

# ABC, TLBO, TLABC ve FDB-TLABC ALGORİTMALARININ BETONARME SÜREKLİ KİRİŞLERİN OPTİMİZASYONU ÜZERİNDEKİ BAŞARIMI

*Hasan Tahsin ÖZTÜRK* \*<sup>ID</sup>  
*Sebahat TEMİZ* \*\*<sup>ID</sup>

Alınma: 09.06.2023 ; düzeltme: 05.12.2023 ; kabul: 04.03.2024

**Öz:** Bu çalışmada ilk olarak, betonarme sürekli kirişlerin detaylı tasarımlarının minimum maliyetle yapılabileceği bir süreç tasarlanmıştır. Ardından bu problem üzerinde FDB-TLABC, TLABC, TLBO ve ABC algoritmalarının performansları değerlendirilmiştir. Bu amaçlarla öncelikle Türk betonarme standardı ve deprem yönetmeliği dikkate alınarak optimizasyon problemi oluşturulmuştur. Bir, iki ve üç açıklıklı kiriş örneklerinden oluşan bir problem takımı hazırlanmıştır. Bu problem takımı üzerinde yapılan testlerden algoritmaların optimum sonuca ulaşma performansları ile belirlenen makul çözümlere ulaşma süreleri ve başarıları belirlenmiştir. Optimum sonuca ulaşmada, TLABC ve FDB-TLABC algoritmalarının en başarılı algoritmalar olduğu görülmüştür. Kararlılık analizinden, TLABC algoritmasının en yüksek kararlılığa ve hıza sahip olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Betonarme Sürekli Kiriş, Optimizasyon, Sezgisel Algoritmalar

## Performance of ABC, TLBO, TLABC and FDB-TLABC Algorithms on Optimization of RC Continuous Beam

**Abstract:** In this study, firstly, a process by which detailed designs of RC continuous beams can be made with minimum cost was designed. Then, the performances of the FDB-TLABC, TLABC, TLBO, and ABC algorithms on this problem were evaluated. For these purposes, first, the optimization problem was created by taking into account the Turkish reinforced concrete standard and earthquake regulations. A problem set consisting of one, two, and three-span beam samples was prepared. From the tests carried out on this problem set, the performance of the algorithms to reach the optimal result and the time to reach feasible solutions and their success were determined. It was seen that the TLABC and FDB-TLABC algorithms are the most successful in reaching the optimum result. From the stability analysis, it was seen that the TLABC algorithm has the highest stability and speed.

**Keywords:** RC Continuous Beam, Optimization, Metaheuristic Algorithms

## 1. GİRİŞ

Günümüzde kaynakların hızla tükenmesi ve iş gücü maliyetlerinin artması nedeniyle, diğer alanlarda olduğu gibi mühendislikte de bir tasarımın ya da yapım işinin en kısa zamanda, minimum maliyetle tamamlanması arzu edilmektedir. Her geçen gün geliştirilen optimizasyon teknikleri bu arzunun gerçekleştirilmesinde mühendislere yardımcı olmaktadır. Bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişime paralel olarak, optimizasyon tekniklerinin kullanım alanını genişletmek ve kullanılan yöntemlerin başarımını artırmak üzere, birçok çalışma

\* Karadeniz Teknik Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon

\*\* Demay Mimarlık, Ankara

İletişim Yazarı: Hasan Tahsin Öztürk (htozturk@ktu.edu.tr)

gerçekleştirilmiştir. Özellikle optimizasyon problemlerinin çözümünde, farklı alanlardaki problemlere kolayca uyarlanabilen sezgisel algoritmalar tercih edilmektedir. Doğadaki canlılardan, fizik ve kimya yasalarından esinlenerek geliştirilen bu algoritmalar; solar yakıt hücrelerinin tasarımı (Ajayan, 2022), motorların başarımının artırımı (Duan ve diğ., 2023), güç sistemlerinin iyileştirilmesi (Ali ve diğ., 2023), tıp alanında hastalık teşhisi (Riaz ve diğ., 2022), yapay sinir ağlarının eğitimi (Öztürk ve diğ., 2018; Mardani-Aghabaglou ve diğ., 2021), akım ve gerilim sensörlerinin tasarımı (Raheem ve Basil, 2023), elektrik ağlarının planlanması (Xia ve diğ., 2023) gibi birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Sezgisel algoritmalar rastgele arama süreçleri kullandıklarından, gradyan tabanlı optimizasyon tekniklerine göre daha çok sayıda hesaplama girişimine ihtiyaç duymaktadırlar. Bu nedenle sezgisel algoritmalar, optimum çözümleri kısa sürede bulabilenlerin belirlenmesi önemli bir araştırma konusu olmaktadır.

