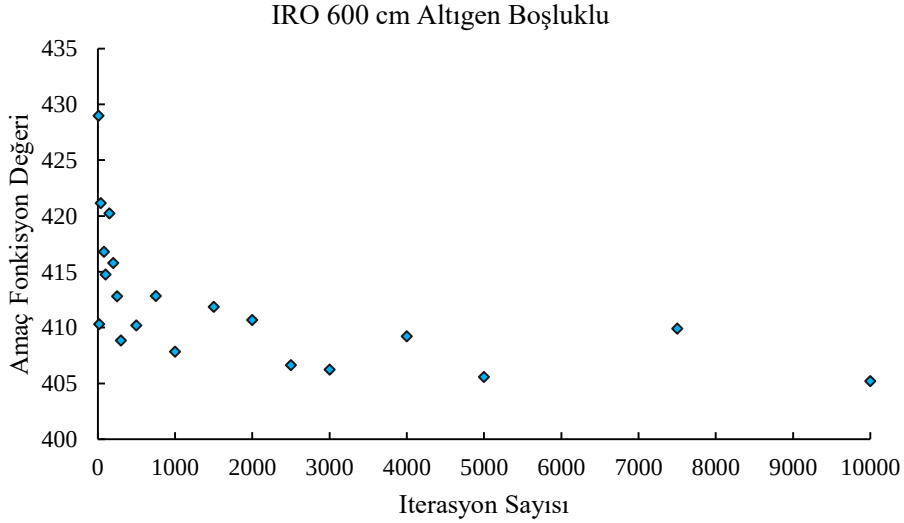
CPA, IRO, VPS, TWO ve ICA algoritmaları kullanılarak sırasıla 600 cm uzunluğunda altıgen boşluklu bir petek kiriş tasarımı için amaç fonksiyonunun yakınsaması değerlendirilir. Şekil 37'de, 600 cm uzunluğuna sahip altıgen boşluklu petek kirişin CPA algoritması kullanılarak optimize edilmesi sürecine dair elde edilen veriler değerlendirildiğinde, algoritmanın oldukça kısa bir sürede stabil bir çözüme ulaştığı gözlemlenmektedir.



Şekil 37. CPA algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

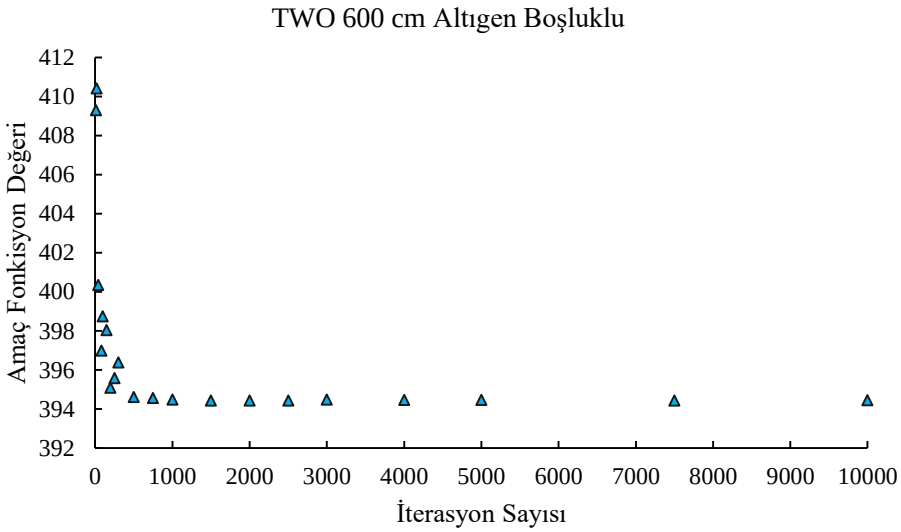
İlk iterasyonlarda amaç fonksiyonu değerinde belirgin bir azalma meydana gelmiş, özellikle 80. iterasyondan itibaren sonuçlar minimum seviyeye yaklaşır. 150. iterasyondan sonra ise amaç fonksiyonu değeri 394.306 seviyesinde sabitlenmiş ve 10.000. iterasyona kadar herhangi bir değişiklik göstermemiştir. Bu durum, CPA algoritmasının hızlı yakınsama yeteneğine sahip olduğunu ve elde edilen optimum değeri yüksek düzeyde istikrarla koruyabildiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bu bulgular, algoritmanın söz konusu problem yapısı içerisinde etkili ve güvenilir bir performans sergilediğini göstermektedir.

600 cm uzunluğundaki petek kiriş için IRO algoritması kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon süreci incelendiğinde, Şekil 38'de amaç fonksiyonu değerlerinde sürekli dalgalanmalar olduğu tespit edilmiştir. İlk iterasyonlarda nispeten yüksek değerlerden başlayan süreç, 3000. iterasyona kadar kademeli olarak düşüş eğilimi göstermektedir. Ancak bu iyileşmeye rağmen, fonksiyon değeri zaman zaman yeniden artış göstermiş, bu da algoritmanın çözüm uzayı içerisinde istikrarlı bir yakınsamaya ulaşmakta zorlandığını göstermiştir. Özellikle 5000. ve 7500. iterasyonlarda değerlerin tekrar yükselmesi, algoritmanın bazı bölgelerde yerel minimumlara takıldığını düşündürmektedir.



Şekil 38. IRO algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

10.000. iterasyonda ulaşılan 405.2025 değeri kabul edilebilir düzeyde olsa da, bu sonuç IRO algoritmasının bu problem yapısında daha fazla iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu ve çözüm sürecinde dalgalı bir seyir izlediğini ortaya koymaktadır.

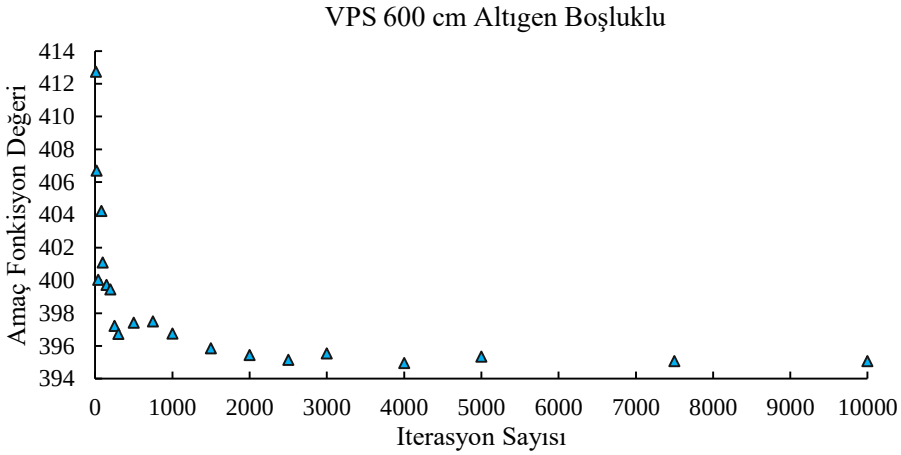


Şekil 39. TWO algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

TWO algoritması ile 600 cm uzunluğundaki petek kiriş üzerinde yapılan optimizasyon çalışmasında, algoritmanın çözüm sürecinde yakınsaması Şekil 39'da gösterilmiştir. Özellikle ilk 100 iterasyonda amaç fonksiyonu değerinde belirgin bir düşüş yaşanmış, 500. iterasyondan sonra ise değerler 394.4 seviyelerinde sabitlenmeye başlar. 1000. iterasyondan itibaren fonksiyon değerindeki değişimler son derece sınırlı düzeyde seyretmiş ve 10.000. iterasyona kadar bu stabil yapı korunmaktadır. Bu durum, TWO algoritmasının zamanla çözüm uzayında dengeli bir şekilde optimum değere yaklaştığını ve son aşamada stabil bir yapı sergilediğini gösterir. Dalgalanmaların sınırlı kalması, algoritmanın yerel minimumlara sıkışmadan genel çözüme yönelme eğiliminde olduğunu ve uygulanabilirlik açısından güven verdiğini ortaya koymaktadır.

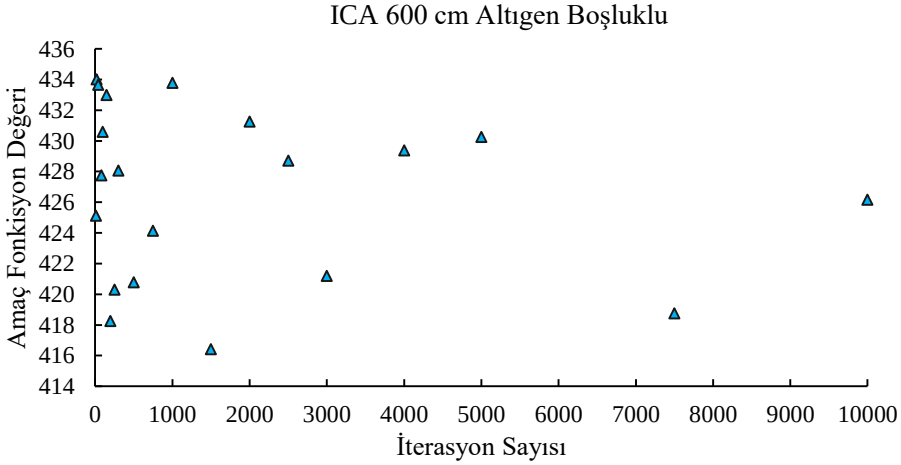
Altıgen boşluklara sahip 600 cm uzunluğundaki petek kirişin VPS algoritması ile optimize edilmesi sürecinde, algoritmanın çözüm arayışı boyunca dalgalı ancak kademeli Şekil 40'ta bir iyileşme sergilediği görülmektedir. İlk iterasyonlarda amaç

fonksiyonu değerinde dikkate değer bir düşüş gözlemlenmiş, 250. iterasyondan itibaren ise değerler yavaş yavaş daha sabit bir çizgiye yaklaşmıştır.



Şekil 40. VPS algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

Ancak bu süreç boyunca değerlerde belirli aralıklarla küçük oynamalar yaşanmış, bu da algoritmanın çözüm uzayında sürekli keşif yapma eğiliminde olduğunu göstermiştir. 4000. iterasyondan sonra elde edilen değerler birbirine oldukça yakın seyretmiş ve 10.000. iterasyonda 395.0851 değerine ulaşılmaktadır. Bu durum, VPS algoritmasının genel olarak dengeli bir yakınsama eğrisi sunduğunu ve çözümün rafine edilmesi sürecinde etkili bir tutum sergilediğini ortaya koymaktadır.

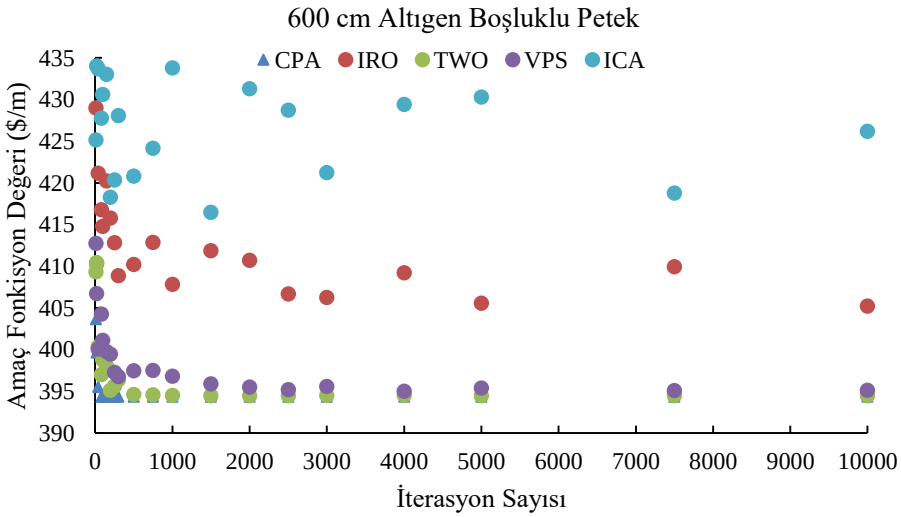


Şekil 41. ICA algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

600 cm uzunluğundaki petek kirişin ICA algoritması ile optimize edilmesine yönelik gerçekleştirilen analizde, amaç fonksiyonu değerlerinin süreç boyunca önemli

ölçüde Şekil 41'de dalgalandığı tespit edilir. Erken iterasyonlardan itibaren, algoritmanın yüksek değerlerde gezinmeye devam ettiği ve belirgin bir yakınsama eğilimi göstermediği gözlemlenmiştir. Özellikle 1000. iterasyonda ulaşılan yüksek değer, algoritmanın çözüm uzayında zaman zaman daha az verimli bölgelere yöneldiğini ortaya koymaktadır. Ancak 1500. iterasyon civarında bir miktar düşüş eğilimi gözlemlenmiş, bu da algoritmanın çözüm kalitesini iyileştirme çabası içinde olduğunu göstermiştir. 10000. iterasyonda ulaşılan 426.1776 değeri, algoritmanın bu problem yapısında yüksek düzeyde stabil sergilemekten uzak kaldığını ve sonuçların görece dağınık bir yapı gösterdiğini ortaya koymaktadır. Buna rağmen, ICA algoritmasının çözüm uzayını geniş biçimde tarayabilme kabiliyeti, alternatif çözümler geliştirme potansiyelini göstermesi açısından dikkat çekicidir.

Bu analizde, 600 cm uzunluğa sahip ve altıgen boşluklarla tasarlanmış petek kirişin imalat maliyetini en aza indirmeyi hedefleyen amaç fonksiyonu, beş farklı optimizasyon algoritması (CPA, IRO, TWO, VPS, ICA) kullanılarak tekrarlar yoluyla Şekil 42'de değerlendirimiştr. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, algoritmaların amaç fonksiyonu bakımından gösterdiği istikrar düzeyi ve performans farklılıkları dikkatle incelenmiştir.



Şekil 42. 5 algoritmalar amaç fonksiyonu yakınsaması

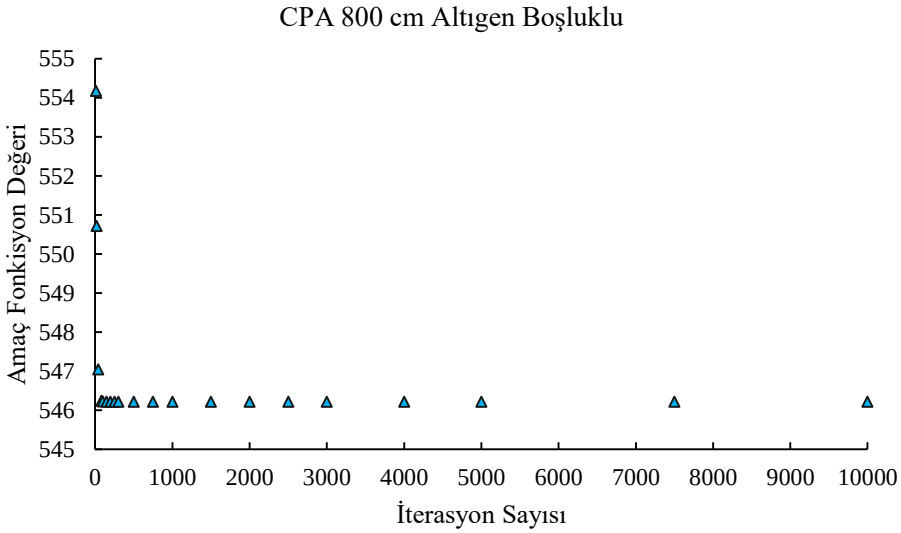
Bu kapsamda CPA algoritması, düşük amaç fonksiyonu değerine en erken ulaşan ve değerlerini tüm tekrarlar boyunca sabit tutarak son derece güçlü bir yakınsama sergileyen algoritma olmaktadır. Bu özellik, CPA'nın hızlı yakınsama ve

kararlılığını bir arada sağlayabildiğini göstermektedir. TWO algoritması ise başlangıçta hafif dalgalı bir seyir izlese de kısa sürede istikrar kazanan bir yapı göstermiş, bu durum özellikle adaptif davranış sergileme kapasitesini ortaya koyar.

VPS algoritması, dalgalanma oranı daha düşük ve stabilite sonuçlar üretmiş, sonuçların tekrarlarla birlikte dar bir aralıkta yoğunlaştığı gözlemlenir. IRO algoritması ise zaman zaman yüksek varyasyonlar gösterse de genel olarak denge ile keşif yeteneğini bir arada tutabilen bir yaklaşım sergilemiştir. Öte yandan ICA algoritması, diğer algoritmalara kıyasla daha yüksek ve dalgalı sonuçlar üretmiş; bu da söz konusu algoritmanın bu problem yapısı altında amaç fonksiyonu açısından düşük istikrar sergilediğini ortaya koymaktadır.

3.2.4 800 cm'lik Kiriş Altıgen Boşluklu Durum

CPA, IRO, TWO, VPS ve ICA algoritmaları kullanılarak 800 cm uzunluğunda altıgen boşluklu bir petek kiriş tasarımı için amaç fonksiyonunun kararlılığı değerlendirmiştir.

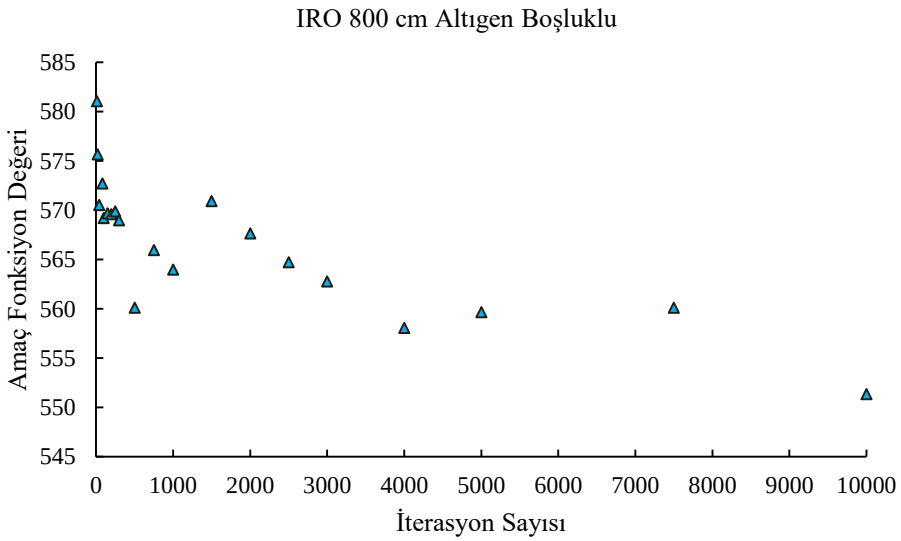


Şekil 43. CPA algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

800 cm uzunluğa sahip petek kirişin CPA algoritması kullanılarak optimize edilmesine yönelik analizde, algoritmanın oldukça erken bir aşamada optimum çözüme ulaştığı ve bu sonucu tüm iterasyonlar boyunca Şekil 43'te koruduğu tespit edilir. Özellikle 150. iterasyondan itibaren amaç fonksiyonu değeri 546.2207

seviyesine ulaşmış ve 10.000. iterasyona kadar bu değerde herhangi bir değişiklik gözlemlenmemektedir. Bu durum, CPA algoritmasının çözüm uzayında etkin ve hızlı bir arama gerçekleştirdiğini, aynı zamanda stabil bir çözüme ulaşma kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen bu kararlılık, algoritmanın bu tür yapıların optimizasyonunda yüksek güvenilirlik ve istikrar sunduğuna işaret etmektedir.

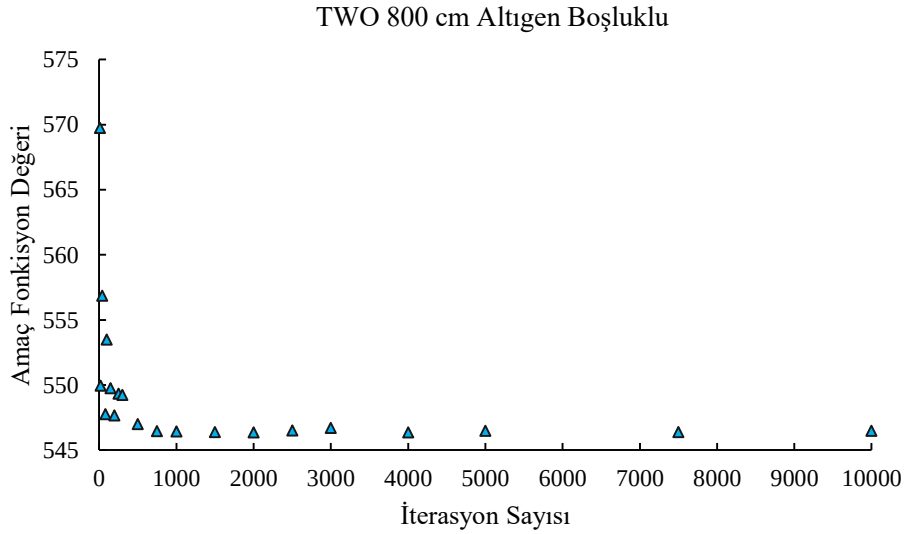
800 cm uzunluğundaki altıgen boşluklu petek kirişin optimizasyonunda kullanılan IRO algoritmasının performansı incelendiğinde, amaç fonksiyonu değerlerinde süreç boyunca dalgalı ancak genel olarak düşüş eğilimi gösteren Şekil 44'te bir seyir izlediği gözlemlenmiştir. İlk 500 iterasyonda fonksiyon değerinde önemli bir iyileşme kaydedilmiş, bu da algoritmanın başlangıç aşamasında etkili bir keşif süreci yürüttüğünü göstermektedir.



Şekil 44. IRO algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

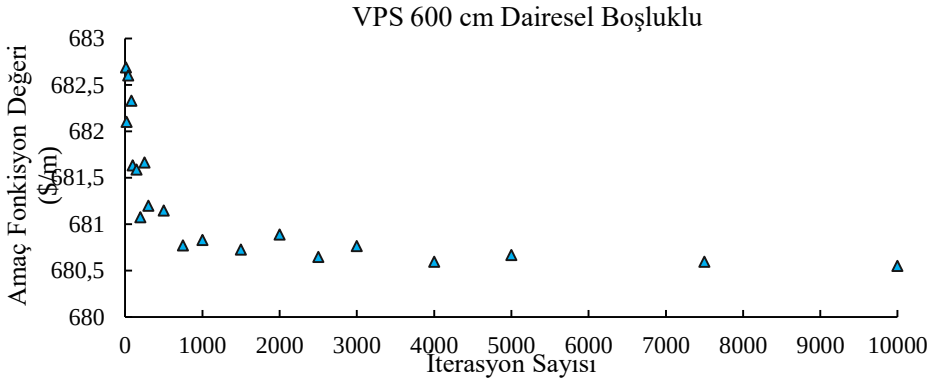
Ancak, daha sonraki iterasyonlarda değerlerde düzensiz artış ve azalmalar gözlenmiş, bu durum algoritmanın yerel minimumlara takılma eğilimi taşıdığını düşündürmektedir. Sonunda, 10.000. iterasyonda ulaşılan 551.3247 değeri önceki tepe noktalara kıyasla daha düşük olsa da, algoritmanın genel çözüm stabilitesini açısından sınırlı bir performans sergilediği anlaşılmaktadır. IRO algoritması bu bağlamda, çözüm uzayını keşfetme yeteneğiyle öne çıkmakta, ancak sonuçların istikrarı açısından belirli zorluklarla karşılaşmaktadır.

800 cm uzunluğundaki petek kirişin TWO algoritması ile optimize edilmesi sürecinde, amaç fonksiyonu değerlerinin genellikle sabit bir aralıkta Şekil 45'te dalgalandığı gözlemlenir. İlk 100 iterasyonda fonksiyon değerinde belirgin bir iniş-çıkış yaşanmakta, bu da algoritmanın çözüm uzayını keşfetmeye çalıştığını göstermektedir. 500. iterasyondan itibaren elde edilen değerler 546.4 bandında daha dengeli seyretmiş, 1000 iterasyondan sonra ise değişimler oldukça sınırlı kalmaktadır. Bu durum, TWO algoritmasının orta iterasyonlardan itibaren stabil bir yapıya ulaştığını ve çözüm çevresinde hassas iyileştirmeler gerçekleştirdiğini ortaya koymaktadır.



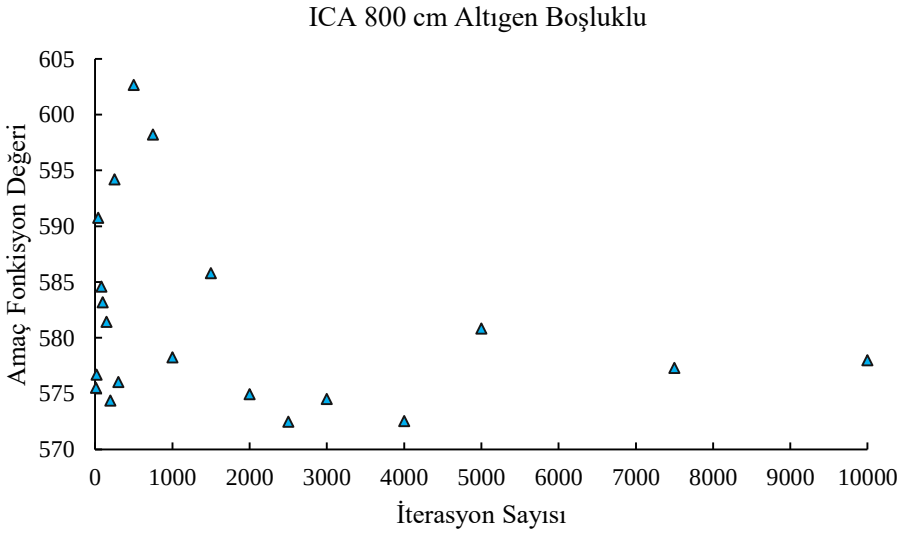
Şekil 45. TWO algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

Son olarak, 10.000. iterasyonda ulaşılan 546.4825 değeri, algoritmanın bu problemde genel olarak stabil ve uygulanabilir bir sonuç elde ettiğini gösterir.



Şekil 46. VPS IRO algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

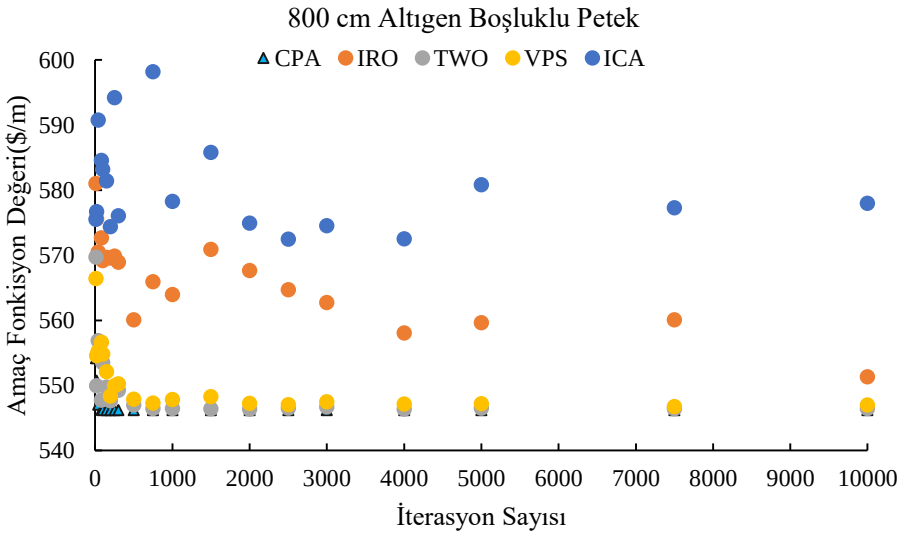
Bu durum, algoritmanın çözüm uzayını keşfetmeye çalıştığını ve daha iyi bir çözüm için arayışta olduğunu ortaya koymaktadır. 150. iterasyondan itibaren değerler 547.0 civarında sabitlenmeye başlamış ve bu, VPS algoritmasının daha stabil bir yapıya kavuştuğunu göstermektedir. 1000 ve 10.000 iterasyonlarında ise değerdeki değişiklikler oldukça sınırlı kalmış, bu da algoritmanın çözümün etrafında hassas iyileştirmeler yaparak daha stabil bir sonuç elde ettiğini ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, VPS algoritmasının 800 cm uzunluğundaki petek kirişlerin tasarımında güçlü, güvenilir ve etkili bir optimizasyon aracı olduğunu göstermektedir.



Şekil 47. ICA algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

800 cm uzunluğunda petek kirişlerin ICA algoritması ile optimize edilmesi sürecinde, amaç fonksiyonu değerlerinin farklı iterasyon sayılarında Şekil 47'de

değişimi gözlemlenir. İlk 100 iterasyonda, değerlerde belirgin dalgalanmalar yaşanmakta olup bu durum algoritmanın çözüm uzayını keşfetmeye çalıştığını ve daha uygun bir çözüm aradığını göstermektedir. 150. iterasyondan sonra ise, değerler 574.0 ile 594.0 arasında dalgalanarak daha dengeli bir hale gelmiştir. Ancak 500. iterasyon sonrasında değerlerdeki dalgalanmalar daha belirginleşmiş, 1000 iterasyondan sonra ise değerler 574.0 civarına yaklaşarak daha stabil bir hale gelir. 10.000 iterasyonda elde edilen 577.991 değeri, ICA algoritmasının bu problemde istikrarlı bir çözüm sağladığını ve optimize edilmiş sonuçların elde edildiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, ICA algoritmasının 800 cm uzunluğundaki altıgen boşluklu petek kirişlerin tasarımında etkili bir şekilde performans gösterdiğini ve güçlü bir optimizasyon aracı sunduğunu ortaya koymaktadır.



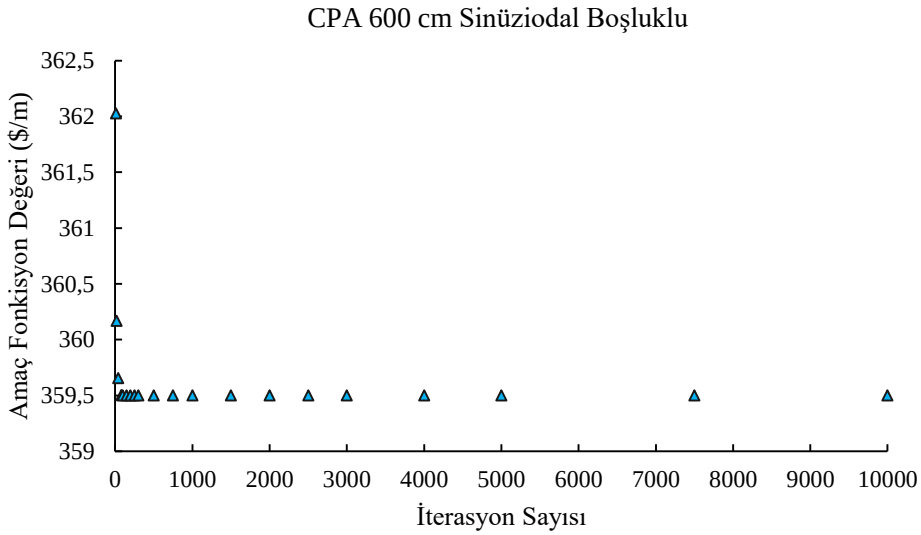
Şekil 48. 5 algoritma amaç fonksiyonu yakınsaması

Bu tez kapsamında, 800 cm uzunluğunda ve altıgen boşluklarla tasarlanmış petek kirişin minimum maliyetle üretilmesini hedefleyen amaç fonksiyonu, beş farklı optimizasyon algoritması (CPA, IRO, TWO, VPS, ICA) ile tekrarlı çalıştırmalar sonucu Şekil 48'de analiz edilir. Bu bağlamda elde edilen sonuçlar, algoritmaların stabil düzeylerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Sonuçlara göre, CPA algoritması, çok erken tekrar sayılarından itibaren amaç fonksiyonu değerini sabitleyerek son derece yüksek bir kararlılık düzeyi sergilemiş ve uzun vadeli tekrar sayılarında dahi bu kararlılığın korunması öne çıkmaktadır. Bu

durum, CPA'nın hızlı ve güvenilir bir yakınsama kabiliyetine sahip olduğunu göstermektedir. TWO algoritması, daha geniş bir aralıkta değişen sonuçlar üretmekle birlikte zamanla değerlerini dengeleyen ve uyum sağlayan bir davranış gösterir. VPS algoritması, başlangıçta dalgalı bir seyir izlese de orta ve yüksek tekrar seviyelerinde istikrarlı bir yapıya ulaşmış ve sonuçların dar bir aralıkta yoğunlaştığı gözlemlenmektedir. IRO algoritması, zaman zaman yüksek dalgalanmalar gösterse de genel eğilim açısından istikrarlı bir yakınsama eğilimi sergilemiş, keşif yeteneğini koruyarak dikkat çekebilir. ICA algoritması ise, diğer algoritmalara kıyasla daha yüksek ve düzensiz sonuçlar üretmiş, bu durum algoritmanın bu özel problem yapısına karşı düşük istikrar sunduğunu ortaya koymaktadır.

3.2.5. 600 cm'lik Kiriş Sinüziodal Boşluklu

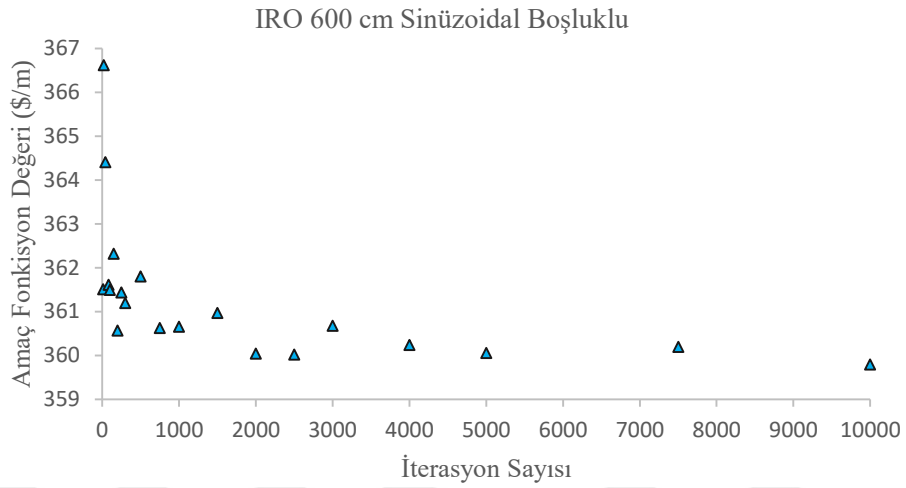
CPA, IRO, TWO, VPS ve ICA algoritmaları kullanılarak sırasıla 800 cm uzunluğunda sinüzoidal boşluklu bir petek kiriş tasarımı için amaç fonksiyonunun kararlılığı değerlendirilmektedir.



Şekil 49. CPA algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

600 cm uzunluğundaki sinüzoidal boşluklara sahip petek kirişlerin CPA algoritması ile optimize edilmesi sürecinde, amaç fonksiyonu değerlerinin iterasyon sayısına bağlı olarak Şekil 49'da değişimi incelenmiştir. İlk 10 iterasyonda amaç fonksiyonu değeri 362.0281 olarak başlamış, ardından 100 iterasyona kadar değerler düzenli bir şekilde azalarak 359.5026 seviyesine kadar gerilemiştir. 150. iterasyondan

itibaren ise amaç fonksiyonu değerinin 359.5024 seviyesinde sabitlenmesiyle birlikte, algoritmanın istikrarlı bir çözüm elde ettiği görülmektedir. 10.000 iterasyona kadar gerçekleştirilen işlemlerde amaç fonksiyonu değerinde herhangi bir değişim yaşanmamış ve sonuçlar yüksek bir kararlılık sergilemiştir. Elde edilen bulgular, CPA algoritmasının 600 cm uzunluğundaki sinüzoidal boşluklu petek kirişlerin tasarımında güçlü, hızlı ve etkili bir optimizasyon performansı sunduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

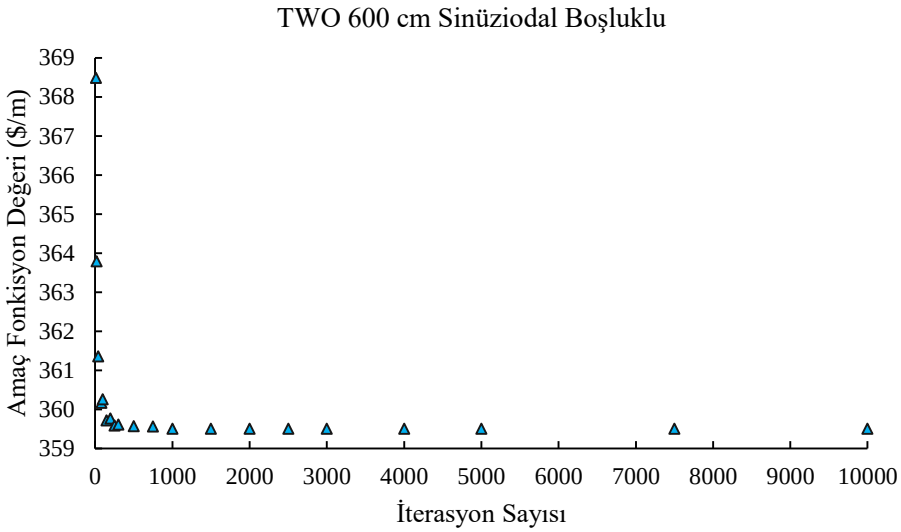


Şekil 50. IRO algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

600 cm uzunluğundaki sinüzoidal boşluklu petek kirişlerin IRO algoritması ile optimize edilmesi sürecinde, amaç fonksiyonu değerlerinde dalgalı Şekil 50'de bir değişim gözlemlenmiştir. İlk 100 iterasyon boyunca değerler 361.5 ila 366.6 arasında değişkenlik göstermiş, bu da algoritmanın çözüm uzayında aktif bir keşif süreci yürüttüğünü düşündürmektedir. 150. iterasyondan sonra değerlerde nispi bir istikrar arayışı gözlenmiş olsa da, küçük dalgalanmalar devam etmiştir. 1000 iterasyondan sonra değerler genel olarak 360.0 civarına yaklaşmış, özellikle 2000 iterasyon sonrasında daha dengeli bir seyir izlenmiştir. Son olarak, 10.000 iterasyonda elde edilen 359.7919 değeri, IRO algoritmasının problemi kabul edilebilir düzeyde optimize edebildiğini, ancak çözüm stabilitesinin CPA veya ICA gibi diğer algoritmalara kıyasla daha geç sağlandığını ortaya koymaktadır.

Uzunluğundaki sinüzoidal boşluklu petek kirişlerin TWO algoritması ile optimizasyon süreci incelendiğinde, başlangıç iterasyonlarında amaç fonksiyonu

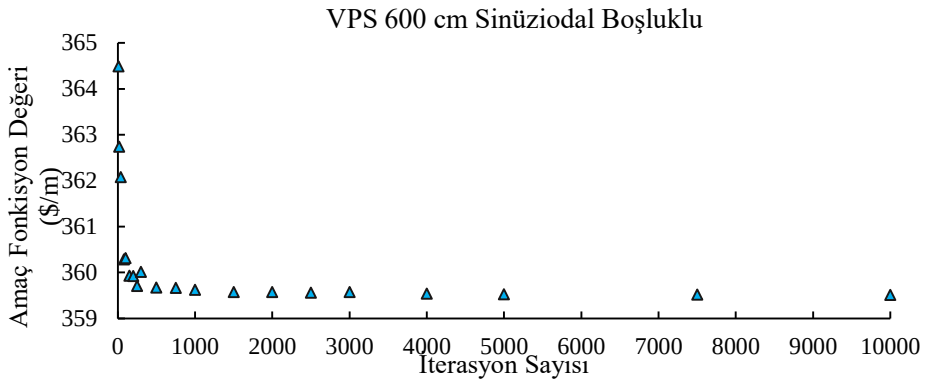
değerlerinde belirgin Şekil 51'de bir iyileşme eğilimi gözlenmektedir. İlk 10 iterasyonda 368.5 gibi yüksek bir değerden başlayan süreç, 100 iterasyon civarında 360.2 seviyelerine gerilemiştir. 150. iterasyonla birlikte 359.7 civarında daha stabil bir seyir başlamış, 1000 iterasyondan sonra değerler 359.5 seviyelerine sabitlenmiştir.



Şekil 51. TWO algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması 600 cm

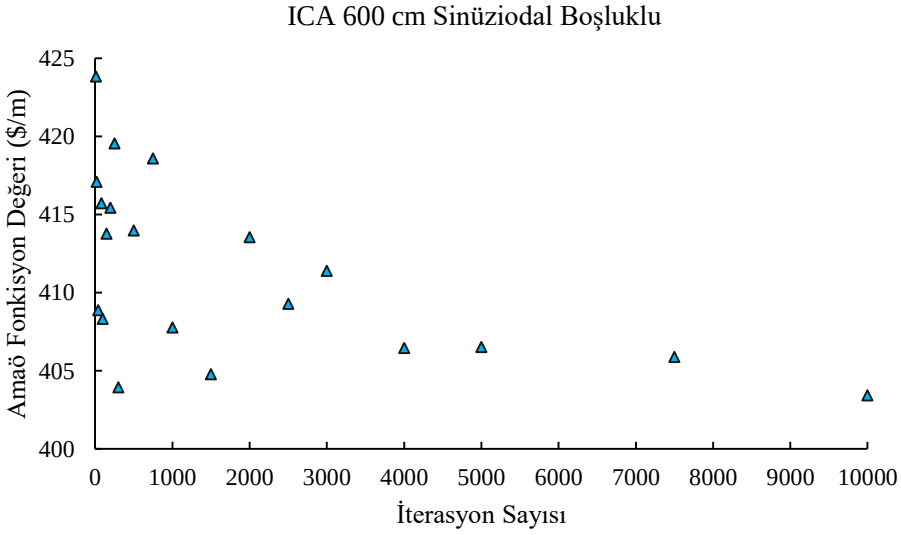
10.000 iterasyon sonunda elde edilen 359.5036 değeri, TWO algoritmasının bu problemde kararlı bir optimizasyon sağladığını göstermektedir. Bu sonuçlar, algoritmanın başlangıçta hızlı bir iyileşme gerçekleştirdiğini, ancak yüksek iterasyon sayılarında stabil bir çözüm noktasına ulaştığını kanıtlamaktadır.

600 cm uzunluğundaki sinüzoidal boşluklu petek kirişlerin VPS algoritması ile yapılan optimizasyon süreci Şekil 52'de analiz edildiğinde, ilk 10 iterasyonda amaç fonksiyonu değerinin 364.48 seviyelerinde olduğu, ancak hızlı bir iyileşme süreciyle 100. iterasyonda yaklaşık 360.3 civarına gerilediği görülmektedir.



Şekil 52. VPS algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

150. iterasyondan itibaren amaç fonksiyonu değerleri 359.9 seviyelerine düşerek daha dengeli bir seyir izlemeye başlamıştır. 1000 iterasyon sonrasında değerler daha da sabitleşmiş ve 10.000 iterasyonda 359.5148 gibi düşük ve istikrarlı bir sonuca ulaşılmıştır. Bu durum, VPS algoritmasının yüksek iterasyonlarda kararlı ve güvenilir bir optimizasyon performansı sunduğunu açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

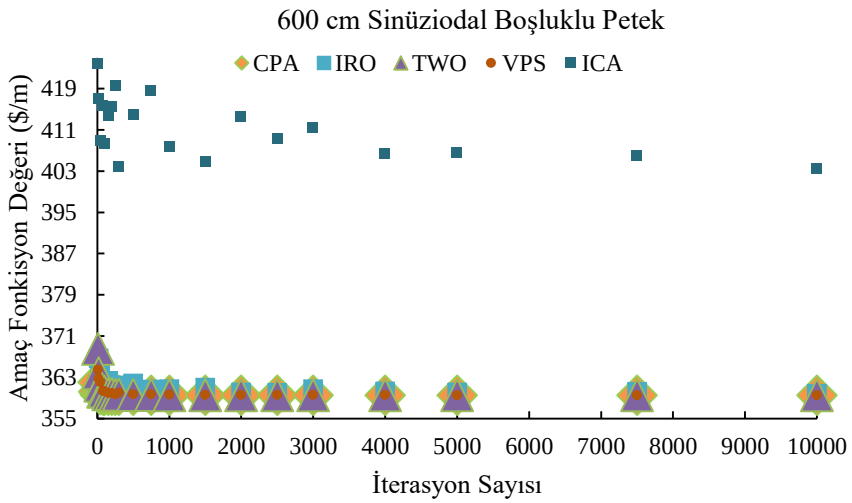


Şekil 53. ICA algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

600 cm uzunluğundaki sinüzoidal boşluklu petek kirişlerin ICA algoritması ile optimize edilmesi süreci incelendiğinde, amaç fonksiyonu değerlerinin iterasyonlar boyunca dalgalı Şekil 53'te bir seyir izlediği gözlemlenmektedir. İlk 100 iterasyonda değerlerde belirgin düşüşler yaşanmış; özellikle 40. iterasyonda 408.87 ve 100.

iterasyonda 408.33 gibi daha düşük değerlere ulaşılmıştır. Ancak sonraki iterasyonlarda, değerlerde zaman zaman artışlar kaydedilmiş ve sistem dengesini korumakta zorlanmıştır. 300. iterasyonda elde edilen 403.94 değeri sonrası, 1000 iterasyondan itibaren amaç fonksiyonu değerleri daha stabil bir yapıya kavuşmuş, nihayetinde 10.000 iterasyonda 403.4195 değerine ulaşarak göreli bir iyileşme sağlanmıştır. Bu sonuçlar, ICA algoritmasının bu uzunlukta ve karmaşıklıktaki tasarım problemleri için istikrarlı bir optimizasyon performansı sergilemekte zorlandığını ancak yine de tatmin edici bir sonuca ulaşabildiğini göstermektedir.

Şekil 54'te sunulan verilere göre, CPA, IRO ve VPS algoritmaları, yüksek düzeyde stabilite ile öne çıkarken; TWO algoritması orta düzeyde, ICA algoritması ise düşük düzeyde stabilite göstermektedir.

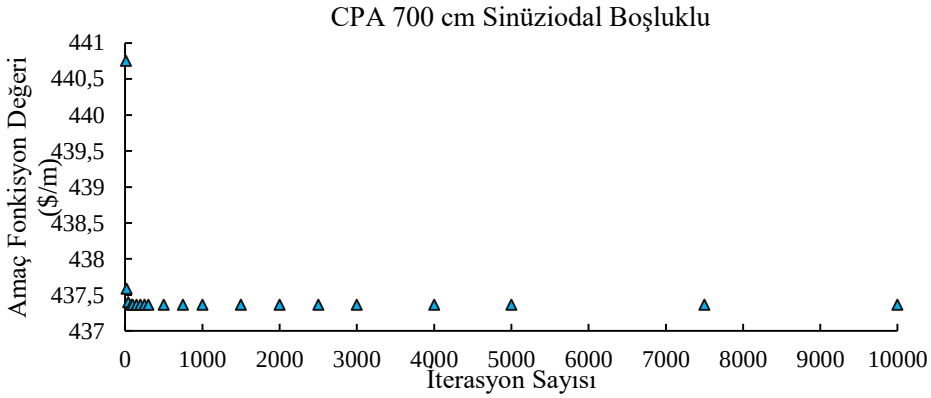


Şekil 54. 5 algoritma amaç fonksiyonu yakınsaması

Bu bağlamda değerlendirildiğinde, özellikle CPA ve IRO algoritmaları, yalnızca işlem süresi açısından değil, amaç fonksiyonu değerlerinin kararlılığı bakımından da son derece etkili ve güvenilir çözümler sunmaktadır.

3.2.6. 700 cm'lik Kiriş Sinüzoidal Boşluklu

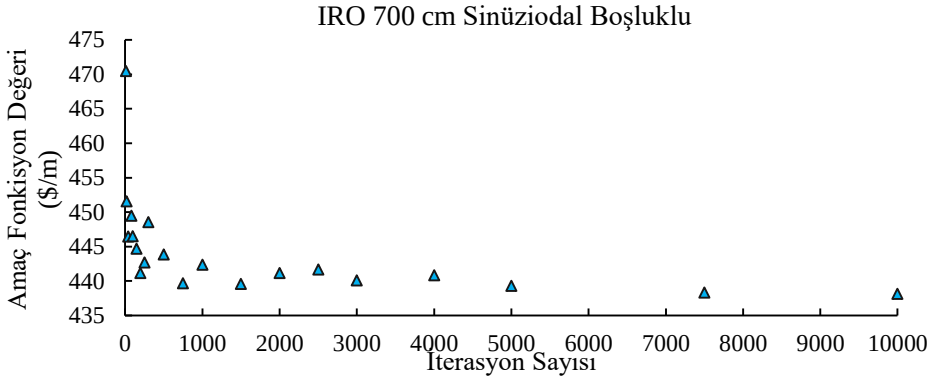
Sinüziodal boşluklu petek kiriş için 800 cm uzunluğunda yapılan değerlendirmelerde elde edilen sonuçlar gerçekçi olmadığını ve bu durum daha önce belirtilmektedir. Bu nedenle, sinüziodal boşluklar için 800 cm yerine 700 cm uzunluğu seçilmiştir ve böylece iki farklı uzunluk ile amaç fonksiyonu karşılaştırılmaktadır.



Şekil 55. CPA algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

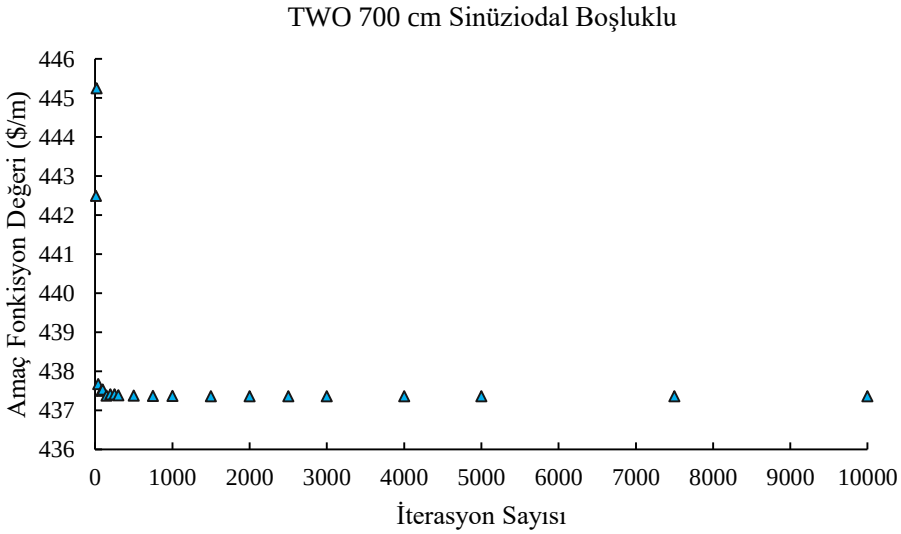
Şekil 55'te CPA algoritması kullanılarak 700 cm uzunluğunda delikli dizaynlı kiriş için hedef fonksiyonunun değerlendirilmesi sonuçları, tekrar sayıları arttıkça belirgin bir şekilde stabil göstermektedir. İlk tekrarlarda küçük değişiklikler gözlemlense de, 100. tekrardan itibaren sonuçlar sabit kalmış ve bu durum, algoritmanın çözüm bulma hızını ve doğruluğunu göstermektedir. Bu, CPA algoritmasının bu mühendislik problemine hızlı bir şekilde stabil çözümler sunduğunu ve çözümün etkinliğini vurgulamaktadır.Sonuçlar, algoritmanın ilk 100 tekrar sonrasında büyük bir dalgalanma göstermediğini, bunun da CPA'nın optimum çözüme hızla ulaşma yeteneğine işaret ettiğini ortaya koymaktadır. Bu sabırlı ve istikrarlı yaklaşım, algoritmanın güvenilirliğini ve doğruluğunu güçlendirmektedir.

Şekil 56'da, IRO algoritması kullanılarak 700 cm uzunluğunda sinüziodal boşluklu kiriş için amaç fonksiyonunun değerlendirilmesi, başlangıçtaki yüksek değerlerin zamanla azaldığını ve algoritmanın zaman içinde daha istikrarlı çözümler sunduğunu göstermektedir. İlk başlarda, amaç fonksiyonu değerlerinde belirgin bir düşüş yaşanmış, ardından ise 1000 tekrardan sonra daha az dalgalanma gözlemlenmiştir.



Şekil 56. IRO algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

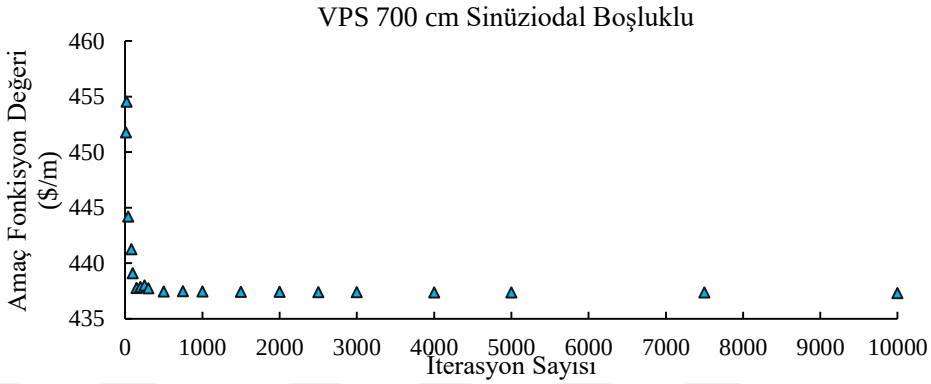
IRO algoritması, yüksek tekrar sayılarında stabilye ulaşmış olup başlangıçta görülen dalgalanmalar, algoritmanın çözüm sürecindeki adaptasyonu ile minimize edilmiştir. Bu, IRO'nun amaç fonksiyonunu optimize ederken zamanla daha güvenilir sonuçlar sunduğunu ve belirli bir çözüm aralığında sabitlendiğini göstermektedir.



Şekil 57. TWO algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

Şekil 57'de, TWO algoritması kullanılarak 700 cm uzunluğunda sinüziodal boşluklu kiriş için amaç fonksiyonu değerlendirilmesi, algoritmanın başlangıcından itibaren amaç fonksiyonu değerlerinde stabilizasyon sağlandığını ve algoritmanın zamanla daha az dalgalanma gösterdiğini ortaya koymaktadır. Başlangıçta görülen değer değişimlerinin ardından, 1000 tekrardan sonra değerler daha stabil hale gelmiş ve belirgin bir şekilde stabil bir seviyeye ulaşılmıştır. TWO algoritması, ilk başlarda

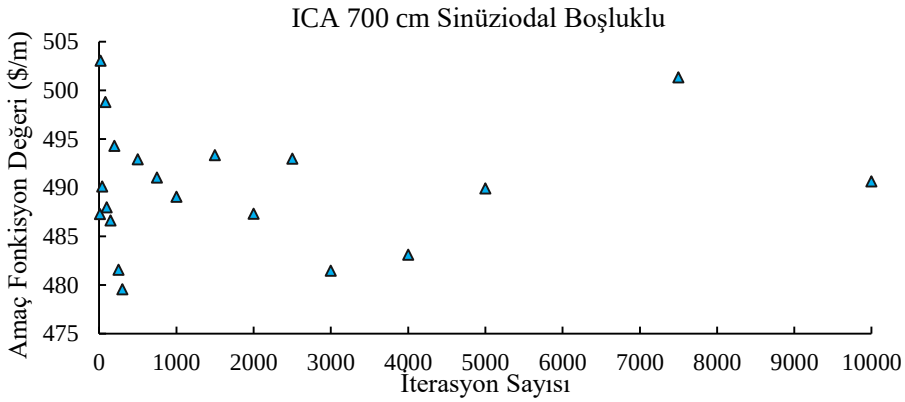
gözlemlenen dalgalanmaları minimize ettikten sonra daha stabil ve tutarlı sonuçlar sunmuştur. Bu durum, algoritmanın amaç fonksiyonunu optimize etme sürecinde zamanla daha güvenilir ve stabil çözümler sunduğunu göstermektedir. Bu şekilde, TWO algoritması yüksek çözünürlükte sabit bir değere ulaşmayı başardır.



Şekil 58. VPS algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

Şekil 58'de, VPS algoritması kullanılarak 700 cm uzunluğunda sinüzoidal boşluklu kiriş için amaç fonksiyonunun değerlendirilmesi, başlangıçtaki yüksek değerlerin zamanla azaldığını ve algoritmanın çözümlerinin giderek daha stabil hale geldiğini göstermektedir. İlk başlarda, hedef fonksiyonu değerlerinde belirgin bir düşüş yaşanmış, ardından 1000 tekrardan sonra daha az dalgalanma gözlemlenmiştir. Bu durum, VPS algoritmasının çözüm sürecindeki uyumlu yapısını ve yüksek tekrar sayılarında daha güvenilir sonuçlar sunduğunu yansıtmaktadır. VPS algoritması, başlangıçtaki dalgalanmaları minimize ederek, zamanla daha tutarlı ve istikrarlı bir çözüm üretmiştir. Bu, algoritmanın hedef fonksiyonunu optimize ederken zamanla daha güvenilir sonuçlar sunduğunu ve belirli bir çözüm aralığında sabitlendiğini göstermektedir. VPS algoritması, sinüzoidal boşluklu kirişlerin optimizasyonu konusunda belirgin bir stabilye ulaşmaktadır.

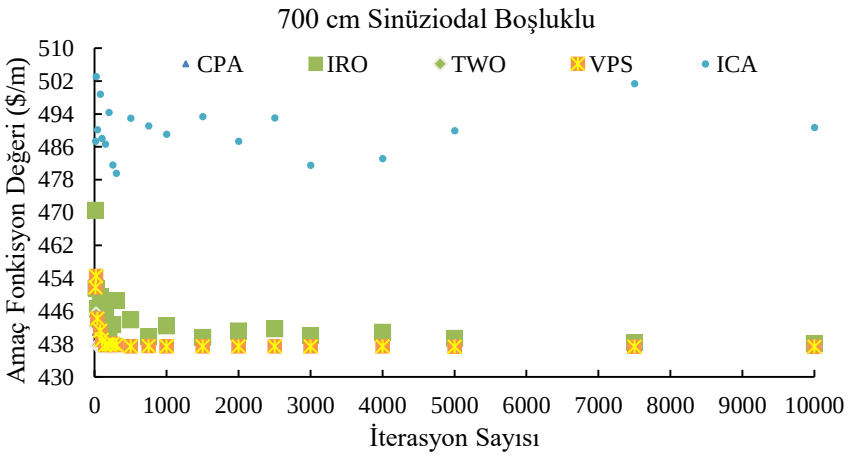
Şekil 59'da, ICA algoritması kullanılarak 700 cm uzunluğunda sinüziodal boşluklu kiriş için amaç fonksiyonunun değerlendirilmesi, başlangıçtaki yüksek değerlerin zamanla azaldığını ve algoritmanın zaman içinde daha kararlılık çözümler sunduğunu göstermektedir.



Şekil 59. ICA algoritması için amaç fonksiyonu yakınsaması

Başlangıçta belirgin bir düşüş gözlemlenmiş, ardından ise 1000 tekrar sonrasında dalgalanmaların minimuma indiği gözlemlenmiştir.

Şekil 60'a göre, amaç fonksiyonu üzerindeki farklı tekrar sayılarında ve beş farklı algoritma için yapılan değerlendirmelere dayanarak; CPA algoritması, amaç fonksiyonu değerinde hızlı bir stabil gösterirken, diğer algoritmalara göre daha hızlı bir şekilde sonuca ulaşmaktadır.



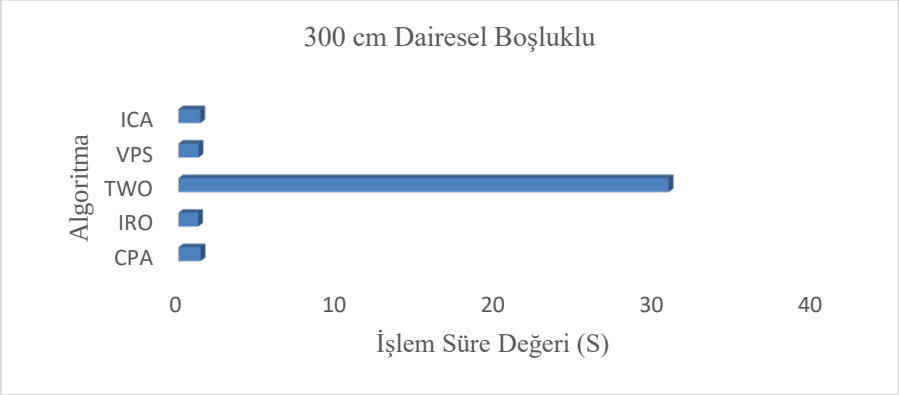
Şekil 60. 5 algoritma amaç fonksiyonu yakınsaması

IRO algoritması ise başlangıçta daha fazla dalgalanma gösterir ve stabilye ulaşması için daha fazla iterasyona ihtiyaç duyar. TWO algoritması, istikrarlı çözümler üretirken, hızlı bir şekilde amaç fonksiyonunu stabilize etmektedir. VPS algoritması, başlangıçtaki yüksek değerlerle başlar ancak iterasyonlar ilerledikçe daha istikrarlı sonuçlar verir. ICA algoritması, yüksek seviyede dalgalanma göstermekte olup

iterasyonlar ilerledikçe diğer algoritmalara kıyasla daha az etkili sonuçlar sunmaktadır. Genel olarak, CPA ve TWO algoritmaları daha hızlı stabil sağlarken, IRO, VPS ve ICA algoritmaları daha fazla iterasyona ihtiyaç duyar ve daha uzun sürede stabilize olmaktadır.

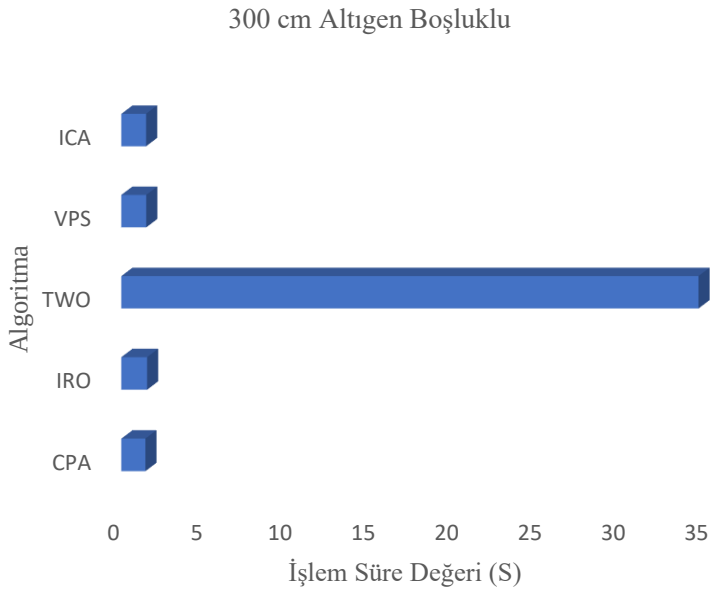
3.3. İşlem Süresi Analizi

İşlem süresi, farklı boşluk türlerine sahip petek kirişlerin tasarımında kullanılan algoritmaların etkinliğini değerlendirmede önemli bir ölçüttür. Elde edilen sonucun doğruluğu kadar, en uygun çözüme ulaşma süresi de algoritmanın mühendislik uygulamaları açısından yeterliliğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, bu bölümde kullanılan beş farklı algoritma için her bir boşluk tipi ve her bir kiriş uzunluğu özelinde işlem süresi analiz edilmiştir. Yapılan analiz, algoritmaların zamansal performanslarını karşılaştırmak ve her bir durumda hangi algoritmanın daha kararlı ve hızlı sonuçlar verdiğini belirlemek amacı taşımaktadır. Ayrıca bu değerlendirme, işlem süresi ve hesaplama kaynakları açısından en uygun algoritmanın seçiminde karar vericilere bilimsel bir temel sağlamaktadır.



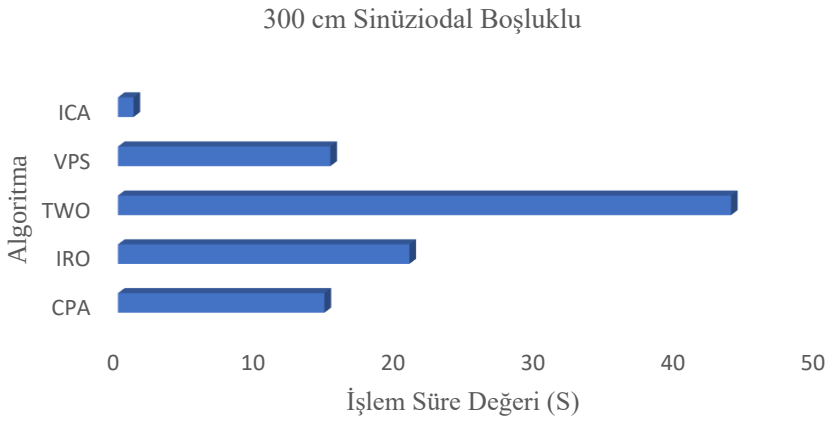
Şekil 61. 300 cm'lik dairesel petek kiriş için işlem süresi

Şekil 61'e göre dairesel boşluklara sahip 300 cm uzunluğundaki petek kirişin tasarımında, işlem süresi açısından en verimli algoritmalar IRO, VPS, ICA ve CPA olmaktadır. Buna karşın, TWO algoritması en uzun işlem süresine sahiptir.



Şekil 62. 300 cm'lik altıgen petek kiriş için işlem süresi

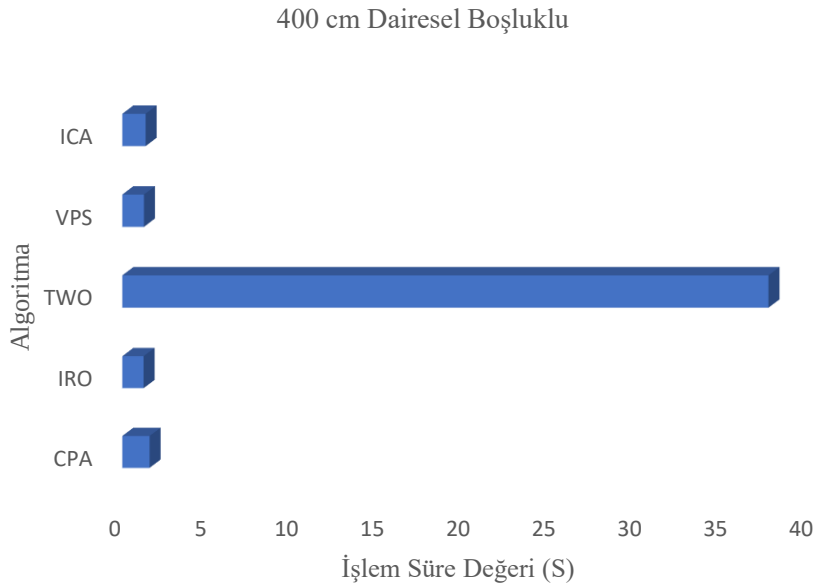
Yukarıda sunulan ve 300 cm uzunluğundaki, altıgen boşluklara sahip petek kiriş tasarımına ait işlem sürelerini gösteren Şekil 62'e göre, CPA, ICA, VPS ve IRO algoritmaları sırasıyla en hızlı çözümleri sunmaktadır. TWO algoritması en uzun işlem süresine vermektedir.



Şekil 63. 300 cm'lik sinüzoidal petek kiriş için işlem süresi

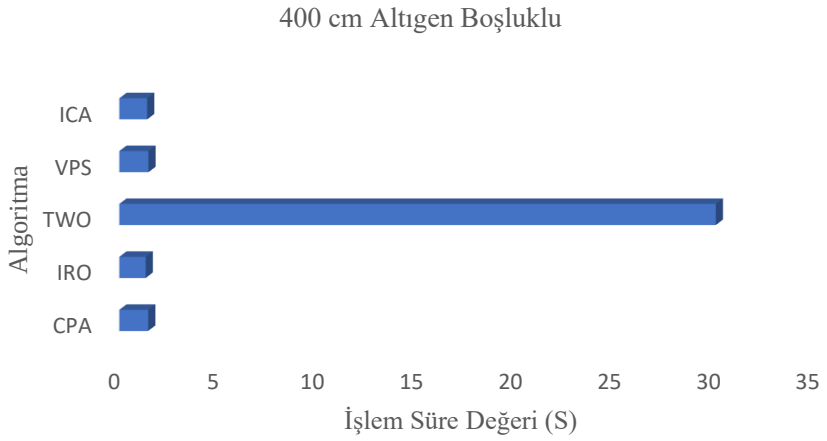
Yukarıda sunulan ve 300 cm uzunluğundaki, sinüziodal boşluklara sahip petek kiriş tasarımına ait işlem sürelerini gösteren Şekil 63'e göre, TWO algoritması en uzun işlem süresine vermektedir. Bunu sırasıyla IRO, VPS, CPA ve ICA algoritmaları takip etmektedir.

Bu sonuçlar, algoritmaların işlem süreleri açısından belirgin farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır.



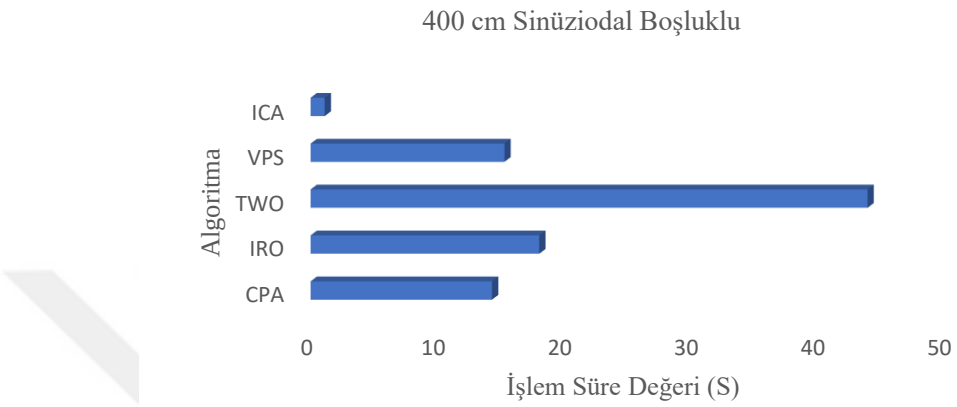
Şekil 64. 400 cm'lik dairesel petek kiriş için işlem süresi

Yukarıdaki Şekil 64'e göre, 400 cm uzunluğundaki ve dairesel boşluklara sahip petek kirişin tasarımına ilişkin algoritmaların işlem süreleri karşılaştırıldığında, en hızlı sonuç veren algoritma IRO olmaktadır. Bunu sırasıyla VPS, ICA ve CPA algoritmaları takip etmiştir. En uzun işlem süresi ise TWO algoritmasında gözlemlenir.



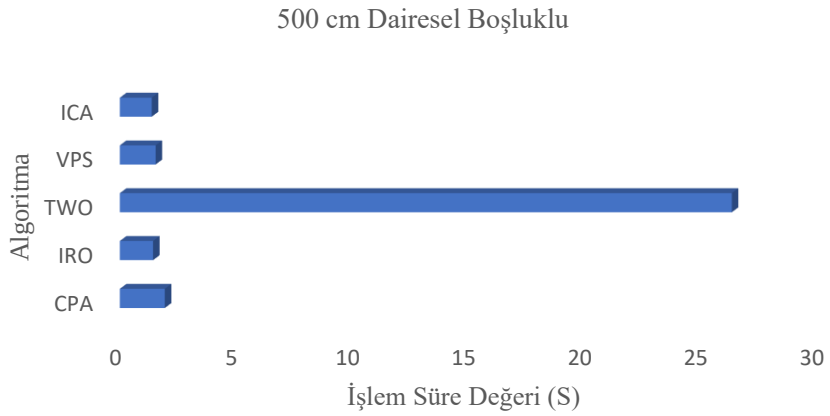
Şekil 65. 400 cm'lik altıgen petek kiriş için işlem süresi

Şekil 65'e göre, 400 cm uzunluğundaki ve altıgen boşluklara sahip petek kirişin tasarım sürecinde, algoritmaların işlem süreleri dikkate alındığında en hızlı performans IRO algoritmasında gözlemlenmiştir. Bunu yakın bir değerle ICA takip etmiş, ardından CPA ve VPS algoritmaları gelmiştir. TWO ise bu tasarım senaryosunda en uzun işlem süresine sahip olmaktadır.



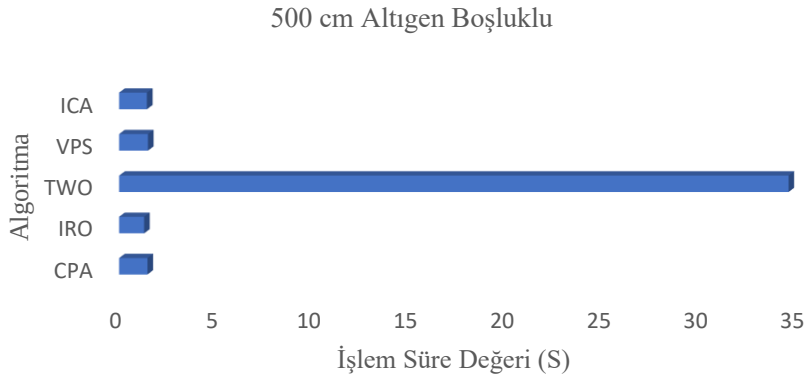
Şekil 66. 400 cm'lik sinüzoidal petek kiriş için işlem süresi

Yukarıda sunulan ve 400 cm uzunluğundaki, sinüziodal boşluklara sahip petek kiriş tasarımına ait işlem sürelerini gösteren Şekil 66'a göre, ICA algoritması en hızlı çözümleri sunmaktadır. Bunu sırasıyla CPA, VPS, IRO ve TWO algoritmaları takip etmektedir. Bu durum, işlem süresi bakımından algoritmalar arasında belirgin farklar olduğunu göstermektedir.



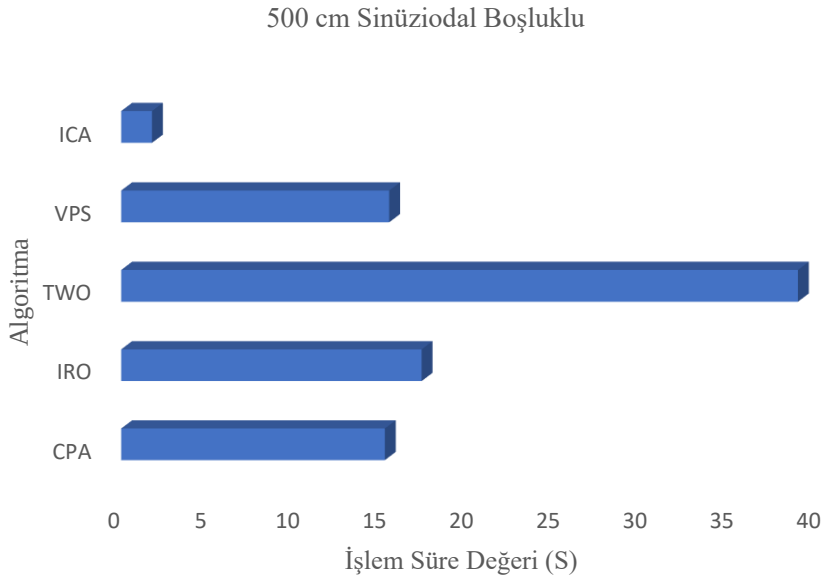
Şekil 67. 500 cm'lik dairesel petek kiriş için işlem süresi

Bu Şekil 67'e göre, 500 cm uzunluğundaki ve dairesel boşluklara sahip petek kirişin tasarımında, en uzun işlem süresi TWO algoritmasında gözlemlenir. Bunu sırasıyla CPA, VPS ve IRO algoritmaları izlemektedir. En hızlı sonuç ise ICA algoritması tarafından elde edilir.



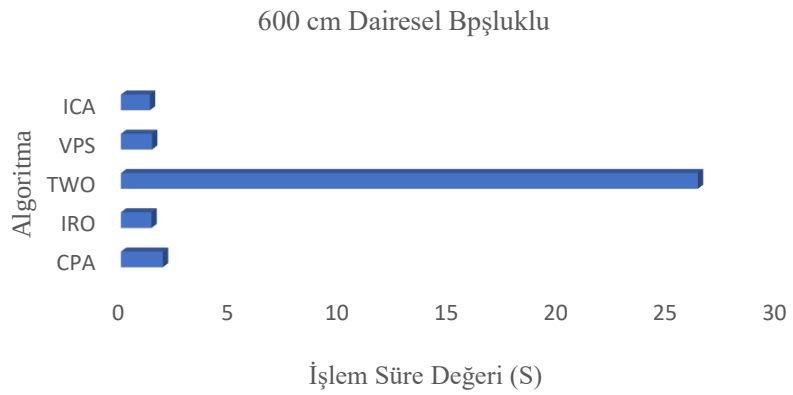
Şekil 68. 500 cm'lik altıgen petek kiriş için işlem süresi

Yukarıdaki Şekil 68'e göre, 500 cm uzunluğundaki ve altıgen boşluklara sahip petek kirişin tasarımında, daha kısa sürede sonuç üreten algoritmalar ise IRO, ICA, CPA ve VPS olmaktadır. En uzun işlem süresi ise TWO algoritmasında kaydedilir.



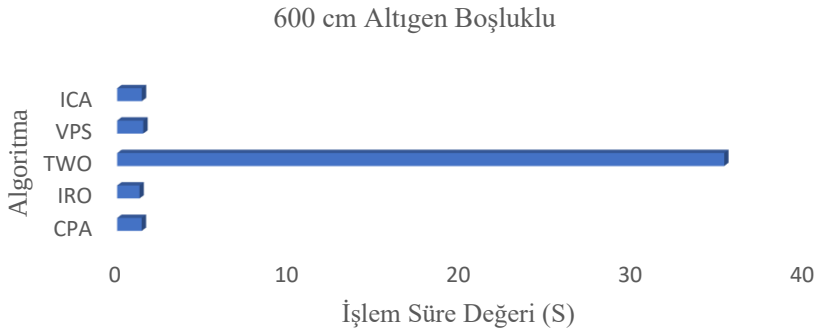
Şekil 69. 500 cm'lik sinüzoidal petek kiriş için işlem süresi

Yukarıda sunulan ve 500 cm uzunluğundaki, sinüziodal boşluklara sahip petek kiriş tasarımına ait işlem sürelerini gösteren Şekil 69'a göre, VPS ve CPA algoritmaları orta seviyede işlem süresi sunmaktadır. TWO algoritması en uzun işlem süresine sahipken, ICA algoritması en kısa sürede çözüm üretmektedir. İşlem sürelerindeki bu dağılım, algoritmaların performans farklılıklarını ortaya koymaktadır.



Şekil 70. 600 cm'lik dairesel petek kiriş için işlem süresi

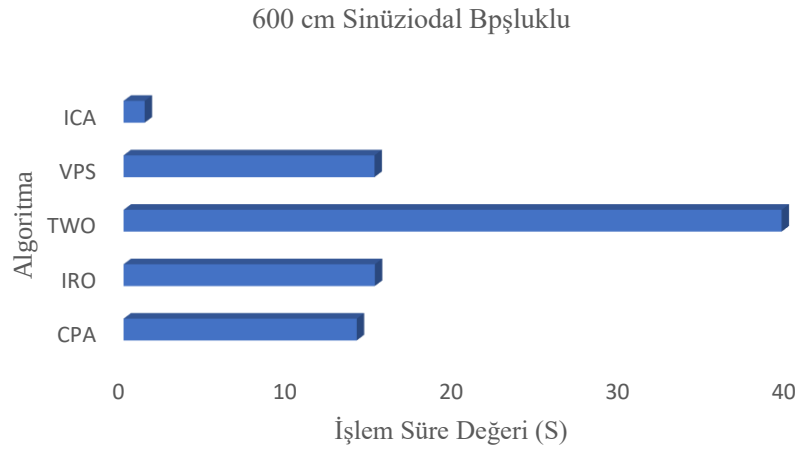
Bu Şekil 70'de, 600 cm uzunluğundaki ve dairesel boşluklara sahip petek kirişin tasarımında, en kısa işlem süresi ICA algoritması ile elde edilmiştir. Onu IRO takip etmiş, ardından VPS algoritması gelmektedir. Daha sonra CPA algoritmasının işlem süresi dikkat çekerken, en uzun işlem süresi TWO algoritmasında gözlemlenmektedir.



Şekil 71. 600 cm'lik altıgen petek kiriş için işlem süresi

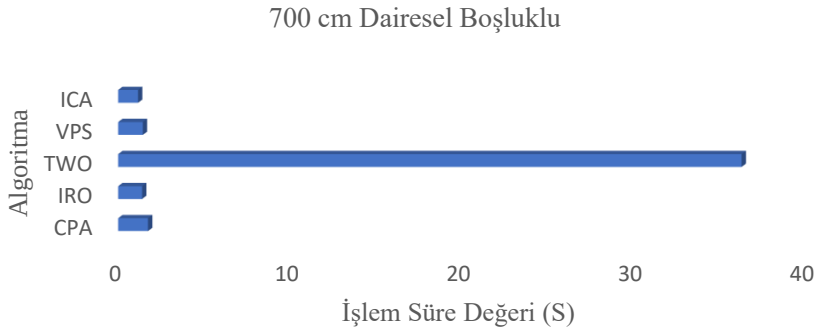
Şekil 71'e göre, 600 cm uzunluğundaki ve altıgen boşluklara sahip kirişin tasarımında, en uzun işlem süresi TWO algoritmasında gözlemlenmiştir. Bunu

sırasıyla VPS ve ICA algoritmaları takip etmektedir. Daha düşük işlem süreleri ise CPA ve IRO algoritmalarında elde edilmiştir.



Şekil 72. 600 cm'lik sinüzoidal petek kiriş için işlem süresi

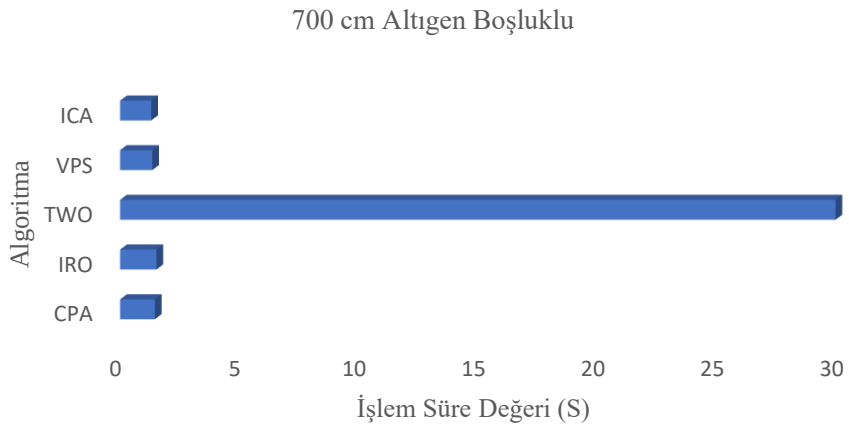
Yukarıda sunulan ve 600 cm uzunluğundaki, sinüziodal boşluklara sahip petek kiriş tasarımına ait işlem sürelerini gösteren Şekil 72'e göre, VPS ve IRO algoritmaları orta seviyede işlem süresi sunmaktadır. ICA algoritması en düşük işlem süresini verirken, TWO algoritması en yüksek işlem süresine ulaşmaktadır. Bu durum, farklı algoritmaların işlem süresi bakımından önemli değişkenlikler gösterebildiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 73. 700 cm'lik dairesel petek kiriş için işlem süresi

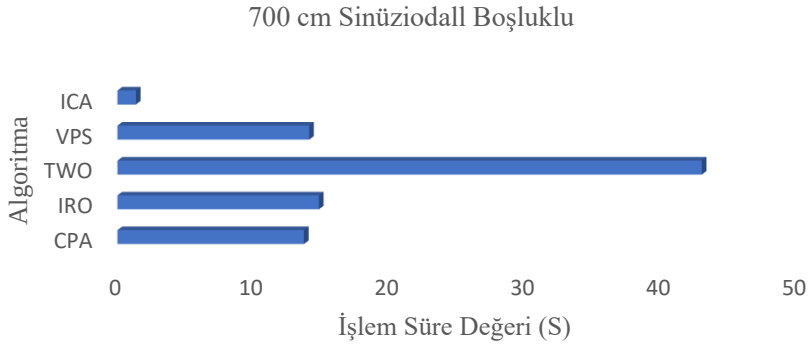
Şekil 73'te, 700 cm uzunluğundaki ve dairesel boşluklara sahip petek kirişin tasarımında en düşük işlem süreleri ICA ve IRO algoritmalarında elde edilir. Bu iki algoritma, tasarım sürecinde yüksek hızlarıyla öne çıkmaktadır. Orta seviyede işlem

süresi VPS ve CPA algoritmalarında gözlemlenirken, TWO algoritması en yüksek işlem süresiyle listenin sonunda yer almaktadır.



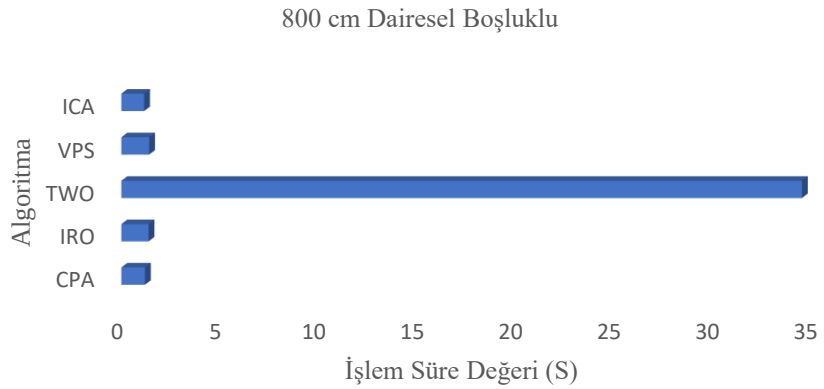
Şekil 74. 700 cm'lik altıgen petek kiriş için işlem süresi

Şekil 74'e göre, 700 cm uzunluğundaki ve altıgen boşluklara sahip petek kirişin tasarımında, en uzun işlem süresi ise belirgin şekilde TWO algoritmasına aittir. Buna karşılık, en kısa sürelerde sonuç veren algoritmalar ICA, VPS, CPA ve IRO olmaktadır.



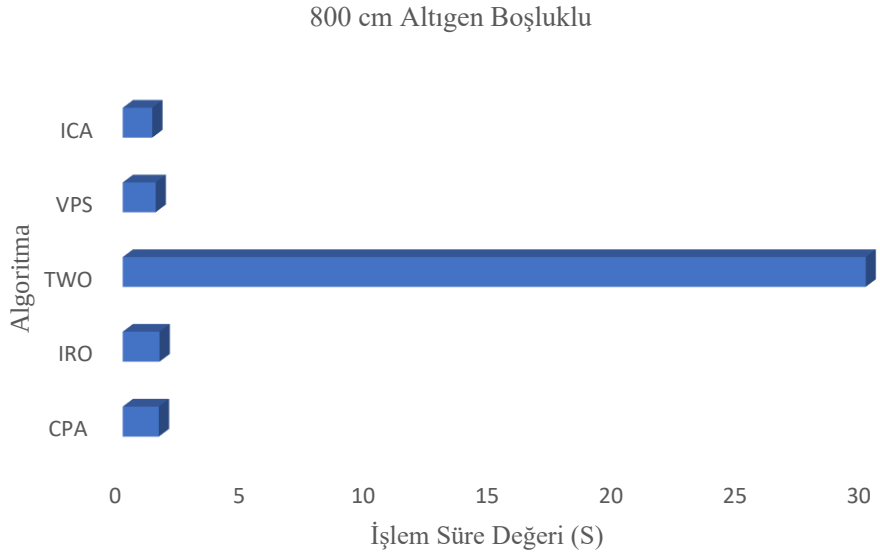
Şekil 75. 600 cm'lik sinüzoidal petek kiriş için işlem süresi

Yukarıda sunulan ve 700 cm uzunluğundaki, sinüziodal boşluklara sahip petek kiriş tasarımına ait işlem sürelerini gösteren Şekil 75'e göre, TWO algoritması en yüksek işlem süresine sahiptir. IRO, VPS ve CPA algoritmaları orta seviyelerde işlem süreleri sunmaktadır. ICA algoritması ise en düşük işlem süresini vermektedir. Bu durum, farklı algoritmaların işlem süreleri bakımından belirgin farklar gösterebildiğini göstermektedir.



Şekil 76. 800 cm'lik dairesel petek kiriş için işlem süresi

Şekil 76'a göre, 800 cm uzunluğunda ve dairesel boşluklara sahip petek kirişin tasarımında en kısa süreli çözümler ICA ve CPA algoritmaları tarafından üretilmiştir. Bu iki yöntem, işlem süresi bakımından oldukça etkin bir performans sergilemektedir. IRO ve VPS algoritmaları daha uzun sürelerde sonu verirken, en yüksek işlem süresi ise TWO algoritmasında elde edilmiştir.

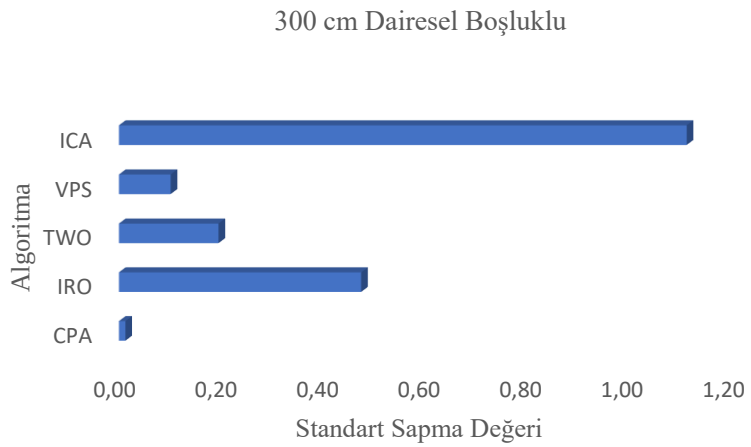


Şekil 77. 800 cm'lik altıgen petek kiriş için işlem süresi

Şekil 77'e göre, 800 cm uzunluğundaki ve altıgen boşluklara sahip petek kirişin tasarımında, işlem süresi açısından daha kısa sürede sonuç üreten algoritmalar ise ICA, VPS, CPA ve IRO olmaktadır. Buna karşılık, en uzun işlem süresi TWO algoritmasına aittir.

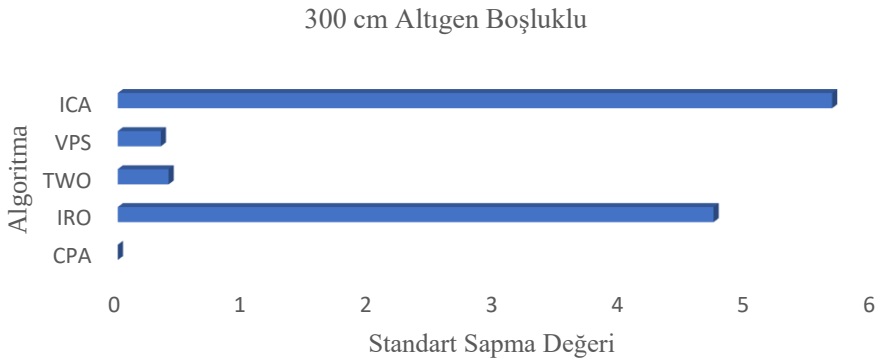
3.4. Standart Sapma Tahkiki

Standart sapma, algoritmaların sonuçlarının kararlılığını ve optimum çözüme olan yakınlığını değerlendirmek için kullanılan önemli bir istatistiksel ölçüttür. Farklı boşluk türlerine sahip petek kirişlerin tasarım sürecinde, düşük standart sapma değeri, çözüm tekrarlanabilirliğini ve hesaplama performansının stabilitesini göstermektedir. Bu bölümde, her bir boşluklu tipi ve her bir kiriş uzunluğu için ayrı ayrı olmak üzere, her algoritma özelinde 20 bağımsız çalışmanın sonuçları esas alınarak standart sapma hesaplanmaktadır. Hesaplamalar, tek bir kabul görmüş formül üzerinden gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz, beş algoritmanın farklı tasarım koşullarındaki kararlılık düzeylerini karşılaştırmayı ve hangi algoritmanın daha güvenilir sonuçlar verdiğini belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu değerlendirme, mühendislik uygulamaları için algoritmaların istatistiksel güvenilirliğini ortaya koyarak, doğru algoritma seçimine katkı sağlamaktadır.



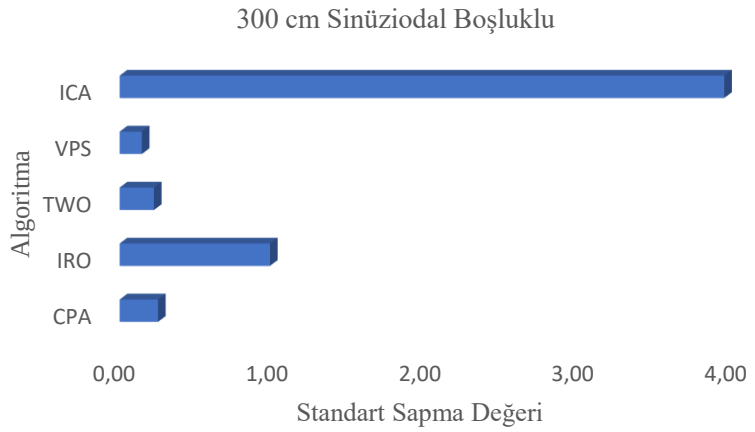
Şekil 78. 300 cm'lik dairesel petek kiriş için standart sapma değerleri mukayesesi

300 cm uzunluğunda, dairesel boşluklara sahip bir petek kirişin standart sapma değerleri Şekil 78'e göre, en düşük sapmaya sahip algoritma CPA olmaktadır. Ardından, VPS algoritması gelir. TWO algoritması orta düzeyde değişkenlik göstermektedir. Daha yüksek sapma değeriyle IRO algoritması izler ve en yüksek sapma ICA algoritmasında gözlemlenmiştir.



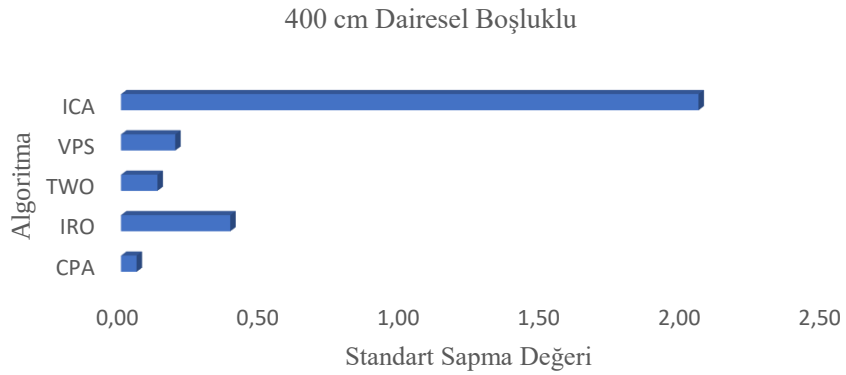
Şekil 79. 300 cm'lik altıgen petek kiriş için standart sapma değerleri mukayesesi

300 cm uzunluğunda, altıgen boşluklara sahip bir petek kirişin standart sapma değerleri Şekil 79'a göre, en yüksek sapma ICA algoritmasında gözlemlenir. Onu takip eden IRO algoritması daha yüksek bir sapma değeri sergilemektedir. TWO ve VPS algoritmalarının sapma değerleri benzer şekilde daha düşük olup en düşük sapmaya sahip algoritma ise CPA olmaktadır.