İnşaat mühendisliği alanındaki optimizasyon uygulamalarının son yıllarda hızla arttığı ve tasarımlarda etkin araçların geliştirildiği görülmektedir. Betonarme kirişlerin optimizasyonunu amaçlayan çalışmalardan başlıcaları incelendiğinde; çalışmaların tek (Chutani ve Singh, 2017) ve/veya çift donatılı dikdörtgen (Shariat ve diğ., 2018) ya da tablalı kiriş kesitlerinin (Ferreira ve diğ., 2003) ve farklı açıklık sayılarına sahip sürekli kirişlerin (Shaqfa ve Orbán, 2019) optimizasyonunu konu edindiği görülmektedir. Bu çalışmaların çoğunda amaç fonksiyonu olarak kesit ya da kirişin maliyet fonksiyonu kullanılmıştır. Bunun dışında bazı çalışmalarda ağırlığın minimizasyonu (Koumousis ve Arsenis, 1998), kesitin taşıyabileceği eğilme momentinin maksimizasyonu (Ferreira ve diğ., 2003) ve CO<sub>2</sub> salınımının minimizasyonu (Sahebi ve Dehestani, 2023) hedeflenmiştir. Diğer taraftan çalışmalarda farklı tasarım standartlarının kullanıldığı da görülmektedir. İncelenen çalışmalarda en çok Amerikan standardının (ACI) kullanıldığı bunun dışında Hindistan (IS) (Govindaraj ve Ramasamy, 2005), Avrupa (Eurocode2) (Rahimi ve Maghrebi, 2023) ve İran (ICS) (Shariat ve diğ., 2018) betonarme standartlarının da kullanıldığı görülmektedir. İncelenen çalışmalarda Genetik Algoritma (GA), Yapay Arı Koloni Algoritması (ABC), Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması (PSO), Parametresiz Modifiye Armoni Arama Algoritması (mPSFHS), Armoni Arama Algoritması (HS), Yarasa Algoritması (BA), Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritması (TLBO) ve Çiçek Tozlaşma Algoritması (FPA) kullanılmıştır. Çalışmaların çoğunda farklı algoritmalarla karşılaştırma yapılmadığı için bir algoritma önerisi bulunmamaktadır. İncelenen çalışmalardan ikisinde yapılan karşılaştırmalı çalışmalarda kirişlerin optimum tasarımında ABC algoritmasının önerildiği görülmektedir (Jahjouh ve diğ., 2013; Öztürk ve diğ., 2012). Literatürdeki çalışmaların hâkim çoğunluğunda durdurma ölçütü olarak maksimum iterasyon sayısı kullanıldığı görülmektedir. Bununla birlikte çalışmaların tamamında hesaplama süresi ve algoritmaların kararlılığı ile ilgili bir çalışmanın yapılmadığı da anlaşılmaktadır.

Bu çalışmanın başlıca iki amacı bulunmaktadır. Bunlar;

i) Sürekli kirişlerin detaylı tasarımlarının minimum maliyetle yapılabileceği bir araç geliştirmek: Bu amaçla “Yöntem” bölümünde açıklanan süreçle bir, iki ve üç açıklıklı sürekli kirişlerin minimum maliyetle optimizasyonunun yapılabileceği ve detaylı betonarme tasarımın elde edilebileceği bir çözüm süreci geliştirilmiştir. Bu problemin oluşturulmasında TS500 ve TBDY-2018 yönetmelikleri kullanılarak araştırmanın Türk standart ve yönetmeliklerine uygun olarak yapılması hedeflenmiştir.

ii) Sezgisel algoritmalarından Yapay Arı Koloni (ABC) (Karaboğa ve Akay, 2009) ve Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) (Rao ve diğ., 2012) algoritmaları ile bunlardan türetilen Öğretme-Öğrenme Tabanlı Yapay Arı Koloni (TLABC) (Chen ve diğ., 2018) algoritması ve uzaklık uygunluk dengesi (FDB) yöntemi (Kahraman ve diğ., 2019) uygulanmış TLABC algoritmasının (FDB-TLABC) (Gürgen ve diğ., 2022) başarımlarını ayırık değişkenlere sahip betonarme sürekli kiriş problemi üzerinde belirlemek, FDB-TLABC ve

TLABC algoritmalarının temel algoritmaları olan ABC ve TLBO algoritmalarına göre daha etkin olup olmadığını incelemek: Bu amaçla ilk aşamada; bir, iki ve üç açıklıklı sürekli kiriş örnekleriyle oluşturulan problem takımı üzerinde yapılan testlerden elde edilen istatistiksel bulgular incelenerek algoritmaların başarımları belirlenmiştir. İkinci aşamada ise algoritmaların, belirlenen bir makul çözüme ulaşma süreleri, diğer bir deyişle hesaplama karmaşıklıkları ve kararlılıklarının (başarı oranlarının) test edildiği kararlılık analizi gerçekleştirilmiştir.

## 2. YÖNTEM

### 2.1. Amaç Fonksiyonu

Problemin amaç fonksiyonu, sürekli kirişin maliyet fonksiyonundan oluşmaktadır. Bu çalışmada;  $C_c$  beton,  $C_s$  çelik maliyetini,  $V_c$  beton hacmini ve  $W_s$  toplam çelik ağırlığını göstermek üzere, amaç fonksiyonu;

$$f(x) = V_c C_c + W_s C_s \quad (1)$$

olarak ifade edilmektedir. Yönetmelik koşullarının ve tasarım ölçütlerinin optimum tasarımda dikkate alınmasını sağlayan sınırlayıcı ihlallerinin, algoritmaya işlenmesi için ceza katsayısı yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada, ceza katsayısı ( $p_c$ )  $10^8$  olarak dikkate alınmış, böylece cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri;

$$P(x) = f(x) + p_c \sum \text{sınır ihlalleri} \quad (2)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

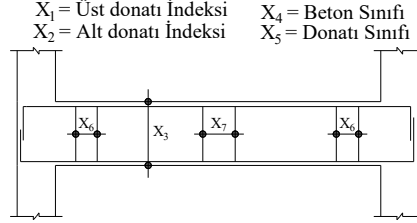
### 2.2. Tasarım Değişkenleri

Bu çalışmadaki betonarme sürekli kiriş optimum tasarım süreci bir, iki ve üç açıklıklı kirişler için geliştirilmiştir. Problemlerin tasarım değişkenleri; üst ve alt donatı çap ve adetlerini temsil eden indeks numaraları, kiriş yükseklikleri, beton sınıfı, donatı sınıfı ile sarılma ve orta bölgedeki etriye aralıklarından oluşmaktadır. Açıklık sayısının değişimine göre tasarım değişken sayısı da farklılık göstermektedir. Geliştirilen yaklaşımda, bir açıklıklı kiriş tasarımı için 7 tane, iki açıklıklı kiriş tasarımı için 10 tane ve üç açıklıklı kiriş tasarımı için ise 13 tane tasarım değişkeni bulunmaktadır. Farklı açıklık sayılarına sahip kiriş tasarımları için tasarım değişkenleri aşağıdaki Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmektedir. Kiriş maliyetini minimize eden bu tasarım değişkenlerinin optimum değerleri aranmaktadır. Tasarım süreci boyunca sabit alınan tasarım parametreleri bölüm 3.2'de verilmektedir.