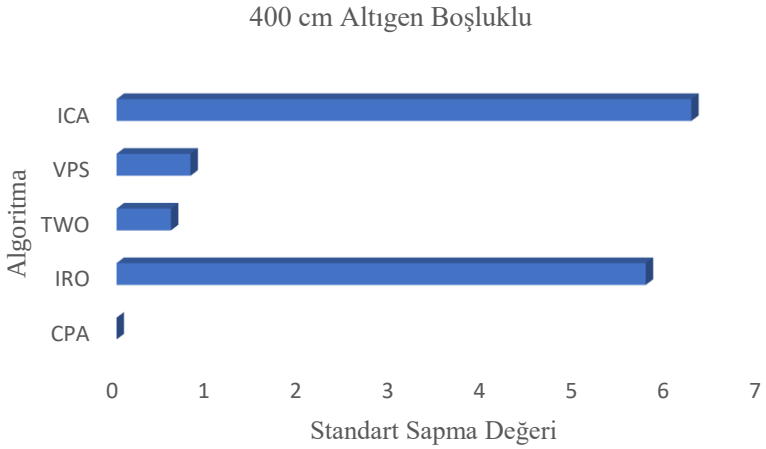
Şekil 80. 300 cm'lik sinüzoidal petek kiriş için standart sapma değerleri mukayesesi

Yukarıda sunulan ve 300 cm uzunluğundaki, sinüzoidal boşluklara sahip petek kiriş tasarımına ait standart sapma değerlerini gösteren Şekil 80'a göre, ICA algoritması en yüksek sapmayı üretmektedir. IRO, CPA, TWO ve VPS algoritmaları sırasıyla daha düşük sapma değerleri sunmaktadır.



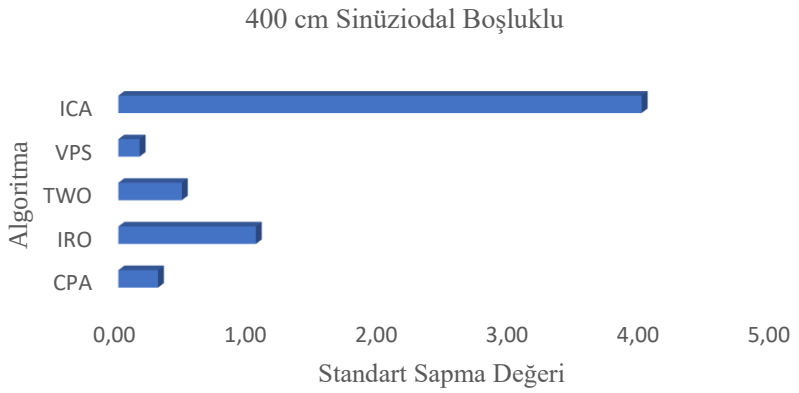
Şekil 81. 400 cm'lik dairesel petek kiriş için standart sapma değerleri mukayesesi

400 cm uzunluğunda, dairesel boşluklara sahip bir petek kirişin standart sapma değerleri Şekil 81'e göre, en düşük sapmaya sahip algoritma CPA olmaktadır. Onu takip eden TWO algoritması da düşük sapma değeri sergilir. VPS algoritması orta düzeyde bir değişkenlik göstermektedir. Daha yüksek sapma değeriyle IRO algoritması gelirken, en yüksek sapma ICA algoritmasında gözlemlenir.



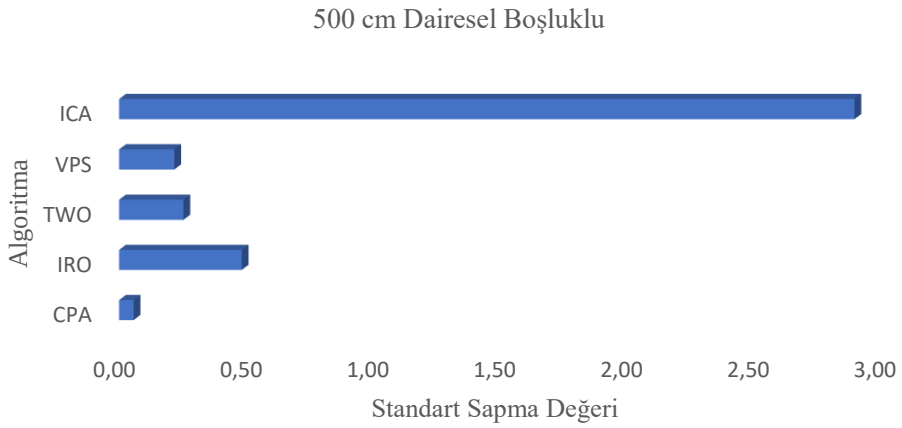
Şekil 82. cm'lik altıgen petek kiriş için standart sapma değerleri mukayesesi

400 cm uzunluğunda, altıgen boşluklara sahip bir petek kirişin standart sapma değerleri Şekil 82'e göre, en yüksek sapma ICA algoritmasında gözlemlenmektedir. Bunu takip eden IRO algoritması, yüksek sapma değeriyle dikkat çekmektedir. VPS algoritması daha düşük bir sapma değeri vermekte olup TWO algoritması ise benzer şekilde düşük sapma sergilemektedir. En düşük standart sapma ise CPA algoritmasında verilmektedir.



Şekil 83. 400 cm'lik sinüzoidal petek kiriş için standart sapma değerleri mukayesesi

400 cm uzunluğundaki, sinüzoidal boşluklara sahip petek kiriş tasarımına ait standart sapma değerleri Şekil 83'e göre, ICA algoritması en yüksek standart sapmaya vermektedir. IRO, CPA, TWO ve VPS algoritmaları sırasıyla daha düşük sapma değerleri sunmaktadır.

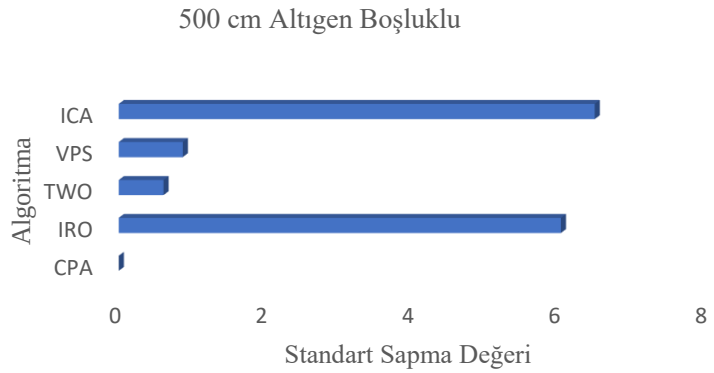


Şekil 84. 500 cm cm'lik dairesel petek kiriş için standart sapma değerleri mukayesesi

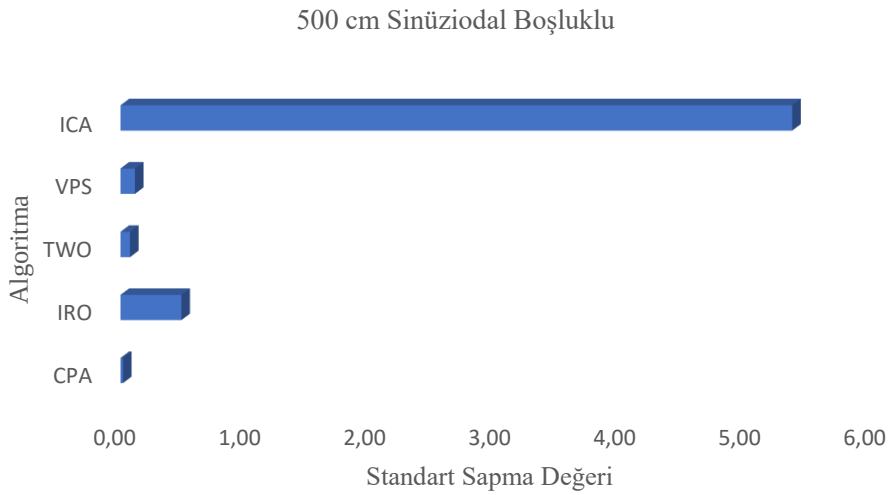
500 cm uzunluğunda, dairesel boşluklara sahip bir petek kirişin standart sapma değerleri Şekil 84'e göre, en yüksek sapma ICA algoritmasında verilmektedir. Ardından IRO algoritması değeriyle yer almakta, TWO ve VPS algoritmalarının standart sapma değerleri benzer şekilde daha düşük olmaktadır. En düşük s standart apma değeri ise CPA algoritmasında gözlemlenmiştir.

500 cm uzunluğunda, altıgen boşluklara sahip bir petek kirişin standart sapma değerleri Şekil 85'e göre, en düşük sapma CPA algoritmasında gözlemlenmiştir. Bunu

takip eden TWO algoritması, düşük sapma değeriyle dikkat çekmektedir. Sonra VPS ve TWO algoritmaları ise daha yüksek sapma gösteren bir performans sergilemektedir. En yüksek sapma ise ICA algoritmasında verilmektedir.



Şekil 85. 500 cm'lik altıgen petek kiriş için standart sapma değerleri mukayesesi

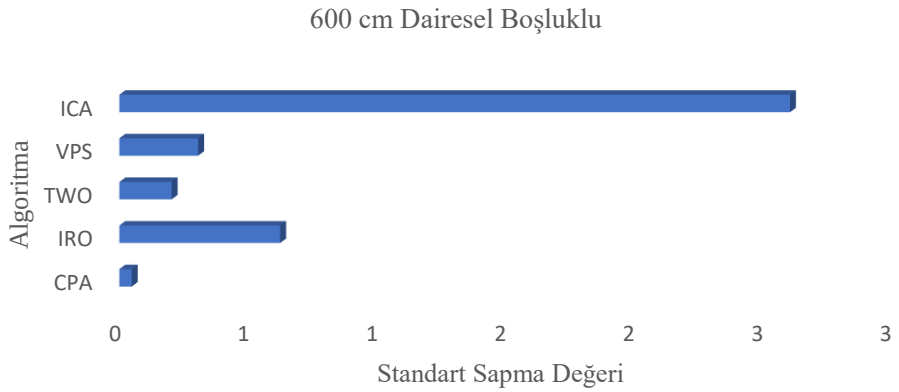


Şekil 86. 500 cm'lik sinüzoidal petek kiriş için standart sapma değerleri mukayesesi

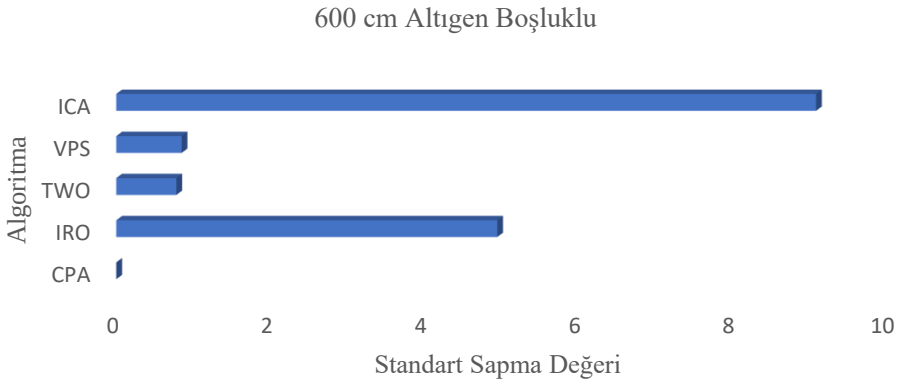
Şekil 86'a göre 500 cm uzunluğundaki, sinüzoidal boşluklara sahip petek kiriş tasarımına ait standart sapma değerlerinin analizi, ICA algoritması en yüksek standart sapma değerini üretmektedir, ardından IRO algoritması gelmektedir. CPA algoritması ise en düşük sapmayı sunmakta olup diğer algoritmalar TWO ve VPS ise orta seviyede sapmalar göstermektedir.

600 cm uzunluğunda, dairesel boşluklara sahip bir petek kirişin standart sapma değerleri Şekil 87'e göre, en düşük sapma CPA algoritmasında verilmektedir. Ardından TWO algoritması daha yüksek standart sapma değeriyle yer almaktadır. VPS

algoritması ise orta seviyede bir sapma değeri sergileyerek diğer algoritmalardan farklı bir performans göstermektedir. Daha yüksek sapma değeriyle IRO algoritması gelmektedir. En yüksek sapma ise ICA algoritmasında gözlemlenmektedir.



Şekil 87. 600 cm'lik dairesel petek kiriş için standart sapma değerleri mukayesesi

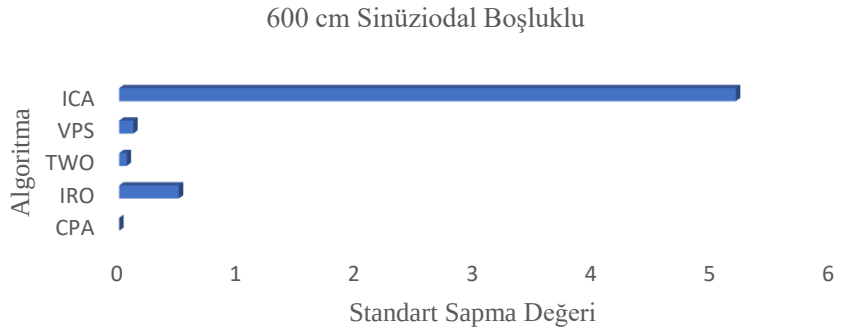


Şekil 88. 600 cm'lik altıgen petek kiriş için standart sapma değerleri mukayesesi

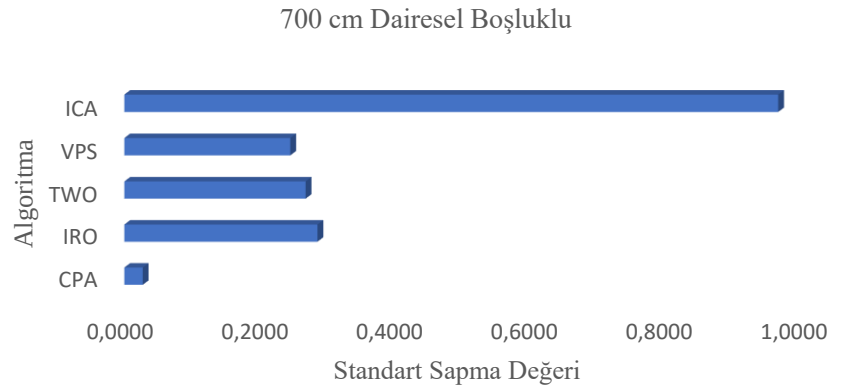
600 cm uzunluğunda, altıgen boşluklara sahip bir petek kirişin standart sapma değerleri Şekil 88'e göre, en yüksek standart sapma ICA algoritmasında gözlemlenmektedir. Bunu takip eden IRO algoritması yüksek sapma değeriyle dikkat çekilir. VPS algoritması orta düzeyde bir standart sapma sergileyerek farklı bir performans sunmaktadır. TWO algoritması ise daha düşük sapma gösteren bir sonuç ortaya koymaktadır. En düşük standart sapma değeri ise CPA algoritmasında verilir.

600 cm uzunluğundaki, sinüzoidal boşluklara sahip petek kiriş tasarımına ait Şekil 89'a göre standart sapma değerlerinin analizi: CPA algoritması, en düşük standart sapma değerine sahip olurken, ICA algoritması en yüksek sapma değerini

sunmaktadır. Diğer algoritmalar ise, IRO, TWO ve VPS, orta düzeyde standart sapma göstermektedir.



Şekil 89. 600 cm'lik sinüzoidal petek kiriş için standart sapma değerleri mukayesesi

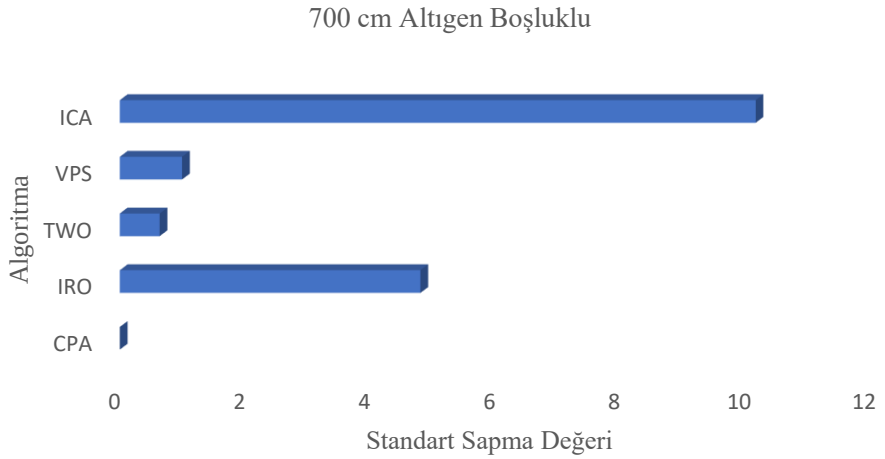


Şekil 90. 700 cm'lik dairesel petek kiriş için standart sapma değerleri mukayesesi

700 cm uzunluğunda, dairesel boşluklara sahip bir petek kirişin standart sapma değerleri Şekil 90'a göre, en yüksek sapma ICA algoritmasında gözlemlenmektedir. Ardından, IRO algoritması daha düşük sapma değeriyle yer almaktadır. TWO algoritması ise orta düzeyde bir sapma sergilemektedir. Daha düşük standart sapma değeriyle VPS algoritması yer almakta, ve en standart düşük sapma CPA algoritmasında gözlemlenir.

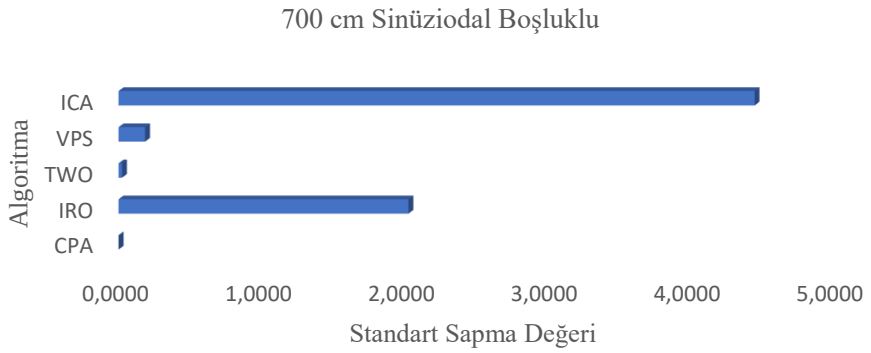
700 cm uzunluğunda, altıgen boşluklara sahip bir petek kirişin standart sapma değerleri Şekil 91'e göre, en düşük standart sapma CPA algoritmasında gözlemlenir. Ardından, TWO algoritması düşük standart sapma değeriyle dikkat çekmektedir. VPS algoritması orta düzeyde bir sapma sergilemekte, IRO algoritması ise daha yüksek

sapma gösteren bir performans sergilir. En yüksek standart sapma değeri ise ICA algoritmasında verilmektedir.

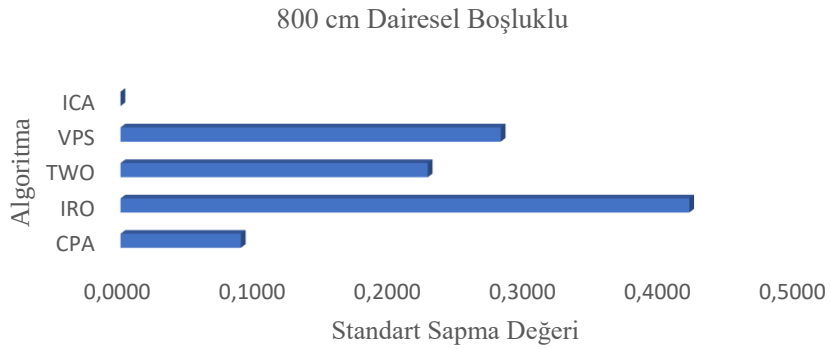


Şekil 91. 700 cm'lik altıgen petek kiriş için standart sapma değerleri mukayesesi

700 cm uzunluğundaki sinüzoidal boşluklara sahip petek kiriş tasarımında Şekil 92'de , CPA algoritması sıfır standart sapma değeri ile en yüksek tutarlılığı sağlamakta olup diğer algoritmaların performansları arasında önemli farklar gözlemlenmektedir. IRO algoritması, en yüksek standart sapma değerini verirken, ICA algoritması da yüksek s standart apma değeri ile öne çıkmaktadır. VPS ve TWO algoritmaları ise orta seviyede sapmalar göstererek, daha dengeli sonuçlar elde etmektedirler. Bu durum, her bir algoritmanın sonuçlarındaki çeşitliliği yansıtmaktadır.

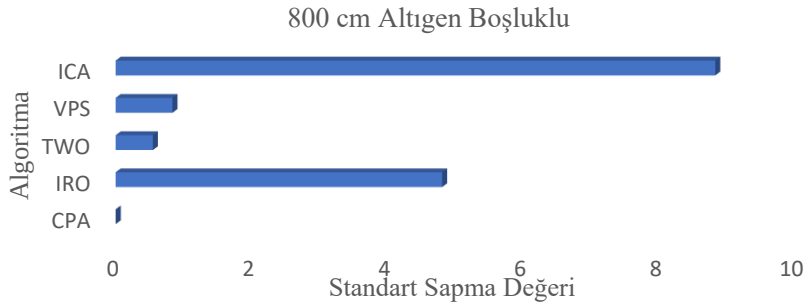


Şekil 92. 700 cm'lik sinüzoidal petek kiriş için standart sapma değerleri mukayesesi



Şekil 93. 800 cm'lik dairesel petek kiriş için standart sapma değerleri mukayesesi

800 cm uzunluğunda, dairesel boşluklara sahip bir petek kirişin standart sapma değerleri Şekil 93'e göre, en düşük sapma ICA algoritmasında verilmektedir. Onu takip eden algoritmalar arasında CPA ve TWO, görece düşük standart sapma değerleriyle öne çıkmaktadır. VPS algoritması orta seviyede bir standart sapma değeri sergilemektedir. En yüksek standart sapma ise IRO algoritmasında gözlemlenir.



Şekil 94. 800 cm cm'lik altıgen petek kiriş için standart sapma değerleri mukayesesi

800 cm uzunluğunda, altıgen boşluklara sahip bir petek kirişin standart sapma değerleri Şekil 94'e göre, en yüksek standart sapma ICA algoritmasında gözlemlenmektedir. Bunu takiben, IRO algoritması da oldukça yüksek bir standart sapma değeri sergilir. VPS algoritması orta düzeyde bir değişkenlik göstermektedir. En düşük standart sapma değerleriyle CPA ve TWO algoritmaları öne çıkmaktadır.

3.4.1. Boşluk Tiplerine Göre Göreli Standart Sapma (RSD) Analizi

Standart sapma analizinin sonuçlarını desteklemek için, her algoritma için tüm mevcut uzunluklarda (dairesel ve altıgen boşlukları için altı uzunluk ve sinüzoidal boşlukları için beş uzunluk) ortalama göreli standart sapma (RSD) hesaplanır. Tablo 19'a göre gösterildiği gibi, her boşluk tipi için, tüm kiriş uzunluklarına ait standart sapma değerlerinin ortalaması alınarak, algoritmaların genel kararlılığı tarafsız şekilde değerlendirilmiştir. CPA algoritması tüm boşluk tiplerinde en düşük RSD'yi gösterir ve yinelemeler boyunca yüksek derecede istatistiksel kararlılık ve tutarlılık göstermektedir. VPS algoritması da, özellikle sinüzoidal boşlukları için düşük RSD sonuçları elde ederek güvenilirliğini destekledi. Buna karşılık, ICA algoritması, özellikle sinüzoidal boşlukları için en yüksek RSD değerlerini gösterir ve sonuçlarda açık bir dağılımı yansıttır. Bu değerler birlikte, algoritmik performansın genel değerlendirmesinin doğruluğunu artırır ve tasarım karar alma sürecinde kararlılığın, amaç fonksiyonu ve işlem süresiyle birlikte önemini vurgular.

Tablo 19. Boşluk tipi ve algoritmalara göre göreli standart sapma (RSD) yüzdeleri

Boşluk Tipi	CPA	IRO	TWO	VPS	ICA
RSD Dairesel (%)	1.016	1.779	1.497	1.142	2.478
RSD Altıgen (%)	0.955	1.695	1.407	1.065	2.393
RSD Sinüzoidal (%)	0.267	1.009	0.175	0.205	4.191

3.5. Algoritmaların Performansının Analizi ve Karşılaştırılması

Korelasyon katsayısı, sistemdeki farklı değişkenler arasındaki ilişkiyi ölçen önemli bir matematiksel araçtır. Özellikle, işlem süresi ve standart sapma gibi değişkenlerin, algoritmanın çıktısı üzerindeki etkilediğini anlamada kullanılmaktadır. Korelasyon katsayısı, bu değişkenler arasındaki ilişkiyi güçlü bir şekilde göstererek, algoritmanın nasıl performans gösterdiğini anlamamıza yardımcı olur. Örneğin, korelasyon katsayısı 1'e yakınsa, bu, değişkenler arasında güçlü bir ilişki olduğunu ve doğru sonuçlar verdiğini gösterir. Eğer korelasyon katsayısı 0 veya negatifse, bu durum, algoritmanın daha fazla geliştirilmesi gerektiğine işaret edebilir. Standart sapma, en önemli göstergedir ve algoritmanın sonuçlarının ne kadar değişken olduğunu ölçer. Daha düşük bir standart sapma, algoritmanın daha güvenilir ve doğru sonuçlar ürettiğini gösterir. Bu da mühendislik uygulamalarında doğruluğun kritik

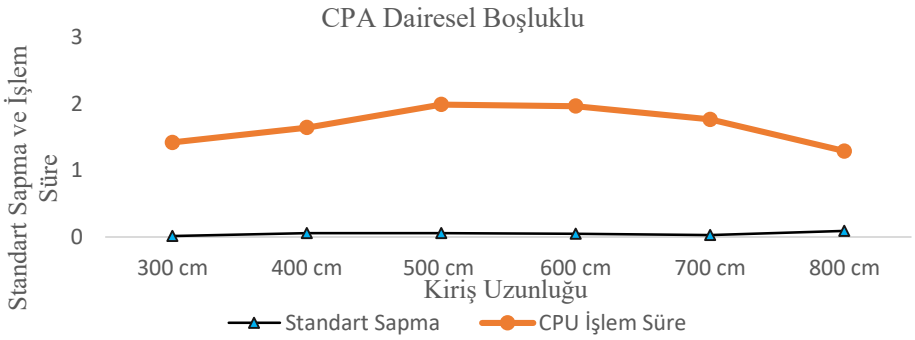
olduğu durumlarda tercih edilir. Diğer taraftan, işlem süresi, algoritmanın büyük ve karmaşık veri setlerini işleme kapasitesini belirleyen bir faktördür. Bu nedenle, algoritmanın doğru sonuçlar sunarken işlem süresini ne kadar kısa tutabileceği de önemlidir. Algoritmanın işlem süresi ile standart sapma değerleri arasındaki ilişkinin olup olmadığını korelasyon analizi yapılmıştır.

3.5.1. CPA Değerlendirilmesi

Dairesel, altıgen ve sinüzoidal boşluklara sahip petek kirişin CPA algoritması ile sonuçlar için işlem süresi ile standart sapma değerleri arasındaki korelasyon katsayısı analizi ve ortlama standart sapma ile ortlama işlem süresi bu bölümde hesaplanmıştır.

3.5.1.1. CPA Dairesel Boşluklu

Dairesel boşluklara sahip petek kirişin CPA algoritmasına ait sonuçları içeren Tablo 20 ve Şekil 95'ye göre, işlem süresi ile standart sapma arasındaki ilişki analiz edilmiştir. CPA algoritması, farklı uzunluklar boyunca dalgalı bir performans sergilemektedir. Standart sapma değerlerinin uzunluklara göre değişkenlik göstermesi, algoritmanın performansının uzunluk değişiminden kısmen etkilendiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, işlem süreleri tüm uzunluklarda makul düzeylerde kalmış ve iyi bir verimliliği sergilenmiştir. Negatif ve zayıf korelasyon katsayısı, işlem süresi ile standart sapma arasında güçlü bir ilişki olmadığını, dolayısıyla performans dalgalanmalarının belirli bir doğrusal kalıba uymadığını göstermektedir.



Şekil 95. CPA Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi

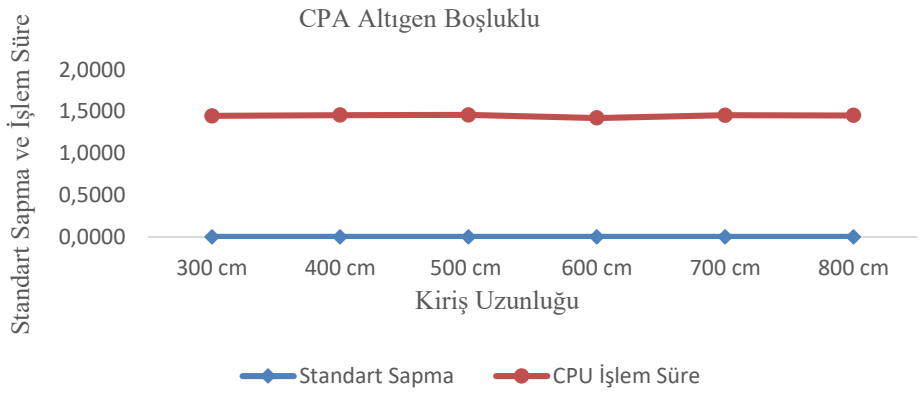
Tablo 20. CPA dairesel boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları

Petek Uzunluğu	Standart Sapma	İşlem Süre
300	0.0127	1.4049
400	0.0552	1.5869
500	0.0571	1.9312
600	0.0481	1.9145
700	0.0274	1.7367
800	0.0891	1.1992
Ortalama	0.0401	1.7148
Korelasyon	-0.2483	

Genel olarak, CPA algoritması dairesel boşluklarda özellikle kısa ve orta uzunluklarda etkili çözümler üretebilme potansiyeline sahiptir. Dairesel boşluklu kirişlerde L = 500 cm için standart sapma en yüksek değeri alırken L = 800 cm en düşük değeri almıştır.

3.5.1.2. CPA Altıgen Boşluklu

CPA algoritmasına ait ve altıgen boşluklu petek kiriş için elde edilen verilere dayanan Tablo 21 ve Şekil 96 kapsamında, işlem süresi ile standart sapma arasındaki korelasyon değerlendirilmiştir. CPA algoritması, altıgen boşluklu kirişler üzerinde oldukça kararlı ve tutarlı bir performans sergilemektedir. Farklı uzunluklardaki kirişlerde elde edilen standart sapma değerlerinin sıfıra çok yakın veya sıfır olması, algoritmanın çıktılarında yüksek düzeyde bir istikrar sağladığını göstermektedir. Bu durum, özellikle hesaplamaların birbirine oldukça yakın sonuçlar üretmesiyle ilişkilendirilebilir. Öte yandan, işlem süreleri de tüm uzunluklar boyunca belirli bir denge içerisinde kalmış ve genel olarak verimli bir işlem süreci ortaya koymuştur. Zaman değerlerinde görülen küçük farklılıklar, performans açısından kayda değer bir değişime neden olmamıştır.



Şekil 96. CPA Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi

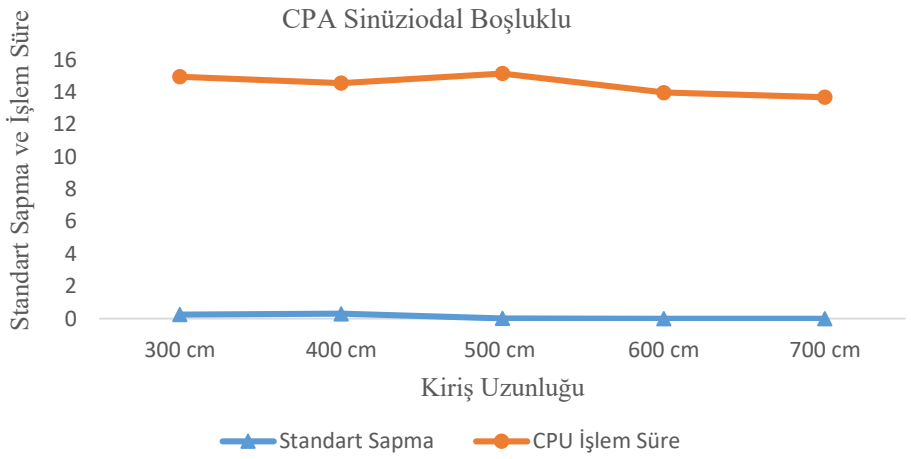
Tablo 21. CPA altıgen boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları

Petek Uzunluğu	Standart Sapma	İşlem Süre
300 cm	0.0011	1.4449
400 cm	0	1.4558
500 cm	0	1.4589
600 cm	0.0007	1.4215
700 cm	0	1.4541
800 cm	0	1.4524
Ortalama	0.0004	1.4470
Korelasyon =		-0.6586

Standart sapma ile işlem süresi arasında elde edilen güçlü negatif korelasyon katsayısı (-0.6586), işlem süresi uzadıkça varyasyonun azaldığını, yani algoritmanın daha stabil çıktılar verme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Bu da CPA algoritmasının altıgen boşluklu kirişlerde, özellikle uzunluk farkı gözetmeksizin, oldukça güvenilir çözümler sunduğunu ortaya koymaktadır.

3.5.1.3. CPA Sinüzoidal Boşluklu Kiriş

Sinüzoidal boşluklara sahip petek kirişin CPA algoritmasına ait sonuçları içeren Tablo 22 ve Şekil 97'ye göre, işlem süresi ile standart sapma arasındaki ilişki analiz edilmiştir. CPA algoritması, sinüzoidal boşluklu petek kirişlerde uygulandığında, dalgalı bir seyir izlemektedir. Özellikle kısa uzunluklarda (L = 300 cm ve 400 cm) standart sapma değerlerinin nispeten yüksek çıkması, çözüm sonuçlarının bu uzunluklarda daha değişken olduğunu göstermektedir. Ancak kiriş boyu arttıkça, özellikle 600 cm ve 700 cm uzunluklarında standart sapma değerlerinin sıfıra inmesi, algoritmanın bu bölgede daha kararlı çıktılar üretebildiğine işaret etmektedir. İşlem süreleri ise tüm uzunluklar boyunca makul seviyelerde seyretmiş, algoritmanın işlem yükü açısından dengeli bir yapı sergilediği gözlemlenmiştir.



Şekil 97. CPA sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi

Ortalama işlem süresi 14 saniyenin biraz üzerinde kalmış, bu da performans-verimlilik dengesinin korunduğunu göstermektedir. Öte yandan, pozitif yönde ve zayıf bir korelasyon katsayısı (0.2193) elde edilmiştir.

Tablo 22. CPA sinüzoidal boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları

Petek Uzunluğu (cm)	Standart Sapma	İşlem Süre
300	0.2515	14.7190
400	0.3031	14.2665
500	0.0197	15.1436
600	0.0000	13.9883
700	0.0000	13.6980
Ortalama	0.1149	14.3631
Korelasyon	0.2193	

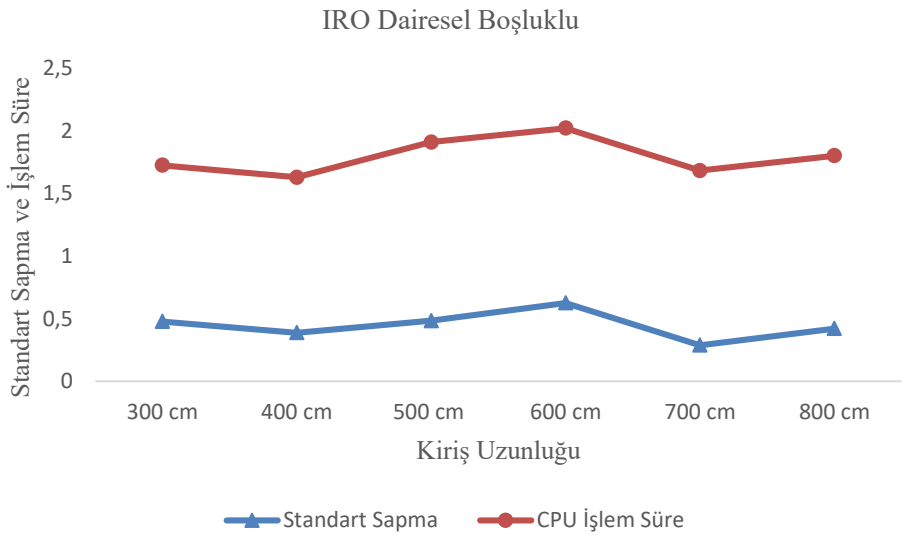
Bu durum, işlem süresi ile sonuçların tutarlılığı arasında belirgin ve doğrudan bir ilişki bulunmadığını, yani algoritmanın istikrar düzeyinin işlem süresinden bağımsız olarak şekillenebildiğini ortaya koymaktadır. Genel olarak bakıldığında, CPA algoritması sinüzoidal boşluklu kirişlerde belirli uzunluklarda etkili çözümler sunabilirken, kısa uzunluklarda elde edilen değişkenlik performans analizinde dikkate alınması gereken bir unsur olarak öne çıkmaktadır.

3.5.2. IRO Değerlendirilmesi

IRO algoritması ile sinüzoidal boşluklara sahip petek kirişin sonuçlar için işlem süresi ile standart sapma değerleri arasındaki korelasyon katsayısı analizi ve ortlama standart sapma ile ortlama işlem süresi bu bölümde hesaplanmıştır..

3.5.2.1. IRO Dairesel Boşluklu Kiriş

IRO algoritmasına ait dairesel boşluklu petek kiriş için elde edilen verilere dayanan Tablo 23 ve Şekil 98 kapsamında, işlem süresi ile standart sapma arasındaki korelasyon değerlendirilir. IRO algoritması, dairesel boşluklu kirişlerde sergilediği performansla dikkat çekmektedir. Farklı uzunluklardaki kirişler üzerinde elde edilen standart sapma değerleri, genel olarak birbirine yakın ve orta düzeyde dağılmıştır.



Şekil 98. IRO Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi

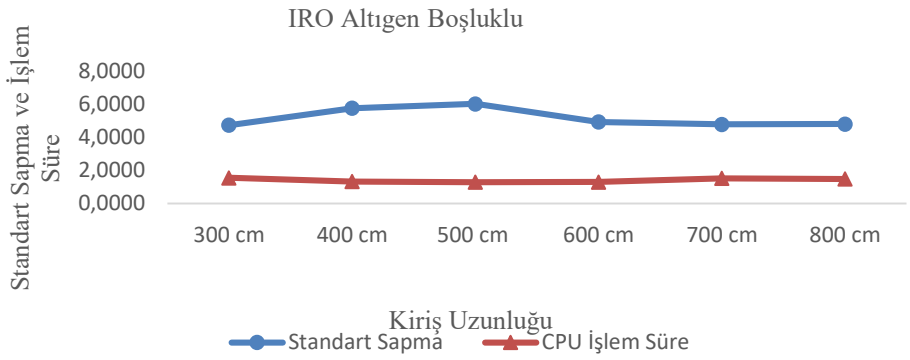
Tablo 23. IRO dairesel boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları

Petek Uzunluğu	Standart Sapma	İşlem Süre
300 cm	0.4764	1.2477
400 cm	0.3868	1.2413
500 cm	0.4837	1.4254
600 cm	0.6252	1.3958
700 cm	0.2871	1.3945
800 cm	0.4210	1.3802
Ortalama	0.4518	1.3409
Korelasyon =		0.1431

Bu durum, algoritmanın belirli bir tutarlılık içinde çalıştığını, ancak sonuçlarda belli ölçüde dalgalanmaların da mevcut olduğunu göstermektedir. Özellikle 600 cm uzunluğundaki kirişte gözlemlenen yüksek standart sapma değeri, bu boyda algoritmanın daha değişken çözümler ürettiğini ortaya koymaktadır. İşlem süreleri bakımından değerlendirildiğinde, tüm uzunluklarda 1.2 ile 1.4 saniye aralığında kalan işlem süreleri, algoritmanın zamansal verimliliğini koruduğunu göstermektedir. İşlem süresi açısından belirgin bir sapma olmadan, istikrarlı bir süre profili izlenmiştir. Elde edilen pozitif ve zayıf korelasyon katsayısı (0.1431) ise, işlem süresi ile standart sapma arasında doğrudan ve güçlü bir bağ olmadığını ifade etmektedir. Bu da, algoritmanın işlem süresindeki değişimlerin sonuçların tutarlılığına belirgin şekilde yansımadığını göstermektedir. Genel itibariyle, IRO algoritması dairesel boşluklu kirişlerde dengeli işlem süreleriyle birlikte orta seviyede bir kararlılık sergilemekte, ancak bazı uzunluklarda istikrarın zayıfladığı durumlar da gözlemlenmektedir.

3.5.2.2. IRO Altıgen Boşluklu Kiriş

Altıgen boşluklara sahip petek kirişin IRO algoritmasına ait sonuçları içeren Tablo 24 ve Şekil 99'ye göre, işlem süresi ile standart sapma arasındaki ilişki analiz edilir. IRO algoritması, altıgen boşluklara sahip kirişlerin tasarımında oldukça değişken bir performans sergilemiştir. Standart sapma değerleri, yüksek seviyelerde seyretmiş ve özellikle 500 cm uzunluğunda maksimum seviyeye ulaşmıştır. Bu durum, algoritmanın çözümlerinde kararlılığın düşük olduğu ve sonuçların büyük oranda dalgalandığına işaret etmektedir. İşlem süreleri açısından ise algoritma oldukça istikrarlı bir profil çizmiştir.



Şekil 99. IRO Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi

Tüm uzunluklar boyunca süreler 1.28 ile 1.54 saniye arasında kalarak zamansal verimliliğini korumuştur. Bu durum, çözüm istikrarsızlıklarına rağmen işlem süresi bakımından algoritmanın güvenilirliğini ortaya koymaktadır.

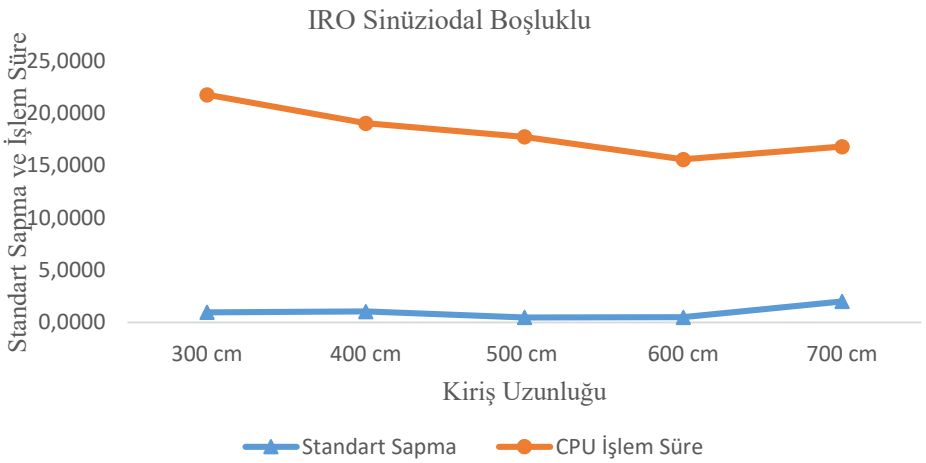
Tablo 24. IRO altıgen boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları

Petek Uzunluğu	Standart Sapma	İşlem Süre
300 cm	4.7370	1.5442
400 cm	5.7583	1.3285
500 cm	6.0281	1.2890
600 cm	4.9294	1.2912
700 cm	4.7865	1.5190
800 cm	4.7990	1.4826
Ortalama	5.2479	1.3944
Korelasyon =		-0.7413

Öte yandan, elde edilen negatif ve güçlü korelasyon katsayısı (-0.7413), işlem süresi ile standart sapma arasında ters yönlü bir ilişki bulunduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, işlem süresi kısaldıkça sonuçların daha dengesiz hale geldiği söylenebilir. Bu da, hızın artmasının doğruluk ve kararlılık üzerinde olumsuz bir etki oluşturabileceğini düşündürmektedir. Genel olarak bakıldığında, IRO algoritması altıgen boşluklu kirişlerde hızlı çalışmasına rağmen, yüksek sapmalar ve düşük stabilite nedeniyle sonuçların güvenilirliği açısından dikkatli değerlendirme gerektiren bir tablo çizmektedir.

3.5.2.3. IRO Sinüzoidal Boşluklu Kiriş

IRO algoritmasına ait sinüzoidal boşluklu kiriş için elde edilen verilere dayanan Tablo 25 ve Şekil 100 kapsamında, işlem süresi ile standart sapma arasındaki değerlendirilir. IRO algoritması, sinüzoidal boşluklu petek kirişlerde uygulandığındadalgalı ve değişken bir performans ortaya koymuştur. Standart sapma değerleri, belirli uzunluklarda dikkat çekici biçimde artış göstermiş; özellikle 700 cm uzunluğunda en yüksek sapma değeri gözlemlenmiştir. Bu durum, algoritmanın uzunluk arttıkça bazı durumlarda çözüm kararlılığını yitirebildiğini göstermektedir. Buna karşılık, işlem süreleri genel olarak makul düzeylerde kalmış, 14.7 ile 20.7 saniye arasında değişmiştir.



Şekil 100. IRO Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi

En uzun işlem süresi kısa uzunlukta (300 cm) gözlenmiş olup daha uzun boyutlarda süreler görece azalmıştır. Bu bağlamda, algoritmanın hesaplama süresi açısından kabul edilebilir bir dengede çalıştığı söylenebilir. Negatif korelasyon katsayısı (-0.2366), işlem süresi ile standart sapma arasında zayıf ters yönlü bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 25. IRO sinüzoidal boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları

Petek Uzunluğu	Standart Sapma	İşlem Süre
300	0.9851	20.7713
400	1.0513	17.9801
500	0.4866	17.2514
600	0.5026	15.0786
700	2.0183	14.7944
Ortalama	1.0088	17.1752
Korelasyon	-0.2366	

Bu da, işlem süresindeki artışın her zaman daha kararlı sonuçlar doğurmadığını, ancak zaman zaman sapmalarda azalma eğilimi gösterdiğini düşündürmektedir. Sonuç olarak, IRO algoritması sinüzoidal boşluklu sistemlerde çeşitli uzunluklarda çalışabilme kapasitesine sahip olsa da, özellikle bazı boyutlarda kararlılığın dalgalanması algoritmanın stabilite açısından sınırlı bir güvenilirlik sunduğunu göstermektedir.

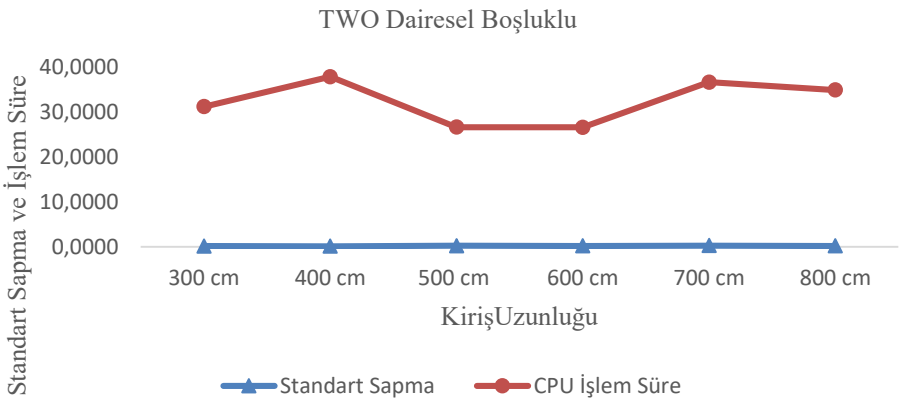
3.5.3. TWO Değerlendirilmesi

Dairesel, altıgen ve sinüzoidal boşluklara sahip petek kirişin TWO algoritması ile sonuçlar için işlem süresi ile standart sapma değerleri arasındaki korelasyon katsayısı analizi ve ortlama standart sapma ile ortlama işlem süresi bu bölümde hesaplanmıştır.

3.5.3.1. TWO Dairesel Boşluklu Kiriş

Dairesel boşluklara sahip petek kirişin algoritmasına ait sonuçları içeren Tablo 26 ve Şekil 101'ye göre, işlem süresi ile standart sapma arasındaki ilişki analiz edilir.

TOW algoritması, dairesel boşluklara sahip kirişlerin tasarımında genel olarak dengeli bir performans profili sunmuştur. Standart sapma değerleri, tüm uzunluklar boyunca belirgin bir aşırılık göstermeksizin orta düzeylerde seyretmiştir. Bu durum, algoritmanın sonuçlar arasında büyük sıçramalar yapmadığını, ancak tam anlamıyla istikrarlı da olmadığını düşündürmektedir.



Şekil 101. TWO Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi

İşlem süresi açısından ise farklı uzunluklarda önemli dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Özellikle 400 cm uzunluğunda süre belirgin şekilde yükselmiş (yaklaşık 37.6 saniye), buna karşın 500 ve 600 cm uzunluklarında daha düşük sürelerle işlem gerçekleştirilmiştir. Bu da, TOW algoritmasının hesaplama yükünün, uzunluktan ziyade belirli yapısal faktörlere daha duyarlı olduğunu işaret etmektedir.

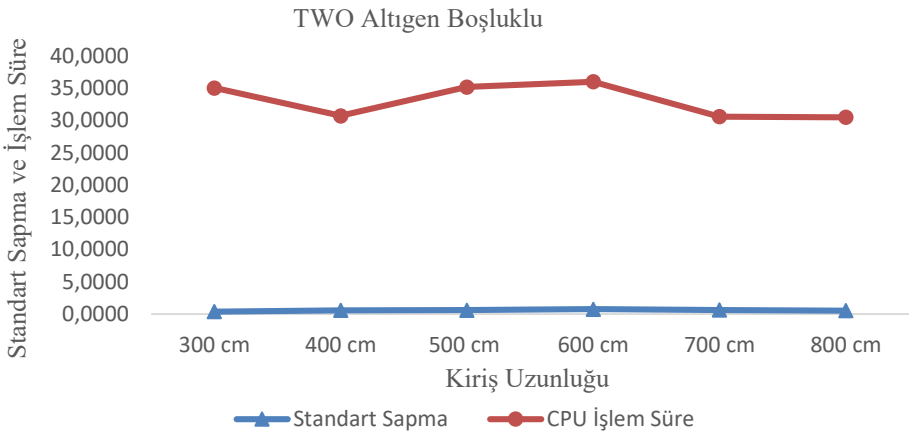
Tablo 26. TWO dairesel boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları

Petek Uzunluğu	Standart Sapma	İşlem Süre
300 cm	0.1958	30.9165
400 cm	0.1288	37.6291
500 cm	0.2535	26.3163
600 cm	0.2032	26.3426
700 cm	0.2694	36.2899
800 cm	0.2274	34.5856
Ortalama	0.2101	31.4989
Korelasyon =		-0.2837

Negatif korelasyon katsayısı (-0.2837), işlem süresi ile standart sapma arasında zayıf ve ters yönlü bir ilişki olduğunu göstermektedir. Yani, işlem süresi uzadığında her zaman daha tutarlı sonuçlar alınmadığı gibi, kısa süreli işlemler de yüksek kararlılık garantisi vermemektedir. Genel değerlendirmede, TOW algoritması dairesel boşluklu sistemlerde makul sürelerle ve kabul edilebilir düzeyde çözüm kararlılığı sunmaktadır. Ancak performans tutarlılığı açısından bazı uzunluklarda küçük oynamalar dikkat çekmektedir. İşlem süresi açısından ise, bazı uzunluklarda oldukça yüksek zaman değerleri gözlenmiş olup bu da bazı durumlarda algoritmanın hesaplama açısından yoğun kaynak tüketebileceğini göstermektedir. Negatif korelasyon katsayısı (-0.2837), uzunluk ile doğruluk arasında zayıf ve ters yönlü bir ilişki olduğunu, ancak bu ilişkinin belirleyici olmadığını göstermektedir. Sonuç olarak, TWO algoritması dairesel boşluklu kirişlerde genel olarak dengeli bir performans sergilemekte; doğruluk ve işlem süresi açısından uzunluklara bağlı olarak değişkendir ancak kabul edilebilir düzeydedir.

3.5.3.2. TWO Altıgen Boşluklu

TWO algoritmasına ait altıgen boşluklu petek kiriş için elde edilen verilere dayanan Tablo 27 ve Şekil 102 kapsamında, işlem süresi ile standart sapma arasındaki korelasyon değerlendirilir. Altıgen boşluklu petek kirişlerin tasarımında TWO algoritması kullanıldığında, standart sapma değerlerinde belirli bir dalgalanma gözlemlenmektedir.



Şekil 102. TWO Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi

TWO algoritması, altıgen boşluklara sahip kirişlerin optimizasyon sürecinde karışık ama öngörülebilir bir davranış profili sergilemiştir. Standart sapma değerlerinin genel ortalaması 0.60 civarında seyretmiş, bu da sonuçların kısmen tutarlı fakat tam anlamıyla sabit olmadığını göstermektedir.

Tablo 27. TWO altıgen boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları

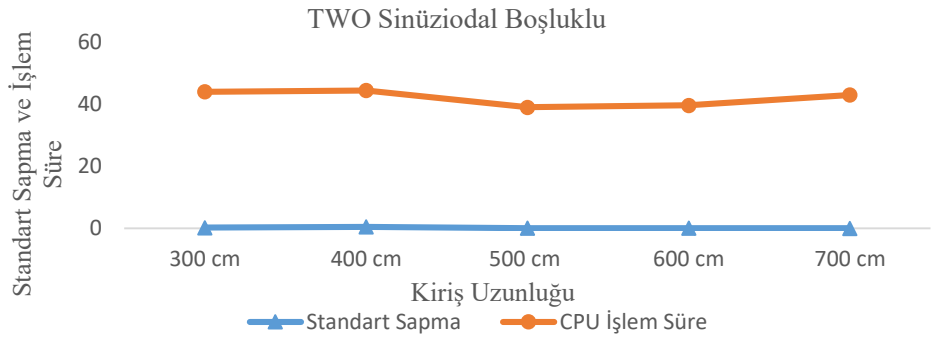
Petek Uzunluğu	Standart Sapma	İşlem Süre
300 cm	0.4045	34.6233
400 cm	0.5914	30.1228
500 cm	0.6093	34.5792
600 cm	0.7777	35.2154
700 cm	0.6344	29.955
800 cm	0.5469	29.9633
Ortalama	0.6035	32.8991
Korelasyon =		0.0944

Özellikle 600 cm uzunluğunda kararsızlık artarken, 300 ve 400 cm gibi daha kısa uzunluklarda daha kontrollü bir dağılım dikkat çekmektedir. İşlem süreleri açısından ise genel olarak yaklaşık 30 ila 35 saniye arasında dalgalanan bir zaman aralığı gözlenmiştir. Bu değerler, algoritmanın hesaplamalarda belirli bir dengeyi koruduğunu, ancak uzunluk değişimlerinden zaman zaman etkilendiğini göstermektedir. Pozitif korelasyon katsayısı (+0.0944), işlem süresi ile standart sapma arasında çok zayıf bir doğrusal ilişki olduğunu ifade etmektedir. Bu durum, zaman artışının her zaman sonuç kararlılığına katkı sağlamadığını ortaya koyar.

Genel olarak değerlendirildiğinde, TWO algoritması altıgen boşluklarla çalışırken hesaplama süresinde istikrar gösterse de, sonuç kararlılığında zaman zaman değişkenlik göstermektedir. Ancak bu dalgalanmalar, yapısal çözümlerin uygulanabilirliğini sınırlayacak seviyede değildir.

3.5.3.3. TWO Sinüzoidal Boşluklu Kiriş

Sinüzoidal boşluklara sahip kirişin TWO algoritmasına ait sonuçları içeren Tablo 28 ve Şekil 103'ye göre, işlem süresi ile standart sapma arasındaki ilişki analiz edilir. TWO algoritmasının sinüzoidal boşluklara sahip kirişlerdeki performansı, değişen uzunluklara karşı duyarlı ve seçici bir karaktere sahiptir. Standart sapma değerleri, özellikle kısa uzunluklarda (400 cm ve altı) görece yüksek seyrederken, daha uzun kirişlerde belirgin bir azalma göstermektedir. Bu durum, algoritmanın uzunluk arttıkça daha kararlı sonuçlar üretme eğiliminde olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 103. TWO Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi

Tablo 28. TWO sinüzoidal boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları

Petek Uzunluğu	Standart Sapma	İşlem Süre
300	0.2249	43.7465
400	0.4854	43.8691
500	0.0765	38.8883
600	0.0634	39.5314
700	0.0237	42.9164
Ortalama	0.1748	41.7903
Korelasyon	0.6112	

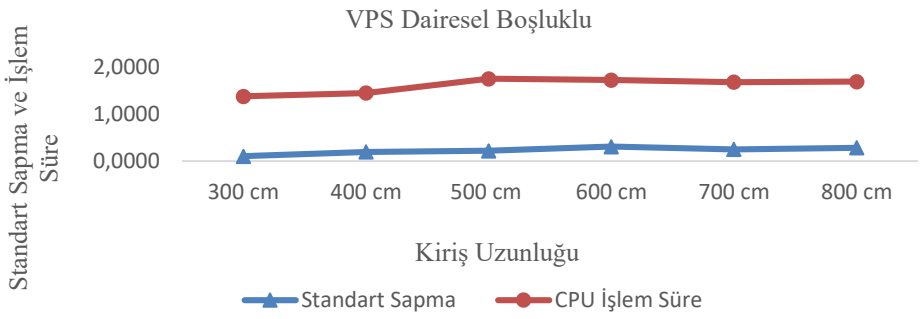
İşlem süresi bakımından algoritma yüksek düzeyde hesaplama kaynaklı yoğunluk sergilemektedir. Ortalama işlem süresi 40 saniyenin üzerinde seyretmiş ve tüm uzunluklar boyunca bu süreler büyük ölçüde birbirine yakın kalmıştır. Bu durum, hesaplama yükünün sabitliğini ve algoritmanın süreklilik gösteren bir işlem yapısını işaret etmektedir.Pozitif yöndeki güçlü korelasyon katsayısı (+0.6112), standart sapma ile işlem süresi arasında belirgin bir doğrusal ilişki olduğunu göstermektedir. Bu da, hesaplama süresinin artmasının sonuç kararlılığı üzerinde doğrudan etkili olabileceğine işaret eder. Sonuç olarak, TWO algoritması sinüzoidal boşluklarda yüksek işlem süresi karşılığında artan kararlılık sunma potansiyeline sahip bir yapıdadır. Özellikle uzun boşluklarda daha stabil sonuçlara ulaşılabilmesi, bu algoritmanın dalgalı geometrilerle uyumlu çalışabileceğini düşündürmektedir.

3.5.4. VPS Değerlendirilmesi

VPS algoritması ile sinüzoidal boşluklara sahip petek kirişin sonuçlar için işlem süresi ile standart sapma değerleri arasındaki korelasyon katsayısı analizi ve ortlama standart sapma ile ortlama işlem süresi bu bölümde hesaplanmıştır.

3.5.4.1. VPS Dairesel Boşluklu Kiriş

Dairesel boşluklara sahip petek kirişin algoritmasına ait sonuçları içeren Tablo 29 ve Şekil 104'ye göre, işlem süresi ile standart sapma arasındaki ilişki analiz edilir. Standart sapma değerleri düşükten yükseğe doğru istikrarlı bir eğilim gösterirken, bu artış belirli bir yapısal sınır çerçevesinde kalmaktadır. Özellikle 300 cm'de düşük sapma değeriyle başlayan tablo, 600 cm civarında zirve yaparak, algoritmanın orta uzunluklarda kararlılığını bir miktar kaybedebileceğini düşündürmektedir.



Şekil 104. VPS Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi

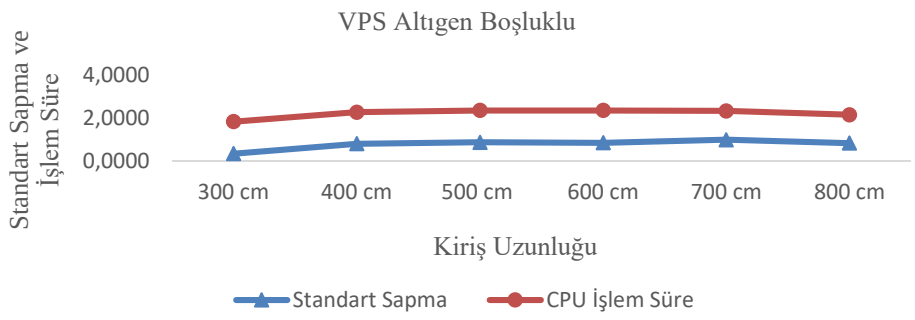
Tablo 29. VPS dairesel boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları

Petek Uzunluğu	Standart Sapma	İşlem Süre
300 cm	0.1018	1.2787
400 cm	0.192	1.2575
500 cm	0.2177	1.5377
600 cm	0.3063	1.4217
700 cm	0.2467	1.4366
800 cm	0.2814	1.4114
Ortalama	0.2129	1.3864
Korelasyon =		0.5683

İşlem süreleri ise genel olarak 1.2 ile 1.5 saniye aralığında sabitlenmiş olup hesaplama açısından verimli ve hızlı bir yapı ortaya koymaktadır. Sürelerdeki bu homojenlik, algoritmanın boyut değişikliklerine karşı hesaplama performansını büyük ölçüde koruduğunu göstermektedir. Pozitif yönlü korelasyon katsayısı (+0.5683), işlem süresi arttıkça sonuçların daha dağılma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Bu durum, VPS algoritmasının yüksek işlem süresiyle birlikte daha değişken sonuçlar verme potansiyeline sahip olduğunu ortaya koyar. Genel bir değerlendirmeyle, VPS algoritması dairesel boşluklu sistemlerde yüksek işlem hızı ve kabul edilebilir kararlılık dengesiyle, hızlı tasarım ihtiyaçları için etkin bir çözüm dairesel olma özelliğini taşımaktadır.

3.5.4.2. VPS Altıgen Boşluklu Kiriş

VPS algoritmasına ait altıgen boşluklu petek kiriş için elde edilen verilere dayanan Tablo 30 ve Şekil 105 kapsamında, işlem süresi ile standart sapma arasındaki korelasyon değerlendirilir.



Şekil 105. VPS Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi

Standart sapma değerlerinin 0.3423 ile 0.9904 arasında geniş bir dağılım göstermesi, algoritmanın özellikle uzunluk arttıkça sonuçlarda farklılık eğilimine girdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle 700 cm uzunluğunda gözlenen en yüksek sapma değeri, kritik boyutlarda daha dikkatli değerlendirme gerekliliğine işaret eder. Buna karşın işlem sürelerinin 1.3 ila 1.5 saniye bandında kalması, VPS'nin hesaplama yönünden tutarlı ve kontrollü ilerlediğini göstermektedir. Bu durum, algoritmanın karmaşık boşluk geometrilerine rağmen zaman bakımından yüksek verimliliğini koruduğunu doğrular niteliktedir. Altıgen boşluklarla petek kirişlerin tasarımında uygulanan VPS algoritması, yüksek seviyede çözüm çeşitliliği üretmiş, ancak beraberinde belirli bir kararsızlık izlenimi de bırakmıştır.

Tablo 30. VPS altıgen boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları

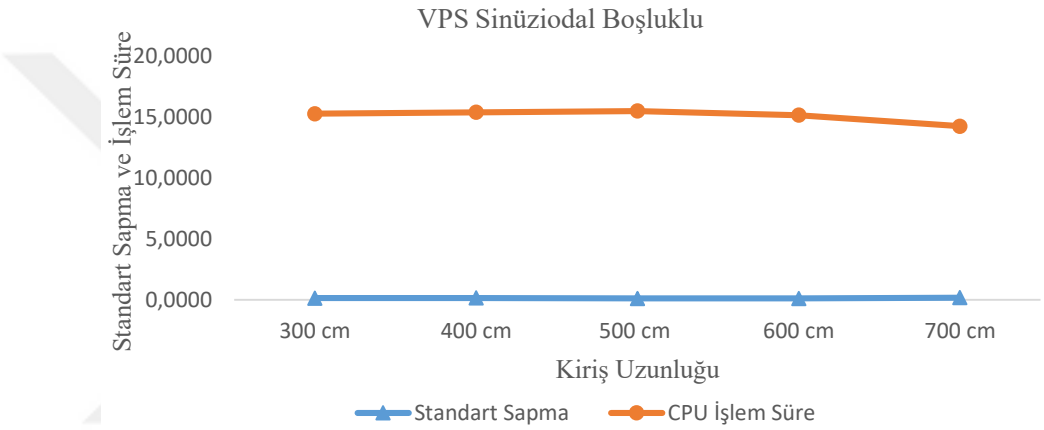
Petek Uzunluğu	Standart Sapma	İşlem Süre
300 cm	0.3423	1.4934
400 cm	0.805	1.4687
500 cm	0.8728	1.4875
600 cm	0.847	1.5097
700 cm	0.9904	1.344
800 cm	0.8345	1.3259
Ortalama	0.7715	1.4607
Korelasyon =		-0.4379

Negatif korelasyon katsayısı (-0.4379), kiriş uzunluğu arttıkça standart sapma eğiliminde bir azalma yaşanabileceğine işaret etse de, bu ilişki tam olarak güçlü bir negatif bağlamda değerlendirilemez. Yani, sistemin boyutsal değişimiyle birlikte sapma değerleri arasında belirgin ama mutlak olmayan bir ters orantı söz konusudur. Genel olarak, VPS algoritması altıgen boşluklu kirişlerde hızlı ve hesaplamasal olarak etkili çözümler sunmakla birlikte, sonuç kararlılığı açısından uzunluk bazlı farklılaşmalara karşı dikkatli analiz gerektiren bir yapı sergilemektedir.

3.5.4.3. VPS Sinüzoidal Boşluklu Kiriş

Sinüzoidal boşluklara sahip petek kirişin VPS algoritmasına ait sonuçları içeren Tablo 31 ve Şekil 106'ya göre, işlem süresi ile standart sapma arasındaki ilişki analiz edilir. Sinüzoidal boşluklarla optimize petek kirişlerde VPS algoritması, oldukça

dengeli ve öngörülebilir sonuçlar üretmiştir. Standart sapma değerleri 0.11 ile 0.18 aralığında kalmış, bu da çözüm dağılımının dar bir bantta yoğunlaştığını ve algoritmanın istikrarlı bir çözüm mimarisi sergilediğini göstermektedir. İşlem süresi açısından ise VPS, ortalama 15 saniyelik süreyle, hesaplama açısından kabul edilebilir bir süre zarfında çözüm üretmiş ve işlem süresi bakımından fiziksel karmaşıklığa rağmen stabil kalmayı başarmıştır. Özellikle 600 cm ve 700 cm uzunluklarındaki süre düşüşü, algoritmanın belirli boyutlarda daha etkin çalıştığını düşündürmektedir. Öne çıkan bir başka bulgu ise negatif korelasyon katsayısıdır (-0.7428). Bu değer, petek uzunluğu arttıkça varyansın azalması eğilimini güçlü bir şekilde göstermektedir.



Şekil 106. VPS Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi

Tablo 31. VPS sinüzoidal boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları

Petek Uzunluğu	Standart Sapma	İşlem Süre
300	0.1455	15.1366
400	0.1624	15.2416
500	0.1155	15.3906
600	0.1189	15.0541
700	0.1847	14.082
Ortalama	0.1454	14.9810
Korelasyon	-0.7428	

Bu bağlamda, uzun kirişlerde VPS algoritması daha tutarlı sonuçlara yönelme eğilimi göstermektedir, bu da mühendislik tasarımı açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Sonuç olarak, VPS algoritması sinüzoidal boşluklu sistemlerde

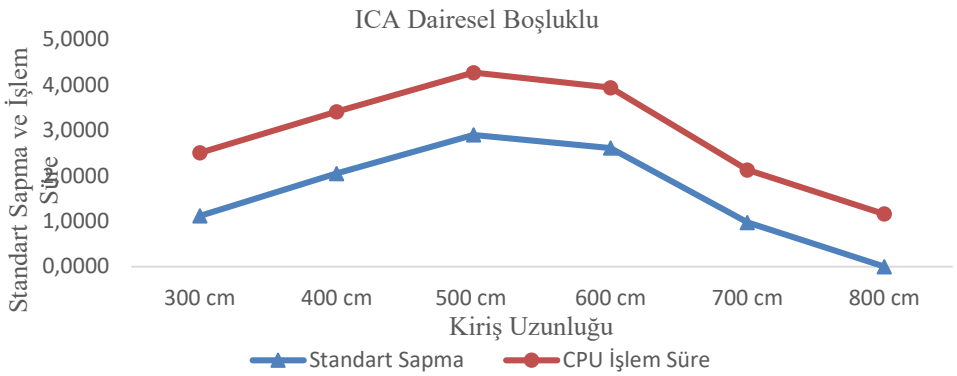
hesaplama zamanı ve standart sapma arasında yüksek denge kurarak, özellikle uzun kirişlerde kararlı ve güvenilir çözüm potansiyelini ön plana çıkarmıştır.

3.5.5. ICA Değerlendirilmesi

Dairesel, altıgen ve sinüzoidal boşluklara sahip petek kirişin ICA algoritması ile sonuçlar için işlem süresi ile standart sapma değerleri arasındaki korelasyon katsayısı analizi ve ortlama standart sapma ile ortlama işlem süresi bu bölümde hesaplanmıştır.

3.5.5.1. ICA Dairesel Boşluklu Kiriş

ICA algoritmasına ait dairesel boşluklu petek kiriş için elde edilen verilere dayanan Tablo 32 ve Şekil 107 kapsamında, işlem süresi ile standart sapma arasındaki korelasyon değerlendirilir.



Şekil 107. ICA Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi

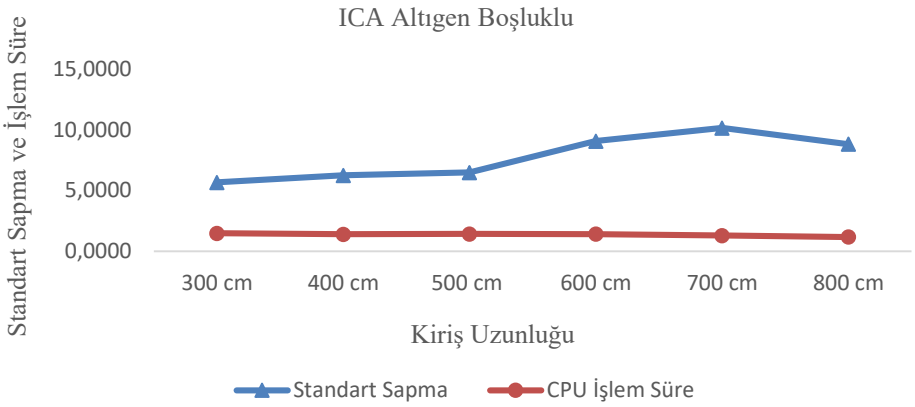
Tablo 32. ICA dairesel boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları

Petek Uzunluğu	Standart Sapma	İşlem Süre
300 cm	1.1171	1.3862
400 cm	2.0483	1.36
500 cm	2.8988	1.3697
600 cm	2.6089	1.3273
700 cm	0.9706	1.1566
800 cm	0	1.1584
Ortalama	1.9287	1.3200
Korelasyon =		0.7136

ICA algoritması, dairesel boşluklu petek kirişlerin tasarımında değişken ancak dikkat çekici bir çözüm davranışı sergilemiştir. Standart sapma değerleri 0 ile 2.89 arasında geniş bir spektrumda dağılmış olup bu durum algoritmanın farklı uzunluklarda tutarlılık seviyelerinin değişkenlik gösterdiğini işaret etmektedir. Özellikle 800 cm uzunluğunda sıfıra düşen varyans, çözüm uzayında mutlak bir yakınsama elde edildiğini düşündürmektedir. İşlem süresi açısından ise ICA, ortalama 1.32 saniyelik süre ile hızlı ve düşük maliyetli hesaplamalar gerçekleştirmiştir. Bu süre, algoritmanın hesaplama verimliliği açısından oldukça makul sınırlar içerisinde çalıştığını ortaya koymaktadır. Pozitif korelasyon katsayısı olan 0.7136, petek uzunluğu ile birlikte çözüm varyansının artma eğilimi taşıdığını göstermektedir. Bu durum, özellikle orta uzunluklardaki kirişlerde daha çeşitlenmiş sonuçlar elde edildiğine işaret ederken; kısa ve uzun uçlarda ise belirgin bir yakınsama eğilimi gözlemlenmiştir. Genel olarak bakıldığında, ICA algoritması dairesel boşlukların modellenmesinde çeşitliliğe açık ve hızlı bir çözüm yaklaşımı sunarken, uzunluk arttıkça sonuçların daha geniş bir dağılım eğilimine girdiği bir yapı ortaya koymuştur

3.5.5.2. ICA Altıgen Boşluklu Kiriş

Altıgen boşluklara sahip petek kirişin ICA algoritmasına ait sonuçları içeren Tablo 33 ve Şekil 108'ye göre, işlem süresi ile standart sapma arasındaki ilişki analiz edilir. Altıgen boşluklu petek kirişlerin tasarımında ICA algoritması, yüksek düzeyde değişkenlik içeren çözümler üretmiştir. Standart sapma değerlerinin 5.67 ile 10.13 arasında değiştiği bu durumda, algoritmanın çözüm kararlılığı düşük, ancak çeşitlilik kapasitesi oldukça yüksektir. Bu tür bir dağılım, tasarım seçeneklerinin genişliğini artırsa da optimum çözüme ulaşmada istikrar sorunu yaşanabileceğini düşündürmektedir. İşlem süreleri açısından değerlendirildiğinde, ortalama 1.41 saniyelik değer ile ICA, hesaplama yükünü düşük tutarak hızlı sonuçlar üretmeye devam etmektedir. Bu durum, yüksek varyanslara rağmen algoritmanın zaman verimliliğini koruduğunu göstermektedir. Korelasyon katsayısının -0.6543 gibi belirgin negatif bir değerde olması, petek uzunluğu arttıkça çözüm değişkenliğinin azalma eğilimi gösterdiğini ifade etmektedir. Bu da, daha uzun kirişlerde algoritmanın daha yakınsayan çözümler üretebildiğine dair önemli bir göstergedir.



Şekil 108. ICA Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi

Tablo 33. ICA altıgen boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları

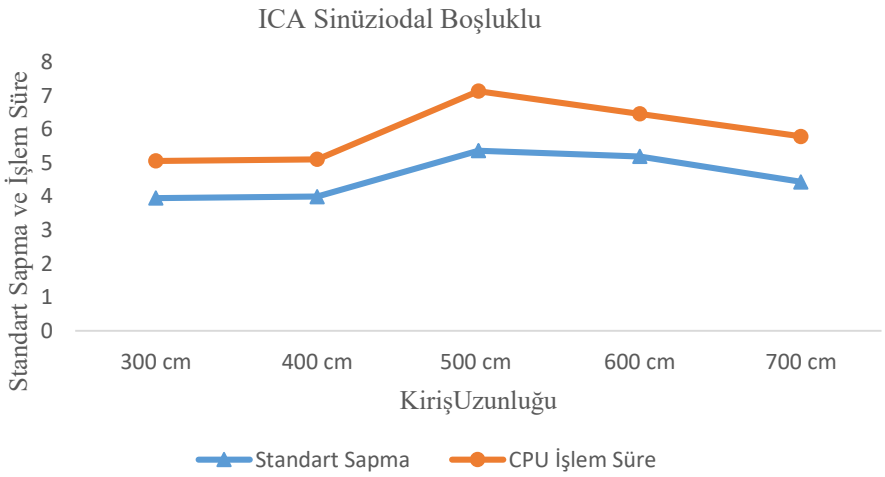
Petek Uzunluğu	Standart Sapma	İşlem Süre
300 cm	5.6746	1.485
400 cm	6.2525	1.4067
500 cm	6.49	1.4325
600 cm	9.0656	1.4281
700 cm	10.1331	1.3015
800 cm	8.8161	1.1874
Ortalama	7.5232	1.4108
Korelasyon =		-0.6543

Sonuç olarak, ICA algoritması altıgen boşluklu kirişlerin optimizasyonunda çözüm çeşitliliği sunan ancak değişkenliğe açık bir yapı sergilemektedir. Buna karşın, işlem süresi yönünden etkili ve hızlı bir performans ortaya koymuştur. Sonuç olarak, uzunluk değişimlerinin etkisi, özellikle daha uzun uzunluklar için daha belirgin olmasına rağmen, algoritmanın işlem süresi açısından verimli olduğu söylenebilir.

3.5.5.3. ICA Sinüzoidal Boşluklu Kiriş

ICA algoritmasına ait Sinüzoidal boşluklu petek kiriş için elde edilen verilere dayanan Tablo 34 ve Şekil 109 kapsamında, işlem süresi ile standart sapma arasındaki korelasyon değerlendirilir. Sinüzoidal boşluklara sahip petek kirişlerin tasarımında ICA algoritması, yüksek seviyede çözüm değişkenliği gösteren bir profil sergilemiştir. Standart sapma değerlerinin 3.95 ile 5.36 aralığında yer alması, algoritmanın bu boşluk tipinde istikrarlı değil, daha çok keşfe yönelik bir optimizasyon süreci yürüttüğünü

göstermektedir. Bu durum, farklı tasarım alternatiflerine ulaşmada güçlü bir potansiyel barındırsa da, belirli bir çözüm etrafında yoğunlaşmanın zor olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 109. ICA Standart sapma ile işlem süresi arasındaki korelasyon analizi

İşlem süresi açısından ortalama 1.32 saniyelik süre, ICA'nın hesaplama açısından hızlı sonuçlar sunmaya devam ettiğini göstermektedir. Özellikle yüksek varyanslarla birlikte bu hızın korunabilmesi, verimlilik açısından olumlu bir göstergedir. 0.7980 gibi oldukça yüksek bir pozitif korelasyon katsayısı, petek uzunluğu ile varyans arasında güçlü bir doğrusal ilişki bulunduğunu ortaya koymaktadır. Uzunluk arttıkça, algoritmanın ürettiği çözümler arasındaki sapmanın da arttığı gözlemlenmektedir. Bu durum, özellikle uzun boşluklu kirişlerde çözüm istikrarının daha fazla dalgalanabileceğini düşündürmektedir.

Tablo 34. ICA sinüzoidal boşluklu kiriş için standart sapma ve işlem süre sonuçları

Petek Uzunluğu	Standart Sapma	İşlem Süre
300	3.9564	1.1069
400	4.0000	1.107
500	5.3667	1.7704
600	5.1951	1.269
700	4.4354	1.3535
Ortalama	4.5907	1.3214
Korelasyon	0.7980	

Sonuç olarak ICA algoritması, sinüzoidal boşluklarla çalışırken yüksek keşif kapasitesini zaman açısından koruyarak ortaya koymakta, fakat çözüm istikrarı açısından daha dikkatli değerlendirme gerektirmektedir.

Yukarıda belirtilenlere göre, işlem süresi, standart sapma, korelasyon katsayısı açısından algoritmaların performansı ile her bir algoritmanın boşluk tipi (daire, altıgen, sinüzoidal) ve uzunluğa göre performansları arasında bir özet ve karşılaştırma sunulmuştur. Her bir algoritmanın performansı sadece boşluk tipiyle değil, aynı zamanda uzunlukla da etkilenmektedir. Uzunluk değişimiyle birlikte bazı algoritmaların performansları belirgin dalgalanmalar gösterirken, diğer algoritmalar uzunluk arttıkça daha stabil sonuçlar üretmektedir. Bu nedenle, algoritmaların performansını değerlendirirken hem boşluk tipi hem de uzunluk faktörlerinin birlikte göz önünde bulundurulması gerekir. Çünkü bu iki faktör, her bir algoritmanın doğruluğu ve işlem süresi üzerinde farklı etkiler yaratmaktadır.

3.6. Boşluk Geometrisi ve Kiriş Uzunluğunun Algoritma Performansına Etkisi: İşlem Süresi ve Standart Sapma Açısından Davranış Eğilimlerinin (Trend) İncelenmesi

Bu bölüm, petek kirişlerin optimizasyonunda kullanılan beş farklı algoritmanın (CPA, IRO, VPS, TWO ve ICA) performans eğilimlerini (trendlerini) ortaya koymayı amaçlamaktadır. Daha önceki bölümlerde elde edilen işlem süresi, standart sapma, bu değerlere ait ortalamalar ve algoritmalar arasındaki ilişkiyi gösteren korelasyon katsayıları bu analizde temel alınmıştır. Bu parametreler, algoritmaların farklı boşluk geometrileri ve kiriş uzunlukları altında nasıl davrandığını ortaya koymak için davranış eğilimi analizinde birer araç olarak değerlendirilmiştir.Her algoritma için ayrı ayrı olmak üzere, tüm boşluk türleri ve tüm kiriş uzunlukları göz önüne alınarak işlem süresi ve standart sapma açısından detaylı bir eğilim analizi sunulmuştur. Ayrıca, korelasyon katsayısı üzerinden bu iki parametre arasındaki ilişki de analiz edilmiştir. Bu kapsamlı analiz, algoritmaların mühendislik uygulamalarındaki uygunluklarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmeye imkân sağlamaktadır.

3.6.1. CPA Algoritması

CPA algoritması dairesel boşluk geometrisi ile uygulandığında standart sapma değerleri 0,0127 ile 0,0891 arasında değişmiş ve ortalama 0,0401 olarak hesaplanmıştır. İşlem süreleri ise 1,1992 ile 1,9312 saniye arasında değişmiş ve ortalama 1,7148 saniye olarak ölçülmüştür. Korelasyon katsayısı -0,2483 olup bu durum uzunluk arttıkça standart sapmada hafif bir azalma eğilimi gözlenmektedir. Altıgen boşluk geometrisi ile kullanıldığında standart sapma değerleri 0 ile 0,0011 arasında oldukça düşük seviyelerde kalmış ve ortalama sadece 0,0004 olarak belirlenmiştir. Bu değerler, CPA algoritmasının altıgen boşlukla birlikte algoritmanın kararlı sonuçlar ürettiği anlaşılmaktadır. İşlem süreleri ise 1,4215 ile 1,4589 saniye arasında sınırlı değişim göstermiş ve ortalama 1,4470 saniye olarak ölçülmüştür. Korelasyon katsayısı -0,6586 olup uzunluk arttıkça standart sapmanın daha da azaldığını ve stabilitenin güçlendiğini göstermektedir. Sinüzoidal boşluk geometrisi ile kullanıldığında standart sapma 0 ile 0,3031 arasında değişmiş ve ortalama 0,1149 olarak hesaplanmıştır. Özellikle 600 cm ve 700 cm uzunluklarında standart sapmanın 0 olması, yüksek düzeyde stabiliteye işaret etmektedir. İşlem süreleri ise 13,6980 ile 15,1436 saniye arasında daha yüksek seviyelerdedir ve ortalama 14,3631 saniye olarak hesaplanmıştır. Korelasyon katsayısı 0,2193 olup zayıf pozitif bir ilişki göstermektedir; yani uzunluk arttıkça standart sapmada sınırlı artış olabilmektedir.

3.6.2. IRO algoritması

IRO algoritması dairesel boşluk geometrisinde standart sapma değerleri 0,0369 ile 0,0644 arasında değişmiş ve ortalama 0,0516 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar algoritmanın dairesel boşlukla birlikte orta seviyede bir stabilite sunduğunu göstermektedir. İşlem süreleri 1,2040 ile 1,4192 saniye arasında sınırlı bir dağılım göstermekte olup ortalama 1,2967 saniyedir. Korelasyon katsayısı -0,3571 olarak tespit edilmiş olup bu durum uzunluk arttıkça standart sapmanın azaldığını ve stabilitenin arttığını göstermektedir. Altıgen boşluk geometrisi ile uygulandığında IRO algoritması 0,0001 ile 0,0006 arasında değişen çok düşük standart sapma değerleri üretmiş ve ortalama 0,0003 olarak hesaplanmıştır. Bu bulgular algoritmanın altıgen boşluklarla birlikte yüksek düzeyde stabilite sağladığını açıkça ortaya koymaktadır.

İşlem süresi 1,4086 ile 1,4475 saniye arasında değişmekte olup ortalama 1,4265 saniye olarak belirlenmiştir. Korelasyon katsayısı -0,6553 olup uzunluk arttıkça stabilitenin güçlendiğini ve varyansın azaldığını göstermektedir. Sinüzoidal boşluk geometrisinde ise IRO algoritması 0,0064 ile 0,1256 arasında değişen standart sapma değerleri üretmiş ve ortalama 0,0570 olarak hesaplanmıştır. Bu durum sinüzoidal boşluklarda diğer geometrilere göre daha az stabilite sağlandığını göstermektedir. İşlem süresi 14,1690 ile 14,9528 saniye arasında değişmiş ve ortalama 14,5696 saniye olarak ölçülmüştür. Korelasyon katsayısı -0,2875 olup bu da uzunlukla birlikte istikrarın hafif şekilde arttığını ve varyansın azaldığını göstermektedir.

3.6.3. TWO Algoritması

TWO algoritması dairesel boşluk geometrisi ile uygulandığında işlem süresi 14,843 ile 14,661 saniye arasında sınırlı bir değişim göstermiş ve ortalama 14,790 saniye olarak hesaplanmıştır. Bu değerler algoritmanın zaman açısından oldukça tutarlı çalıştığını göstermektedir. Standart sapma değerleri ise 0,0438 ile 0,0168 arasında değişmiş ve ortalama 0,0300 olarak kaydedilmiştir. Bu sonuçlar dairesel boşlukla birlikte TWO algoritmasının istikrarlı sonuçlar üretebildiğini göstermektedir. Uzunluk ile standart sapma arasındaki korelasyon katsayısı -0,7061 olup güçlü negatif ilişki algoritmanın uzunluk arttıkça daha kararlı sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır. Altıgen boşluk geometrisinde TWO algoritmasının işlem süresi 14,830 ile 14,561 saniye arasında değişmiş ve ortalama 14,732 saniye olarak ölçülmüştür. Bu değerler algoritmanın altıgen boşlukla birlikte zaman açısından yüksek düzeyde stabilite gösterdiğini göstermektedir. Standart sapma değerleri 0,0109 ile 0,0033 arasında dar bir aralıkta seyretmiş ve ortalama 0,0059 olarak hesaplanmıştır. Bu durum altıgen boşlukla birlikte TWO algoritmasının yüksek düzeyde istikrar sağladığını göstermektedir.

Ayrıca uzunluk ile standart sapma arasındaki korelasyon katsayısı -0,6119 olup bu da uzunluk arttıkça istikrarın belirgin şekilde iyileştiğine işaret etmektedir. Sinüzoidal boşluk geometrisinde TWO algoritmasının işlem süresi önemli ölçüde artarak 14,349 ile 15,017 saniye arasında değişmiş ve ortalama 14,750 saniye olarak belirlenmiştir. Bu durum sinüzoidal boşlukların işlem süresine olumsuz etki ettiğini ortaya koymaktadır. Standart sapma değerleri ise 0,2450 ile başlayıp 600 cm ve 700

cm uzunluklarında sıfıra ulaşmış ve ortalama 0,1126 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar sinüzoidal boşluklarla birlikte algoritmanın özellikle uzunluk arttıkça yüksek düzeyde stabilite sağladığını göstermektedir. Korelasyon katsayısı -0,1931 olup zayıf negatif ilişki dikkat çekmektedir ve bu durum istikrar artışının uzunlukla birlikte sınırlı düzeyde gerçekleştiğini göstermektedir.

3.6.4. VPS algoritması

VPS algoritması dairesel boşluk geometrisinde 0,0172 ile 0,1024 arasında değişen standart sapma değerleri üretmiş ve ortalama 0,0479 olarak hesaplanmıştır bu sonuçlar algoritmanın dairesel boşlukla birlikte orta düzeyde bir stabilite sunduğunu göstermektedir işlem süresi 1,4725 ile 1,6887 saniye arasında değişmekte olup ortalama 1,5619 saniyedir korelasyon katsayısı -0,0562 olarak belirlenmiş ve bu değer uzunluk ile varyans arasında zayıf bir negatif ilişki olduğunu göstermektedir altıgen boşluk geometrisinde VPS algoritması 0 ile 0,0017 arasında değişen çok düşük standart sapma değerleri üretmiş ve ortalama 0,0005 olarak hesaplanmıştır bu durum algoritmanın altıgen boşluklarda yüksek düzeyde stabilite sağladığını göstermektedir işlem süreleri 1,4645 ile 1,4861 saniye arasında sınırlı kalmış ve ortalama 1,4741 saniye olarak ölçülmüştür korelasyon katsayısı -0,5940 olup uzunluk arttıkça varyansın azaldığını ve stabilitenin arttığını göstermektedir sinüzoidal boşluk geometrisinde ise standart sapma değerleri 0 ile 0,1703 arasında değişmiş ve ortalama 0,0612 olarak hesaplanmıştır bu durum sinüzoidal boşluklarla birlikte stabilitenin azaldığını göstermektedir işlem süresi 13,5482 ile 15,1453 saniye arasında değişmiş ve ortalama 14,3258 saniyedir korelasyon katsayısı -0,2427 olup bu da uzunlukla birlikte varyansın hafif şekilde azaldığını ve stabilitenin arttığını göstermektedir.

3.6.5. ICA algoritması

ICA algoritması dairesel boşluk geometrisinde 0,0010 ile 0,0718 arasında değişen standart sapma değerleri üretmiş ve ortalama 0,0301 olarak belirlenmiştir bu değerler algoritmanın dairesel boşluklarla birlikte iyi düzeyde bir stabilite sunduğunu göstermektedir işlem süreleri 1,4069 ile 1,4687 saniye arasında değişmekte olup ortalama 1,4352 saniyedir korelasyon katsayısı -0,4046 olup uzunluk arttıkça varyansın azaldığını ve stabilitenin arttığını göstermektedir altıgen boşluk

geometrisinde ise 0 ile 0,0009 arasında değişen çok düşük standart sapma değerleri gözlemlenmiş ve ortalama 0,0002 olarak hesaplanmıştır bu da altıgen boşlukların yüksek düzeyde stabilite sağladığını göstermektedir işlem süresi 1,4378 ile 1,4546 saniye arasında sınırlı kalmış ve ortalama 1,4455 saniye olarak ölçülmüştür korelasyon katsayısı -0,1639 olup uzunlukla birlikte varyansın hafif azaldığını göstermektedir sinüzoidal boşluklarda ise standart sapma değerleri 0 ile 0,2276 arasında değişmiş ve ortalama 0,0711 olarak hesaplanmıştır bu durum sinüzoidal boşluklarda stabilitenin azaldığını göstermektedir işlem süresi 13,6795 ile 14,9402 saniye arasında değişmiş ve ortalama 14,1472 saniye olarak ölçülmüştür korelasyon katsayısı -0,3552 olup uzunlukla birlikte varyansın azaldığını ve stabilitenin arttığını göstermektedir.

Bu çalışmada algoritmaların 300 cm ile 800 cm arasındaki farklı petek uzunluklarında gösterdiği performans.

Tablo 35. Üç boşluk tiplerine ve kiriş uzunluklarına göre optimizasyon algoritmalarının performans sınıflandırması

Petek Uzunluğu	Boşluk Tipi	CPA	IRO	TWO	VPS	ICA
300 cm	Dairesel	İyi	Orta	Orta	Çok İyi	İyi
	Altıgen	İyi	Zayıf	Orta	Orta	Zayıf
	Sinüzoidal	Zayıf	Zayıf	Orta	İyi	Orta
400 cm	Dairesel	İyi	Orta	Orta	İyi	Orta
	Altıgen	İyi	Zayıf	Orta	Zayıf	Zayıf
	Sinüzoidal	Zayıf	Zayıf	Orta	İyi	Orta
500 cm	Dairesel	Orta	Orta	İyi	İyi	Zayıf
	Altıgen	İyi	Zayıf	Zayıf	Zayıf	Zayıf
	Sinüzoidal	Orta	Orta	İyi	Çok İyi	Zayıf
600 cm	Dairesel	Orta	Zayıf	İyi	Orta	Zayıf
	Altıgen	İyi	Zayıf	Zayıf	Zayıf	Zayıf
	Sinüzoidal	İyi	Orta	İyi	Çok İyi	Orta
700 cm	Dairesel	İyi	Orta	Zayıf	İyi	İyi
	Altıgen	İyi	Zayıf	İyi	Zayıf	Zayıf
	Sinüzoidal	İyi	Zayıf	Zayıf	İyi	Orta
800 cm	Dairesel	Orta	Orta	Zayıf	Orta	Orta
	Altıgen	İyi	Zayıf	İyi	Zayıf	Zayıf

Üç temel ölçüt üzerinden değerlendirilmiştir; amaç fonksiyonu değeri (maliyet), standart sapma (kararlılık) ve işlem süresi (hesaplama verimliliği). Elde edilen ortalama sonuçlar doğrultusunda, her algoritmanın ilgili boşluk tipi ve uzunluk için genel başarı düzeyi niteliksel ifadelerle ("Çok İyi", "İyi", "Orta", "Zayıf") derecelendirilmiş ve Tablo 35'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu yaklaşım, algoritmaların hangi koşullarda daha verimli çalıştığını belirlemeye ve mühendislik tasarım kararlarına sistematik bir temel oluşturmaya olanak tanımaktadır.

3.7. İşlem Süresi ve Kararlılık Açısından Algoritmaların Performans Analizi

Bu bölüm, 3.6'da sunulan optimizasyon sonuçlarının devamı niteliğindedir. Ancak burada, amaç fonksiyonu değerlerinden ziyade algoritmaların işlem süresi ve standart sapma (kararlılık) değerleri dikkate alınarak performansları analiz edilmiştir. Her bir algoritmanın farklı kiriş uzunlukları ve boşluk tipleri altındaki işlem verimliliği ve çözüm stabilitesi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu analiz, algoritmaların yalnızca sonuç kalitesiyle değil, aynı zamanda süreklilik ve işlem süresi açısından da ne derece uygun olduklarını ortaya koymayı amaçlamaktadır.

3.7.1. CPA Algoritması

CPA algoritmasının farklı kiriş uzunlukları ve boşluk tipleri altındaki performans analiz edilerek, bu parametrelerin algoritma üzerindeki etkisi incelenmektedir.

300 cm uzunluğunda, dairesel boşlukta, amaç fonksiyonu değeri ile standart sapma arasında dengeli bir dağılım sağlanmış, bu da CPA algoritmasının yüksek stabilite ile etkili bir performans sergilemesini sağlamıştır.Altıgen boşlukta, işlem süresi düşük seviyede kalmasına rağmen, standart sapmadaki artış stabiliteyi sınırlamıştır. Sinüzoidal boşlukta, değerlerin düzensizliği ve yüksek standart sapma nedeniyle performans düşük seviyede kalmıştır.

400 cm uzunluğunda, dairesel boşluk için iyi performans, hız ve kalite açısından dengeli ve altıgen boşluk için iyi performans, standart sapmada hafif artış gözlemleniyor. sinüzoidal boşluk için zayıf performans, bu uzunlukta da uygun değildir.

500 cm uzunluğunda, dairesel boşluk için orta performans, sonuçlarda hafif dalgalanma. altıgen boşluk için iyi performans, nispeten kararlı sonuçlar ve sinüzoidal boşluk için orta performans, kısa uzunluklara göre iyileşme vardır.