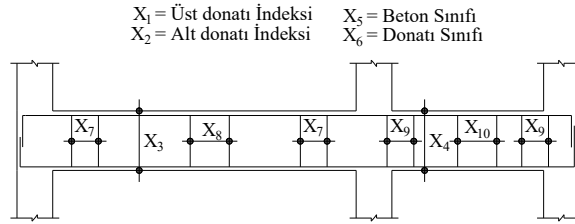
#### 2.1. Optimum Tasarım Süreci

Sürekli kirişlerin optimum tasarımı için geliştirilen süreç Şekil 4'teki akış diyagramında verilmektedir. Şekil 4'den görüleceği üzere diyagramın sol kısmındaki akış probleme uygulanan herhangi bir sezgisel algoritmanın süreçlerini göstermektedir. Bu kısım kullanılan sezgisel algoritmanın yapısına bağlı olarak farklılıklar gösterebilmektedir. Diyagramın sağ tarafı ise, sürekli kiriş optimizasyonu için geliştirilen süreçte kullanılan; verilerin düzenlendiği, yapısal çözümleme ve betonarme tasarım detaylarının oluşturulduğu modüllerden oluşmaktadır. Sürecin başlangıcında giriş verileri tanımlanırken, donatı şablonu oluşturma modülü yardımıyla çözülecek probleme özgü donatı şablonlarının oluşturulması gerekmektedir. Böylece problemin çözümünde donatıların seçildiği veri havuzu oluşturulmaktadır. Şablonlarda bir ya da iki sıralı donatı düzeni kullanılmaktadır. Donatılar Şekil 5'te farklı renklerle gösterilen 4 gruba ayrılmıştır. Bunlar; 1. sıra kenar, 1. sıra ara, 2. sıra kenar ve 2. sıra ara donatı gruplarından

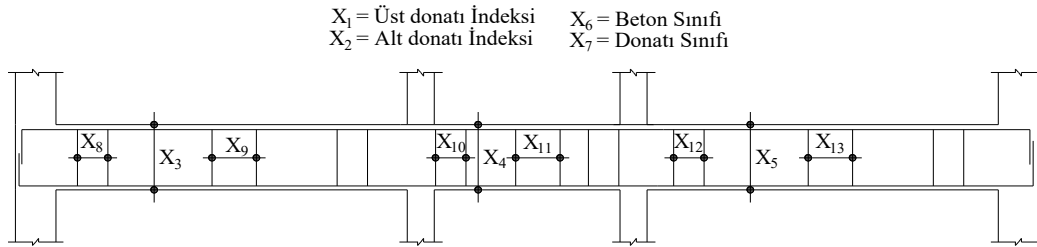
oluşmaktadır. Bu modülde kiriş genişliğine göre kirişe en az sayıda donatıdan, yönetmelik koşullarına göre sığabilecek en çok sayıda donatıya kadar çeşitli sayılarda ve çaplarda donatıdan oluşan kullanılabilir şablonlar oluşturulmaktadır.



**Şekil 1:**  
Bir açıklıklı kiriş probleminin tasarım değişkenleri



**Şekil 2:**  
İki açıklıklı kiriş probleminin tasarım değişkenleri



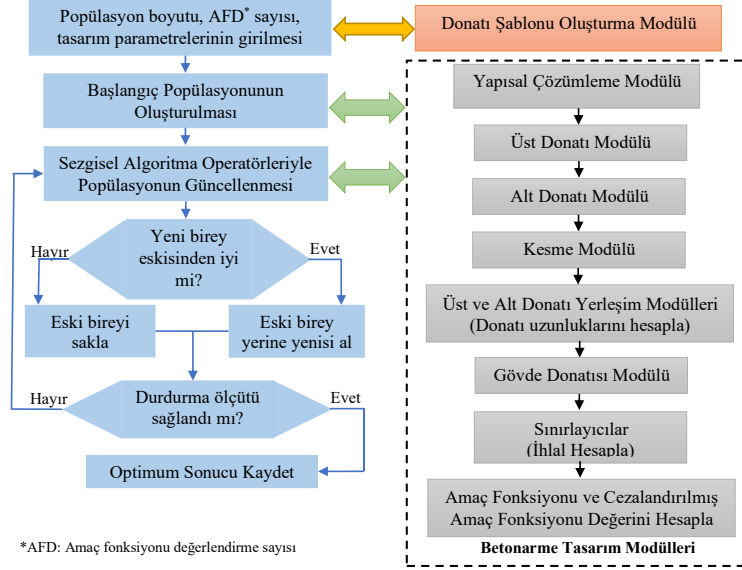
**Şekil 3:**  
Üç açıklıklı kiriş probleminin tasarım değişkenleri

Bu şablonların oluşturulmasında aşağıdaki kurallara uyulmuştur.

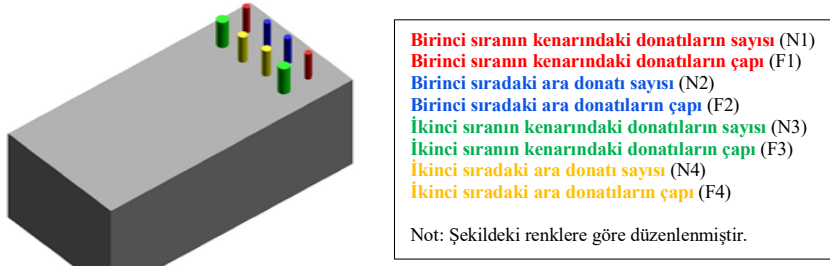
- 1) Birinci sıra için N1 yalnızca 2 olabilmektedir. N2 ile N4 ile ifade edilen donatı sayıları ise 0 ile kesite yerleşebilecek maksimum donatı sayısı arasında değer almakta, N3 ile ifade edilen donatı sayısı 0 veya 2 olabilmektedir.
- 2) N2 sıfır değerini alıyorsa, N3 ve N4 de sıfır olmalıdır.
- 3) N3 sıfır değerini alıyorsa, N4 de sıfır olmalıdır.
- 4) Birinci sıra, alabileceği donatı sayısı ile dolmadan ikinci sıraya geçilmemelidir.
- 5) Birinci ve ikinci sıradaki donatılar arasındaki mesafe TS 500'de verilen ve 3 bağıntısıyla ifade edilen aralık şartını sağlamalıdır.
- 6) Birinci sıradaki toplam donatı alanı, ikinci sıradakine eşit yada büyük olmalıdır. Böylece donatı faydalı yüksekliğinden daha fazla yararlanılmış olmaktadır.

Bu koşullara uymayan donatı yerleşimleri modül tarafından veri havuzundan çıkarılmaktadır. Oluşturulan her şablona birer indeks numarası verilmektedir. Donatı çapları

isteğe göre ayarlanabildiği gibi bu çalışmada asal donatı çapları 12 mm ile 24 mm arasında seçilmiştir. Kesite sığabilecek maksimum donatı sayısı belirlenirken donatı aralıklarının:



**Şekil 4:**  
Sürekli kiriş optimizasyonuna ilişkin akış diyagramı



**Şekil 5:**  
Oluşturulan donatı şablonlarında donatı grupları

$$\text{donatılar arası mesafe} \leq \begin{cases} 25 \text{ mm} \\ \emptyset_{\text{maks}} \\ \frac{4}{3} D_{\text{maks}} \end{cases} \quad (3)$$

koşulunu sağlaması modül tarafından denetlenmektedir. Burada  $D_{\text{maks}}$  maksimum agrega tane boyutunu,  $\emptyset_{\text{maks}}$  ise en büyük boyuna donatı çapını ifade etmektedir.

Kullanılan optimizasyon algoritmasının işletilmesi esnasında amaç fonksiyonunun hesaplanması gerektiği durumda betonarme tasarım modülleri çağırılmaktadır. Bu modüller akış diyagramından da görüldüğü üzere sırasıyla yapısal çözümleme, üst donatı, alt donatı, kesme, üst ve alt donatı yerleşim, gövde donatısı, sınırlayıcılar ve amaç fonksiyonu ile cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerlerini hesaplama modüllerinden oluşmaktadır. Yapısal çözümleme modülünde girilen kat çerçevesi bilgilerine göre sistemin rijitlik matrisi ve yük vektörleri

tanımlanmakta, yapısal çözümlenmeyle algoritmadan gelen tasarım değişkeni bilgilerine göre kirişlerdeki tasarım kesit etkileri hesaplanmaktadır.

Şekil 4’de görülen üst donatı modülünde üst donatıyı temsilen bir indeks numarasını algoritma seçmektedir. Bu atanmış donatı indeksi, bir donatı şablonunu ifade etmektedir. Bu donatı ana şablonunun ikincil şablonları, ana şablondan donatı eksiltilerek türetilmektedir. Türetilen ikincil şablonların her biri için, kirişlerin atanmış boyutları da dikkate alınarak moment taşıma güçleri hesaplanmaktadır. Her bir mesnet için, yapısal çözümlenme modülünden okunan, tasarım mesnet momentini karşılayabilen en ekonomik donatı alanına sahip ikincil donatı şablonları söz konusu mesnetlere atanmaktadır. Kirişin orta bölgelerindeki üst donatının seçiminde ise yönetmelik gereği en büyük mesnet donatısının dörtte birinin kiriş boyunca devam etmesi kuralı uyarınca seçilen en ekonomik donatılı ikincil şablon atanmaktadır.

Üst donatı modülünü izleyen, alt donatı modülünde de benzer bir süreç takip edilmektedir. Alt donatıyı temsilen bir indeks numarasından, diğer bir deyişle donatı şablonundan ikincil donatı şablonları türetilmektedir. Türetilen ikincil şablonların taşıma güçleri belirlenerek, her bir açıklık için belirlenen tasarım açıklık momentini karşılayabilen en ekonomik donatı alanına sahip ikincil şablonları kiriş açıklıklarına atanmaktadır.

Kesme modülünde, daha sonra sınırlayıcı ihlallerinin hesaplanmasında kullanılmak üzere, yapısal çözümlenme modülünden kesme kuvvetleri okunmakta, ardından kesme kuvveti değerlerinden kirişlerin sarılma bölgeleri ve orta bölgeleri için tasarım kesme kuvvetleri hesaplanmaktadır. Algoritma tarafından atanmış etriye aralıkları için sarılma bölgesinde ve orta bölgede kesme kuvveti taşıma güçleri, etriye sayıları ve etriye uzunlukları ile toplam etriye ağırlığı belirlenmektedir.

$$W_s^{etriye} = \sum_{i=1}^n [(n_{sar,i}^{etr} + n_{orta,i}^{etr}) \cdot L_{etr,i}] \cdot A_0 \gamma_s \quad (4)$$

Burada  $n_{sar}^{etr}$  ve  $n_{orta}^{etr}$  etriye aralıklarına göre hesaplanan sarılma ve orta bölgedeki etriye sayılarını,  $L_{etr}$  etriye uzunluğunu,  $A_0$  etriye enkesit alanını,  $\gamma_s$  donatının birim ağırlığını göstermektedir.