600 cm uzunluğunda, dairesel boşluklarda orta performans, işlem süresi biraz etkilir, altıgen boşluklarda ise İyi performans, bazı dalgalanmalar olsa da dengelidir. Sinüzoidal Boşluk için İyi performans, karmaşık boşluklarda CPA etkilidir.

700 cm uzunluğunda, dairesel boşluklarda iyi bir performans, nispeten stabil sonuçlar, altıgen boşluklarda İyi performans, CPA'nın düzensiz boşlukları yönetme kabiliyeti belirgindir. Sinüzoidal boşluk için İyi performans, yüksek performans ve tutarlılıktır.

800 cm uzunluğunda ise dairesel boşluklarda orta seviyede, altıgen boşluklarda ise istikrarlı sonuçlar ve sinüzoidal boşluk için bu uzunluk analizden çıkarılmıştır.

Genelde, CPA algoritması, özellikle altıgen boşluklarda, 300 cm'den 700 cm'ye kadar olan uzunluklarda tutarlı ve düşük sapmalı sonuçlar ile yüksek stabilite sergilemektedir. Sinüzoidal boşluklarda uzunluk arttıkça performans iyileşmekte ve 600 cm'den itibaren etkili olmaktadır. Dairesel boşluklarda ise nispeten dengeli fakat altıgene göre daha az bir performans gözlemlenmektedir.

3.7.2. IRO Algoritması

IRO algoritmasının farklı kiriş uzunlukları ve boşluk tipleri altındaki performansı analiz edilerek, bu parametrelerin algoritma üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

300 cm uzunluğunda, dairesel boşluklar altında algoritma orta düzeyde bir performans sergilemektedir. Ancak işlem süresi ve standart sapma değerlerinde gözlenen dalgalanmalar, sonuçların stabilitesini sınırlamaktadır. Altıgen boşluklarda, algoritma zayıf performans göstermekte; bu durum, amaç fonksiyonu değerleri ve çözüm kalitesi üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Sinüzoidal boşluklar için ise, yüksek standart sapma ve kararsız işlem süresi değerleri ile birlikte zayıf bir performans gözlemlenmektedir.

400 cm uzunluğunda, dairesel boşluklar altında orta düzeyde performans sürmekte olup 300 cm uzunluğa kıyasla kısmi bir stabilite artışı gözlenmiştir.Altıgen boşluklar

için performans zayıf düzeydedir; çözüm değerlerinde belirgin dalgalanmalar ve tutarsızlıklar mevcuttur. Sinüzoidal boşluklarda, algoritma zayıf bir performans sergilemekte ve sonuçlar diğer boşluk tiplerine göre daha düşük stabilite göstermektedir.

500 cm uzunluğunda, dairesel boşluklarda, algoritmanın performansı orta düzeyde olup işlem süresi ve standart sapma açısından nispeten dengeli sonuçlar elde edilmiştir. Altıgen boşluklar altında performans zayıf kalmakta; amaç fonksiyonu değerlerinde gözlenen dalgalanmalar çözüm kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Sinüzoidal boşluklar için ise orta düzeyde performans sağlanmış olup önceki uzunluklara göre stabilitede bazı iyileşmeler gözlenmiştir.

600 cm uzunluğunda, dairesel boşluklarda algoritma zayıf performans sergilemekte; işlem süresinde artış ve sonuçlarda belirgin dalgalanmalar mevcuttur. Altıgen boşluklar için elde edilen sonuçlar istenilen stabilite düzeyine ulaşamamaktadır ve genel başarı seviyesi zayıf kalmaktadır. Sinüzoidal boşluklar altında algoritma orta düzeyde performans göstermekte, ancak diğer boşluk tiplerine kıyasla daha az verimli sonuçlar üretmektedir.

700 cm uzunluğunda, dairesel boşluklarda, algoritma orta performans sergilemektedir; 600 cm uzunluğuna göre stabilitede hafif bir iyileşme söz konusudur. Altıgen boşluklar altında zayıf performans devam etmekte; sonuçların stabilitesi halen düşüktür. Sinüzoidal boşluklarda, performans zayıf düzeydedir ve işlem süresinde belirgin dalgalanmalar gözlemlenmiştir.

800 cm uzunluğunda, dairesel boşluklar için algoritmanın performansı orta düzeyde olup standart sapma değerlerinde hafif bir artış gözlenmektedir. Altıgen boşluklarda, algoritma zayıf performans göstermekte ve stabilite sınırlı düzeyde kalmaktadır. Sinüzoidal boşluklara ait bu uzunlukta analiz gerçekleştirilmemiştir.

Genel olarak, IRO algoritması; altıgen ve sinüzoidal boşluk tiplerinde zayıf bir performans sergilemekte, dairesel boşluklar altında ise orta düzeyde başarı elde etmektedir. Kiriş uzunluğunun artması, algoritmanın stabilite sağlama yeteneğini azaltmakta olup; bu durum, daha gelişmiş ve dengeli optimizasyon tekniklerine ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır.

3.7.3. TWO Algoritması

TWO algoritmasının farklı kiriş uzunlukları ve boşluk tipleri altındaki duyarlılığı analiz edilerek, bu parametrelerin algoritma üzerindeki etkisi incelenmektedir.

300 cm uzunluğunda, dairesel boşluklarda ortalama performans sergilenmekte olup işlem süresi ve standart sapmada bazı dalgalanmalar gözlenmektedir. Bu durum sonuçların kararlılığını kısmen olumsuz etkilemektedir. Altıgen boşluklarda ortalama performans gözlenmekte, bazı değişkenlikler mevcut olmakla birlikte genel performans kabul edilebilir düzeydedir. Sinüzoidal boşluklarda ortalama performans, işlem süresi ve standart sapma açısından dengeli olup amaç fonksiyonu sonuçlarında nispeten kararlı değerler elde edilmiştir.

400 cm uzunluğunda, dairesel boşluklarda ortalama performans sağlanmış, işlem süresi ve standart sapmada kabul edilebilir düzeyde kararlılık elde edilmiştir. Altıgen boşluklarda da ortalama performans korunmuş, standart sapmadaki değişikliklere rağmen genel çıktı kalitesi etkilenmemiştir. Sinüzoidal boşluklarda ise işlem süresi sabit, standart sapma sınırlar içindedir ve genel performans ortalama seviyededir.

500 cm uzunluğunda, dairesel boşluklarda iyi performans sergilenmiş, kararlılık ve standart sapmada belirgin iyileşmeler elde edilmiştir. Altıgen boşluklarda zayıf performans gözlenmekte; artan işlem süresi ve standart sapma, çıktı kalitesini olumsuz etkilemektedir. Sinüzoidal boşluklarda ise çok iyi performans elde edilmiş, düşük işlem süresi ve düşük standart sapma ile yüksek kararlılık sağlanmıştır.

600 cm uzunluğunda, dairesel boşluklarda iyi performans sürdürülmüş; işlem süresi ve standart sapmadaki azalmalar sayesinde kararlı sonuçlar elde edilmiştir. Altıgen boşluklarda işlem süresindeki artış ve devam eden değişkenlik performansı zayıflatmaktadır. Sinüzoidal boşluklarda ise çok iyi performans gözlenmiş, mükemmel kararlılık ve düşük standart sapma değerleri elde edilmiştir.

700 cm uzunluğunda, dairesel boşluklarda zayıf performans gözlenmiş; artan işlem süresi ve standart sapma, çıktı kalitesini düşürmektedir. Altıgen boşluklarda da zayıf performans söz konusu olup önceki uzunluklara göre stabilite korunamamıştır.

Sinüzoidal boşluklarda zayıf performans dikkat çekmekte; işlem süresi ve sonuçlarda belirgin dalgalanmalar mevcuttur.

800 cm uzunluğunda, dairesel boşluklarda zayıf performans sergilenmiş; sonuçların kararlılığı ve işlem süresi belirgin şekilde bozulmuştur. Altıgen boşluklarda ise orta düzeyde performans gözlenmekte, bazı kriterlerde iyileşmeler olsa da genel stabilite sınırlıdır. Sinüzoidal boşluklar bu uzunlukta analiz kapsamına alınmamıştır.

Sonuç olarak, TWO algoritması, kiriş uzunluğu ve boşluk tipine bağlı olarak değişken performans sergilemektedir. Orta uzunluklardaki (500–600 cm) sinüzoidal boşluklar altında en yüksek performans elde edilmekte, ancak uzunluk arttıkça, özellikle dairesel ve sinüzoidal boşluklarda belirgin performans düşüşleri gözlenmektedi.

3.7.4 VPS Algoritması

VPS algoritmasının farklı kiriş uzunlukları ve boşluk tipleri altındaki performansı analiz edilerek, bu parametrelerin algoritma üzerindeki etkisi incelenmektedi.

300 cm uzunluğunda, dairesel boşluklarda işlem süresi ve standart sapma açısından yüksek stabilite ile mükemmel performans sergilenmiş, bu da güvenilir sonuçlara işaret etmektedir. Altıgen boşluklarda ise orta ile iyi arasında performans gözlenmiş; işlem süresinde hafif dalgalanmalar olsa da standart sapma kabul edilebilir düzeydedir. Sinüzoidal boşluklarda uygun işlem süresi ve makul stabilite ile iyi performans sağlanmıştır.

400 cm uzunluğunda, dairesel boşluklarda iyi performans ve belirgin stabilite ile düşük işlem süresi elde edilmiştir; bu durum algoritmanın verimliliğini ortaya koymaktadır. Altıgen boşluklarda ise işlem süresi artmış ve standart sapma nispeten yükselmiştir; sonuçlarda dalgalanmalar gözlenmiş, genel olarak zayıf performans sergilenmiştir. Sinüzoidal boşluklarda ise düşük işlem süresi ve düşük standart sapma ile iyi ve stabil performans elde edilmiştir.

500 cm uzunluğunda, dairesel boşluklarda artan stabilite ve düşük varyans sayesinde çok iyi performans sağlanmıştır. Altıgen boşluklarda ise işlem süresi ve standart sapmadaki belirgin artış ile çok zayıf performans gözlenmiştir.Sinüzoidal boşluklarda

en düşük işlem süresi ve düşük standart sapma ile çok iyi ve stabil performans elde edilmiştir.

600 cm uzunluğunda, dairesel boşluklarda işlem süresinde bazı dalgalanmalar bulunmakla birlikte genel stabilite kabul edilebilir düzeydedir ve performans orta ile iyi arasında değişmektedir. Altıgen boşluklarda işlem süresi ve standart sapma açısından zayıf performans sürmektedir. Sinüzoidal boşluklarda ise çok iyi stabilite ve çok düşük standart sapma ile mükemmel performans sergilenmiştir.

700 cm uzunluğunda, dairesel boşluklarda standart sapma ve işlem süresindeki kararlılık ile iyi performans elde edilmiştir; sonuçlar genel olarak güvenilirdir. Altıgen boşluklarda ise artan işlem süresi ve stabil olmayan sonuçlarla birlikte zayıf performans gözlenmektedir. Sinüzoidal boşluklarda hafif dalgalanmalara rağmen işlem süresi ve standart sapma kabul edilebilir sınırlar içerisindedir; performans iyi düzeydedir.

800 cm uzunluğunda, dairesel boşluklarda işlem süresi ve standart sapmadaki dalgalanmalar nedeniyle orta düzeyde performans gözlenmiştir. Altıgen boşluklarda işlem süresi artmış, sonuçlar kararsız seyretmiş ve performans zayıf kalmıştır. Sinüzoidal boşluklar bu uzunlukta analiz kapsamı dışında tutulmuştur.

Sonuç olarak, VPS algoritması özellikle orta uzunluklarda (500–600 cm) sinüzoidal ve dairesel boşluklar altında iyi performans göstermektedir. Ancak altıgen boşluklarda, artan işlem süresi ve dalgalanan standart sapma nedeniyle performans sınırlı kalmakta ve algoritmanın kararlılığı azalmaktadır.

3.7.5. ICA Algoritması

ICA algoritmasının farklı kiriş uzunlukları ve boşluk tipleri altındaki performansı analiz edilerek, bu parametrelerin algoritma üzerindeki etkisi değerlendirilmişti.

300 cm uzunluğunda, algoritmanın performansı orta düzeyde kalmış; işlem süresi ve standart sapma açısından ne iyi ne de kötü sonuçlar vermiştir. Altıgen ve sinüzoidal boşluklarda ise daha düşük performans ve dalgalı sonuçlar gözlemlenmiştir.

400 cm uzunluğunda, tüm boşluk tiplerinde genel olarak düşük performans sergilemiştir. Özellikle altıgen boşluklarda, işlem süresi ve standart sapmadaki artış, performans düşüklüğünü daha belirgin hâle getirmiştir.

500 cm uzunluğunda, dairesel, altıgen ve sinüzoidal boşluklarda benzer şekilde istikrarsız sonuçlar elde edilmiş, performans genel olarak zayıf düzeyde kalmıştır.

600 cm uzunluğunda, performansta belirgin dalgalanmalar ve standart sapmada artış gözlemlenmiştir. Bu durum özellikle altıgen boşluklarda daha belirgin olup performansın zayıflığını ortaya koymaktadır.

700 cm uzunluğunda, tüm boşluk tiplerinde yüksek standart sapma ve uzun işlem süresi dikkat çekmiştir. Genel olarak performansın zayıf ve kararsız olduğu anlaşılmaktadır.

800 cm uzunluğunda, özellikle altıgen boşluklarda, yüksek hassasiyet kaybı (yani belirgin dalgalanma ve belirsizlik) gözlenmiş; Dairesel boşluklarda dahi istikrar seviyesi orta-düşük düzeyde kalmıştır.

Sonuç olarak, ICA algoritması kiriş uzunluğu arttıkça, özellikle altıgen ve sinüzoidal boşluk tiplerinde, performans dalgalanmaları ve verim kaybı göstermektedir. Dairesel boşluklarda nispeten daha stabil sonuçlar verse de, genel itibarıyla zayıf ve değişken bir performans sergilemektedir. Bu nedenle, ICA algoritmasının farklı uzunluk ve boşluk tipleri altında güvenilirliği sınırlıdır.

Performans Değerlendirmesinin Sonuçları ve Mühendislik Uygulamaları:

Farklı kiriş uzunlukları ve boşluk tipleri gibi değişkenlerin etkisi altında algoritmaların performansını değerlendirmek, mühendislik optimizasyonunda temel bir adımdır. Bu analiz, algoritmaların çeşitli tasarım koşullarında ne derece kararlı, hızlı ve verimli çalıştığını ortaya koymakta; her durum için en uygun algoritmanın seçiminde rehberlik etmektedir. Her tasarım durumu için en uygun algoritmanın seçimini yönlendirir. Mühendislik açısından, performans analizleri; maliyetlerin düşürülmesi, işlem süresinin azaltılması ve yapısal verimliliğin artırılması gibi tasarım kararlarının bilinçli biçimde alınmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca, bu analiz mevcut stratejilerin geliştirilmesi ve yeni algoritmaların bilimsel temelde tasarlanması için sağlam bir çerçeve sunar; böylece pratik, enerji ve verimlilik gereksinimleri daha iyi

karşılanır. Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında yapılan performans analizi; petek kirişlerin farklı boyut ve boşluk tipleri altında en uygun algoritmalarla tasarlanmasına olanak tanıyarak, optimize ve güvenilir mühendislik çözümleri geliştirmek adına vazgeçilmez bir araç olarak değerlendirilmektedir. Tablo 36'da, her bir kiriş uzunluğu ve boşluk tipi kombinasyonu için en düşük işlem süresi ve standart sapma değerleri baz alınarak en uygun algoritmayı göstermektedir. Bu özet tablo, mühendislik tasarımlarında algoritma seçiminde yol gösterici bir referans sunmaktadır. Tablo 35 ve Tablo 36 arasındaki farklılıklar, değerlendirme kriterlerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Tablo 35, amaç fonksiyon ile işlem süresi ve standart sapma kriterlerini birlikte değerlendirirken; Tablo 35 sadece işlem süresi ve standart sapmaya dayanmaktadır.

Tablo 36. Kiriş uzunluğu ve boşluk tipine göre en uygun algoritma dağılımı

Kiriş Uzunluğu (cm)	Dairesel Boşluk	Altıgen Boşluk	Sinüzoidal Boşluk
300	CPA	CPA	TWO
400	IRO	CPA	TWO
500	CPA	CPA	TWO
600	CPA	CPA	TWO
700	CPA	CPA	TWO
800	CPA	IRO	**YOKTUR**

Bu nedenle, algoritmaların performans sıralaması her iki tabloda farklılık göstermektedir. Bazı durumlarda, benzer performans sergileyen algoritmalar arasında seçim yapılırken, kararlılığın mühendislik açısından önemi göz önünde bulundurulmuştur.

3.8. Çözüm Stabilitesi ve İşlem Verimliliği Üzerine Değerlendirme

3.8.1. Amaç Fonksiyonunun Stabilite Yön, Uzunluk ve Yinelemeler Açısından Analizi

Bu analizde, farklı boşluk tipleri (dairesel, altıgen ve sinüzoidal) ile 600, 700 ve 800 cm kiriş uzunluklarının çözüm stabilitesi ve algoritmik tepkiler üzerindeki etkileri incelenmektedir. Amaç fonksiyonunun stabilitesi, beş farklı optimizasyon algoritması (CPA, IRO, TWO, VPS ve ICA) kullanılarak değerlendirilir.

3.8.1.1. Boşluğun amaç fonkisyonyn stabilitesi üzerindeki yönünün, uzunluğuna etkisinin ve boşluğun tipinin analizi

Boşluk geometrisinin ve kiriş uzunluğunun, amaç fonksiyonunun stabilizasyon davranışına etkisi incelenerek, delik geometrisinin algoritmik performans üzerindeki rolü değerlendirilmektedir.

3.8.1.1.1. 600 cm Dairesel, Altıgen ve Sinüzoidal Boşluklu

CPA: Genellikle hızlı ve tutarlı bir stabilite özelikle dairesel ve altıgen boşluklarda gösterir.

IRO: Kabul edilebilir bir stabilite seviyesine ulaşmış, ancak sinüzoidal boşluklarda hafif dalgalanmalar gözlemlenir.

TWO: Stabiliteye ulaşma hızı orta düzeyde olup özellikle altıgen boşluklarla dengeli ve tatmin edici sonuçlar elde edilir.

VPS: Özellikle sinüzoidal boşluklarda belirgin bir stabiliteye ulaşabilmek için daha fazla yinelemeye ihtiyaç duymaktadır.

ICA: Stabiliteye ulaşmada görece daha yavaş olmasına rağmen, sinüzoidal boşluklarla birlikte ulaştığı noktada yüksek doğruluk sağlar.

3.8.1.1.2. 700 cm (Yalnızca Sinüzoidal Boşluklu)

CPA: Göreceli olarak hızlı bir şekilde stabiliteye ulaşmıştır, ancak küçük dalgalanmalar gözlemlenir.

IRO: Yüksek sayıda yineleme gerektirmiş, ancak sonunda iyi düzeyde bir stabilite sağlar.

TWO: Dengeleyici bir performans sergilemiş, makul seviyede bir stabilite sağlamış; ancak CPA kadar hızlı değildir.

VPS: Bu durumda en yavaş stabilizasyon sürecine sahip algoritma olmuş, açık bir stabiliteye ulaşmak için daha uzun süreye ihtiyaç duymaktadır.

ICA: Yüksek doğruluk göstermiş ancak stabilizasyon ancak çok sayıda yineleme sonrası gerçekleşir.

3.8.1.1.3. 800 cm Dairesel ve Altıgen Boşluklu

CPA: Her iki boşluk tipinde de en hızlı stabiliteye ulaşan algoritma olmaktadır.

IRO: Altıgen boşluklarla birlikte iyi bir stabilite sergilemiş, ancak dairesel boşluklarda daha az dengeli bir yapı gösterir.

TWO: Hız ve doğruluk açısından kabul edilebilir bir performans sergilemiş, her iki durumda da dengeli sonuçlar elde edilir.

VPS: Özellikle altıgen boşluklarla birlikte stabiliteye ulaşmak için yüksek sayıda yineleme gerekir.

ICA: Stabiliteye ulaşması zaman almasına rağmen, ulaşılan noktada oldukça yüksek bir doğruluk sağlamaktadır. Ayrıca, algoritmaların iterasyon sayısına karşı gösterdiği stabilite davranışı aşağıda özetlenmiştir:

CPA algoritması, çoğu durumda sınırlı sayıda yineleme ile stabilizasyon noktasına ulaşarak tutarlı ve dengeli bir davranış sergiler. ICA ve VPS gibi algoritmalar daha fazla yineleme gerektirse de, stabiliteye ulaştıktan sonra daha yüksek doğruluk sağlamışlardır. TWO ise hız ile doğruluk arasında denge kuran bir algoritma olarak öne çıkmaktadır. Sinüzoidal boşluklar genel olarak dairesel ve altıgen boşluklara göre daha fazla yineleme gerektirmekte ve stabilizasyon açısından daha karmaşık bir yapı sergilemektedir. Ayrıca, 800 cm uzunluğundaki kirişlerde özellikle ICA ve VPS algoritmaları ile daha fazla performans dalgalanması gözlemlenmiş, bu da algoritmaların uzunluk parametresine karşı duyarlılığını ortaya koymaktadır.

- Stabil bir çözüme hızlı ulaşmak önemliyse, CPA algoritması en uygun seçenektir.
- Son doğruluk hızdan daha önemliyse, ICA ve VPS algoritmaları daha etkili olacaktır.
- TWO, hız ve doğruluk arasında başarılı bir denge sunmakta ve dengeli performans gerektiren durumlar için ideal bir alternatiftir.

Boşluk tipi, stabiliteye ulaşma sürecinde belirleyici bir faktördür; Sinüzoidal boşluklar, stabilizasyon açısından en karmaşık ve zorlu geometriyi temsil etmektedir.

3.8.2. Trend Analizi

Bu bölümde, işlem süresi, istatistiksel kararlılık ve tasarım parametreleri ile amaç fonkisyonu arasındaki ilişkilerin trend analizine dayalı değerlendirmesi sunulmaktadır. Her bir algoritma için genel eğilimler, ilgili Şekiller aracılığıyla analiz edilir. Kullanılan beş optimizasyon algoritması şunlardır: CPA, IRO, TWO, VPS ve ICA. İlk olarak, her algoritmanın işlem süresi açısından performansı analiz edilmiştir.

3.8.2.1. İşlem Süresi Analizi

CPA algoritması, tüm boşluk türlerinde ve taşıyıcı uzunluklarında en kısa işlem süresi ile öne çıkmaktadır. Özellikle dairesel ve altıgen boşluklarda tutarlı ve hızlı sonuçlar sağlamaktadır.

IRO algoritması, dairesel boşluklarda hızlı çalışmakla birlikte, sinüzoidal boşluklarda işlem süresi belirgin şekilde uzamaktadır.

TWO algoritması, sinüzoidal boşluklarla birlikte görece daha uzun süreler göstermiş, özellikle 700 cm ve 800 cm uzunluklarında işlem süresi belirgin şekilde artmaktadır.

VPS algoritması, genel olarak daha uzun işlem süreleri sergilemiş, özellikle sinüzoidal boşluklar ile bu süreler daha da artmıştır

ICA algoritması, özellikle sinüzoidal boşluklar ile birlikte uzun işlem süresi gerektirmiştir. Bu durum, boşluk geometrisinin işlem süresi üzerindeki belirleyici etkisini vurgulamaktadır.

Genel olarak, sinüzoidal boşluklar, geometrik karmaşıklık nedeniyle işlem süresini uzatmaktadır. İkinci olarak, algoritmaların çıktı kararlılığı standart sapma değerleri üzerinden incelenmiştir.

3.8.2.2. Standart Sapma Analizi

- CPA ve VPS algoritmaları, birçok durumda düşük standart sapma değerleri üretmiş ve bu da sonuçların kararlılığını ve tekrarlanabilirliğini göstermektedir.

- IRO ve TWO algoritmaları, özellikle uzun taşıyıcılarda ve sinüzoidal boşluklarda standart sapmanın arttığını ve sonuçlarda daha fazla dalgalanma olduğunu göstermektedir.
- ICA algoritması, genel olarak kararlı sonuçlar sunmuş, ancak bazı yüksek taşıyıcı uzunluklarında sapmalarda hafif artış gözlemlenir.

Son olarak, tasarım parametreleri ile amaç fonksiyonu arasındaki ilişkiler korelasyon katsayısı ile analiz edilmiştir.

3.8.2.3. Korelasyon Katsayısı Analizi

Bu çalışmada amaç fonksiyonu minimum maliyet değerini temsil etmektedir. Korelasyon katsayısı analizleri yalnızca destekleyici bilgi amacıyla sunulmuş olup temel karar kriteri olarak kullanılmamıştır.

- ICA algoritması, özellikle dairesel ve altıgen boşluklar ile birlikte yüksek korelasyon katsayısı değerleri göstermiş, bu da tasarım parametreleri ile amaç fonksiyonu arasındaki güçlü ilişkiyi yansıtmaktadır.
- CPA ve VPS, genel olarak orta düzeyde korelasyon sağlamış, özellikle dairesel boşluklarla stabilite açısından tutarlı sonuçlar üretmektedir.
- IRO ve TWO algoritmaları, özellikle sinüzoidal boşluklarda ve 800 cm uzunlukta korelasyon katsayısında dalgalanmalar gösterir.

Elde edilen analiz bulgularına göre aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- Dairesel ve altıgen boşluklar, hem işlem süresi hem de istatistiksel stabilite açısından daha avantajlıdır.
- Sinüzoidal boşluklar, karmaşık geometrik yapısı nedeniyle daha uzun işlem süresi gerektirmekte ve özellikle uzun taşıyıcılarda parametre hassasiyeti göstermektedir.
- CPA algoritması, hız öncelikli tasarımlar için en uygun seçenek olarak öne çıkmaktadır.
- VPS ve ICA, kararlılık ve tekrarlanabilirlik açısından uzun vadede tercih edilebilir algoritmalardır.

- TWO algoritması, özellikle sinüzoidal boşluklarda stabilite açısından daha zayıf performans sergilemiştir, ancak diğer durumlarda dengeli bir alternatif sunabilmektedir.
- IRO algoritması, özellikle kısa uzunluklar ve dairesel boşluklarla birlikte dengeli sonuçlar sunarken; sinüzoidal boşluklarda performansı düşmekte ve işlem süresi ile standart sapmada dalgalanmalar gözlemlenmektedir.

3.9. Ortalama Amaç Fonksiyonu Sonuçları, Standart Sapma ve İşlem Süresine Dayalı Olarak Algoritma Performanslarının Karşılaştırmalı Betimsel Analizi

Bu analiz, boşluklu kiriş tasarımı sürecinde kullanılan beş farklı optimizasyon algoritmasının genel başarı düzeyini üç temel ölçüt üzerinden betimsel bir yaklaşımla değerlendirmektedir. Bu ölçütler: ortalama amaç fonksiyonu değeri (maliyet açısından optimallik), ortalama standart sapma (sonuçların kararlılığı) ve ortalama işlem süresi (sayısal hesaplama verimliliği) olarak belirlenmiştir. Her bir algoritma için bu üç ölçüte ilişkin ortalama değerler, her bir tasarım durumunda 20 tekrar sonucunda elde edilen veriler üzerinden hesaplanmış ve 300 cm ile 800 cm arasındaki tüm kiriş uzunluklarını ve üç farklı boşluk tipini (dairesel, altıgen, sinüzoidal) kapsamaktadır. Bu analizde, önceki nicel verilere dayanılarak oluşturulan 34 numaralı tablo esas alınmış, analizde her bir algoritmanın farklı tasarım koşullarındaki performansı nitel ifadelerle (“Çok İyi”, “İyi”, “Orta”, “Zayıf”) sınıflandırılmıştır. Ortalama amaç fonksiyonu değeri incelendiğinde, VPS algoritmasının genel olarak yüksek ve dengeli bir performans sergilediği görülmektedir. Özellikle dairesel ve sinüzoidal boşluk tiplerinde, çoğu durumda "Çok İyi" veya "İyi" derecelerine ulaşarak maliyet açısından etkin çözümler üretebildiği gözlemlenmiştir. CPA algoritması ise özellikle dairesel ve altıgen boşluklarda istikrarlı bir performans ortaya koymuş, sinüzoidal boşluklarda ise görece değişken sonuçlar üretmiştir. Ortalama standart sapma değerlerinin genellikle düşük olması, bu algoritmanın tekrarlar arasında dengeli sonuçlar üretme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. ICA algoritmasının performansı ise çeşitlilik göstermektedir. Bazı uzunluk ve boşluk tiplerinde iyi sonuçlar üretse de, genel anlamda yüksek standart sapma ve işlem süresi değerleriyle daha az istikrarlı bir profil çizmiştir. Bu durum, özellikle hesaplama verimliliği önemli olan uygulamalarda kullanımını sınırlamaktadır. TWO algoritması ise genelde orta düzeyde bir performans

sergilemiş, sinüzoidal ve dairesel boşluklarda kabul edilebilir sonuçlar vermesine rağmen, altıgen boşluk tiplerinde rekabetçi olmaktan uzak kalmıştır. IRO algoritması ise çoğu durumda, özellikle altıgen boşluklarda zayıf performans göstermiş ve bu çalışmada değerlendirilen algoritmalar arasında en düşük başarı seviyesine sahip olmuştur.

Sonuç olarak, ortalamalara dayalı bu karşılaştırmalı analiz, algoritmaların farklı tasarım koşullarındaki genel davranışlarını ortaya koymakta ve mühendislik karar süreçlerinde yönlendirici bir referans sunmaktadır. Özellikle sayısal istikrar ve işlem verimliliği açısından hangi algoritmanın hangi koşullarda daha uygun olduğu bu betimsel yaklaşım ile net bir şekilde değerlendirilebilmektedir. Bu bağlamda, söz konusu analiz, her bir algoritmanın hangi tasarım koşulları altında daha verimli çalıştığını ortaya koymakta; yeni sayısal veri üretmeksizin, önceki analizlerin bütüncül ve karşılaştırmalı bir özetini sunmaktadır. Bu betimsel yaklaşım, algoritmalar arası genel eğilimleri anlamaya katkı sağlamakta ve mühendislik tasarımı kararlarında yönlendirici bir referans oluşturmaktadır.

3.10. Algoritmalarının Kesit Boyutlarını Belirleme Yaklaşımlarının Karşılaştırmalı Analizi

Bu çalışmada, seçilen beş algoritmanın performansı, kesit yüksekliği , gövde genişliği , başlık genişliği ve başlık kalınlığı olmak üzere tasarımda temel değişkenleri temsil eden dört ana geometrik boyut temel alınarak değerlendirilmiştir. Sadece bu dört bağımsız boyuta odaklanılmıştır, çünkü bu boyutlar her algoritmanın tasarım kısıtlamalarıyla nasıl başa çıktığını ve optimal çözümü nasıl sağladığını doğrudan yansıtmaktadır. Diğer boyutlar ise matematiksel olarak bu temel değerlerden türetildiği için, algoritmanın bağımsız bir görüşünü temsil etmeyip, sadece temel boyutlara bağlı matematiksel ilişkiler olarak değerlendirilmiş ve değerlendirme dışı bırakılmıştır.Bu yaklaşım, her algoritmanın tasarım boyutlarını düzenleme biçimini ve mühendislik kısıtlamalarına tepkisini adil ve detaylı bir şekilde analiz etmemizi sağlamış, böylece performanslarını net ve objektif biçimde karşılaştırabilmemize olanak tanımıştır. Bu dört temel boyut, farklı yapısal başarısızlık modlarına karşı dayanımı artırma açısından kritik rol oynamaktadır. Örneğin, kesit yüksekliği (dg) eğilme momentine karşı direnci artırırken; gövde kalınlığı (tw) kesme kuvvetlerine

karşı mukavemeti temsil eder. Başlık genişliği (bf) ve kalınlığı (tf) ise burkulma ve lokal ezilme gibi durumlara karşı rijitlik sağlar.

CPA Algoritması : CPA algoritması ile farklı boşluk tiplerine sahip petek kirişlerin tasarımında elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

A . Dairesel Boşluklar: dg değeri, tasarımsal maksimum değere kıyasla orta seviyeden başlayarak, kiriş boyunun artmasıyla birlikte düzenli bir artış eğilimi göstermektedir. Bu durum, kesit yüksekliğinin uzunlukla birlikte optimize edildiğini göstermektedir. Bu artış eğilimi, özellikle dairesel boşluklu kirişlerde eğilme momentinin etkisine karşı kesit rijitliğinin artırılmasıyla açıklanabilir. bf değeri, tüm durumlarda maksimuma yakın seviyede sabit tutulmuş olup algoritmanın bu parametreyi sınır değerde tercih ettiğini göstermektedir. tw değeri, tüm uzunluklarda oldukça sabit kalmış, yapısal yeterliliği koruyacak minimum bir kalınlıkla belirlenmiştir. tf değeri, görece daha düşük bir başlangıç seviyesinden başlamış, ardından uzunlukla birlikte kademeli olarak artmıştır. Bu da, başlık kalınlığının kiriş uzunluğu arttıkça rijitliği sağlamak adına güçlendirildiğini ortaya koymaktadır.

B . Altıgen Boşluklar: dg değeri, tüm uzunluklar boyunca tasarımsal maksimuma göre oldukça düşük seviyeden başlamış, daha sonra kiriş uzunluğu artmasıyla birlikte belirgin ve düzenli bir artış eğilimi sergilemiştir. Bu durum, kesit yüksekliğinin algoritma tarafından daha temkinli bir şekilde optimize edildiğini göstermektedir. bf değeri, başlangıçta nispeten düşük bir seviyede belirlenmiş olup orta uzunluklarda maksimum değere yaklaşmakla birlikte, genel olarak sınır değerin biraz altında kalmıştır. Bu durum, başlık genişliğinin yapısal dengeyle birlikte optimize edildiğini düşündürmektedir. tw değeri, tüm uzunluklarda sabit tutulmuş olup minimum kalınlıkta belirlenmiştir. Bu da algoritmanın gövde kalınlığına müdahalede bulunmadığını göstermektedir. tf değeri, başlangıçta oldukça yüksek bir seviyede tercih edilmiş ve sonrasında maksimum tasarımsal değerde sabit tutulmuştur. Bu, başlık kalınlığının algoritma tarafından yüksek rijitlik sağlayacak şekilde belirlenmiş olduğunu göstermektedir. Bu durum, altıgen boşluklarda oluşabilecek lokal burkulma veya başlık ezilmesi gibi başarısızlık modlarına karşı bir önlem olarak değerlendirilebilir.

C . Sinüzoidal Boşluklar: dg değeri, başlangıçta orta seviyede belirlenmiş olup orta uzunluklarda tasarımsal maksimuma oldukça yaklaşmış, ardından bir miktar azalma göstermiştir. Bu durum, kesit yüksekliğinin dalgalı bir optimizasyon sürecine tabi tutulduğunu ortaya koymaktadır. bf değeri, başta tasarımsal üst sınıra yakın bir seviyede iken, orta uzunluklarda belirgin şekilde azalmış ve son uzunlukta maksimum sınırda sabitlenmiştir. Bu da algoritmanın başlık genişliğini uzunlukla birlikte değişken şekilde optimize ettiğini göstermektedir. tw değeri, ilk durumda görece yüksek bir değerle başlarken, daha sonraki uzunluklarda kademeli olarak azaltılmış ve minimum sınırlarda sabitlenmiştir. Bu eğilim, gövde kalınlığının yapısal optimizasyon kapsamında kontrollü şekilde düşürüldüğünü düşündürmektedir. Bu yaklaşım, sinüzoidal boşluklarda kesme kuvvetlerinin karmaşık etkilerine karşı gövde rijitliğinin dengelenmesini amaçlamaktadır. tf değeri, ilk uzunlukta oldukça yüksek tutulmuş ve sonrasında tüm uzunluklarda tasarımsal maksimum değerde sabitlenmiştir. Bu, başlıkkalınlığının rijitlik açısından yüksek tutulduğunu ve değişikliğe gidilmediğini göstermektedir.

CPA algoritması, farklı boşluk türlerine sahip petek kirişlerin tasarımında belirgin ve tutarlı eğilimler sergilemektedir. Genel olarak bakıldığında, algoritma uzunlukların artışına paralel olarak belirli boyutsal parametrelerde kademeli ve kontrollü değişiklikler yapmaktadır. Ancak bu değişimlerin karakteri, boşluk tipine göre farklılık göstermektedir: Dairesel boşluklar ile yapılan tasarımlarda, özellikle dg parametresi uzunluk arttıkça sürekli artış göstermiştir. Bu durum, algoritmanın dairesel boşluklu kirişlerde kesit yüksekliğini daha aktif bir şekilde optimize ettiğini ve uzunluk arttıkça taşıyıcılığı artırmak amacıyla bu değeri yükselttiğini göstermektedir. Diğer parametrelerde ise daha dengeli ve sınırlı değişimler gözlemlenmiştir. Altıgen boşluklar için tasarımlarda tf parametresi başlangıçta maksimum değerde sabitlenmiş olup bu durum tüm uzunluklar boyunca korunmuştur. Bu, altıgen boşluk yapılarında başlık kalınlığının rijitlik açısından kritik görüldüğünü ortaya koymaktadır. Kesit yüksekliği ise artan uzunluklarla birlikte istikrarlı şekilde artırılmıştır, bu da taşıyıcılık ihtiyacına paralel bir yaklaşımı işaret etmektedir. Sinüzoidal boşluklarda, dg değerinde dalgalı fakat genel olarak artış yönlü bir eğilim gözlemlenmiştir. Özellikle orta uzunluklarda maksimuma yaklaşan bu değer, algoritmanın bu tip boşluklarda dinamik bir optimizasyon stratejisi benimsediğini

göstermektedir. Ayrıca tw parametresi bu boşluk tipinde daha fazla değişkenlik göstermiş, bu da sinüzoidal yapının karmaşık etkilerine karşı algoritmanın daha esnek davrandığını düşündürmektedir.

Sonuç olarak, CPA algoritması, her üç boşluk türünde de uzunluklara bağlı olarak optimize edici ve uyumlu bir yaklaşım sergilemektedir. Ancak, boşluk tipine göre farklı parametrelere öncelik vererek tasarım stratejisini çeşitlendirmektedir. Bu durum, algoritmanın sadece genel bir optimizasyon değil, aynı zamanda geometriye duyarlı bir strateji izlediğini ortaya koymaktadır.

IRO algoritması, farklı boşluklarda petek kirişlerin tasarımında boyutlara yönelik belirgin ve sistematik bir yaklaşım sergilemektedir. Algoritmanın boşluk tipine göre boyutsal tepkileri şu şekilde özetlenebilir:

A - Dairesel boşluklar: bf açısından bakıldığında, değerlerin sabit kalmaktan uzak olduğu, bazı uzunluklarda dikkate değer azalmalar gösterdiği görülmektedir. Bu durum, algoritmanın rijitlikten çok malzeme verimliliğine yöneldiği uzunluklarda başlık boyutlarında fedakârlık yaptığını düşündürmektedir. Bu yaklaşım, dairesel boşluklu kirişlerde lokal burkulma veya başlık ezilmesi gibi başarısızlık risklerinin görece düşük olduğu varsayımıyla açıklanabilir. tw değerleri genel olarak sınır değerlere yakın olsa da, bazı uzunluklarda belirgin artış göstermiştir. Bu artışlar, yapılan yerel optimizasyonlara işaret etmektedir. tf parametresi ise oldukça dalgalı bir seyir izlemekte olup uzunluklara bağlı olarak düşük ve yüksek değerler arasında geçiş yaptığı gözlemlenmiştir.

B - Altıgen boşluklar: IRO algoritması, altıgen boşluklu kirişlerde özellikle dg parametresine odaklanarak uzunlukların artışıyla birlikte düzenli bir artış eğilimi göstermektedir. Bu durum, taşıyıcılık kapasitesine öncelik verildiğinin bir göstergesi olarak yorumlanabilir. bf değerleri ise uzunluklar boyunca oldukça değişken bir seyir izlemektedir. Düşük değerlere doğru yönelim, algoritmanın bazı boşluklarda rijitlikten ziyade malzeme tasarrufuna odaklandığını düşündürmektedir. Sadece belirli bir uzunlukta dikkate değer bir artış gözlenmiştir. tw parametresi bazı uzunluklarda belirgin şekilde yüksek tutulmuştur. Bu da stabilite kaygısıyla yapılan lokal ayarlamaların bir sonucu olarak değerlendirilebilir. Altıgen boşluk yapısının kesme kuvvetlerine karşı daha hassas olabileceği göz önüne alındığında, gövde kalınlığındaki

bu artış, düşey kesme kuvvetlerine karşı direncin artırılmasına yönelik olabilir. Ancak diğer uzunluklarda düşük sınırlara yakın kalınarak malzeme tasarrufu sağlanmıştır. tf değerleri ise genel olarak sabit düşük seviyelerde seyretmektedir. Bu durum, başlık kalınlığı açısından IRO algoritmasının oldukça ekonomik ve minimal bir yaklaşım benimsediğini ortaya koymaktadır.

C - Sinüzoidal boşluklar: dg açısından, IRO algoritması oldukça yüksek başlangıç değerleriyle dikkat çekmekte olup tüm uzunluklar boyunca bu yüksek seviyeyi koruyan dalgalı fakat güçlü bir strateji benimsemiştir. Bu, taşıyıcı yüksekliğe öncelik verildiğini açıkça göstermektedir. bf değerlerinde ise genel olarak dengeli fakat uzunluklara göre hafif değişkenlik gösteren bir yapı izlenmiştir. Bazı durumlarda genişleme eğilimi, başlık düzeyinde rijitlik kaygısıyla ilişkilendirilebilir. tw için orta seviyede başlayan değerler, belirli uzunluklarda gözle görülür artışlar ile farklılaşmıştır. Bu da uzunluğa özel stabilite gereksinimlerine verilen yanıt olarak değerlendirilebilir. Sinüzoidal boşluklar, karmaşık yük aktarım mekanizmaları oluşturduğundan, bu değişiklikler özellikle yatay kesme kuvvetlerine ve yerel burkulmalara karşı bir uyum stratejisi olarak yorumlanabilir. tf parametresinde ise çeşitlilik göze çarpmaktadır. Uzunluklara göre başlık kalınlığında artış ve azalışlar olmuş, bu dauzunluğa özel stabilite gereksinimlerine verilen yanıt olarak değerlendirilebilir.

Genel olarak IRO algoritması, farklı boşluk türlerine göre değişen stratejiler izlese de bazı temel tasarım ilkelerini istikrarlı şekilde sürdürmektedir. Özellikle dg parametresine yüksek öncelik vererek taşıyıcı yüksekliği artırmayı amaçlamakta, tf ve tw gibi kalınlık parametrelerini ise her boşluk tipine ve uzunluğa bağlı olarak esnek biçimde ayarlamaktadır. Diğer yandan, başlık genişliği (bf) tasarımında net bir sabit eğilim gözlenmemekte olup bu değer kiriş uzunluğu ve boşluk tipine bağlı yapısal gereksinimlere göre değişkenlik göstermektedir. Bu durum, algoritmanın dengeleyici ve esnek bir tasarım yaklaşımı benimsediğini göstermektedir.

TWO Algoritması: TWO algoritması ile farklı boşluk tiplerine sahip petek kirişlerin tasarımında elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

A . Dairesel boşluklar dg değeri, genel anlamda orta seviyede bir başlangıçtan sonra, özellikle daha uzun uzunluklarda düzenli ve istikrarlı bir artış göstermektedir. Bu

durum, algoritmanın taşıma kapasitesine odaklı bir optimizasyon gerçekleştirdiğini ve uzunluk arttıkça kesit yüksekliğini artırarak stabiliteyi sağlamaya çalıştığını göstermektedir. bf parametresi başlık genişliği olarak değerlendirilirse, uzunluklara göre değişkenlik göstermekte; bazı uzunluklarda sabit yüksek değerlere ulaşmakta ve diğerlerinde biraz daha kompakt kalmaktadır. Bu, başlığın boşluğa göre rijitlik katkısına yönelik optimize edildiğini düşündürmektedir. tw değişkeni açısından algoritma, değerleri genellikle dar bir aralıkta tutarak sabit ve güvenli bir taşıyıcı gövde kalınlığı sağlamayı amaçlamaktadır. Bu sabit yaklaşım, dairesel boşluklarda kesme kuvvetlerine karşı gövde stabilitesinin korunmasına yönelik bir strateji olarak değerlendirilebilir. Bu yaklaşım, burkulma riski göz önünde bulundurularak dikkatli bir denge sağlamaktadır. tf parametresi başlık kalınlığı olarak değerlendirildiğinde, uzunluklara göre düzenlenmiş fakat genel olarak belirli bir sınır içinde kalacak şekilde optimize edilmiştir. Bu, başlık bölgesinin gerilme koşullarına karşı ekonomik ama güvenli bir çözüm önerdiğini yansıtmaktadır.

B . Altıgen Boşluklar : dg parametresi, kısa uzunluklarda düşük değerlerle başlamakta; ancak uzunluk arttıkça kararlı ve lineer bir artış eğilimi göstermektedir. Bu, algoritmanın taşıma kapasitesini boşluğun karmaşık geometrisine göre dikkatlice artırdığını ve uzunlukla birlikte rijitliği de yükselttiğini ortaya koymaktadır. bf değeri oldukça kararlı ve yüksek seviyede tutulmuştur.Bu başlık genişliği, altıgen boşlukların oluşturabileceği lokal gerilmelere karşı algoritmanın güvenli bir çözüm önerdiğini göstermektedir. tw değişkeni genel olarak dengeli bir yapı sergilemekle birlikte, özellikle 600 cm uzunlukta 1.5000 gibi yüksek bir değere ulaşmıştır. Bu, kritik uzunluklarda gövde kalınlığının artırılarak burkulma riskinin minimize edilmek istendiğini göstermektedir. tf parametresi, başlık kalınlığı olarak değerlendirildiğinde oldukça yüksek ve tutarlı bir seviyede optimize edilmiştir. Bu da, başlık bölgesinde yeterli rijitlik ve güvenlik sağlanmasına yönelik kontrollü bir yaklaşım olduğunu yansıtmaktadır. Altıgen boşlukların neden olduğu gerilme konsantrasyonları göz önüne alındığında, bu rijit tasarım, lokal burkulma risklerinin azaltılması açısından önemlidir.

C . Sinüzoidal Boşluklar : dg değeri, uzunluk arttıkça neredeyse doğrusal ve sürekli bir artış göstermektedir. Bu eğilim, algoritmanın taşıma kapasitesini sinüzoidal

boşlukların doğal dalga formuna uygun olarak dikkatli şekilde optimize ettiğini göstermektedir. Özellikle 600 cm ve 700 cm uzunluklarda yüksek dg değerleri, rijitlik ihtiyacına doğrudan karşılık geldiğini düşündürmektedir. bf değeri çoğu durumda maksimum değerde tutulmuş olup sadece 500 cm uzunlukta hafif düşüş gözlenmektedir. Bu durum, başlık bölgesinin stabilite ve taşıma kapasitesi açısından algoritma tarafından önemli görüldüğünü ve genellikle sınır değere yakın optimize edildiğini göstermektedir. tw, kısa uzunluklarda (300-500) cm 0.9 – 1.3 cm aralığında değişmekte; ancak büyük uzunluklarda gövde kalınlığı tw 0.76 cm civarına düşmektedir. Bu da, uzunluk büyüdükçe malzeme kullanımında denge sağlanmaya çalışıldığını, ancak rijitlikten de çok fazla taviz verilmediğini göstermektedir. tf ise oldukça kararlı ve yüksek düzeyde optimize edilmiştir (1.3787–1.5000) cm. Bu başlık kalınlıkları, sinüzoidal boşlukların geometrik karmaşıklığına rağmen yapısal stabilitenin sağlandığını ve algoritmanın rijitlik kontrolünü başarıyla yönettiğini göstermektedir. Ayrıca, bu yaklaşım, sinüzoidal yapıların potansiyel lokal deformasyonlarını sınırlamak ve başlık stabilitesini sürdürmek adına kritik bir önlem niteliğindedir.