Üst ve alt donatı yerleşim modülleri, asal donatı uzunluklarının hesaplanmasını ve böylece asal donatıların ağırlığının bulunmasını sağlamaktadır. Üst ve alt donatı yerleşim modüllerinde kiriş açıklık ve mesnet bölgelerine atanmış ikincil donatı şablonları dikkate alınarak, farklı açıklık sayılarına sahip kirişler için en az uzunlukta donatı kullanımını sağlayan donatılar seçilerek üst ve alt donatı yerleşimi sağlanmaktadır. Böylece belirlenen yerleşime ve kullanılan donatı çapına göre düz ya da kancalı kenetlenme ve gerekiyorsa bindirme boyları da eklenerek yerleştirilen donatı uzunlukları hesaplanmaktadır. Bu modüllerde donatı kenetlenme ve bindirme boyları TS500 (2000) standardına uygun olarak hesaplanmaktadır. Donatı uzunluklarının hesaplanmasıyla alt ve üst boyuna donatıların ağırlıkları

$$W_s^{üst ya da alt} = \gamma_s \sum_{j=1}^{DS} L_j \cdot A_{s,j} \quad (5)$$

ifadesiyle hesaplanabilmektedir. Burada  $\gamma_s$  donatının birim ağırlığını, DS düzenlemelerde kullanılan donatı sayısını (örneğin üç açıklıklı kirişte üst donatılar için DS=10, alt donatılar için DS=6), L ilgili donatının uzunluğunu (kullanılmayan donatı uzunluğu 0 alınmaktadır),  $A_{s,j}$  ise ilgili numaralı donatının enkesit alanını göstermektedir. Kiriş alt ve üst donatıları hesaplandıktan sonra toplam asal donatı ağırlığı hesaplanmaktadır.

$$W_s^{asal} = W_s^{alt} + W_s^{üst} \quad (6)$$

Gövde donatısı modülünde; kiriş yüksekliği 60cm'yi aşması durumunda ya da kiriş yüksekliği, kiriş açıklığının dörtte birinden büyük olması durumunda kirişe gövde donatısı yerleştirilmektedir. Modülde her bir kiriş için ayrı ayrı işlem yapılmaktadır. Yönetmelikler uyarınca söz konusu kirişe gövde donatısı yerleştirmeye karar verildiğinde TS500 (2000)'de bulunan;

$$A_{sl} = 0,001 \cdot b_w \cdot d \quad (7)$$

gövde donatısı alanı koşulu ve TBDY (2018)'de bulunan toplam boyuna gövde donatısı alanının, sağ veya sol mesnet kesitlerinde üst ve alt boyuna donatı alanları toplamının en büyüğünün %30'undan daha az olmayacağı koşulları uygulanır.

$$A_{sl} = 0,30 \cdot \max(A_{s,mesnet}^{sağ}, A_{s,mesnet}^{sol}) \quad (8)$$

Buna göre her iki koşula göre hesaplanan gövde donatısı alanlarının en büyüğü minimum gövde donatısı alanı olarak dikkate alınmaktadır. Eğer gövde donatısı kullanılması gerekiyorsa, belirlenen minimum alan donatı adedi ve çapına dönüştürülmekte, belirlenen gövde donatısı ağırlığı; donatının çapı ( $\emptyset_{i,gövde}$ ), sayısı ( $d_{ni,gövde}$ ) ve uzunluğu ( $L_{i,gövde}$ ) dikkate alınarak,

$$W_s^{gövde} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\emptyset_{i,gövde}^2}{4} d_{ni,gövde} \cdot L_{i,gövde} \right) \gamma_s \quad (9)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Hesaplanan asal donatı, gövde donatısı ve etriye ağırlıklarıyla kullanılan toplam donatı ağırlığı,

$$W_s = W_s^{asal} + W_s^{gövde} + W_s^{etriye} \quad (10)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır.

## 2.2. Sınırlayıcılar

Optimizasyon sürecinde minimum maliyetli tasarım aranırken, tasarımların dayanım ve dayanıklılık bakımından gerekli sınır durumları ve yönetmelik koşullarını sağlaması için çeşitli sınırlayıcılar tanımlanarak bunların ihlal edilip edilmedikleri denetlenmelidir. Yönetmeliklerde kiriş gövde genişliğinin, kiriş yüksekliği ile kirişin birleştiği kolonun veya perdenin kirişe dik genişliğinin toplamını geçmemesi gerekmektedir. Bu koşulun denetlenmesi için, her bir kiriş-kolon birleşiminde:  $b_w$  kiriş genişliğini,  $h_k$  kiriş yüksekliğini,  $b_x^{kolon}$  ise kirişin birleştiği kolonun kirişe dik boyutu olmak üzere:

$$g_1(x) = \frac{b_w}{h_k + b_x^{kolon}} - 1 \leq 0 \quad (11)$$

sınırlayıcısı kullanılmaktadır. Bu sınırlayıcı için N adet açıklığa sahip sürekli kirişte toplam 2N adet denetim yapılmaktadır. Kiriş yüksekliğinin, kiriş genişliğinin üç buçuk katından küçük olması koşulu veri üst sınırıyla denetlenebilse de veri hazırlanırken bu kuralın dikkate alınmama ihtimaline karşı, hatalı tasarıma yol açmamak üzere, bu koşul da denetlenmektedir. Bu koşul her açıklıkta;

$$g_2(x) = \frac{h_k}{3,5 \cdot b_w} - 1 \leq 0 \quad (12)$$

ifadesiyle denetlenmektedir. Bu sınırlayıcı için N adet açıklığa sahip sürekli kirişte toplam N adet denetim yapılmaktadır. Çalışmada sehim hesabı gerektirmeyen kiriş yükseklikleri kullanılmaktadır. Bilindiği üzere L kiriş açıklığı olmak üzere, kirişin iç açıklıkta olması durumunda kiriş yüksekliğinin en az L/15, kenar açıklıkta olması durumunda ise L/12 olması gerekmektedir. Bu yükseklikler, açıklığın kenar ya da içte olması durumlarına göre:

$$g_3(x) = \frac{L/12 \text{ yada } L/15}{h_k} - 1 \leq 0 \quad (13)$$

sınırlayıcısıyla her bir açıklıkta denetlenmektedir. Bu sınırlayıcı için N adet açıklığa sahip sürekli kirişte toplam N adet denetim yapılmaktadır. Kesitlerde minimum ve maksimum donatı oranı denetimleri,

$$g_4(x) = \frac{\rho_{\min}}{\rho} - 1 \leq 0 \quad (14)$$

$$g_5(x) = \frac{\rho}{\rho_{\max}} - 1 \leq 0 \quad (15)$$

sınırlayıcılarıyla denetlenmektedir. Her bir kirişin açıklığında ve her iki mesnet bölgesinde denetim yapılmaktadır. Dolayısıyla dördüncü ve beşinci sınırlayıcılar için N adet açıklığa sahip sürekli kirişte toplam 6N adet denetim yapılmaktadır. Deprem yönetmeliği gereği, mesnetlerdeki alt donatı, aynı mesnetteki üst donatının deprem tasarım sınıfı (DTS) 1, 1a, 2 veya 2a olan yapılarda %50'sinden, diğer yapılarda ise %30'undan daha az olamamaktadır. Buna göre bu koşul, giriş parametresi olarak girilen deprem tasarım sınıfı (DTS) bilgisi dikkate alınarak,  $A_{\text{smesnet}}^{\text{üst}}$  mesnetteki üst donatı alanını,  $A_{\text{smesnet}}^{\text{alt}}$  ise mesnetteki alt donatı alanını göstermek üzere:

$$g_6(x) = \frac{(0,3 \text{ yada } 0,5)A_{\text{smesnet}}^{\text{üst}}}{A_{\text{smesnet}}^{\text{alt}}} - 1 \leq 0 \quad (16)$$

sınırlayıcısıyla denetlenmektedir. Bu sınırlayıcı kiriş açıklıklarında, kenar ve ortak iç mesnetlerde denetlenmektedir. Dolayısıyla N adet açıklığa sahip sürekli kirişte toplam N+1 adet denetim yapılmaktadır. Taşıma gücü momentlerinin ( $M_r$ ), tasarım momentlerinden ( $M_d$ ) büyük olması durumu her bir mesnette:

$$g_7(x) = \frac{M_{d(i)}}{M_{r(i)}} - 1 \leq 0 \quad i = 1..2 \text{ (mesnet no)} \quad (17)$$

sınırlayıcısıyla, her bir açıklıkta ise:

$$g_8(x) = \frac{M_{d(i)}}{M_{r(i)}} - 1 \leq 0 \quad i = 1. \text{ (açıklık no)} \quad (18)$$

sınırlayıcısıyla denetlenmektedir. Yedi nolu sınırlayıcı için her bir mesnette denetim yapıldığından, N adet açıklığa sahip sürekli kirişte toplam 2N adet, sekizinci sınırlayıcı için her bir açıklıkta denetim yapıldığından N adet açıklığa sahip sürekli kirişte toplam N adet denetim yapılmaktadır. Her bir kirişte kesme donatısı için hem sarılma hem de orta bölgede,



$$g_9(x) = 0,3 \frac{f_{ctd}}{f_{ywd}} b_w \frac{s}{A_{sw}} - 1 \leq 0 \quad (19)$$

sınırlayıcısı kullanılarak denetim yapılmaktadır. Hem sarılma hem de orta bölgede denetim yapıldığından, bu sınırlayıcıyla N adet açıklığa sahip sürekli kirişte toplam 2N adet denetim gerçekleştirilmektedir. Etriye aralık denetimi için sarılma bölgelerinde,  $s_k$  sarılma bölgesindeki etriye aralığını göstermek üzere:

$$g_{10}(x) = \frac{s_k}{\min\left(\frac{h_k}{4}, 8\emptyset_{min}, 150 \text{ mm}\right)} - 1 \leq 0 \quad (20)$$

sınırlayıcısı, orta bölgede ise,  $s_o$  orta bölgedeki etriye aralığını, d faydalı yüksekliği göstermek üzere:

$$V_d \leq 3V_{cr} \quad \Rightarrow \quad g_{11}(x) = \frac{s_o}{\min\left(\frac{d}{2}, 350\right)} - 1 \leq 0 \quad (21)$$

yada

$$V_d > 3V_{cr} \quad \Rightarrow \quad g_{11}(x) = \frac{s_o}{\min\left(\frac{d}{4}, 350\right)} - 1 \leq 0 \quad (22)$$

sınırlayıcısı kullanılmaktadır. Her bir kiriş açıklığının sarılma ve orta bölgesi için denetim yapıldığından 10. ve 11. sınırlayıcılar için N adet açıklığa sahip sürekli kirişte toplam 2N adet denetim gerçekleştirilmektedir. Kirişin kesme kuvveti taşıma gücünün, sarılma ve orta bölgedeki tasarım kesme kuvvetlerinden büyük olmasının sağlanması için:

$$g_{12} = \frac{V_d}{V_r} - 1 \leq 0 \quad (23)$$

koşulu her bir kirişin sarılma ve orta bölgesinde denetlenmektedir. Burada  $V_d$  sarılma bölgesinde ya da orta bölgede hesaplanan tasarım kesme kuvvetini,  $V_r$  ise algoritma tarafından yerleştirilen kesme donatısına göre sarılma bölgesinde ya da orta bölgede hesaplanan kesme kuvveti taşıma gücünü ifade etmektedir. Bu durumda N adet açıklığa sahip sürekli kirişte toplam 2N adet denetim yapılmaktadır. Farklı açıklık sayıları için sınırlayıcı denetimlerinin toplam sayısı değiştiğinden üç açıklıklı kiriş için toplam 61, iki açıklıklı kiriş için toplam 41 ve bir açıklıklı kiriş için ise toplam 22 sınırlayıcı denetimi gerçekleştirilmektedir.

### 3. SAYISAL ÇALIŞMA

Bu çalışmada bir, iki ve üç açıklıklı örnek sürekli kirişler için ABC, TLBO, TLABC ve FDB-TLABC algoritmaları kullanılarak optimum tasarımlar gerçekleştirilerek, algoritmaların optimum tasarımı bulmadaki kararlılıkları ve hesaplama karmaşıklıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgular aşağıdaki başlıklar altında sunulmuştur.

### 3.1. Algoritma Ayarları

Kullanılan tüm algoritmaların popülasyon boyutları 80 alınarak tümünde eşit seçilmiştir. Algoritmaların kendilerine özgü parametre ayarları belirlenirken orijinal formlarına sadık kalınarak geliştirenlerin önerdiği ayarlar kullanılmaya çalışılmıştır. Kullanılan ayarlar aşağıdaki Tablo 1’de özetlenmektedir. Algoritmalar Intel® Xeon® CPU E5-1650v3@3,50GHz işlemciye sahip iş istasyonunda çalıştırılmışlardır. Algoritma durdurma ölçütü olarak amaç fonksiyonu değerlendirme sayısı kullanılmış, D tasarım değişkeni sayısı olmak üzere; algoritmaların 1000xD, 5000xD ve 10000xD maksimum amaç fonksiyonu değerlendirme sayısı (maksAFDS) değerlerinde durdurulduğu farklı durum çalışmaları yapılmıştır. Her bir çalışmada 51 bağımsız test gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 1. Algoritma parametre ayarları**

Algoritma	Ayarlar
ABC [18]	MR=0,6; Limit = 0,1 x Populasyon Boyutu x D SPP = 0,1 x Populasyon Boyutu x D
TLBO [19]	-
TLABC [20]	limit = 200; CR = 0,5;
FDB-TLABC [22]	limit = 200; CR = 0,5;
Tüm algoritmalarda popülasyon boyutu 80 alınmıştır.	

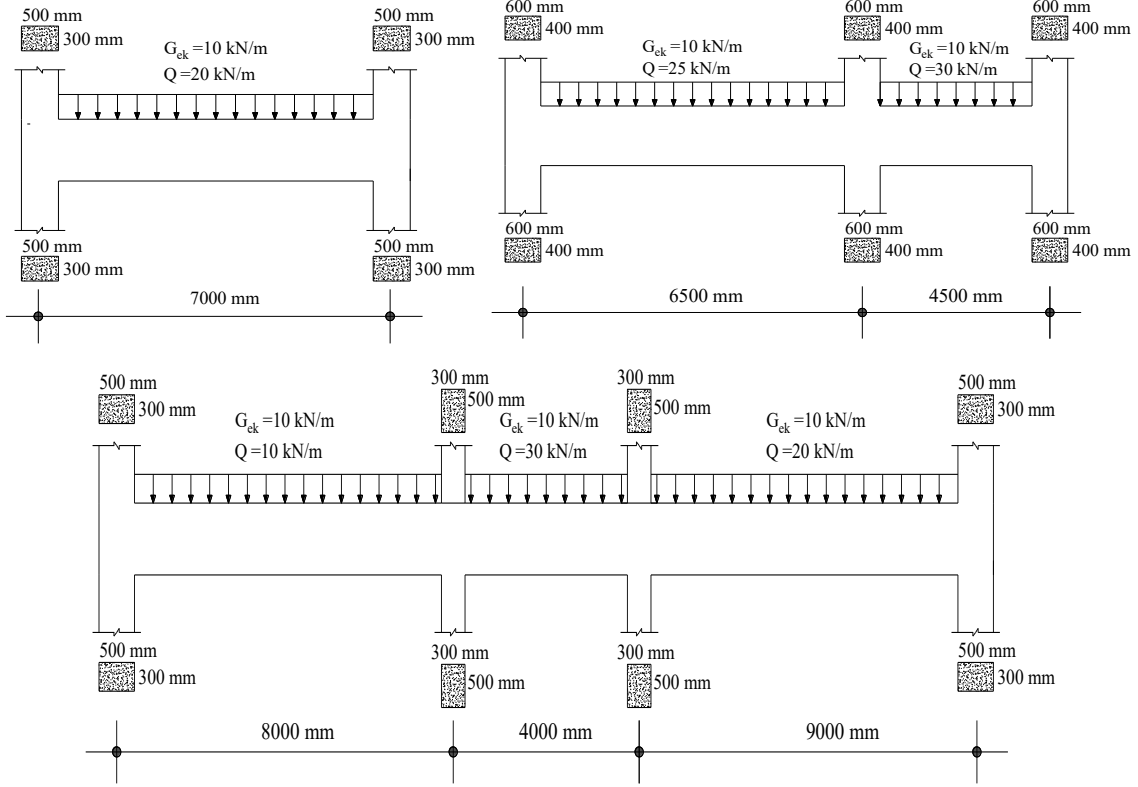
Metasezgisel arama algoritmalarının birbiriyle karşılaştırıldığı çalışmalarda dikkate alınan rakip algoritma ayarları önemli bir konudur. Deneysel karşılaştırmalarda, rakip algoritmaların geliştiricileri tarafından önerilen ayarlar kullanılarak çalıştırılması gerekir. Diğer önemli bir konu ise amaç fonksiyonu azami değerlendirme sayısını tüm algoritmalarda eşit olmasıdır. Bu iki konu rakip algoritmalar arasında adillğin sağlanmasında başlıca üzerinde durulması gereken kriterlerdir. Bu bağlamda deneysel çalışmaların adil bir şekilde yürütülebilmesi için tüm rakip algoritmaların maksimum amaç fonksiyonu değerlendirme sayılarının eşit olması ve algoritmaların geliştiricileri tarafından önerilen ayarlarla çalıştırılması gerekir. Bu makalede deneysel çalışmaların yürütülmesinde bu iki husus dikkate alınmıştır.