TWO algoritması, üç farklı boşluk türüne karşı tutarlı ve mühendislik açısından dengeli bir tasarım yaklaşımı sergilemektedir: dg değerinde, dairesel ve sinüzoidal boşluklarda daha yüksek taşıma kapasitesine yönelmiş, ancak altıgen boşluklarda uzunlukla birlikte daha dikkatli artışlar tercih etmiştir. bf çoğu durumda 24–25 bandında korunmuş, özellikle sinüzoidal ve altıgen boşluklarda maksimum kapasiteye yakın değerler sunmuştur. Bu da başlık rijitliğine öncelik verildiğini göstermektedir. tw parametresi, boşluk tipine göre dikkatli şekilde ayarlanmış, büyük uzunluklarda bazen arttırılarak burkulma önlenmiştir. tf ise genellikle yüksek değerlerde sabitlenmiş olup rijitlik gereksinimlerine uyumlu olarak boşluk geometrisine göre başarıyla şekillendirilmiştir. Bu özellikler, algoritmanın farklı başarısızlık modlarına karşı adaptif bir tasarım yaklaşımı benimsediğini ve mühendislik sınırlamalarına duyarlı çözümler sunduğunu ortaya koymaktadır. Genel olarak TWO algoritması, yüksek taşıma kapasitesi ile malzeme ekonomisi arasında denge kuran, boşluk türüne duyarlı bir optimizasyon eğilimi göstermektedir.

VPS Algoritması: farklı boşluklarda petek kirişlerin tasarımında boyutlara yönelik belirgin ve sistematik bir yaklaşım sergilemektedir. Algoritmanın boşluk tipine göre boyutsal tepkileri şu şekilde özetlenebilir:

A - Dairesel boşluklar: dg: Genelde dalgalı bir seyir izlemektedir. Bazı uzunluklarda yüksek, bazılarında ise düşük tutulmuştur. Bu durum, algoritmanın taşıma kapasitesine göre dinamik ve boşluğa özel bir tasarım yaklaşımı benimsediğini göstermektedir. bf değerler genelde orta seviyede ve istikrarlıdır. Bu, başlık genişliğinin algoritma tarafından yapısal ihtiyaçlara göre ama belirli sınırlar içinde tutulduğunu göstermektedir. tw: Orta kalınlıkta ve uzunluk değiştikçe kademeli olarak ayarlanmıştır. VPS burada gövde rijitliğini sağlarken malzeme tasarrufunu da gözeten bir strateji uygulamaktadır. Bu strateji, gövdenin kesme kuvvetlerine karşı dayanımını artırırken aynı zamanda burkulma riskini de azaltmayı hedeflemektedir. tf düşükten yükseğe değişen değerlerle uzunluğa duyarlı bir şekilde ayarlanmıştır. Bu, başlığın moment taleplerine göre optimize edildiğini gösterir.

B . Altıgen Boşluklar : dg tasarım derinliği genel olarak orta seviyeden yüksek seviyeye doğru artmaktadır. Bu durum, VPS algoritmasının uzunluk arttıkça taşıma kapasitesini artırmak için derinliği kademeli olarak artırdığını göstermektedir. bf orta seviyelerde dalgalanan ama genel olarak denge arayan bir yapıdadır. Başlık genişliği, yapısal rijitliği sağlayacak ama aşırıya kaçmayacak şekilde optimize edilmiştir. tw genelde orta seviyededir. Bu, rijitlik ve malzeme kullanımı arasında denge kurulduğunu göstermektedir. tf sabit yüksek seviyelerde tutulmuştur. Bu durum, başlık kısmında özellikle bükülme ve moment etkilerine karşı yüksek dayanım hedeflendiğini göstermektedir. Altıgen boşluk geometrisinin neden olduğu lokal gerilme birikimlerine karşı başlık bölgesinde rijitliğin artırılması, lokal ezilme riskini azaltmak açısından kritik bir tercihtir.

C . Sinüzoidal boşluklar : dg: yüksek seviyelerdedir ve uzunlukla birlikte artmaktadır. Bu durum, sinüzoidal boşlukların karmaşık gerilme dağılımına karşı yüksek taşıma kapasitesi ihtiyacına odaklandığını göstermektedir. bf orta seviyede tutulmuş, ancak yer yer azalan eğilimler de gözlemlenmiştir. Bu, rijitlik ihtiyacına göre uyarlamaları işaret eder. tw yüksekten ortaya doğru değişmektedir. Bu, sinüzoidal formun oluşturduğu karmaşık kesme dağılımlarına karşı gövdenin yeterli mukavemeti

koruması amacı taşımaktadır. Bu adaptif yaklaşım, dalgalı boşluk geometrisinin oluşturduğu yerel gerilmelere karşı gövde dayanımını optimize etme amacı taşımaktadır. tf sürekli olarak yüksek seviyede seyretmektedir. Bu durum, başlık bölgesinde moment ve burulma etkilerine karşı direnç artırma hedefini yansıtmaktadır.

VPS Algoritma, boşluk tipi ve kiriş uzunluğundaki farklılıklara dinamik ve uyumlu bir tasarım stratejisi uygulamaktadır; bu da taşıma kapasitesi ve yapısal gereksinimlere göre esnek bir yaklaşım sergilediğini göstermektedir. Dairesel boşluklarda, boyutlar dalgalı seyir izlemekle birlikte genel anlamda dengeli ve orta seviyede tutulmuştur; bu durum, malzeme tasarrufu ve rijitlik arasında iyi bir denge kurulduğunu işaret etmektedir. Altıgen boşluklarda derinlik artış gösterirken, başlık genişliği ve gövde kalınlığı dengeli kalmakta, bu da rijitliği sağlarken aşırı malzeme kullanımını önleyen bir tasarım olduğunu belirtmektedir. Sinüzoidal boşluklarda yüksek ve artan derinlik değerleri, karmaşık gerilme dağılımlarına karşı yüksek taşıma kapasitesi sağlama amacıyla optimize edilmiştir; kalınlıklar ise rijitliği ve dayanımı artıracak şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca, VPS algoritması, farklı başarısızlık modlarına (örneğin; kesme dayanımı, lokal burkulma, başlık ezilmesi) karşı uyarlanabilir tasarım eğilimleri sergileyerek mühendislik güvenliğini ön planda tutmaktadır. Genel olarak, algoritmanın boyutlara yönelik yaklaşımı, farklı geometri ve uzunluklara göre optimize edilmiş, yapısal ihtiyaçlarla malzeme verimliliğini dengeleyen bir yöntem izlemektedir.

ICA Algoritması: ICA algoritması ile farklı boşluk tiplerine sahip petek kirişlerin tasarımında elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

A - Dairesel boşluklar : ICA Algoritması, kiriş uzunluğuna bağlı olarak boyutlarda düzenli bir artış veya azalış yerine düzensiz ve adaptif bir değişim sergilemektedir; her uzunluğun taşıma kapasitesi ve yapısal gereksinimlerine göre boyutlar optimize edilmektedir. dg değerlerinde belirgin dalgalanmalar görülmekte, bu da algoritmanın sertlik ve malzeme kullanımı arasında en uygun dengeyi sağlamaya çalıştığını göstermektedir. bf de farklı uzunluklarda değişkenlik göstermekte, yapısal stabiliteyi sağlamak için farklı stratejiler uygulanmaktadır. tw ve tf da esnek şekilde ayarlanarak, eğilme ve momentlere karşı direnç artırılmaktadır; sabit olmayan bu değişimler, malzeme kullanımının optimize edildiğine işaret etmiştr. Ancak bu dalgalı

değişimler, gövde ve başlık bölgelerinde yerel burkulma ve ezilme risklerine karşı sürekli ve istikrarlı bir koruma sağlamaktan uzak görünmektedir.

B . Altıgen Boşluklar : dg düzensiz ancak genel olarak artan bir trend sergilemekte, orta uzunluklarda dalgalanmalar ile taşıma kapasitesi ve rijitlik arasında denge arandığını göstermektedir. bf farklı uzunluklarda inişli çıkışlı değişim göstererek, yapısal dengeyi sağlamak için farklı yaklaşımlar kullanıldığını işaret etmektedir. tw nispeten stabil olup ortalama bir değerde dalgalanmakta, malzeme kullanımı ile rijitlik arasında denge kurulduğunu göstermektedir. tf ise düzensiz değişimlerle optimize edilmekte, her uzunluğa özgü moment ve burulma etkilerine karşı direnç sağlanmaktadır. Bununla birlikte, özellikle başlık kalınlığındaki bu tutarsızlıklar, altıgen boşlukların neden olduğu lokal gerilme yoğunluklarına karşı yeterli rijitliğin her zaman sağlanamadığını düşündürmektedir.

C . Sinüzoidal boşluklar : dg yüksek seviyelerde olup 600 cm uzunluğa kadar artmakta, ardından 700 cm'de belirgin bir azalma göstermektedir; bu durum algoritmanın karmaşık gerilme dağılımına karşı dayanıklılığı optimize ettiğini göstermektedir. bf dalgalı ve büyük değişimler sergilemekte, rijitlik ve denge ihtiyaçlarına göre algoritmanın esnek ayarlamalar yaptığını işaret etmektedir tw yüksek ve değişken olmakla birlikte, yerel gerilmeler nedeniyle dayanımı artırmak amacıyla optimize edilmektedir. Ancak, bu dalgalı yapı, karmaşık sinüzoidal geometriye karşı kesme dayanımı açısından her uzunlukta güvenilir bir çözüm sunamamaktadır. tf orta ve yüksek seviyelerde dalgalanmalar göstermekte, burulma ve moment etkilerine karşı direnç artırılmaktadır.

ICA algoritması, farklı boşluk tiplerinde kesit boyutlarını belirlemede dalgalı ve düzensiz bir performans sergilemekte, boyutlar farklı uzunluklarda tutarlı olmayan değişimler göstermektedir; bu durum, algoritmanın tutarlı bir tasarım stratejisi geliştirmekte zorlandığını göstermektedir. dg, bf,tw ile tf düzensiz değişimler algoritmanın homojen ve kararlı çözümler üretme yeteneğinin sınırlı olduğunu, bu durumun tasarım kalitesi ve dayanıklılığı olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir. Analizler ICA'nın taşıma kapasitesi ve rijitlik ihtiyaçlarına göre gelişmiş optimizasyon stratejileri uygulamadığını, malzeme kullanımında ve performansta optimal dengeyi kurmakta yetersiz kaldığını ortaya koymaktadır. Özellikle yapısal başarısızlık

risklerini minimize etmeye yönelik boyutsal kararlılığın eksikliği, mühendislik açısından ciddi sınırlılıklar oluşturmaktadır. Genel olarak, ICA algoritmasının kesit boyutları ve değişkenliklerine ilişkin esneklik ve kararlılık bakımından geliştirilmesi gerekmekte, böylece kiriş tasarımında daha güvenilir ve etkili sonuçlar alınabilmektedir.

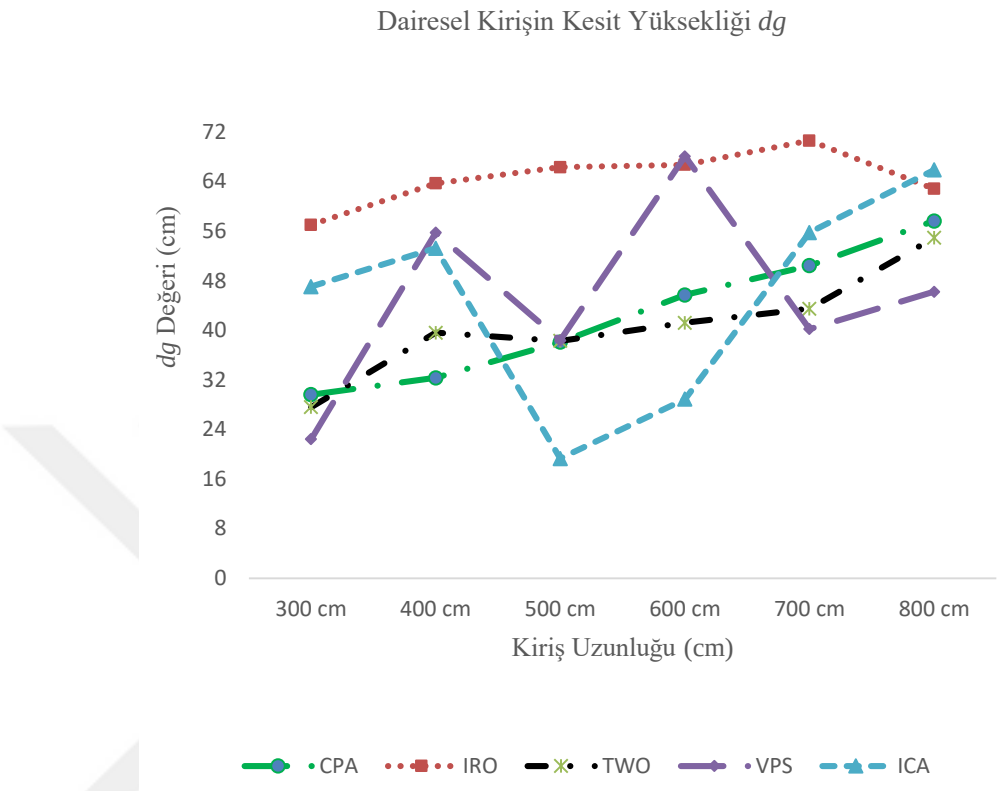
3.11. Tasarım Değişkenleri Açısından Algoritmaların Karşılaştırmalı Performans Analizi

Her bir algoritmanın üç farklı boşluk tipi (dairesel, altıgen, sinüzoidal) üzerindeki performansı analiz edildikten sonra, bu bölümde dört temel kesit boyutu (kesit yüksekliği, başlık genişliği, başlık kalınlığı ve gövde genişliği) açısından algoritmalar arası karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılmaktadır. Bu karşılaştırmalar, sadece geometrik verimlilik değil, aynı zamanda taşıyıcılık, burkulma ve rijitlik gibi yapısal başarısızlık modlarına karşı potansiyel performansı da ortaya koymayı hedeflemektedir. Bu analiz, aynı tasarım değişkeni hedeflendiğinde beş algoritmanın mimari verimlilik (yüksekliğin kullanımı ve alan tasarrufu) ve ekonomik etkinlik (hacim, ağırlık ya da olası maliyet azaltımı) açısından farklılıklarını ortaya koymayı amaçlamaktadır. Ayrıca, farklı kiriş uzunluklarında daha stabil çözümler üreten algoritmaların belirlenmesi hedeflenmektedir.

3.11.1 Dairesel Boşluklu Kirişlerde Kesit Yüksekliğinin Algoritmalara Göre Analizi

Şekil 110'da, dairesel boşluklara sahip kirişlerde kesit yüksekliği (dg) değerleri algoritmalar arasında belirgin farklılıklar göstermektedir. Kesit yüksekliği, eğilme momentine karşı dayanımı temsil ettiğinden, bu farklılıklar doğrudan taşıyıcılık kapasitesine etki etmektedirIRO, tüm kiriş uzunluklarında en yüksek kesit yüksekliği değerlerini sunmuş ve bu da onu eğilme dayanımı açısından en korumacı algoritma haline getirmiştir. Ancak bu yaklaşım, yüksek malzeme tüketimine neden olabilir. VPS ve ICA algoritmaları ise, özellikle 300 cm ve 500 cm gibi kısa ve orta uzunluklarda düşük kesit yüksekliği sunarak malzeme ekonomisi sağlamayı amaçlamıştır. Ancak bu durum, eğilme dayanımı açısından risk oluşturabilecek bir tasarım tercihidir. CPA ve TWO algoritmaları ise, kesit yüksekliğinde dengeli ve orta

seviyeli çözümler sunarak hem taşıyıcılık hem de malzeme kullanımı açısından optimize edilmiş bir tasarım yaklaşımı sergilemiştir.

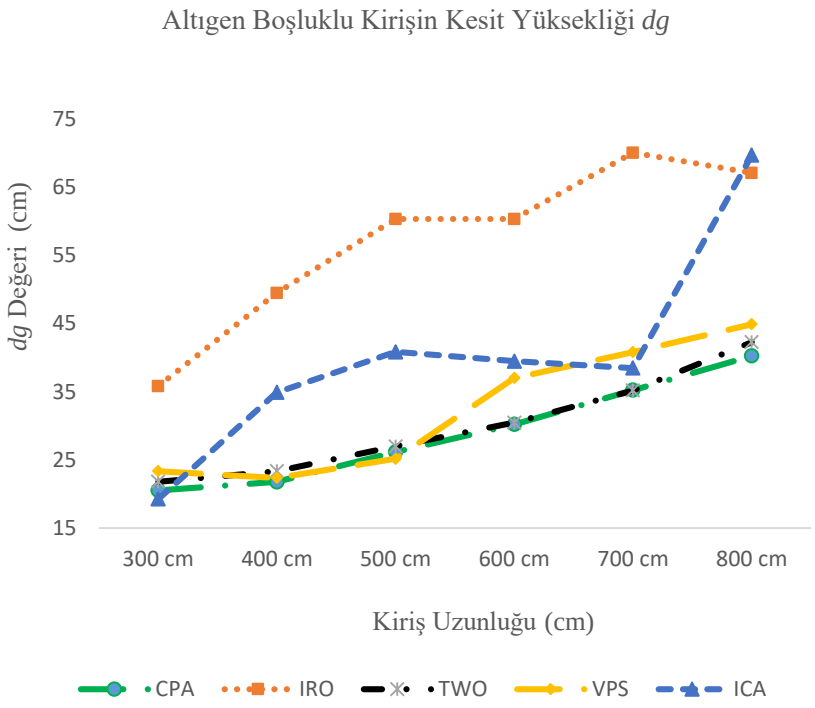


Şekil 110. Beş Algoritma ile Dairesel Boşluklu Petek Kirişlerin Kesit Yüksekliği Değerlendirmesi

3.11.2 Altıgen Boşluklu Kirişlerde Kesit Yüksekliğinin Algoritmalara Göre Analizi

Şekil 111'de, altıgen boşluklu petek kirişlerde kesit yüksekliği (dg) değerleri algoritmalara göre belirgin farklılıklar göstermektedir. Kesit yüksekliği, eğilme momentine karşı dayanım açısından kritik bir parametre olduğundan, bu farklılıklar doğrudan taşıma kapasitesi ve yapısal rijitliğe etki etmektedir. IRO algoritması, tüm uzunluklarda en yüksek dg değerlerini sunarak rijitliği önceliklendiren, taşıma kapasitesi yüksek çözümler üretmiştir. Bu yaklaşım, özellikle boşluk arttıkça oluşabilecek eğilme taleplerine karşı koruyucu bir strateji olarak değerlendirilebilir. CPA ve TWO algoritmaları, kısa ve orta uzunluklarda daha düşük ancak dengeli dg

değerleriyle malzeme kullanımında ekonomi sağlamayı amaçlamış; buna rağmen yapısal yeterliliği koruyacak seviyede kalmışlardır. Bu durum, boşluğa özel kontrollü bir optimizasyon uygulandığını göstermektedir. ICA algoritması, 300 cm'de en düşük ve 800 cm'de en yüksek kesit yüksekliği ile oldukça tutarsız bir seyir göstermektedir. Bu dalgalı davranış, algoritmanın boyutsal kararlılık konusunda zayıf olabileceğine işaret etmektedir. VPS algoritması ise çoğu uzunlukta dengeli ve kabul edilebilir dg değerleri sunarak hem mimari gereksinimlere hem de ekonomik sınırlara uygun çözümler üretmiştir. Bu yaklaşım, rijitlik ve malzeme verimliliği arasında bir denge kurulduğunu göstermektedir.

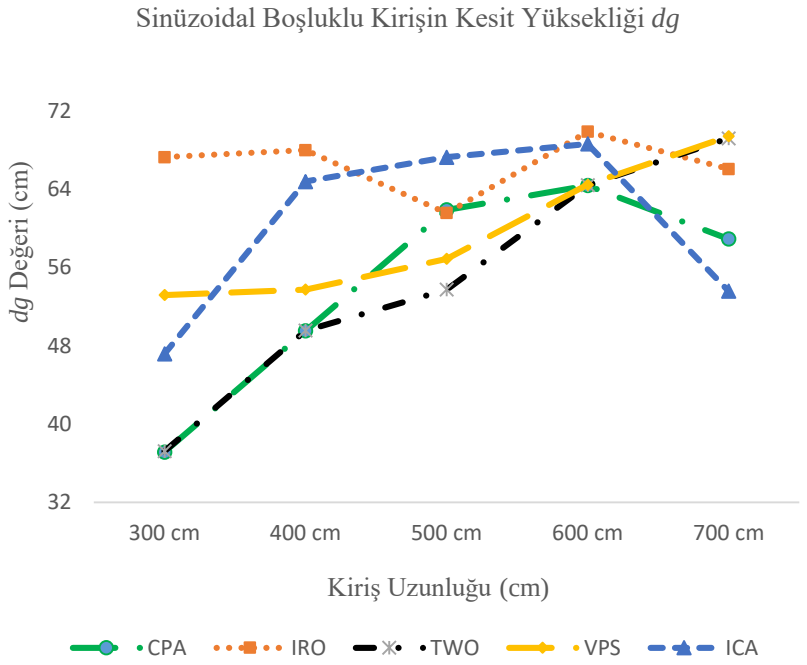


Şekil 111. Beş Algoritma ile Altıgen Boşluklu Petek Kirişlerin Kesit Yüksekliği Değerlendirmesi

Genel olarak değerlendirildiğinde, IRO algoritması taşıyıcılığı artırma yönünde agresif bir strateji izlerken, CPA ve TWO daha ekonomik ve dengeli çözümler sunmuştur. ICA algoritmasının ise tutarsız davranışı, uzunluk bazlı stabilite ihtiyacını karşılamada yetersiz kaldığını düşündürmektedir. VPS algoritması ise istikrarlı ve optimize bir eğilme direnci sağlayarak mühendislik açısından dengeli bir performans sergilemiştir.

3.11.3 Sinüzoidal Boşluklu Kirişlerde Kesit Yüksekliğinin Algoritmalara Göre Analizi

Şekil 112'de, sinüzoidal boşluklu petek kirişlerde kesit yüksekliği (dg) değerleri, algoritmalara göre belirgin eğilimler sergilemekte olup özellikle orta ve uzun boşluklarda dikkat çekici farklar ortaya koymaktadır. Bu boşluk türü, dalgalı geometrisi nedeniyle karmaşık gerilme dağılımları oluşturduğundan, kesit yüksekliğinin optimizasyonu taşıyıcılık ve rijitlik açısından daha kritik hale gelmektedir. IRO algoritması, tüm uzunluklarda yüksek ve kararlı dg değerleri sunarak taşıma kapasitesini önceliklendiren bir strateji izlemektedir. Bu yaklaşım, boşluk arttıkça eğilme momentine karşı yeterli dayanım sağlama amacını yansıtmaktadır. CPA algoritması, özellikle 300 cm uzunlukta düşük bir kesit yüksekliği seçerek malzeme tasarrufuna yönelmiş; ancak artan boşluklarda bu değeri istikrarlı bir şekilde yükselterek taşıyıcılığı destekleyen dengeli bir yapı ortaya koymuştur.

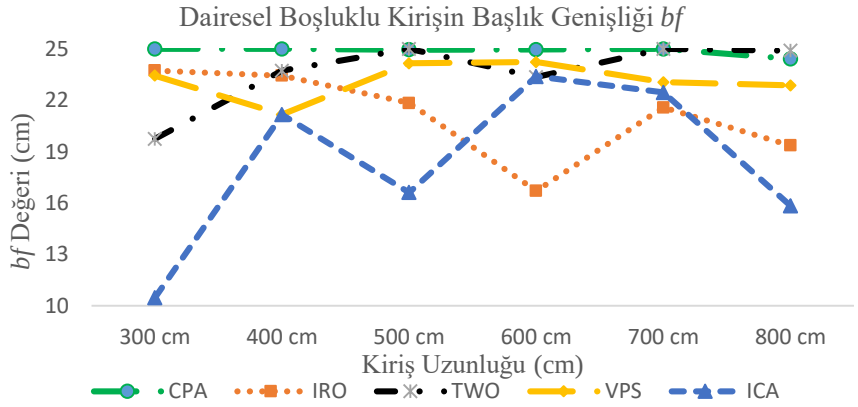


Şekil 112. Beş Algoritma ile Sinüzoidal Boşluklu Petek Kirişlerin Kesit Yüksekliği Değerlendirmesi

VPS ve TWO algoritmaları, orta ve uzun boşluklarda (500–700 cm) dg değerlerini düzenli biçimde artırarak boşlukla birlikte artan moment taleplerine duyarlı çözümler üretmiştir. Bu durum, algoritmaların rijitlik ihtiyacına adaptif bir şekilde karşılık verdiğini göstermektedir. ICA algoritması, 600 cm uzunluğunda maksimum değere ulaşıp 700 cm'de belirgin bir düşüş göstermiştir. Bu davranış, algoritmanın boşlukla birlikte tutarlılığı koruyamadığını ve sinusoidal boşlukların karmaşıklığına karşı yeterince istikrarlı tepki veremediğini düşündürmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, sinüzoidal boşluklu kirişlerde kesit yüksekliğinin optimizasyonu algoritmalara göre farklılık göstermekte; IRO, CPA ve VPS daha dengeli ve güvenli çözümler sunarken, ICA algoritması bu geometriye karşı kararlılık açısından zayıf bir performans sergilemiştir. TWO ise özellikle 700 cm'de yüksek taşıyıcılık sağlayan etkili bir yapı ortaya koymuştur.

3.11.4 Dairesel Boşluklu Kirişlerde Başlık Genişliğinin Algoritmalara Göre Analizi

Şekil 113'te, dairesel boşluklu petek kirişlerde üst başlık genişliği (bf) değerleri algoritmalara göre önemli farklılıklar sergilemektedir. Bu değişken, özellikle üst başlık rijitliği ve basınç etkilerine karşı dayanım açısından kritik bir rol oynamaktadır. CPA algoritması, tüm boşluklarda bf değerini sabit yüksek seviyede koruyarak oldukça istikrarlı ve güvenli bir tasarım stratejisi ortaya koymuştur.



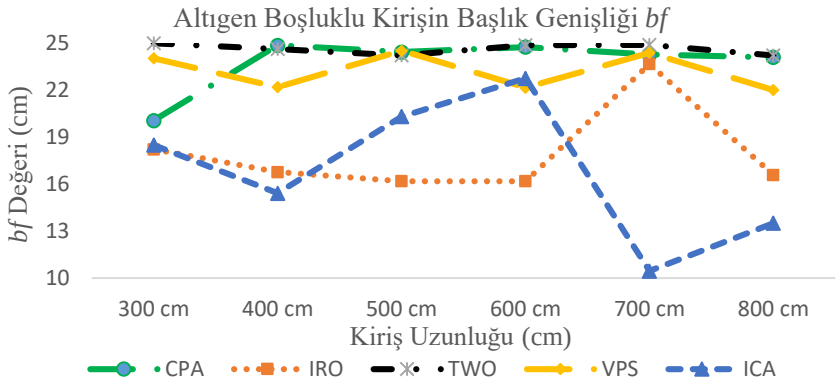
Şekil 113. Beş Algoritma ile Dairesel Boşluklu Petek Kirişlerin Başlık Genişliği Değerlendirmesi

Bu durum, rijitlik ve yük aktarımı açısından kararlı çözümler sunduğunu göstermektedir. IRO algoritması, boşluk arttıkça belirgin bir düşüş eğilimi sergilemiştir. Özellikle 600 cm uzunluğunda ulaşılan en düşük değer (yaklaşık 16.7 cm), algoritmanın yerel optimizasyonlar yoluyla malzeme tasarrufu ya da ağırlık azaltımı hedeflediğini düşündürmektedir. Ancak bu durum rijitlikten taviz anlamına da gelebilir. TWO ve VPS algoritmaları, orta seviyelerde ve sınırlı dalgalanmalarla uyarlanabilir bir tasarım yaklaşımı sergilemiştir. Değerlerdeki hafif değişiklikler, farklı uzunluklara göre rijitlik gereksinimlerine verilen kontrollü tepkileri yansıtmaktadır. ICA algoritması, hem 300 cm'deki oldukça düşük başlangıç değeri (~10.5 cm) hem de boşluklar boyunca gösterdiği düzensiz dalgalanmalar ile kararsız ve güvensiz bir davranış ortaya koymuştur. Bu durum, algoritmanın tasarım optimizasyonunda başlık genişliğini kontrol etmede tutarsız kaldığını göstermektedir.

Genel olarak, CPA algoritması rijitlik açısından en istikrarlı çözümü sunarken, ICA algoritması genişlik parametresinde büyük sapmalarla zayıf bir kararlılık sergilemektedir. IRO algoritmasının eğilimi ise ekonomik fayda ile yapısal güvenlik arasında bir denge arayışını temsil etmektedir.

3.11.5 Altıgen Boşluklu Kirişlerde Başlık Genişliğinin Algoritmalara Göre Analizi

Şekil 114'te, altıgen boşluklu kirişler için başlık genişliği (bf) değerleri algoritmalar arasında dikkat çekici farklılıklar sergilemektedir. Bu parametre, özellikle üst başlık rijitliği ve lokal burkulma riskine karşı direncin belirlenmesinde önemli bir göstergedir. CPA algoritması, tüm boşluklar boyunca dengeli ve kararlı değerler sunmuştur (20.06–24.86 cm aralığında). Bu eğilim, algoritmanın hem rijitlik hem de malzeme kullanımı açısından uyumlu ve güvenilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir. IRO algoritması, genel olarak 16 cm civarında düşük değerler üretmiştir. Bu durum, malzeme verimliliğini önceliklendiren bir yaklaşımı yansıtmakta; ancak bu dar başlık genişlikleri, özellikle büyük boşluklarda rijitlik kaybına neden olabilir. TWO algoritması, neredeyse tüm uzunluklarda 25 cm'e yakın sabit değerler koruyarak muhafazakâr ve rijitliğe öncelik veren bir strateji izlemiştir. Bu kararlı yapı, başlık bölgesinde yüksek dayanım ihtiyacını karşılama amacını yansıtır. VPS algoritması, küçük dalgalanmalarla birlikte genel olarak stabil bir yapı sergilemiştir.



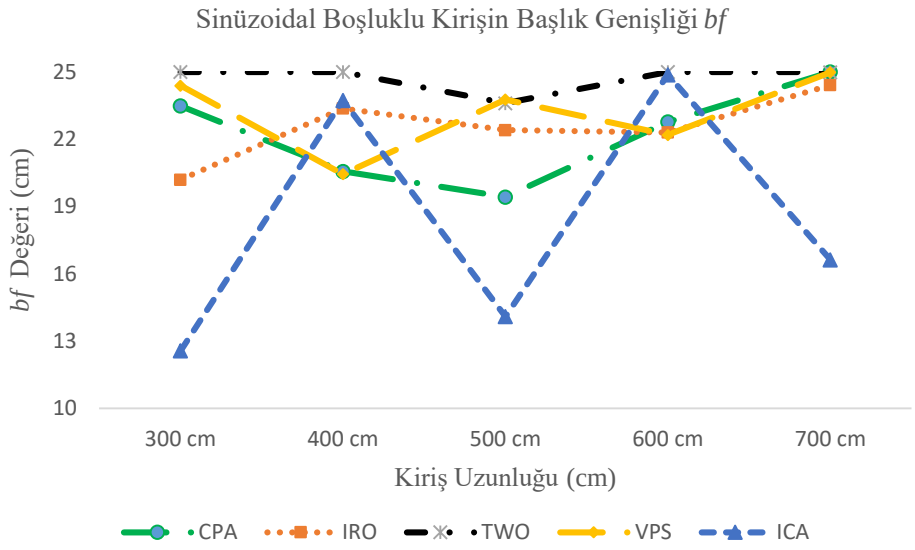
Şekil 114. Beş Algoritma ile Altıgen Boşluklu Petek Kirişlerin Başlık Genişliği Değerlendirmesi

Değerler 23–25 cm bandında yoğunlaşarak rijitlik ve ekonomi arasında dengeli bir tasarım sunmuştur. ICA algoritması, aşırı dalgalanmalar ve tutarsızlıklarla dikkat çekmektedir. Özellikle 700 cm açıklığında sadece ~10.5 cm'lik bir değer sunması, algoritmanın altıgen boşluk geometrisine yeterince adapte olamadığını ve yüksek boşluklarda yetersiz rijitlik riski taşıdığını göstermektedir.

Genel değerlendirme olarak, TWO ve CPA algoritmaları genişlik bakımından en kararlı ve güvenli çözümleri sunarken, ICA algoritması düşük kararlılık ve yapısal güven eksikliği göstermektedir. IRO ise özellikle malzeme azaltımı hedefiyle hareket ederken rijitlikten taviz verme eğilimindedir.

3.11.6 Sinüzoidal Boşluklu Kirişlerde Başlık Genişliğinin Algoritmalara Göre Analizi

Şekil 115'te, sinusoidal boşluk geometrisine sahip kirişlerde başlık genişliği (bf) değerlerinin algoritmalar arasında belirgin farklılıklar gösterdiği gözlemlenmektedir. Bu parametre, özellikle üst başlık rijitliği ve genel stabilite açısından önemli bir belirleyicidir. TWO algoritması, tüm boşluklarda 25 cm'e yakın sabit ve maksimuma yakın değerler üretmiştir. Bu, algoritmanın yüksek stabilite ve rijitlik öncelikli bir yaklaşım benimsediğini ve sinüzoidal boşlukların oluşturabileceği karmaşık gerilmelere karşı koruyucu bir strateji izlediğini göstermektedir. CPA algoritması, 19.4 cm ile 25 cm arasında değişen değerlerle esnek ama kontrollü bir tasarım yaklaşımı sergilemiştir. Bu dalgalanmalar, boşluk arttıkça rijitlik ihtiyacına göre optimize edilen bir tasarım stratejisini yansıtmaktadır. IRO algoritması, özellikle CPA ile benzer seviyede sabit ve kararlı değerler üretmiş; bu da algoritmanın yapısal stabiliteyi korumaya yönelik bir eğilim gösterdiğini ortaya koymaktadır. VPS algoritması, genel olarak kabul edilebilir ve dengeli sonuçlar üretmiş olsa da, 400 cm ve 600 cm uzunluklarında gözle görülür düşüşler yaşanmıştır. Bu durum, algoritmanın yer yer rijitlikten taviz verebildiğini düşündürmektedir. ICA algoritması, önceki boşluk türlerinde olduğu gibi burada da yüksek dalgalanma ve kararsızlık sergilemiştir. Özellikle 300 cm'de 12.56 cm ve 500 cm'de 14.09 cm gibi oldukça düşük değerler, başlık rijitliği açısından yetersiz tasarım anlamına gelmektedir. Bu da algoritmanın sinusoidal geometrinin dalgalı yapısına etkili şekilde adapte olamadığını ve stabilite sorunları oluşturabileceğini göstermektedir.



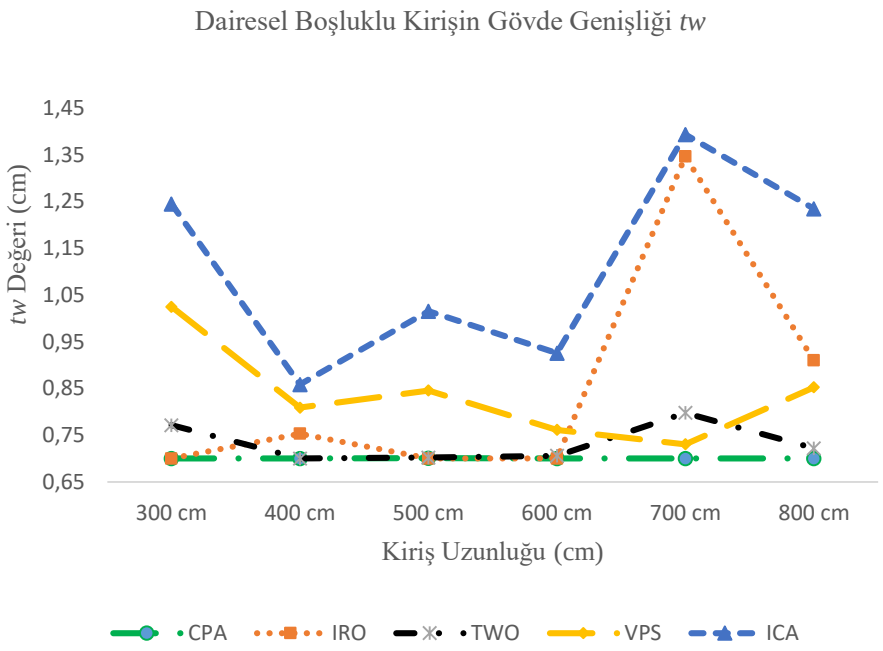
Şekil 115. Beş Algoritma ile Sinüzoidal Boşluklu Petek Kirişlerin Başlık Genişliği Değerlendirmesi

Sonuç olarak, TWO ve CPA algoritmaları sinusoidal boşluklu kirişlerde başlık genişliği bakımından en kararlı ve güvenilir çözümleri sunarken, ICA algoritması, yapısal güvenilirlik açısından en zayıf performansı sergilemiştir. Bu analiz, başlık rijitliğinin boşluk geometrisine göre nasıl optimize edildiğini ve algoritmaların bu gereksinimlere ne ölçüde cevap verebildiğini ortaya koymaktadır.

3.11.7 Dairesel Boşluklu Kirişlerde Gövde Genişliğinin Algoritmalara Göre Analizi

Şekil 116'da, gövde genişliği (tw) değerlerinin algoritmalara göre değişimi değerlendirilmiştir. Bu parametre, burkulma riski, taşıma kapasitesi ve genel rijitlik açısından son derece kritik bir rol oynamaktadır. CPA algoritması, tüm boşluklarda yaklaşık 0.70 cm değerinde sabit sonuçlar sunarak, yüksek düzeyde stabilite sergilemiştir. Bu yaklaşım, güvenli ve tutarlı bir taşıyıcı sistem hedeflendiğini ortaya koymaktadır. IRO algoritması, kısa boşluklarda stabil bir yapı sunsa da, 700 cm uzunluğunda 1.3462 cm gibi oldukça yüksek bir değere ulaşarak kararsız bir davranış profili sergilemiştir. Bu durum, algoritmanın özellikle uzun boşluklarda rijitlik dengesini sağlamakta zorlandığını düşündürmektedir. TWO algoritması, 0.70–0.77 cm

aralığında değişen değerlerle kabul edilebilir sınırlar içinde kalmış, burkulma riskine karşı dengeli ve optimize bir yapı önerisi sunmuştur.



Şekil 116. Beş Algoritma ile Dairesel Boşluklu Petek Kirişlerin Gövde Genişliği Değerlendirmesi

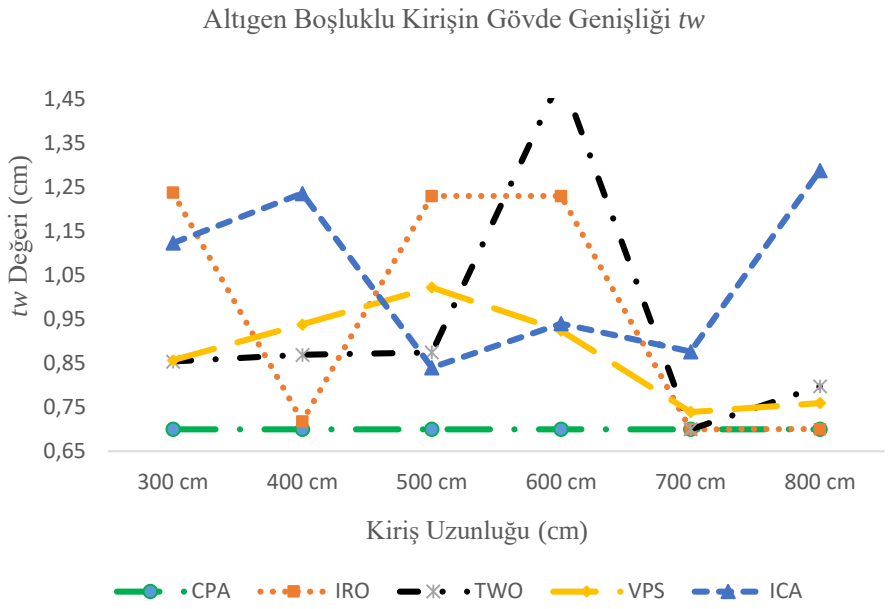
VPS algoritması, 300 cm'de 1.0249 cm ile yüksek bir başlangıç yapmış, ardından kademeli azalmalarla daha esnek fakat daha az stabil bir profil çizmiştir. Bu, değişken geometrilere karşı duyarlılığın arttığını ama stabilitenin sınırlı kaldığını göstermektedir. ICA algoritması ise en yüksek dalgalanmayı sergileyen algoritma olmuştur. Değerler 0.858 cm ile 1.393 cm arasında değişmiş, bu da algoritmanın kararsız, tutarsız ve optimize edilmemiş sonuçlar ürettiğini göstermektedir. Bu değişkenlik, gövde rijitliğinin sürekli kontrol altında tutulmadığını ve yapısal güvenlik açısından zayıf bir performans ortaya konduğunu yansıtmaktadır.

Sonuç olarak, CPA ve TWO algoritmaları, dairesel boşluklu kirişlerde gövde genişliği bakımından en dengeli ve güvenilir sonuçları sunarken; IRO ve özellikle ICA algoritmaları, uzun boşluklarda ciddi stabilite sorunları yaratabilecek kararsız çözümler üretmiştir. Bu analiz, gövde bölgesinin burkulma ve rijitlik açısından hangi algoritmalarla daha etkin yönetilebildiğini açıkça ortaya koymaktadır.

3.11.8 Altıgen Boşluklu Kirişlerde Gövde Genişliğinin Algoritmalara Göre Analizi

Şekil 117'de, altıgen boşluklu kirişler için gövde genişliği (tw) değerlerinin algoritmalar arasındaki değişimi değerlendirilmiştir. Bu parametre, özellikle burkulma direnci ve kesit rijitliği açısından kritik öneme sahiptir. CPA algoritması, tüm kiriş uzunluklarında 0.7 cm sabit değeriyle maksimum düzeyde stabilite sağlamış ve en tutarlı tasarım yaklaşımını sergilemiştir. Bu, algoritmanın altıgen geometrilere karşı optimize ve dengeli bir çözüm ürettiğini göstermektedir. IRO algoritması, 300 cm, 500 cm ve 600 cm boşluklarında sırasıyla 1.2371 cm ve 1.2296 cm gibi yüksek değerlere ulaşarak, açık biçimde kararsız ve dalgalı bir tasarım davranışı ortaya koymuştur. Bu durum, özellikle uzun boşluklarda gövde rijitliğini kontrol etmekte zorlandığını düşündürmektedir. TWO algoritması, 600 cm uzunluğunda 1.5000 cm değeri ile tüm algoritmalar arasında en yüksek gövde genişliği değerine ulaşmıştır. Bu durum, algoritmanın gövde bölgesine yönelik aşırı korumacı ve belki de ekonomik olmayan bir yaklaşım benimsediğini göstermektedir. VPS algoritması, 0.7393 cm ile 1.0218 cm aralığında değişen değerlerle orta düzeyde bir stabilite sunmuştur. Özellikle 500–700 cm arasında değişken ancak sınırlı sapmalar göstermesi, kontrollü bir adaptasyon stratejisi izlediğini işaret etmektedir. ICA algoritması ise, özellikle 300 cm, 400 cm ve 800 cm uzunluklarında 1.1232 cm ile 1.2875 cm arasında değişen değerlerle yüksek oranda dalgalanma sergilemiştir. Bu davranış, gövde rijitliği açısından yetersiz ve optimize edilmemiş bir tasarım yapısına işaret etmektedir.

Genel değerlendirme yapıldığında, CPA algoritması, altıgen boşluklu kirişlerde gövde genişliği bakımından en yüksek stabiliteyi sunarken, IRO, ICA ve özellikle TWO algoritmaları ciddi dalgalanmalarla tasarım güvenilirliğini düşürmektedir. Gövde bölgesi gibi burkulmaya açık bir alanda bu tür kararsızlıklar, yapısal güvenlik açısından ciddi riskler oluşturmaktadır.

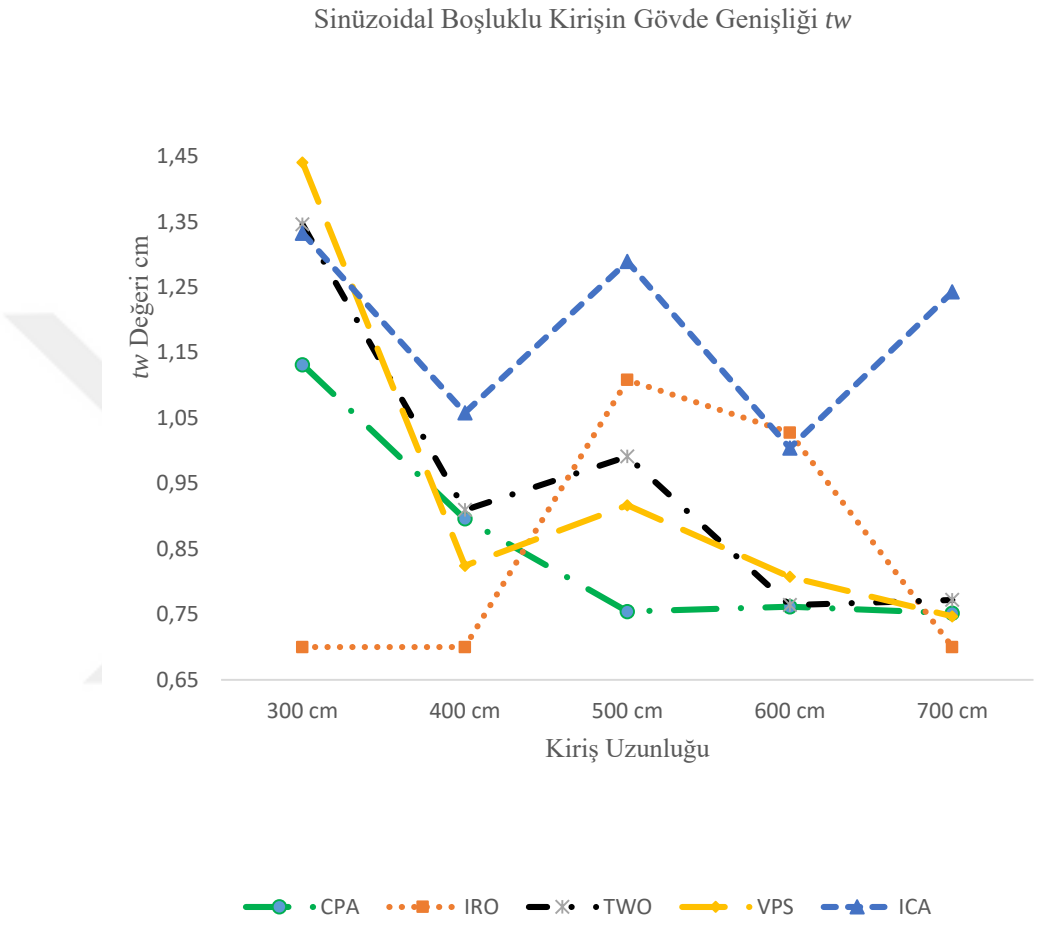


Şekil 117. Beş Algoritma ile Altıgen Boşluklu Petek Kirişlerin Gövde Genişliği Değerlendirmesi

3.11.9 Sinüzoidal Boşluklu Kirişlerde Gövde Genişliğinin Algoritmalara Göre Analizi

Şekil 118'de, sinüzoidal boşluklu kirişlerde gövde genişliği (tw) değerlerinin algoritmalara göre değişimi analiz edilmiştir. Bu parametre, özellikle dalgalı boşluk geometrisinin oluşturduğu yerel gerilmelere karşı gövdenin stabilitesi açısından kritik rol oynamaktadır. CPA algoritması, 0.7543 cm ile 1.1314 cm arasında değişen değerlerle görece stabil bir davranış sergilemiştir. En belirgin sapma 300 cm uzunluğunda gözlemlenmiş olsa da genel dağılım, kontrollü bir adaptasyon yaklaşımı ile örtüşmektedir. IRO algoritması, genellikle 0.7 cm seviyesinde yüksek stabilite göstermiştir. Ancak, 500 ve 600 cm uzunluklarında sırasıyla 1.1081 cm ve 1.0276 cm değerlerin çıkan ani artışlar, algoritmanın bazı boşluklarda tutarsız tepkiler verdiğini göstermektedir. TWO algoritması, özellikle 300 cm uzunluğunda 1.3458 cm değeri ile önemli bir kararsızlık ortaya koymuştur. Diğer uzunluklarda daha dengeli seyretse de, genel olarak tam bir stabilite sağladığı söylenemez. VPS algoritması, 300 cm uzunluğunda 1.4406 cm ile tüm algoritmalar arasında en yüksek sapmayı üretmiştir. Sonraki uzunluklarda değerlerde düşüş görülse de, bu dalgalı yapı dengesiz bir tasarım

karakteristiğine işaret etmektedir. ICA algoritması, neredeyse tüm uzunluklarda 1.0041 cm ile 1.3325 cm arasında değişen değerlerle en düşük düzeyde stabilite sergilemiştir. Bu durum, gövde rijitliği açısından algoritmanın yetersiz ve öngörülemez bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

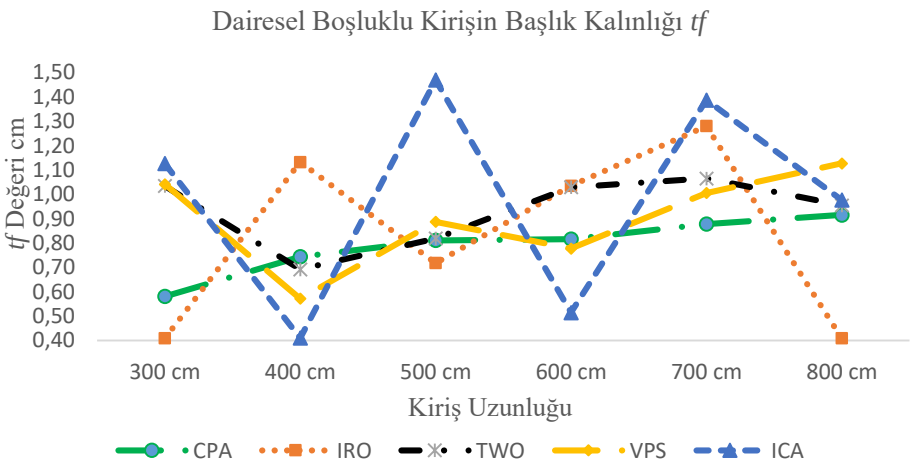


Şekil 118. Beş Algoritma ile Sinüzoidal Boşluklu Petek Kirişlerin Gövde Genişliği Değerlendirmesi

Genel değerlendirmede, CPA algoritması kabul edilebilir düzeyde dengeli bir yapı sunarken, VPS ve ICA algoritmaları, özellikle kısa boşluklarda yüksek sapmalar ve dengesiz tasarım davranışları ile dikkat çekmiştir. Gövde genişliği gibi hassas bir parametrede bu tür dalgalanmalar, yapısal güvenlik ve performans açısından olumsuz etkiler doğurabilir.

3.11.10 Dairesel Boşluklu Kirişlerde Başlık Kalınlığının Algoritmalara Göre Analizi

Şekil 119'da, dairesel boşluklu kirişlerde üst başlık kalınlığı (tf) değerlerinin algoritmalara göre dağılımı incelenmiştir. Bu parametre, özellikle eğilme momentlerine karşı direncin belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır. CPA algoritması, 0.5806 cm ile 0.9154 cm arasında kademeli bir artış sergileyerek, yüksek düzeyde stabil ve kontrollü bir tasarım yaklaşımı ortaya koymuştur. Bu eğilim, farklı kiriş uzunluklarına karşı algoritmanın uyarlanabilir ve kararlı olduğunu göstermektedir. IRO algoritması, 0.4081 cm ile 1.2800 cm arasında geniş bir değişim aralığına sahiptir ve özellikle 400 cm ve 700 cm uzunluklarında görülen ani sıçramalar, tasarım istikrarının zayıf olduğunu ve karar verme sürecinde kararsızlık yaşandığını ortaya koymaktadır. TWO algoritması, çoğu uzunlukta 0.9 cm civarında sabit değerler üretmiş; yalnızca 400 cm ve 800 cm uzunluklarında küçük sapmalar göstermiştir.



Şekil 119. Beş Algoritma ile Dairesel Boşluklu Petek Kirişlerin Başlık Kalınlığı Değerlendirmesi

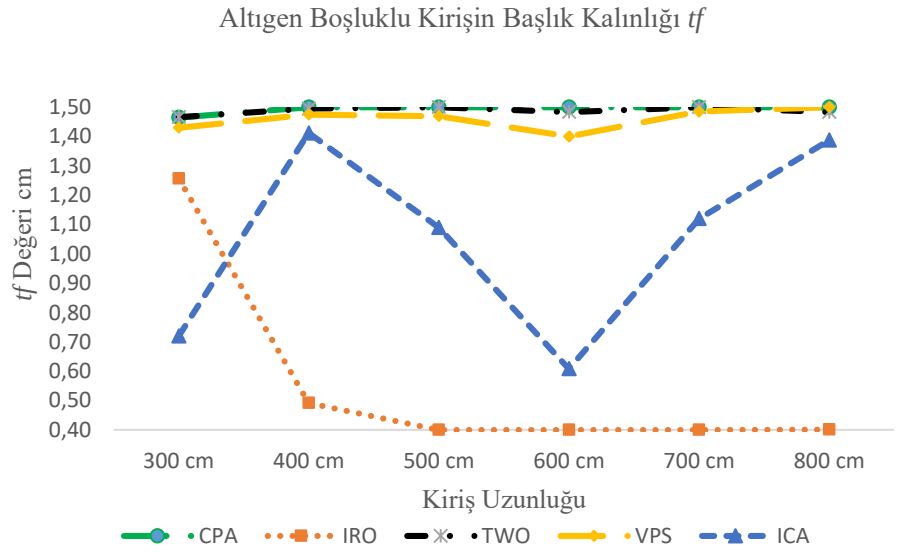
Bu yapı, orta düzeyde bir stabilite sağladığını göstermektedir. VPS algoritması, belirli dalgalanmalara rağmen genel eğilim açısından kararlı ve kabul edilebilir bir performans ortaya koymuştur. Özellikle orta uzunluklarda elde edilen sonuçlar, algoritmanın optimum dayanım-malzeme dengesi kurabildiğini göstermektedir. ICA algoritması, 1.4691 cm ve 1.3873 cm gibi çok yüksek değerlere ulaşarak, gövde

tasarımında belirgin kararsızlık sergilemiştir. Dalgalanma seviyesi yüksek olduğundan, algoritmanın dairesel boşluklu kirişlerde güvenilirlik seviyesi düşüktür.

Genel değerlendirmede, CPA algoritması, başlık kalınlığı gibi kritik bir parametrede yüksek düzeyde uyum ve istikrar sağlarken, IRO ve ICA algoritmaları farklı uzunluklarda ani değişimlerle düşük kararlılık ve öngörülemezlik sergilemektedir. Bu durum, ilgili algoritmaların eğilme dayanımı gereksinimlerini dengeli karşılamada yetersiz kaldığını işaret etmektedir.

3.11.11. Altıgen Boşluklu Kirişlerde Başlık Kalınlığının Algoritmalara Göre Analizi

Şekil 120'de, altıgen boşluklu kirişlerde başlık kalınlığı (tf) değerlerinin algoritmalara göre dağılımı incelenmiştir.



Şekil 120. Beş Algoritma ile Altıgen Boşluklu Petek Kirişlerin Başlık Kalınlığı Değerlendirmesi

Bu parametre, özellikle eğilme kapasitesinin belirlenmesinde kritik bir rol oynamakta ve yapısal güvenilirliğin doğrudan bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir. CPA algoritması, 1.4652 cm ile 1.5 cm arasında çok dar bir aralıkta sonuçlar üretmiş ve bu durum, algoritmanın yüksek düzeyde stabil,

öngörülebilir ve tutarlı bir tasarım stratejisi izlediğini göstermektedir. Her bir kiriş uzunluğu için benzer sonuçlar sunması, sistematik bir davranış ortaya koymaktadır. TWO algoritması, benzer şekilde 1.5 cm'ye yakın sabit değerler üretmiş; bu da algoritmanın yüksek güvenlik marjına sahip bir yaklaşım sergilediğini ve tasarım esnekliğinden ödün vermeksizin dayanımı ön planda tuttuğunu göstermektedir. VPS algoritması, küçük ölçekli dalgalanmalar göstermiş olsa da genel olarak 1.4 – 1.5 cm bandında kalarak kabul edilebilir düzeyde stabilite ve optimizasyon sağlamıştır. IRO algoritması, özellikle 400 cm uzunluktan itibaren 0.4000 cm gibi son derece düşük değerlerle, minimum malzeme kullanımı yaklaşımını benimsemiş görünmektedir. Ancak bu durum, taşıma kapasitesi ve güvenlik açısından riskli bir profil çizmektedir ve düşük düzeyde yapısal güvenilirlik anlamına gelmektedir. ICA algoritması, 0.6081 cm ile 1.4119 cm arasında geniş bir aralıkta sonuçlar üretmiş ve belirgin bir kararsızlık eğilimi sergilemiştir. Dalgalanmaların bu seviyede olması, algoritmanın başlık kalınlığı tasarımında tutarsız kararlar verdiğini ve stabil bir optimizasyon yapısından uzaklaştığını ortaya koymaktadır.

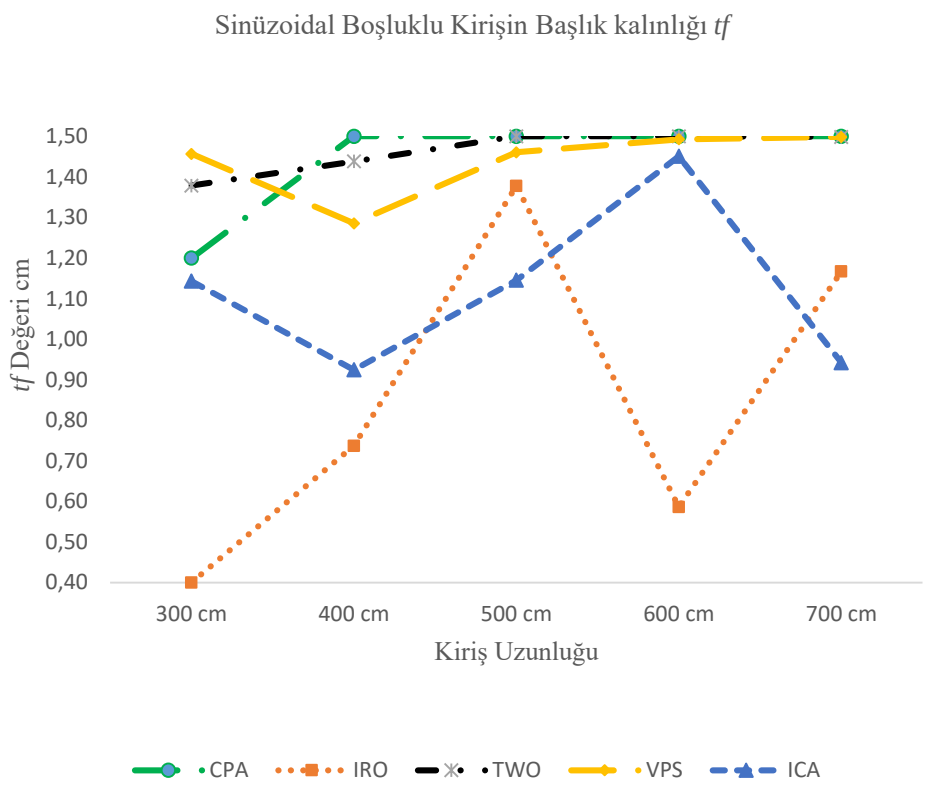
Genel olarak değerlendirildiğinde, CPA, TWO ve VPS algoritmaları, altıgen boşluklu kirişlerde başlık kalınlığı açısından yüksek stabilite ve güvenilirlik sunarken, IRO ve ICA algoritmaları önemli ölçüde kararsızlık ve yetersiz dayanım potansiyeli sergilemektedir.

3.11.12. Sinüzoidal Boşluklu Kirişlerde Başlık Kalınlığının Algoritmalara Göre Analizi

Şekil 121'de, sinusoidal boşluklu kirişler için başlık kalınlığı (tf) değerlerinin algoritmalara göre değişimi sunulmuştur. Bu parametre, özellikle eğilme dayanımı ve burkulma direncinin artırılması açısından kritik olup tasarımın genel rijitliğini doğrudan etkilemektedir. CPA algoritması, 300 cm uzunluğunda 1.2000 cm değeri ile başlayıp 400 cm'den itibaren 1.5000 cm seviyesinde sabitlenmiş ve üst düzey bir stabilite sergilemiştir. Bu durum, algoritmanın artan kiriş boylarına karşı tutarlı ve güvenilir bir tasarım eğilimi benimsediğini göstermektedir. TWO algoritması, tüm uzunluklar boyunca 1.3787 – 1.5000 cm aralığında sabit kalan yüksek değerlerle kararlı, güvenlik odaklı ve rijit bir profil ortaya koymuştur. Bu algoritmanın yaklaşımı, maksimum dayanım hedefiyle örtüşmektedir. VPS algoritması, bazı kısa vadeli

dalgalanmalara rağmen genel olarak yüksek tf değerlerini korumuş, özellikle 600 ve 700 cm uzunluklarında istikrarını pekiştirerek dengeli bir performans ortaya koymuştur. ICA algoritması, 1.1428 cm ile başlayıp bazı uzunluklarda düşüşler ve yükselişler sergilemiştir. Özellikle 400 ve 700 cm'deki azalmalar, algoritmanın kararsız ve dengesiz bir yapısal çözüm sunduğunu göstermektedir. IRO algoritması ise 0.4000 cm gibi aşırı düşük bir başlangıç değeri üretmiş ve ilerleyen uzunluklarda dengesiz bir seyir izlemiştir. Bu durum, algoritmanın bu boşluk tipi için güvenilirlikten uzak, zayıf bir tasarım yaklaşımı sergilediğini düşündürmektedir.

Sonuç olarak, CPA, TWO ve VPS algoritmaları, sinusoidal boşluklu kirişlerde başlık kalınlığı açısından yüksek düzeyde stabilite ve rijitlik sunarken; ICA ve IRO algoritmaları, kararsızlık ve düşük tasarım güvenliği ile öne çıkmaktadır.



Şekil 121. Beş Algoritma ile Sinüzoidal Boşluklu Petek Kirişlerin Başlık Kalınlığı Değerlendirmesi

Boyutsal Kararlılık Sonuçları ve Genel Değerlendirme:

Dört temel tasarım boyutunun (bf, tw, tf, dg) analizine ve üç farklı boşluk türüne (dairesel, altıgen ve sinüzoidal) göre yapılan detaylı değerlendirme sonucunda aşağıdaki genel bulgular elde edilmiştir:

- CPA algoritması, hemen her boşluk türünde özellikle tf ve tw gibi rijitlikle ilişkili parametrelerde üst düzey stabilite sağlamış; bu yönüyle güvenilir ve tutarlı bir tasarım yaklaşımı sunmuştur.
- TWO algoritması, hem bf hem de tf açısından tüm boşluk türlerinde yüksek kararlılık sergileyerek muhafazakâr ama istikrarlı bir yapısal tercih olduğunu ortaya koymuştur.
- IRO algoritması, çoğu durumda başlangıçta kabul edilebilir düzeyde kararlılık gösterse de, özellikle altıgen boşluklu kirişlerde ve tf/tw boyutlarında ani sapmalar ve kararsızlıklar üretmiştir.
- VPS algoritması, genel olarak orta düzeyde stabilite sağlamış ve belirli boyutlarda (özellikle kısa-orta kirişlerde) kabul edilebilir performans sunmuştur.
- ICA algoritması, tüm analizlerde en düşük stabiliteyi sergilemiş; değerlerin geniş aralıkta dalgalanması nedeniyle tasarımsal güvenilirliği düşük bir algoritma olarak değerlendirilmiştir.

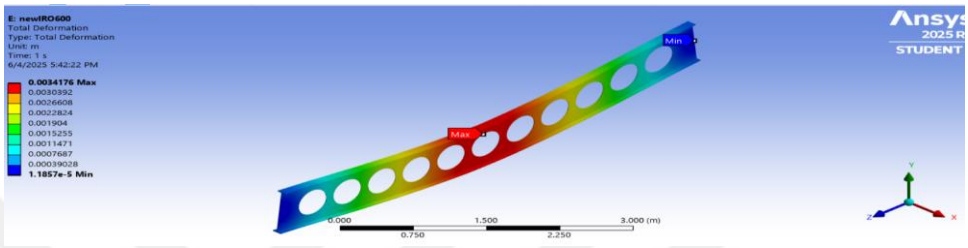
Bu bağlamda, dört temel boyutsal değişkenin optimizasyonu açısından CPA ve TWO algoritmaları, yüksek kararlılık, tasarım güvenliği ve performans sürekliliği açısından en uygun metasezgisel yöntemler olarak öne çıkmaktadır.

3.12. Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulanması

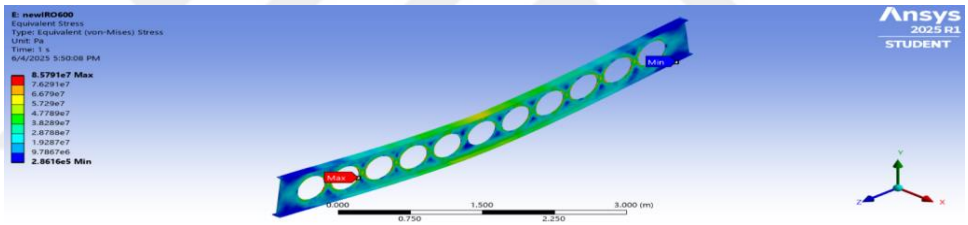
Bu bölümde, daha önce optimizasyon ile elde edilen sayısal veriler kullanılarak 3 adet petek kirişin sonlu elemanlar ile üç boyutlu statik analizi yapılmıştır. Bu analizlerden elde edilen maksimum sehim ve en büyük biçim değiştirme gerilmesi (von-Mises) ile mühendislik tasarımlarında oldukça önemli olan birinci asal gerilme değerleri gösterilmiştir. En büyük sehim değerleri çubuk teorisi için verilen bağıntılarla hesaplanan sehim değerleri ile karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Gerilme değerleri ise emniyet gerilmelerin altında kalarak kesitin güvenliği olduğu ortaya çıkmıştır. ANSYS programında sınır koşulları tanımlanırken

“remote displacement” komutu kullanılarak basit kiriş modeli oluşturulmuştur. Sonlu eleman ağı (mesh) için ise herhangi özel bir koşul girilmeden progamın otomatik özelliğinden faydlanmıştır.

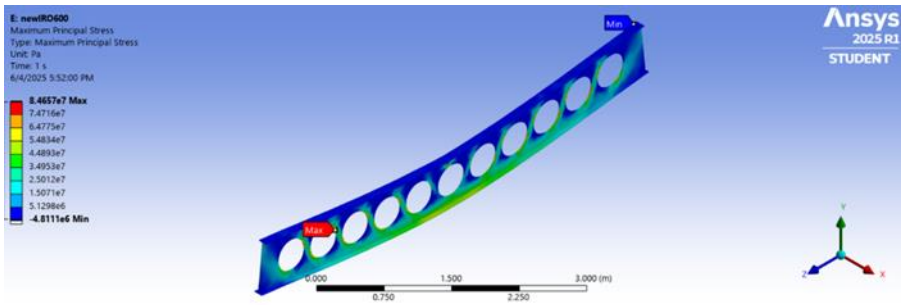
İlk olarak IRO algoritması ile 600 cm’lik kirişin optimizasyon sonucunda elde edilen boyutlar kullanılarak kirişin ANSYS modeli oluşturulmuştur. ANSYS analiz sonucunda elde edilen en büyük yer değiştirme değerleri, von-Mises gerilme değerleri ve en büyük asal gerilme değerleri şekil (122-124)’te sunulmuştur.



Şekil 122. IRO-600 için en büyük yer değiştirme değerleri



Şekil 123. IRO-600 için en büyük von-Mises gerilme değerleri

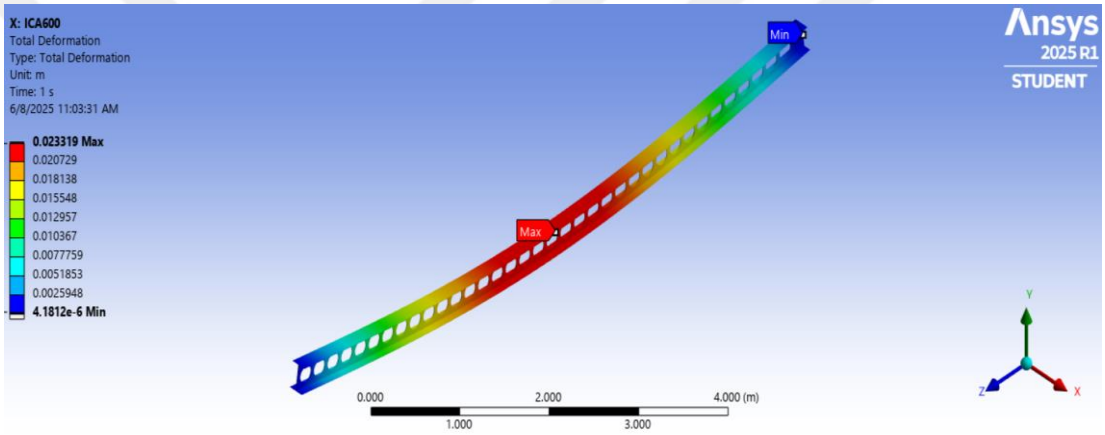


Şekil 124. IRO-600 için en büyük asal gerilme değerleri

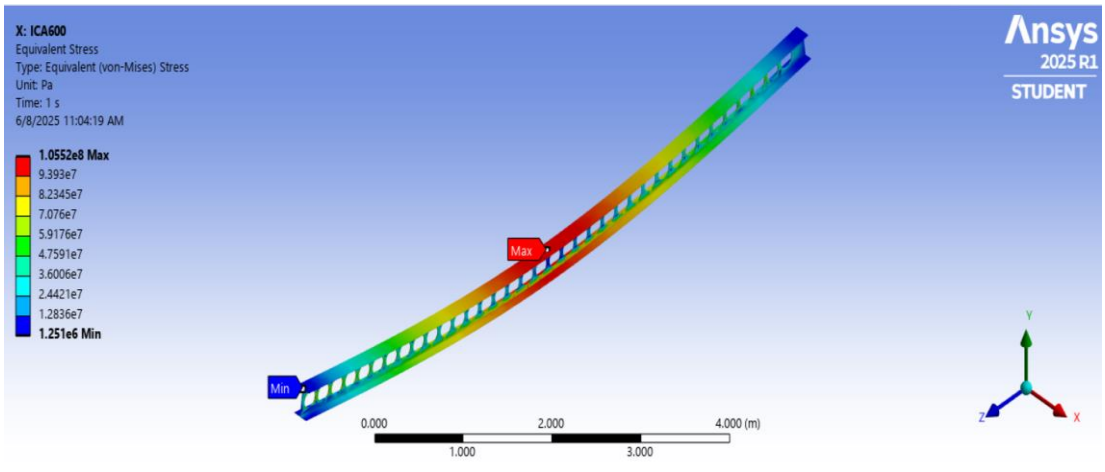
Tablo 11’de verilen değerler kullanılarak hesaplanan sehim miktar 0.342157 cm olarak hesaplanmıştı. Bu değer, Şekil 122’de verilen yer değiştirme değerleri ile

uyumlu olup Şekil (123-124)'te verilen gerilme değerleri ise emniyet gerilmesinin altında kalmaktadır.

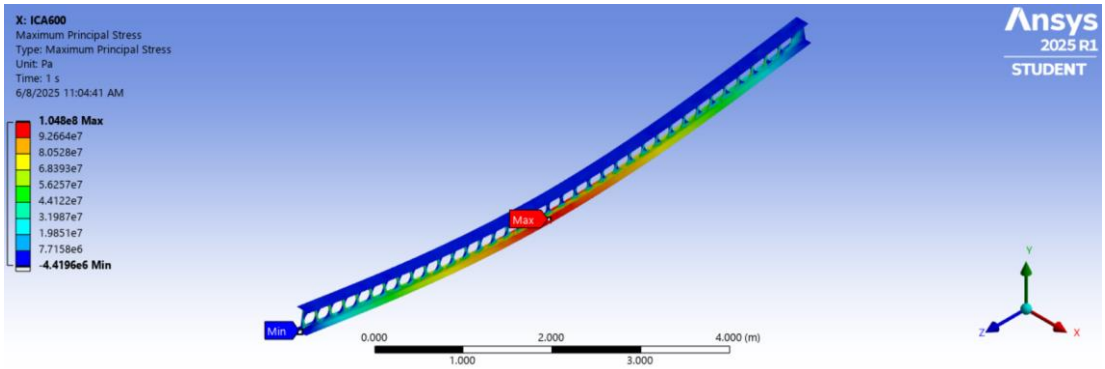
ICA algoritması kullanılarak 600 cm uzunluğundaki kiriş için elde edilen optimum boyutlar doğrultusunda ANSYS modeli oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen ANSYS analizleri sonucunda elde edilen maksimum yer değiştirme, von Mises gerilmesi ve maksimum asal gerilme değerleri Şekil (125–127)'te sunulmaktadır. Tablo 11'de sunulan veriler kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda sehim miktarı 2.7606 cm olarak bulunmuştur. Bu değer, Şekil 125'te verilen yer değiştirme sonuçları ile oldukça yakındır. Şekil 126 ve Şekil 127'de gösterilen gerilme değerlerinin ise emniyet gerilmesinin altında kaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 125. ICA-600 için en büyük yer değiştirme değerleri

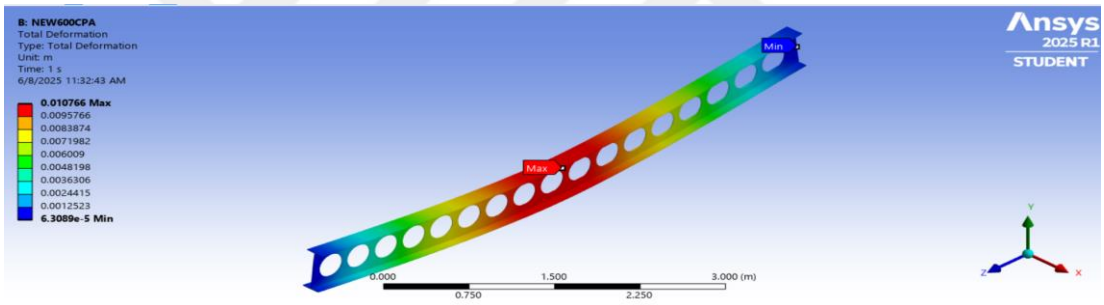


Şekil 126. ICA-600 için en büyük von-Mises gerilme değerleri

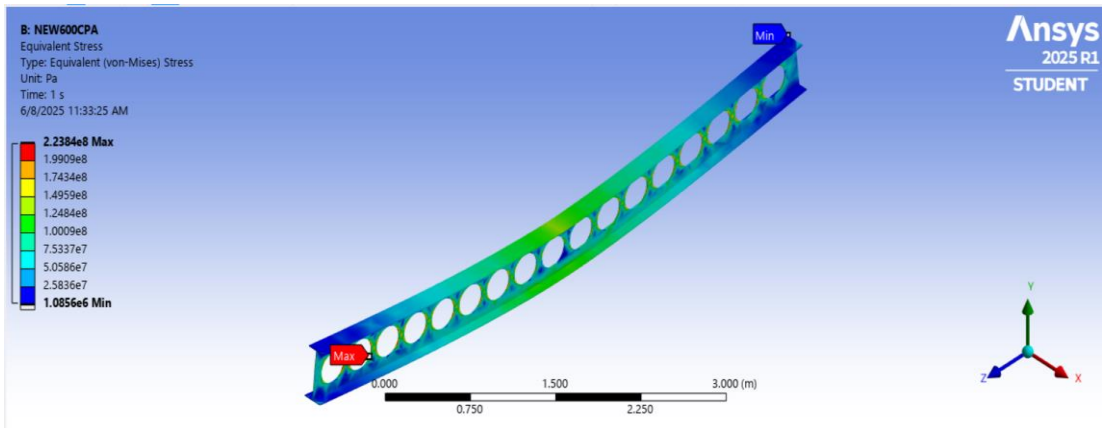


Şekil 127. ICA-600 için en büyük asal gerilme değerleri

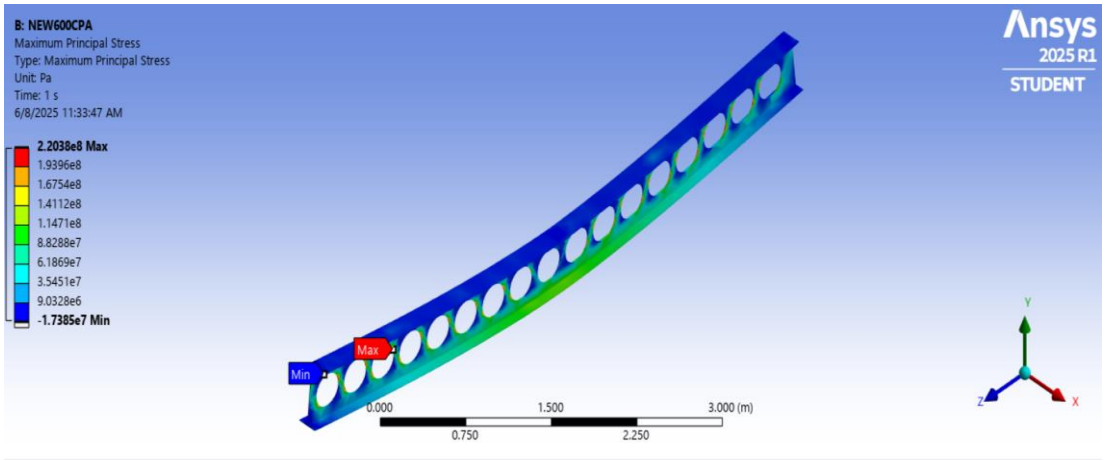
Son olarak CPA algoritması ile 600 cm'lik kirişin optimizasyon sonucunda elde edilen boyutlar kullanılarak kirişin ANSYS modeli oluşturulmuştur. ANSYS analiz sonucunda elde edilen en büyük yer değiştirme değerleri, von-Mises gerilme değerleri ve en büyük asal gerilme değerleri şekil (128-130)'te sunulmuştur.



Şekil 128. CPA-600 için en büyük yer değiştirme değerleri



Şekil 129. CPA-600 için en büyük von-Mises gerilme değerleri



Şekil 130. CPA-600 için en büyük asal gerilme değerleri

Tablo 11'e göre hesaplanan 0.693769 cm'lik sehim değeri, Şekil 128'de sunulan yer değiştirme değeriyle yüksek düzeyde uyum göstermektedir. Bununla birlikte, Şekil 129 ve 130'da elde edilen gerilme değerlerinin emniyet gerilmesine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Tüm analizlerde, daha önce belirtilen S355 çeliği esas alınmış olup güvenlik katsayısı 1.5 kabul edilerek yaklaşık 236.67 MPa değerinde bir emniyet gerilmesi referans alınmıştır. Elde edilen von-Mises ve asal gerilme sonuçlarının bu değerin altında kalması, optimize edilmiş kesitlerin mühendislik açısından güvenli olduğunu göstermektedir.

3.13. Sehime Göre Optimizasyon

Bu bölümde, sehim ile ilgili kısıtlamalar ve tasarım değişkenleri Albayati ve Noori (2024) ve Albayati ve ark. (2025) tarafından verilmektedir. Elde edilen sonuçları Tablo 35 ile 38'de sunulmuştur.

Tablo (37-38) verilerine göre, petek kiriş tasarımında kullanılan malzeme türü sonuçlar üzerinde belirgin bir etki oluşturmamaktadır. Yüksek akma gerilmesine sahip kirişlerde maksimum düşey yer değiştirme değerleri Fx daha yüksek bulunmuştur; bu durum, bu kirişlerin daha fazla yük taşıyabilmesiyle ve benzer elastisite modülüne sahip olmalarıyla açıklanmaktadır. Kesit yüksekliği, eğilme kapasitesi ve yer değiştirme hesaplarında belirleyici olup tüm algoritmalarda benzer sonuçlar vermektedir ve malzeme özelliklerinden bağımsızdır. Başlık genişliği açısından ise algoritmalar farklı sonuçlar üretmektedir. Bu farkın, kısıtlamalar gereği başlık

genişliğinin kesit yüksekliğine göre etkisinin sınırlı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 37. St-355 için optimum tasarım değerleri (L=200,300,400,500,600 cm)

Tasarım Değişkeni	Kullanılan Algoritma	L = 200 cm	L = 300 cm	L = 400 cm	L = 500 cm	L = 600 cm
h_w (cm)	FPA	38.8889	36.3636	41.9753	39.6395	42.8537
	FA	38.8889	36.3636	41.9753	39.6396	42.8571
	BA	38.8507	36.3630	41.9727	39.6344	42.8528
b_f (cm)	FPA	16.3884	25.0000	25.0000	25.0000	20.8046
	FA	14.1181	9.1737	11.9905	20.3979	15.6762
	BA	9.4825	9.5088	8.7141	9.0362	8.7394
t_w (cm)	FPA	1.5000	1.5000	1.5000	0.7000	0.7000
	FA	1.1629	0.9099	1.2873	1.4190	1.3041
	BA	0.7000	0.7204	0.7000	0.7000	0.7000
t_f (cm)	FPA	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000
	FA	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000
	BA	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000
a (cm)	FPA	11.6667	10.9091	12.5926	11.8919	12.8561
	FA	11.6667	10.9091	12.5926	11.8919	12.8571
	BA	11.6552	10.9089	12.5918	11.8903	12.8558
w (cm)	FPA	5.8333	5.4545	6.2963	5.9460	6.1538
	FA	5.8333	5.4545	6.2963	5.9459	6.1538
	BA	5.8276	5.4545	6.2959	5.9452	6.4279
Fx (cm)	FPA	0.02156	0.05292	0.08134	0.13426	0.18032
	FA	0.02156	0.05292	0.08134	0.13426	0.18032
	BA	0.02156	0.05292	0.08134	0.13426	0.18032

FPA algoritması en yüksek, BA algoritması ise en düşük gövde genişliği değerlerini sunmaktadır. Mühendislik uygulamaları açısından FPA'nın önerdiği değerlerin daha uygun olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca, FA ve FPA algoritmalarının başlık genişliği sonuçları birbirine oldukça yakındır.

Tablo 38. St-355 için optimum tasarım değerleri (L=700,750, 800, 900, 1000 cm)

Tasarım Değişkeni	Kullanılan Algoritma	L = 700 cm	L = 750 cm	L = 800 cm	L = 900 cm	L = 1000 cm
h_w (cm)	FPA	41.0256	42.2018	43.2749	41.7910	43.5185
	FA	41.0256	42.2018	43.2749	41.7910	43.5185
	BA	41.0248	42.2011	43.2733	41.7906	43.5115
b_f (cm)	FPA	21.1272	19.5431	19.3459	11.2698	25.0000
	FA	8.6286	11.6624	10.9708	8.3582	12.1932
	BA	8.6861	9.0528	8.9289	9.1270	8.7405
t_w (cm)	FPA	0.7536	0.7000	0.7096	0.7000	0.7000
	FA	1.2427	0.8184	0.7000	1.5000	1.0357
	BA	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000
t_f (cm)	FPA	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000
	FA	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000
	BA	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000
a (cm)	FPA	12.3077	12.6606	12.9825	12.5373	13.0556
	FA	12.3077	12.6606	12.9825	12.5373	13.0556
	BA	12.3074	12.6603	12.9820	12.5372	13.0534
w (cm)	FPA	6.1538	6.3303	6.4912	6.2687	6.5278
	FA	6.1538	6.3303	6.4912	6.2687	6.5278
	BA	6.1537	6.3302	6.4910	6.2686	6.5267
Fx (cm)	FPA	0.25578	0.28616	0.31752	0.41552	0.49392
	FA	0.25578	0.28616	0.31752	0.41552	0.49392
	BA	0.25578	0.28616	0.31752	0.41552	0.49392

Tablo 39-40'te elde edilen sonuçlara göre, petek kiriş uzunluğu arttıkça düşey yer değiştirme değerinin *Fx* de kademeli ve sınırlı şekilde arttığı gözlemlenmektedir. Malzeme türüne bağlı olarak ise boyutlarda çok küçük artışlar meydana gelmiş, bu da yapısal çalışma koşulları altında söz konusu malzemelerin ekonomik açıdan uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Üç farklı algoritma ile karşılaştırılması sonucunda, DE ve PSO algoritmalarının bazı kesit boyutları ve amaç fonksiyonu değerlerinde aynı sonuçları verdiği belirlenmiştir. Ancak gövde kalınlığı ve başlık genişliği açısından DE algoritmasının, PSO'ya kıyasla %12'ye kadar ve en fazla 1 cm olacak şekilde daha yüksek değerler ürettiği saptanmıştır. GWO algoritması ise toplam kesit yüksekliği bakımından, DE ve PSO'ya göre %15'e varan oranda daha düşük

değerler üretmiştir. Diğer boyutlar ve amaç fonksiyonu açısından ise GWO ile elde edilen artışlar %15'in altında kalmıştır.

Tablo 39. St-355 için optimum tasarım değerleri (L=200,300,400,500,600 cm)

Tasarım Değişkeni	Kullanılan Algoritma	L = 200 cm	L = 300 cm	L = 400 cm	L = 500 cm	L = 600 cm
h_w	GWO	34.9577	30.1885	37.4998	33.9071	39.0861
	PSO	38.8889	36.3636	35.8519	39.6396	42.8571
	DE	38.8889	36.3636	41.9735	39.6396	42.8571
b_f	GWO	11.4362	11.9613	9.9068	14.1154	9.2731
	PSO	8	8	8	8	8
	DE	8.1123	8	8	8.091	8
t_w	GWO	1.1429	1.1897	1.0651	0.8328	0.9372
	PSO	0.7	0.7	1.5	0.7	0.7
	DE	0.7	0.8471	0.8155	0.7	0.7
t_f	GWO	0.8157	0.8968	0.9544	0.8576	1.0849
	PSO	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	DE	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
a	GWO	11.009	9.8634	11.8313	10.6202	12.0261
	PSO	11.6667	10.9091	12.5926	11.8919	12.8571
	DE	11.6667	10.9091	12.5926	11.8919	12.8571
w	GWO	6.3912	7.1837	7.2153	7.1145	7.1606
	PSO	5.8333	5.4545	6.2963	5.9459	6.4286
	DE	5.8333	5.4545	6.2963	5.9459	6.4286
Fx	GWO	0.005	0.0129	0.0187	0.0323	0.0401
	PSO	0.0044	0.0105	0.0189	0.0269	0.0361
	DE	0.0044	0.0105	0.0163	0.0269	0.0361

Bu tez kapsamında yapılan üç optimizasyon algoritmasıyla elde edilen kesit boyutları, hem teorik hesaplamalarla hem de ANSYS sonlu elemanlar analizleriyle karşılaştırılmıştır. ANSYS analizleri, maksimum yer değiştirme değerlerinin teorik verilerle büyük ölçüde örtüştüğünü göstermiştir. Böylece, bu tez çalışmasında kullanılan yöntemlerin doğruluğu ve mühendislik tasarımındaki güvenilirliği doğrulanmıştır. Öte yandan, daha önce yapılan iki ayrı çalışmada kullanılan farklı

algoritmaların sonuçları doğrudan ANSYS ile doğrulanmamış olsa da, elde edilen yer değiştirme değerlerinin büyüklükleri, bu tezdeki analizlerle aynı mertebelerde olup genel olarak tutarlı sonuçlar vermektedir.

Tablo 40. St-355 için optimum tasarım değerleri (L=700,750, 800, 900, 1000 cm)

Tasarım Değişkeni	Kullanılan Algoritma	L = 700 cm	L = 750 cm	L = 800 cm	L = 900 cm	L = 1000 cm
h_w	GWO	35.4059	37.4219	38.0747	38.1407	38.6325
	PSO	41.0256	42.2018	43.2748	41.791	43.3481
	DE	41.0256	42.2008	43.2789	41.791	43.5185
b_f	GWO	11.8576	9.54	18.1994	12.7779	16.1788
	PSO	8	8	8	8	8
	DE	8	8	8	8	8
t_w	GWO	1.1946	1.3077	1.0448	0.843	1.0848
	PSO	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
	DE	0.7086	0.7063	0.8123	0.7371	0.8467
t_f	GWO	0.6945	0.6478	0.6649	0.7032	0.7479
	PSO	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	DE	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
a	GWO	10.8512	11.4764	11.811	11.8186	12.5348
	PSO	12.3077	12.6606	12.9824	12.5373	13.0044
	DE	12.3077	12.6606	12.9825	12.5373	13.0556
w	GWO	7.8739	7.6771	7.6294	6.7315	6.2807
	PSO	6.1538	6.3303	6.4913	6.2687	6.5256
	DE	6.1538	6.3303	6.4912	6.2687	6.5278
Fx	GWO	0.0612	0.0668	0.0746	0.0941	0.1145
	PSO	0.0511	0.0572	0.0636	0.0831	0.0992
	DE	0.0511	0.0572	0.0636	0.0831	0.0988

Bu durum, seçilen optimizasyon algoritmalarının genel mühendislik performansı açısından kabul edilebilir çözümler sunduğunu göstermektedir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde, üç farklı boşluk tipine sahip (dairesel, altıgen ve sinüzoidal) boşluklar petek kirişlerin altı farklı kiriş uzunluğunda (300 - 800) cm tasarımı ve analizine odaklanmaktadır. Maliyet değerlendirmesi için temel ölçüt olarak amaç fonksiyonu kabul edilip her bir tasarım durumu beş farklı optimizasyon algoritmasıyla değerlendirilmiştir. Ayrıca, bu analizlerin ortalama sonuçlarına dayalı olarak karşılaştırmalı betimsel bir analiz de gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki önemli noktalar vurgulanmıştır:

- 700 cm ve 800 cm uzunluğundaki kirişler, daha kısa kirişlere kıyasla daha dengeli bir yapısal tepki göstermiştir. Bu özellikle dairesel ve altıgen boşluklu kirişlerde belirgin olup sinüzoidal boşluklar için yalnızca 700 cm'e kadar olan analizlerde geçerlidir. 800 cm uzunluk için sinüzoidal boşluklar değerlendirme dışı bırakılmıştır çünkü elde edilen sonuçlar mühendislik açısından gerçekçi bulunmamıştır.
- Sinüzoidal boşluklar, özellikle 600 cm ve 700 cm uzunluğundaki kirişlerde, daha verimli bulunmuştur.
- Dairesel boşluklar ise orta uzunluklarda (500–600 cm) daha uygun performans sergilemiştir.
- Altıgen boşluklar, tüm uzunluklar boyunca performans ile maliyet arasında dengeli bir çözüm sunmuştur.
- Ortalama amaç fonksiyonu değerlerine göre, VPS algoritması, genel olarak en tutarlı ve düşük maliyetli çözümleri sunmuştur.
- CPA algoritması, özellikle sinüzoidal boşluklarda 600–700 cm ve altıgen boşluklarda 800 cm gibi bazı uzunluklarda çok yüksek performans göstermiştir. Dairesel boşluklarda ise CPA, 600 cm ve 800 cm uzunluklarında rekabetçi sonuçlar üretmiştir.
- ICA algoritması, bazı durumlarda etkili olmuşsa da özellikle dairesel ve altıgen boşluklarda değişkenlik göstermiş ve genel kararlılığı düşüktür.
- IRO algoritması, bazı kısa kiriş uzunluklarında sınırlı düzeyde kabul edilebilir sonuçlar vermiş olsa da, özellikle uzunluk arttıkça hem amaç fonksiyonu hem de boyutsal kararlılık açısından zayıf bir performans sergilemiştir.

- TWO algoritması, özellikle sinüzoidal boşluklarda, 600–700 cm uzunluklarında dengeye hızlı ulaşabilen yapısıyla dikkat çekmiştir. Ancak çözüm süresi diğer algoritmalara kıyasla daha uzundur (bu konu Bölüm 2'de ele alınacaktır).

NOT: Bu bölümde amaç fonksiyonu üzerinden yapılan karşılaştırmalar, her boşluk tipi ve her uzunluk için ayrı ayrı analiz edilen sonuçlara dayanmaktadır. Genel ifadelerin arkasında, spesifik performans detayları Bölüm 3'te boyutsal kararlılıkla birlikte sunulmuştur.

- Ortalama amaç fonksiyonu değerlerine göre, VPS algoritması genel olarak en tutarlı ve düşük maliyetli çözümleri sunarken; CPA algoritması özellikle altıgen ve sinüzoidal boşluklarda rekabetçi sonuçlar vermiştir. ICA algoritması ise bazı durumlarda etkili olmuş ancak genel olarak değişkenlik göstermiştir
- İşlem süresi analizlerine göre: CPA algoritması, tüm boşluk tiplerinde ve özellikle 600–700 cm uzunluklarda kısa işlem süresiyle dikkat çekmiş, zaman-maliyet verimliliği açısından güçlü bir aday olduğunu kanıtlamıştır. TWO algoritması, dairesel ve sinüzoidal boşluklarda optimum sonuca ulaşmak için daha uzun işlem süresine ihtiyaç duymuştur. Bu durum, algoritmanın çözüm uzayını daha derinlemesine tarama eğiliminden kaynaklanmaktadır. ICA algoritması, sinüzoidal boşluklarda en kısa işlem süresiyle çözüme ulaşan algoritma olmuş, ancak bu hızlılık düşük stabilite ile birlikte değerlendirilmelidir. VPS ve IRO algoritmaları ise çoğu durumda orta düzeyde işlem süresi sergileyerek denge sağlamıştır.
- Standart sapma değerlendirmelerine göre: CPA algoritması, tüm uzunluklar ve tüm boşluk tiplerinde en düşük standart sapma değerleriyle yüksek düzeyde stabilite sergilemiştir. VPS algoritması da birçok durumda CPA'ya yakın kararlılık göstermiş, özellikle altıgen ve sinüzoidal boşluklarda düşük dalgalanma ile öne çıkmıştır. IRO algoritması, kısa kiriş uzunluklarında kabul edilebilir seviyede dalgalanma üretmişse de, uzunluk arttıkça kararlılığını kaybetmiştir. TWO algoritması, 500–700 cm aralığında kararlı sonuçlar üretmiş, ancak bazı kısa kiriş uzunluklarında dalgalanma göstermiştir. ICA

algoritması ise, özellikle altıgen boşluklarda çok yüksek standart sapma ile çalışmış ve en düşük stabiliteye sahip algoritma olarak dikkat çekmiştir.

- Göreli standart sapma (RSD), farklı algoritmaların genel kararlılığını karşılaştırmak amacıyla kullanılmıştır. Bu analizde, her algoritma için her bir boşluk tipi üzerinden elde edilen amaç fonksiyonu değerlerinin %RSD'si hesaplanmıştır. Ortalama değerler üzerinden yapılan bu değerlendirme, genel bir karşılaştırma imkânı sunmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre CPA algoritması, üç boşluk tipi için de en düşük RSD değerleriyle öne çıkmış, ardından sırasıyla VPS ve TWO algoritmaları gelmiştir. IRO algoritması orta düzeyde stabilite sergilerken, ICA algoritması en yüksek RSD değerleri ile en düşük kararlılığı göstermiştir.
- Korelasyon analizine göre: TWO algoritması, özellikle sinüzoidal boşluklarda maliyet ile iterasyon sayısı arasında güçlü bir pozitif korelasyon göstermiştir. VPS algoritması ise negatif korelasyon sergilemiş, bu da erken iterasyonlarda iyi sonuçlar verdiğini ve daha düşük tekrar sayılarında optimize edilebileceğini göstermektedir. CPA algoritması, orta seviyede pozitif korelasyon ile stabil ama tekrara duyarlı bir yapı göstermiştir. ICA ve IRO algoritmaları ise korelasyon açısından düzensiz eğilimler sergilemiş, bu nedenle iterasyon sayısı seçilirken dikkatli olunmalıdır.
- Yüksek tekrarlı (10.000 iterasyon) hassasiyet analizleri sonucunda elde edilen bulgular şunlardır: Dairesel ve altıgen boşluklu kirişlerde, özellikle 800 cm uzunlukta CPA algoritması çok erken iterasyonlardan itibaren istikrar kazanmış ve süreç boyunca bu stabiliteyi sürdürmüştür. Aynı uzunlukta ICA algoritması ise kararlılığa geç ulaşmış ve yüksek dalgalanma sergilemiştir. IRO ve TWO algoritmaları ise orta düzeyde stabilite sağlamıştır. 600 cm uzunlukta dairesel boşluklu kirişlerde, CPA ve VPS algoritmaları düşük sapma ve sabit sonuçlarla öne çıkarken; ICA algoritması grafiklerde temsil edilemeyecek kadar düşük çözüm değeri üretmiştir. Altıgen boşluklu kirişlerde, 600 ve 800 cm için CPA yine istikrarlı performans göstermiş, TWO ve VPS algoritmaları orta düzey stabilite sağlamıştır. IRO ise zamanla uyumlu hale gelirken ICA düzensiz bir yapı sunmuştur. Sinüzoidal boşluklarda, yalnızca 600 ve 700 cm uzunluklar için hassasiyet analizi yapılmıştır. Bu analizlerde CPA, IRO ve VPS

algoritmaları yüksek düzeyde stabilite ile öne çıkarken; TWO algoritması orta düzeyde, ICA algoritması ise düşük düzeyde stabilite sergilemiştir. 800 cm uzunluk, sinüzoidal boşluklar için değerlendirme dışı bırakılmıştır çünkü çözümler mühendislik açısından geçerli kabul edilmemiştir.

- Genel eğilim değerlendirmesi, Dairesel, altıgen ve sinüzoidal boşluklu kirişler için işlem süresi, standart sapma ve korelasyon katsayısı açısından kapsamlı bir trend analizi gerçekleştirilmiştir. Dairesel boşluklu kirişlerde, TWO algoritması optimum çözüme ulaşmak için daha uzun işlem süresi gerektirmiştir; bu durum algoritmanın çözüm uzayını detaylı incelemesinden kaynaklanmaktadır. CPA, IRO, VPS ve ICA algoritmaları ise hızlı ve verimli sonuçlar üretmiştir. CPA algoritması tüm uzunluklarda en düşük standart sapma ile yüksek kararlılık sergilerken, ICA algoritması yüksek dalgalanma ve düşük stabilite göstermiştir. Korelasyon analizlerinde ise TWO algoritması maliyet ile tekrarlama sayısı arasında güçlü pozitif ilişki ortaya koymuştur. Altıgen boşluklu kirişlerde, CPA algoritması kısa ve istikrarlı işlem süreleriyle ön plana çıkmış, TWO algoritması daha uzun işlem süresi göstermiştir. CPA aynı zamanda tüm uzunluklarda en düşük standart sapma ile yüksek stabilite sağlamıştır. IRO algoritması yüksek dalgalanma ve düşük kararlılık sergilerken, ICA algoritması en az stabil sonuçları vermiştir. Korelasyon analizleri TWO algoritmasında daha belirgin pozitif ilişkiler göstermiştir. Sinüzoidal boşluklu kirişlerde, ICA algoritması en kısa işlem süresine sahip olmasına rağmen, CPA, IRO ve VPS algoritmaları dengeli işlem süreleri ve yüksek kararlılık göstermiştir. TWO algoritması ise işlem süresinde daha uzundur. Standart sapma açısından CPA ve VPS algoritmaları yüksek kararlılık sunarken, ICA algoritması düşük stabilite sergilemiştir. Korelasyon analizleri TWO algoritmasında pozitif ilişkiyi desteklemiştir ancak diğer algoritmalar korelasyonda dalgalanmalar göstermiştir.

Bu trend analizleri, farklı algoritmaların işlem süresi ve kararlılık açısından performanslarını karşılaştırarak, proje ihtiyaçlarına göre en uygun algoritmanın seçilmesine olanak sağlamaktadır.

- **Tasarım Boyutlarına Göre Algoritmaların Performansına İlişkin Sonuçlar**: Yapılan kapsamlı analiz sonucunda, toplam 17 farklı durum (6 dairesel, 6 altıgen ve 5 sinüzoidal boşluk tipi) üzerinden değerlendirme yapılmış ve her bir algoritmanın tasarım boyutları (*dg*, *bf*, *tw* ve *tf*) açısından performansı ortaya konmuştur.

- CPA algoritması, 17 durumun 8'inde en iyi sonucu vererek tüm algoritmalar arasında en öne çıkan yöntem olmuştur:
  - Dairesel boşluklu kirişlerde: 300, 400, 600, 700 cm
  - Altıgen boşluklu kirişlerde: 400, 500, 600, 800 cm
  - Sinüzoidal boşluklu kirişlerde: 600 cm

  Bu durum, özellikle altıgen boşluklar ve uzun kirişlerde CPA'nın boyutsal stabilite ve kararlılık açısından üstün olduğunu göstermektedir.

- VPS algoritması, 5 durumda en iyi sonucu vermiştir:
  - Dairesel boşluklu kirişlerde: 500 cm
  - Altıgen boşluklu kirişlerde : 300 cm
  - Sinüzoidal boşluklu kirişlerde: 400, 600 cm

Özellikle sinüzoidal boşluklarda öne çıkmış, karmaşık geometriye uyum sağlayan yapısıyla dikkat çekmiştir.

- TWO algoritması, 4 durumda en iyi performansı göstermiştir:
  - Dairesel boşluklu kirişlerde: 800 cm
  - Altıgen boşluklu kirişlerde: 700 cm
  - Sinüzoidal boşluklu kirişlerde: 300, 500, 700 cm

Bu algoritmanın uzun kirişlerde ve sinüzoidal boşluklarda etkin olduğu gözlemlenmiştir.

- IRO algoritması, hiçbir durumda en iyi sonucu verememiştir; ancak bazı durumlarda sınırlı ölçüde kabul edilebilir performans sunmuştur.

Bunun dışında, özellikle *tf* ve *tw* boyutlarında büyük dalgalanmalar sergileyerek istikrarsızlık göstermiştir.

- ICA algoritması, hiçbir durumda en iyi sonucu verememiş, tüm boyutlarda dalgalı ve dengesiz sonuçlar üretmiştir.

Önemli bir katkı olarak, "en iyi" algoritmanın belirlendiği durumlarda dahi bazı algoritmaların "iyi" veya "kabul edilebilir" sonuçlar verdiği de gözlemlenmiştir. Örneğin: altıgen 800 cm durumunda CPA en iyi sonucu vermiş, ancak TWO da yakın ve düzenli bir performans sunmuştur. Sinüzoidal 700 cm durumunda hem VPS hem de TWO dengeli ve uygulanabilir sonuçlar vermiştir. Bu durum, tasarımcıya alternatif algoritmalar arasında esnek bir seçim alanı sunmakta ve çalışmanın uygulamaya yönelik değerini arttırmaktadır.

- Literatürde sinüzoidal boşluklar üzerine yeterli sayıda çalışma bulunmadığından, bu çalışmadaki analizler bu konuda öncü bir adım teşkil etmektedir. Özellikle CPA ve VPS algoritmalarının bu boşluk tipinde öne çıkması, karmaşık geometriyle başa çıkabilen algoritmaların seçilmesi gerekliliğini vurgulamaktadır.
- İlaveten, bu analizlerin tümü, her bir boyutun potansiyel yapısal arıza türleriyle (burkulma, akma, çekme) olan ilişkisi dikkate alınarak yapılmıştır. Bu bağlamda, *tw* değişimleri burkulma riskini,*tf* ve *bf* varyasyonları çekme ve eğilme dayanımını, *dg* ise ağırlık, üretim zorluğu ve maliyetle ilişkilendirilerek yorumlanmıştır.

Özetle:

- CPA, genel olarak tüm boyutlarda ve boşluk tiplerinde en güvenilir ve stabil algoritmadır.
- VPS, özellikle sinüzoidal boşluklarda ve orta uzunlukta kirişlerde dikkat çeken bir denge sunmuştur.
- TWO, uzun kirişlerde (700 ve 800 cm) ve sinüzoidal yapılarda iyi performans sergilemiştir.
- IRO, yalnızca sınırlı şartlar altında etkinlik göstermiştir.

- ICA, genel olarak düşük stabilite ile sınırlı kalmıştır.

Bu kapsamlı boyutsal analiz, sadece mevcut algoritmik değerlendirmeyi sunmakla kalmamakta, aynı zamanda farklı boşluk geometrilerine sahip petek kirişlerin daha güvenilir, ekonomik ve optimize tasarımı için gelecekte yapılacak daha derinlemesine çalışmaların temelini oluşturmaktadır.

Genel Bulguların Stratejik Değerlendirmesi ve Uygulama Önerileri:

Bu çalışmada elde edilen kapsamlı veriler ışığında, algoritmaların yalnızca sayısal başarımı değil, aynı zamanda mühendislik tasarımı açısından uygulanabilirliği de değerlendirilmiştir. Aşağıdaki genel bulgular ve öneriler, bu doğrultuda öne çıkan temel noktaları yansıtmaktadır:

- CPA algoritması, tüm algoritmalar arasında hem boyutsal kararlılık hem de düşük maliyet ve işlem süresi açısından en dengeli ve güvenilir yaklaşımı sunmuştur. Çoklu kriterler göz önüne alındığında, genel mühendislik projeleri için ilk tercih olarak önerilmektedir.
- ICA algoritması, yüksek standart sapma ve kararsız yakınsama yapısıyla genel olarak düşük güvenilirlik göstermiştir. Ancak yüksek tekrar sayısına sahip uygulamalarda zaman zaman kararlı sonuçlar verebilmiştir.
- VPS algoritması, özellikle sinüzoidal boşluklu kirişlerde başarılı olmuş, maliyet performansı ve düşey rijitliği optimize etme potansiyeliyle öne çıkmıştır. Bu algoritma, karmaşık geometriye sahip yapılar için uygun bir seçenektir.
- IRO algoritması, işlem süresinin sabit olması ve kısa boşluklu kirişlerde tatmin edici çözümler sunması nedeniyle, zamanın kritik olduğu mühendislik uygulamaları için alternatif bir yol olarak değerlendirilebilir.
- TWO algoritması, özellikle yatay boyutlar üzerinde (örneğin *bf*) sağladığı tutarlılık ile boyutsal rijitlik açısından dikkat çekmiştir. Maliyet-tekrar korelasyonu güçlü projelerde tercih edilebilir.
- Yapılan ANSYS doğrulama analizleri, elde edilen optimum boyutların mühendislik tasarımları açısından uygulanabilir ve güvenli olduğunu

göstermiştir. Özellikle maksimum yer değiştirme ve gerilme değerleri, teorik hesaplamalar ve güvenlik sınırları ile uyum içerisindedir.

- Elde edilen bulgular, yalnızca ekonomik değil, geometrik güvenilirlik ve mühendislik uygunluğu açısından da algoritma seçiminin önemli bir kriter olduğunu ortaya koymaktadır.
- Bununla birlikte, bazı algoritmalar "en iyi sonucu" vermese dahi, birçok durumda “iyi” ya da “kabul edilebilir” seviyede çözümler sunmuştur. Bu durum, mühendislik uygulamalarında esneklik ve alternatif çözüm yolları sağlamaktadır.
- Özellikle sinüzoidal boşluklar için yapılan detaylı analizler, literatürde eksikliği hissedilen bir alanı doldurmakta olup CPA ve VPS algoritmalarının bu tür geometrilerde öne çıktığını açıkça ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışmada elde edilen veriler, petek kiriş tasarımında algoritmik yaklaşımların çok boyutlu ve uygulanabilir temellerini ortaya koymakta ve daha kapsamlı ileri çalışmalar için önemli bir referans noktası oluşturmaktadır .

Bu çalışmada beş farklı algoritmanın performansı değerlendirilmiş olup sonuçların görselleştirilmesi ve yorumlanmasında yalnızca belirgin fark yaratan algoritmalar detaylı şekilde vurgulanmıştır. Diğer algoritmalar ise analiz sürecinde yer almış, ancak elde ettikleri sonuçlar istatistiksel anlamda öne çıkmadığı için ayrı ayrı sunulmamıştır. Amaç fonksiyonunun istikrarlı bir değere ulaşabilmesi için yapılan hassasiyet analizleri sonucunda, 4000–6000 tekrar aralığı genel olarak yeterli görülmüştür. Ancak bu tekrar sayısı, boşluk tipi ve kiriş uzunluğu gibi parametrelere göre yeniden ayarlanmalıdır. Boyutsal tutarlılık ile amaç fonksiyonunun stabilitesi arasında kurulan ilişki, yalnızca ekonomik optimizasyonun değil, aynı zamanda geometrik ve yapısal kararlılığın da algoritma seçiminde belirleyici bir kriter olduğunu göstermiştir. Bu bağlamda, tasarım sürecinde yalnızca en düşük maliyet hedeflenmemeli; aynı zamanda seçilen algoritmanın mühendislik uygulamaları açısından güvenilir ve tekrarlanabilir çözümler üretebilme yeteneği de dikkate alınmalıdır.

Tezin Özgün Katkıları

Bu doktora tezinde elde edilen bilimsel katkılar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

• Literatürde ilk defa beş modern sezgisel algoritma (CPA, IRO, ICA, VPS, TWO), farklı boşluk uzunluklarına ve boşluk tiplerine sahip petek kesitli çelik kirişlerin optimizasyonunda birlikte ve sistematik bir yaklaşımla değerlendirilmiştir.

• Altı farklı kiriş uzunluğu (300 cm – 800 cm) için her algoritma 250 iterasyonla çalıştırılmış, işlem süresi, maliyet ve standart sapma gibi performans göstergeleri çok yönlü olarak karşılaştırılmıştır.

• Sinüzoidal boşluklara sahip petek kirişlerin optimizasyon tabanlı parametrik tasarımı bu tezde ilk defa kapsamlı bir şekilde gerçekleştirilmiş; bu geometri için beş farklı algoritmanın performansı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

• Hassasiyet analizi yalnızca klasik boşluk tipleri için değil, sinüzoidal geometriler için de 600 cm ve 700 cm uzunluklarında uygulanarak, algoritmaların tekrara duyarlılığı derinlemesine analiz edilmiştir.

• Geliştirilen yön (trend) analizi yaklaşımı ile, algoritmaların sadece işlem süresine değil, aynı zamanda standart sapma değerlerine göre de yönelimleri incelenmiş ve özgün bir analiz perspektifi ortaya konmuştur. Bu kapsamda, her boşluk tipi için tüm kiriş uzunluklarına ait göreli standart sapma (RSD) ortalamaları hesaplanarak, algoritmaların genel kararlılık düzeyleri tarafsız şekilde değerlendirilmiştir.

• Her algoritmanın dört temel boyutsal parametre (kesit yüksekliği, başlık genişliği, başlık kalınlığı ve gövde genişliği) üzerindeki tasarım tercihleri karşılaştırmalı olarak analiz edilerek, algoritmaların mühendislik yaklaşımı hakkında bilimsel içgörüler elde edilmiştir.

Bu katkılar, yalnızca mevcut literatüre metodolojik bir yenilik getirmekle kalmayıp; aynı zamanda petek kirişlerin optimizasyonu ve parametrik tasarımı konularında daha ileri düzey çalışmalara sağlam bir temel sunmaktadır.

KAYNAKÇA

Abualigah, L., Elaziz, M. A., Khasawneh, A. M., Alshinwan, M., Ibrahim, R. A., Al-Qaness, M. A., ... & Gandomi, A. H. (2022). Meta-heuristic optimization algorithms for solving real-world mechanical engineering design problems: a comprehensive survey, applications, comparative analysis, and results. *Neural Computing and Applications*, 1-30.

Ahmed, A., & Said, A. M. I. (2024). The Effect of Expansion Ratio, Opening Size, and Prestress Strand on the Flexural Behavior of Steel Beams with Expanded Web using FEA. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, *14*(3), 14257-14265.

Albayati, M. A. S., & Noori, A. R. (2024). Üç Farklı Metasezgisel Algoritma Kullanılarak Petek Kirişlerin Yer Değiştirme Optimizasyonu. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *39*(4), 979-990.

Albayati, M. A. S., Noori, A. R., & Kayabekir, A. E. (2025) Optimization of Fixed Supported Castellated Steel Beams. *International Journal of Engineering Technologies IJET, 10*(1), 1-8.

Al-Mawashee, H. S., & Al-Kannoon, M. A. A. (2021, August). Flexural strength of castellated beams with corrugated webs. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1973, No. 1, p. 012213). IOP Publishing.

Al-Thabhawee, H. W., & Al-Kannoon, M. A. A. (2022). Experimental study of the behaviour and failure modes of tapered castellated steel beams. *Open Engineering*, *12*(1), 245-253.

Baghalzadeh Shishehgarkhaneh, M., Moradinia, S. F., Keivani, A., & Azizi, M. (2022). Application of classic and novel metaheuristic algorithms in a BIM-based resource Tradeoff in dam projects. *Smart Cities*, *5*(4), 1441-1464.

Bożejko, W., Hejducki, Z., Uchroński, M., & Wodecki, M. (2014). Solving resource-constrained construction scheduling problems with overlaps by metaheuristic. *Journal of Civil Engineering and Management*, *20*(5), 649-659.

Budi, L., & Partono, W. (2017). Optimization analysis of size and distance of hexagonal hole in castellated steel beams. *Procedia engineering*, *171*, 1092-1099.

Carbas, S., Aydogdu, I., & Saka, M. P. (2013, May). A comparative study of three metaheuristics for optimum design of engineering structures. In *10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, Orlando, Florida*.

Casciati, S., & Elia, L. (2017). Potential of TWO metaheuristic optimization tools for damage localization in civil structures. *Journal of Aerospace Engineering*, *30*(2), B4016012

Cercevik, A. E., Bozkurt, H., & Toklu, Y. C. (2014). Applications of Meta-heuristic algorithms to civil engineering problems, a survey. *METAHEURISTICS AND ENGINEERING*, 63.

Chou, J. S., & Nguyen, N. M. (2021). Metaheuristics-optimized ensemble system for predicting mechanical strength of reinforced concrete materials. *Structural Control and Health Monitoring*, *28*(5), e2706.

Chou, J. S., & Pham, A. D. (2017). Nature-inspired metaheuristic optimization in least squares support vector regression for obtaining bridge scour information. *Information Sciences*, *399*, 64-80.

Chou, J. S., Chong, W. K., & Bui, D. K. (2016). Nature-inspired metaheuristic regression system: programming and implementation for civil engineering applications. *Journal of Computing in Civil Engineering*, *30*(5), 04016007.

Chou, J. S., Pham, T. T. P., & Ho, C. C. (2021). Metaheuristic optimized multi-level classification learning system for engineering management. *Applied Sciences*, *11*(12), 5533.

Cs$ébf$alvi, A. (2009). A hybrid meta-heuristic method for continuous engineering optimization. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, *53*(2), 93-100.

Demirdjian, S. (1999). *STABILITY OF CASTELLATED BEAM WEBS* (Doctoral dissertation, McGill University Montreal, Canada).

de Aguiar, L. A., Monteiro, D. K., & Morsch, I. B. (n.d.). *Optimum design of steel cellular beams using particle swarm optimization and finite element method*. [Steel and Aluminium Structures (ICSAS24) Rio de Janeiro, Brazil, 5-7, June, 2024]

de Oliveira, J. P., Cardoso, D. C. T., & Sotelino, E. D. (2019). Elastic flexural local buckling of Litzka castellated beams: Explicit equations and FE parametric study. *Engineering Structures*, *186*, 436-445.

Dhede, M., & Shirsat, M. (2020). Geometrical optimization and buckling analysis of castellated steel column. *International Research Journal of Engineering and Technology*, *7*, 1304-1307.

Dogan, E., & Ozyuksel Ciftcioglu, A. (2020). Weight optimization of steel frames with cellular beams through improved hunting search algorithm. *Advances in Structural Engineering*, *23*(5), 1024-1037.

Doorı, S., & Noorı, A. R. (2021). Finite element approach for the bending analysis of castellated steel beams with various web openings. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, *3*(2), 38-49.

Durif, S., & Bouchair, A. (2012). Behavior of cellular beams with sinusoidal openings. *Procedia engineering*, *40*, 108-113.

Elaiwi, S. S. (2019). *Analysis and Design of Castellated Beams* (Doctoral dissertation, University of Plymouth).

Erdal, F. (2011). *Ultimate load capacity of optimally designed cellular beams* (Doctoral dissertation, Middle East Technical University (Turkey)).

Erdal, F., & Saka, M. P. (2013). Ultimate load carrying capacity of optimally designed steel cellular beams. Journal of constructional steel research, 80, 355-368.

Erdal, F. (2015). The comparative analysis of optimal designed web expanded beams via improved harmony search method. *Structural Engineering and Mechanics*, *54*(4), 665-691.

Erdal, F. (2017). A firefly algorithm for optimum design of new-generation beams. *Engineering Optimization*, *49*(6), 915-931.

Erdal, F., Doğan, E., & Saka, M. P. (2011). Optimum design of cellular beams using harmony search and particle swarm optimizers. *Journal of Constructional Steel Research*, *67*(2), 237-247.

Ertürkmen, D., & Noori, A. R. (2023). SEY ile eğri eksenli petek kirişlerin eğilme analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *38*(1), 73-84.

Estrada, H., Jimenez, J. J., & Aguíñiga, F. (2006). Cost analysis in the design of open-web castellated beams. In *Building Integration Solutions* (pp. 1-10).

Fares, S., Coulson, J., & Dinehart, D. (2016). Castellated and cellular beam design. *American Institute of Steel Construction*.

Ferreira, F. P. V., Martins, C. H., & De Nardin, S. (2020). Advances in composite beams with web openings and composite cellular beams. *Journal of Constructional Steel Research*, *172*, 106182.

Ferreira, F. P. V., Tsavdaridis, K. D., Martins, C. H., & De Nardin, S. (2021). Buckling and post-buckling analyses of composite cellular beams. Composite Structures, 262, 113616.

Gandomi, A. H., Yang, X. S., & Alavi, A. H. (2013). Cuckoo search algorithm: a metaheuristic approach to solve structural optimization problems. *Engineering with computers*, *29*, 17-35.

Gandomi, A. H., Yang, X. S., Talatahari, S., & Alavi, A. H. (2013). Metaheuristic algorithms. In *Metaheuristic applications in structures and infrastructures* (pp. 1-24). Waltham: Elsevier. Ghaemifard, S., & Ghannadiasl, A. (2024). A Comparison of Metaheuristic Algorithms for Structural Optimization: Performance and Efficiency Analysis. *Advances in Civil Engineering*, *2024*(1), 2054173.

Gholizadeh, S., & Seyedpoor, S. M. (2011). Shape optimization of arch dams by metaheuristics and neural neTWOrks for frequency constraints. *Scientia*

Iranica, *18*(5), 1020-1027.

Goryachevskiy, O. (2019). Optimization of simply supported castellated I-beams loaded by a uniformly distributed load. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, *15*(4), 58-65.

Hasançebi, O. (2012). An Efficient Metaheuristic Algorithm for Engineering Optimization: SOPT.

Hashim, N. S., & De'nan, F. (2024). The magnitude of stress concentration of I-beam with web opening because of lateral-torsional buckling effects. *World Journal of Engineering*, *21*(2), 386-397.

Hashm, M., Noori, M., Noorı, A. R., & Doorı, S. G. (2024). Undamped forced vıbratıon analysıs of castellated steel beam wıth cırcular, square and pentagonal web openıngs. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *11*(22), 46-62.

Hieu, N. T., & Tuan, V. A. (2018). Weight optimization of composite cellular beam based on the differential evolution algorithm. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE)-HUCE*, *12*(5), 28-38.

Hosain, M. U., & Spiers, W. G. (1970). Experiments on castellated steel beams. Saskatoon, Canada: Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan.

Hosseini, P., Kaveh, A., & Naghian, A. (2023). The use of artificial neural neTWOrks and metaheuristic algorithms to optimize the compressive strength of concrete. *Int. J. Optim. Civil Eng*, *13*(3), 327-338.

Hussein, M., Eltoukhy, A. E., Darko, A., & Eltawil, A. (2021). Simulation-optimization for the planning of off-site construction projects: A comparative study of recent swarm intelligence metaheuristics. *Sustainability*, *13*(24), 13551.

Jadhav, V. N., Kurlapkar, R. R., & Patil, A. P. (2024). Assessment of lateral-torsional buckling capacity of mild steel castellated beam with sinusoidal web openings. *Asian Journal of Civil Engineering*, *25*(5), 4081-4090.

Jamadar, A. M., & Kumbhar, P. D. (2015). Parametric study of castellated beam with circular and diamond shaped openings. *International Research Journal of Engineering and Technology*, *2*(2), 715-722.

Ji, W., Jia, L., Wang, Y., & Chen, C. (2018, July). Experimental Study of Local Buckling of Castellated Steel Beams Under Pure Bending. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 392, No. 2, p. 022013). IOP Publishing.

Jia, L., Li, Q., Ji, W., Chen, C., Du, J., & Geng, K. (2024, May). Influence of the local buckling of web on the bearing capacity of a castellated beam/composite beam

under pure bending. In *Structures* (Vol. 63, p. 106358). Elsevier.

Kang, L., Hong, S., & Liu, X. (2021). Shear behaviour and strength design of cellular beams with circular or elongated openings. *Thin-Walled Structures*, *160*, 107353.

Kashani, A. R., Gandomi, M., Camp, C. V., Rostamian, M., & Gandomi, A. H. (2020). Metaheuristics in civil engineering: A review. *1*, *1*(1), 019.

Katebi, J., Shoaei-parchin, M., Shariati, M., Trung, N. T., & Khorami, M. (2020). Developed comparative analysis of metaheuristic optimization algorithms for optimal active control of structures. *Engineering with Computers*, *36*, 1539-1558.

Kaveh, A., & Ardebili, S. R. (2023). Optimal design of mixed structures under time-history loading using metaheuristic algorithm. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, *67*(1), 57-64.

Kaveh, A., & Ilchi Ghazaan, M. (2015). Structural reliability assessment utilizing four metaheuristic algorithms. *Internatıonal Journal of Optımızatıon in Civil Engıneerıng;* 5(2):189-209.

Kaveh A, Mahdavi VR (2014) Colliding bodies optimization: a novel meta-heuristic method. *Comput Struct* 139:18–27

Kaveh, A. (2016). Optimum design of castellated beams using the tug of war algorithm. *In Applications of metaheuristic optimization algorithms in civil Engineering* (pp. 9-30). Cham: Springer International Publishing.

Kaveh, A., & Sabzi, O. (2011). A comparative study of TWO meta-heuristic algorithms for optimum design of reinforced concrete frames. *International Journal of Civil Engineering*, *9*(3).

Kaveh, A., & Seddighian, M. R. (2021). Optimization of slope critical surfaces considering seepage and seismic effects using finite element method and five meta-heuristic algorithms. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, *65*(2), 425-436.

Kaveh, A., & Shokohi, F. (2015). Cost Optimization of End-Filled Castellated Beams Using Meta-Heuristic Algorithms. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, *5*(3), 329-351.

Kaveh, A., & Shokohi, F. (2016). A hybrid optimization algorithm for the optimal design of laterally-supported castellated beams. *Scientia Iranica*, *23*(2), 508-519.

Kaveh, A., & Shokohi, F. (2016). Applıcatıon of Grey Wolf Optımızer in Desıgn of Castellated Beams. *Asian Journal of Civil Engineering (Bhrc)*, *17*(5), 683-700.

Kaveh, A., & Shokohi, F. (2016). Optimum design of laterally supported castellated

beams using tug of war optimization algorithm. *Structural Engineering and Mechanics*, *3*(58), 533-553.

Kaveh, A., & Shokohi, F. (2016). Optimum design of laterally supported castellated beams using natural forest regeneration algorithm. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, *40*, 195-207.

Kaveh, A., & Vazirinia, Y. (2019). Construction site layout planning problem using metaheuristic algorithms: a comparative study. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, *43*, 105-115.

Kaveh, A., & Bakhshpoori, T. (2019). *Metaheuristics: Outlines, MATLAB Codes and Examples*. Springer.

Kaveh, A., Almasi, P., & Khodagholi, A. (2023). Optimum design of castellated beams using four recently developed meta-heuristic algorithms. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, *47*(2), 713-725.

Kaveh, A., Hosseini, S. M., & Zaerreza, A. (2021). Boundary strategy for optimization-based structural damage detection problem using metaheuristic algorithms. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, *65*(1), 150-167.

Kayabekir, A. E. (2021). Optimization of cylindrical wall domes via metaheuristic algorithms. *Challenge Journal of Structural Mechanics*.

Kayabekir, A. E., Nigdeli, S. M., & Bekdaş, G. (2023). The Development of Hybrid Metaheuristics in Structural Engineering. In *Hybrid Metaheuristics in Structural Engineering: Including Machine Learning Applications* (pp. 17-34). Cham: Springer Nature Switzerland.

Kayabekir, A. E., Bekdaş, G., & Nigdeli, S. M. (2021). The Effect of Initial Values on Metaheuristic-Based Optimum Design of Tuned Mass Dampers. In *Proceedings of 6th International Conference on Harmony Search, Soft Computing and Applications: ICHSA 2020, Istanbul* (pp. 81-91). Springer Singapore.

Kayabekir, A. E., Nigdeli, S. M., Bekdaş, G., & Yücel, M. (2021, September). Optimum design of tuned mass dampers for real-size structures via adaptive harmony search algorithm. In *Proceedings of the 14th ECCOMAS Thematic Conference on Evolutionary and Deterministic Methods for Design, Optimization and Control (EUROGEN 2021), Athens, Greece* (pp. 28-30).

Kayabekir, A. E., Toklu, Y. C., Bekdaş, G., Nigdeli, S. M., Yücel, M., & Geem, Z. W. (2020). A novel hybrid harmony search approach for the analysis of plane stress systems via total potential optimization. *Applied Sciences*, *10*(7), 2301.

Kerdal, D., & Nethercot, D. A. (1984). Failure modes for castellated beams. *Journal of constructional steel research*, *4*(4), 295-315.

Kshirsagar, V. V., & Parekar, S. R. (2018). Behaviour of castellated beams with and

without stiffeners-A review. *Behaviour*, *5*(04), 2964-2969.

Kumbhar, P. D., & Jamadar, A. M. (2015). Optimization of opening size for castellated beam with sinusoidal openings. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, *5*(3), 301-313.

Kurlapkar, R. R., Patil, A. P., & Kumbhar, P. D. (2024). Analyzing the influence of perforations on the structural behavior of mild steel cellular beams. *Asian Journal of Civil Engineering*, *25*(2), 1385-1394.

Kurlapkar, R., & Patil, A. (2021). Optimization of various parameters of castellated beam containing sinusoidal openings. *International Journal Of Engineering Research & Technology (IJERT) Volume*, *10*, 120-123.

Lagaros, N. D., Plevris, V., & Kallioras, N. A. (2022). The mosaic of metaheuristic algorithms in structural optimization. *Archives of Computational Methods in Engineering*, *29*(7), 5457-5492.

Lee, E. H., Lee, H. M., & Kim, J. H. (2018). Application of a meta-heuristic optimization algorithm motivated by a vision correction procedure for civil engineering problems. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *22*(7), 2623-2636.

Liao, T. W., Egbelu, P. J., Sarker, B. R., & Leu, S. S. (2011). Metaheuristics for project and construction management–A state-of-the-art review. *Automation in construction*, *20*(5), 491-505.

Mahjoubi, S., & Bao, Y. (2021). Game theory-based metaheuristics for structural design optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, *36*(10), 1337-1353.

Mashayekhi, M. R., & Mosayyebi, S. (2023). A new hybrid Harris hawks optimization (HHO) and particle swarm optimization (PSO) algorithm for the design of castellated beams. *Asian Journal of Civil Engineering*, *24*(7), 2121-2139.

Mehetre, A. J., & Talikoti, R. S. (2020). Effect of fillet radii on moment carrying capacity of sinusoidal web opening castellated steel beams in comparison with hexagonal web openings. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, *44*, 151-161.

Mei, L., & Wang, Q. (2021). Structural optimization in civil engineering: a literature review. *Buildings*, *11*(2), 66.

Mela, K., & Heinisuo, M. (2014). Weight and cost optimization of welded high strength steel beams. *Engineering structures*, *79*, 354-364.

Mezher, N. A. M., Noorı, A. R., & Ertürkmen, D. (2023). Influence of the web opening shapes on the bending and free vibration responses of castellated steel beams. *International Journal of Engineering Technologies IJET*, *8*(2), 83-100.

Moayedi, H., Kalantar, B., Foong, L. K., Tien Bui, D., & Motevalli, A. (2019).

Application of three metaheuristic techniques in simulation of concrete slump. *Applied Sciences*, *9*(20), 4340.

Morkhade, S. G., Shirke, T., Mansuke, A., Chavan, M. U., & Gupta, L. M. (2021). Experimental and analytical investigation of castellated steel beams with varying openings eccentricity. *Journal of the Institution of Engineers (india): Series A*, *102*(2), 479-488.

Naranjo-Pérez, J., Infantes, M., Jiménez-Alonso, J. F., & Sáez, A. (2020). A collaborative machine learning-optimization algorithm to improve the finite element model updating of civil engineering structures. *Engineering Structures*, *225*, 111327.

Nguyen, Q. H., Ly, H. B., Le, T. T., Nguyen, T. A., Phan, V. H., Tran, V. Q., & Pham, B. T. (2020). Parametric investigation of particle swarm optimization to improve the performance of the adaptive neuro-fuzzy inference system in determining the buckling capacity of circular opening steel beams. *Materials*, *13*(10), 2210.

Nigdeli, S. M., Bekdaş, G., & Yang, X. S. (2018). Metaheuristic optimization of reinforced concrete footings. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *22*, 4555-4563.

Okubo, T., & Nethercot, D. A. (1985). WEB POST STRENGTH IN CASTELLATED STEEL BEAMS. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, *79*(3), 533-557.

Ozyuksel Ciftcioglu, A., Ustuner, B., Dogan, E., Arafat, S., & Hussain, A. (2024). Taguchi-enhanced Grey Wolf Optimizer for robust design of cellular beams. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, *52*(8), 5739-5768.

Pachpor, P. D., Gupta, L. M., Deshpande, N. V., & Bedi, K. (2011). Parametric Study of Castellated Beam. *Advanced Materials Research*, *163*, 842-845.

Pritykin, A. I. (2022). Prediction of the castellated beams deflections. *Vestnik MGSU*, *17*(9), 1160-1174.

Panedpojaman, P., Sae-Long, W., Yapa, R., & Chaiviriyawong, P. (2024). Design of Cellular Members under Axial-Shear-Flexure Interaction. *Journal of Applied and Computational Mechanics*.

Podolski, M., & Sroka, B. (2019). Cost optimization of multiunit construction projects using linear programming and metaheuristic-based simulated annealing algorithm. *Journal of civil engineering and management*, *25*(8), 848-857.

Prayogo, D., Cheng, M. Y., Wu, Y. W., Redi, A. P., Yu, V. F., Persada, S. F., & Nadlifatin, R. (2020). A novel hybrid metaheuristic algorithm for optimization of construction management site layout planning. *Algorithms*, *13*(5), 117.

Rabi, M., Jweihan, Y. S., Abarkan, I., Ferreira, F. P. V., Shamass, R., Limbachiya, V., ... & Santos, L. F. P. (2024). Machine learning-driven web-post buckling resistance prediction for high-strength steel beams with elliptically-based web openings. *Results in Engineering*, *21*, 101749.

Redwood, R., & Demirdjian, S. (1998). Castellated beam web buckling in shear. *Journal of Structural Engineering*, *124*(10), 1202-1207.

Rezk, H., Olabi, A. G., Wilberforce, T., & Sayed, E. T. (2024). Metaheuristic optimization algorithms for real-world electrical and civil engineering application: A Review. *Results in Engineering*, *23*.102437.

Saberi, A. A., & Sedaghat Shayegan, D. (2021). Optimization of Haraz dam reservoir operation using CBO metaheuristic algorithm. *Int J Optim Civil Eng*, *11*(4), 581-92.

Saka, M. P., Hasançebi, O., & Geem, Z. W. (2016). Metaheuristics in structural optimization and discussions on harmony search algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, *28*, 88-97.

Sattar, D., & Salim, R. (2021). A smart metaheuristic algorithm for solving engineering problems. *Engineering with Computers*, *37*(3), 2389-2417.

Sharifi, Y., & Tohidi, S. (2014). Lateral-torsional buckling capacity assessment of web opening steel girders by artificial neural neTWOrks—elastic investigation. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, *8*(2), 167-177.

Showkati, H., Ghazijahani, T. G., Noori, A., & Zirakian, T. (2012). Experiments on elastically braced castellated beams. *Journal of Constructional Steel Research*, *77*, 163-172.

Soltani, M. R., Bouchaïr, A., & Mimoune, M. (2012). Nonlinear FE analysis of the ultimate behavior of steel castellated beams. *Journal of constructional steel research*, *70*, 101-114.

Sorkhabi, R. V., Naseri, A., & Naseri, M. (2014). Optimization of the castellated beams by particle swarm algorithms method. *APCBEE Procedia*, *9*, 381-387.

Sotelino, E. D. (2017). Design equations for local buckling of castellated beams subjected to pure bending (*Doctoral dissertation*, PUC-Rio).

Talatahari, S., Azizi, M., & Gandomi, A. H. (2021). Material generation algorithm: A novel metaheuristic algorithm for optimization of engineering problems. *Processes*, *9*(5), 859.

Talatahari, S., Azizi, M., Tolouei, M., Talatahari, B., & Sareh, P. (2021). Crystal structure algorithm (CryStAl): a metaheuristic optimization method. *IEEE Access*, *9*, 71244-71261.

Tanady, K., & Suryoatmono, B. (2024). Numerical Study of Behavior of Castellated

Beam under Cyclic Loading. *Civil Engineering and Architecture*, *12*(1), 185-202.

Tayfun, D. E. D. E. Metaheuristic Optimization Algorithms and Civil Engineering. *Current Trends in Civil & Structural Engineering.* 1 (1): 2018. CTCSE. MS. ID, 502.

Tsavdaridis, K. D., & D'Mello, C. (2011). Web buckling study of the behaviour and strength of perforated steel beams with differ ent novel web opening shapes. *Journal of Constructional Steel Research*, 67, 1605–1620.

Tudjono, S., & Han, A. L. (2017, November). Analysis of castellated steel beam with oval openings. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 271, No. 1, p. 012104). IOP Publishing.

Ulusoy, S., Kayabekir, A. E., Bekdaş, G., & Niğdeli, S. M. (2020). Metaheuristic algorithms in optimum design of reinforced concrete beam by investigating strength of concrete. *Challenge Journal Of Concrete Research Letters* 11 (2) 26–30 .

Üstüner, B., Aydoğdu, İ., Özyürek, C., & Doğan, E. (2024, December). A comparative analysis of metaheuristic algorithms for optimizing curved roof structures. In *Structures* (Vol. 70, p. 107722). Elsevier.

Wang, P., Guo, K., Liu, M., & Zhang, L. (2016). Shear buckling strengths of web-posts in a castellated steel beam with hexagonal web openings. *Journal of Constructional Steel Research*, *121*, 173-184.

Wang, P., Wang, X., & Ma, N. (2014). Vertical shear buckling capacity of web-posts in castellated steel beams with fillet corner hexagonal web openings. *Engineering Structures*, *75*, 315-326.

Yalcin, Y., Orhon, M., & Pekcan, O. (2019). An automated approach for the design of mechanically stabilized earth walls incorporating metaheuristic optimization algorithms. *Applied Soft Computing*, *74*, 547-566.

Yang XS. 2008. Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms. Luniver Press: *Bristol*.

Yang, X. S. (2010). Firefly algorithm, Levy flights and global optimization. In Research and development in intelligent systems XXVI: Incorporating applications and innovations in intelligent systems XVII *Springer London* (pp. 209-218).

Yang, X. S., & Hossein Gandomi, A. (2012). Bat algorithm: a novel approach for global engineering optimization. *Engineering computations*, 29(5), 464-483.

Yang, X. S., Bekdaş, G., & Nigdeli, S. M. (2016). Review and applications of metaheuristic algorithms in civil engineering. *Metaheuristics and Optimization in Civil Engineering*, 1-24.

Yoo, D. G., Kim, J. H., & Geem, Z. W. (2014). Overview of harmony search algorithm and its applications in civil engineering. *Evolutionary Intelligence*, *7*, 3-16.

Yuan, W. B., Yu, N. T., Bao, Z. S., & Wu, L. P. (2016). Deflection of castellated beams subjected to uniformly distributed transverse loading. *International Journal of Steel Structures*, *16*, 813-821.

Yuan, W. B., Kim, B., & Li, L. Y. (2014). Buckling of axially loaded castellated steel columns. *Journal of Constructional Steel Research*, *92*, 40-45.

Zaheer, Q., Manzoor, M. M., & Ahamad, M. J. (2023). A review on developing optimization techniques in civil engineering. *Engineering Computations*, *40*(2), 348-377.

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

Zavala, G., Nebro, A. J., Luna, F., & Coello Coello, C. A. (2016). Structural design using multi-objective metaheuristics. Comparative study and application to a real-world problem. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, *53*, 545-566.

Zhang, J., Huang, Y., Wang, Y., & Ma, G. (2020). Multi-objective optimization of concrete mixture proportions using machine learning and metaheuristic algorithms. *Construction and Building Materials*, *253*, 119208.

Zhao, B., Huo, H., Ran, C., Fang, C., Wang, W., & Zhou, H. (2024). Flexural behavior of castellated partially encased composite (PEC) beams. *Journal of Constructional Steel Research*, *214*, 108509.

Zhou, X., He, Z., Chen, P., Li, J., & Li, Z. (2019, April). Distortional buckling behavior and design consideration of castellated beams considering residual stresses. In *Proceedings of the 2019 Structural Stability Research Council Annual Stability Conference*.

Zirakian, T., & Showkati, H. (2006). Distortional buckling of castellated beams. *Journal of Constructional Steel Research*, *62*(9), 863-871.

ÖZGEÇMİŞ

1. Kişisel Bilgiler:

Adı Soyadı: Marwan Abdulkareem Shakir ALBAYATI
Uyruk: Irak

3. Akademik Eğitim:

- Lisans:

Bağdat Üniversitesi – Mühendislik Fakültesi – İnşaat Mühendisliği Bölümü (1997–1998)

- Yüksek Lisans:

Arap Bilim, Teknoloji ve Deniz Taşımacılığı Akademisi – Mısır (2008)

Tez Konusu: İnşaat Projelerinin Yönetiminde Ekipman Performansının Değerlendirilmesi

Danışman: Prof. Dr. Hüssam Hüsni

G.P.A. = 3.75

- Doktora:

İstanbul Gelişim Üniversitesi – İnşaat Mühendisliği Bölümü

Danışman: Dr. Ahmad Reshad Noori

3. Dil Bilgisi:

Arapça: Ana dil

Türkçe: C1

İngilizce: İyi (Londra'dan mühendisler için B2 sertifikası – Puan: 89)

4. Bilgisayar Becerileri:

Microsoft Word – Microsoft Excel – PowerPoint – Windows

AutoCAD – Primavera – MATLAB – Kalite Yönetim Sistemleri

5. Katıldığı Eğitimler (Sertifikalı):

1. Sağlık ve Güvenlik Yönetimi – Birleşik Krallık
2. Risk Değerlendirmesinin 5 Adımı – Birleşik Krallık

3. Ortak Tehlikeler – Birleşik Krallık
4. Manuel Taşıma – Birleşik Krallık
5. Görsel Ekran Ekipmanları Yönetimi – Birleşik Krallık
6. UK POWER Deneyimi – Üretim, Dağıtım ve Ticaret
7. İnsan Kaynakları Yönetimi (İleri düzey yöneticiler için)
8. Teknik Yönetim (İleri düzey yöneticiler için)
9. FIDIC Yeni Sarı Kitap (Tesis ve Tasarım İşleri) – ABD Ordusuna bağlı Amerikan kuruluşundan alınan eğitim
10. FIDIC EPC/T Anahtar Teslim Sözleşmeleri – ABD Ordusuna bağlı Amerikan kuruluşundan alınan eğitim
11. Kalite Sistemleri Denetimi
12. Katkı Maddelerinin Özellikleri
13. Kazak Temelleri

6. Mesleki Deneyim (24 Yıl):

- Ünvan: Başmühendis (Emekli)
- Kurum: Irak Milli Eğitim ve Yüksek Araştırma Bakanlığı, Elektrik Bakanlığı

Eğitim Alanında:
- Mustansiriya Üniversitesi – Mühendislik Fakültesi – İnşaat Mühendisliği Bölümünde öğretim görevlisi
- İnşaat Malzemeleri dersini verdim ve laboratuvar sorumlusuydum (1 yıl)

Elektrik Dönüştürme İstasyonları Projelerinde:
- Elektrik üretim ve dönüştürme istasyonlarının inşası ve mühendislik tasarımı
- Ulusular firmalarla müzakereler ve firma seçim komiteleri üyeliği
- Ticaret bölümünde müdür yardımcılığı ve yerel ihalelerin müdürü
- Teknik ve idari ihale süreci, yüklenici firmalarla koordinasyon ve mali takibin yapılması
- Resmi ödeme emirleri ve değişiklik emirlerinin düzenlenmesi

Büyük Projeler:
- Enbar, Selahaddin ve Diyala şehirlerinde toplam 21 elektrik dönüştürme istasyonu projesinde İnşaat, elektrik ve mekanik mühendislik işlerinin Yönetici müdürü
- 400 ve 132 kV yüksek gerilim hatları ile kablo kanallarının inşası da bu görev kapsamındaydır.

7. Resmi Komite Görevleri:

- SİEMENS, GENERAL ELECTRİC (GE), ALSTOM gibi uluslararası şirketlerle çalışılan projelerde nihai teslim ve teknik değerlendirme komitelerinde üyelik

Japon şirketi **TOYOTA** ile teknik ve finansal takip komitesi üyelik
- Proje süresi uzatma, değişiklik emri, kesinti süresi ve kalite denetimi gibi konularda onlarca resmi komitede başkanlık ve üyelik
- Yeni trafo merkezleri için mühendis ve teknisyen seçiminde, tahribatlı testlerin uygulanması ve ulusular firmalarla birlikte eğitim/uygulama süreçlerine katılım amacıyla seçici komitelerde görev
- Kerkük Üniversitesi ve Batı Kerkük projeleri ve büyük ölçekli altyapı projelerinde fiyat değerlendirme ve ihale dosyası hazırlama komitelerinde görev (başkan)

Kariyerim boyunca 37'den fazla resmi teşekkür belgesi ve takdir yazısı aldım.

Bu özgeçmişte yer alan tüm bilgiler resmî belgelerle belgelenmiştir. Şu anda ilgili belgeler mevcut olmadığı için bazı diğer faaliyetler dâhil edilmemiştir (örneğin: büyük ölçekli elektrik trafo merkezlerinin inşası, yüksek gerilim hatları ve kablo kanalları, uluslararası firmaların tekliflerinin değerlendirme komisyonları ve çeşitli ihale inceleme ve karar komisyonları).