### 3.2. Problemler için Tasarım Parametreleri ve Tasarım Değişkeni Sınırları

Çalışmada üç farklı problem ele alındığından, her bir problem için tasarım parametreleri ve tasarım değişkenlerinin alt ve üst sınırları ayrı ayrı verilecektir. İncelenen kirişlerin açıklık değeri, kolon boyutları ve kiriş üzerinde dikkate alınan yüklemeler Şekil 6’da verilmektedir. Bu şekillerde verilemeyen diğer tasarım parametreleri ise Tablo 2’de verilmiştir.

Çalışmada tasarımı gerçekleştirilen örnek problemlere ilişkin tasarım değişkenlerinin alt ve üst sınırları, problem ayrık değişkenli olarak çözüldüğünden tasarım değişkenlerinin artım değerleri Tablo 3’de verilmektedir. Burada daha önce tasarım değişkenleri bölümünde de belirtildiği gibi ilk iki tasarım değişkeni alt ve üst donatı şablonu indekslerini ifade etmektedir. Çalışmada üç örnek için donatı şablonu veri havuzları, donatı şablonu oluşturma modülü kullanılarak oluşturulmuştur. Bu şablonların oluşturulmasında tasarım parametresi olarak verilen kiriş genişlikleri ve kullanılan donatı çapları etkili olmaktadır. Bu çalışmada 12 mm-24 mm çapları arasındaki donatılar kullanılmıştır. Tablo 2’de de ifade edildiği gibi etriye çapları 8

mm olarak alınmıştır. Bu durumda oluşturulan donatı şablonu veri havuzunda 7130 farklı donatı şablonu bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan birim maliyetler Tablo 4’de verilmektedir.



**Şekil 6:**

*Bir, iki ve üç açıklıklı betonarme kirişlerin bazı tasarım parametreleri*

**Tablo 2. Bir, iki ve üç açıklıklı kiriş uygulamalarına ilişkin diğer tasarım parametreleri**

Tasarım Parametresi	Değeri	Birimi
Beton birim ağırlığı	25	kN/m <sup>3</sup>
Kat yükseklikleri	3000	mm
Etriye çapı	8	mm
Deprem tasarım sınıfı	1a	-
En büyük agrega çapı	16	mm
Kiriş genişliği	250	mm
Net beton örtüsü	25	mm

### 3.3. Optimum Tasarımın Belirlenmesi

Bu bölümde algoritma durdurma kriteri olarak kullanılan amaç fonksiyonu değerlendirme sayılarının (maksAFDS) çeşitli değerleri (1000xD, 5000xD ve 10000xD) için 51 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi ve ortalama çözümler, başarı oranları ve Friedman testiyle (Friedman, 1940) elde edilen skorları araştırılmıştır. Bu bilgiler bir açıklıklı kiriş problemi için Tablo 5’te sunulmaktadır.

**Tablo 3. Uygulamalara ilişkin tasarım değişkenleri alt ve üst sınırları, artımları**

Tasarım Değişkeni	Bir Açıklıklı Kiriş			İki Açıklıklı Kiriş			Üç Açıklıklı Kiriş		
	Alt limit	Üst limit	Artım	Alt limit	Üst limit	Artım	Alt limit	Üst limit	Artım
X <sub>1</sub>	1	7130	1	1	7130	1	1	7130	1
X <sub>2</sub>	1	7130	1	1	7130	1	1	7130	1
X <sub>3</sub>	250	1050	50	250	1050	50	250	1050	50
X <sub>4</sub>	{C25, C30, C35, C40, C45, C50}			250	1050	50	250	1050	50
X <sub>5</sub>	{B420C, B500C}			{C25, C30, C35, C40, C45, C50}			250	1050	50
X <sub>6</sub>	50	350	10	{B420C, B500C}			{C25, C30, C35, C40, C45, C50}		
X <sub>7</sub>	50	350	10	50	350	10	{B420C, B500C}		
X <sub>8</sub>				50	350	10	50	350	10
X <sub>9</sub>				50	350	10	50	350	10
X <sub>10</sub>				50	350	10	50	350	10
X <sub>11</sub>							50	350	10
X <sub>12</sub>							50	350	10
X <sub>13</sub>							50	350	10

\*Uzunluk gösteren büyüklükler mm cinsindedir.

**Tablo 4. Malzeme birim maliyetleri**

Malzeme	Birim Maliyet
Çelik (B420C ve B500C)	4.444,24 ₺/kg
Beton (25 MPa)	253,63 ₺/m <sup>3</sup>
Beton (30 MPa)	262,38 ₺/m <sup>3</sup>
Beton (35 MPa)	278,63 ₺/m <sup>3</sup>
Beton (40 MPa)	293,63 ₺/m <sup>3</sup>
Beton (45 MPa)	299,88 ₺/m <sup>3</sup>
Beton (50 MPa)	307,38 ₺/m <sup>3</sup>

**Tablo 5. Bir açıklıklı kiriş için bağımsız testlerden elde edilen en iyi ve ortalama çözümler, başarımları ve Friedman skorları**

Durdurma Kriteri		ABC	FDB TLABC	TLABC	TLBO
1000 x D	En iyi (₺)	828,56	832,12	828,56	<b>827,14</b>
	Ortalama (₺)	838,42	843,40	839,69	850,26
	Başarı Oranı (%)	0	0	0	<b>1,96</b>
	Friedman Skoru	<b>1,853</b>	2,578	2,069	3,500
5000 x D	En iyi (₺)	<b>827,14</b>	<b>827,14</b>	<b>827,14</b>	<b>827,14</b>
	Ortalama (₺)	830,76	829,60	<b>828,17</b>	830,36
	Başarı Oranı (%)	23,53	17,65	<b>47,06</b>	31,37
	Friedman Skoru	2,912	2,471	<b>1,951</b>	2,667
10000 x D	En iyi (₺)	<b>827,14</b>	<b>827,14</b>	<b>827,14</b>	<b>827,14</b>
	Ortalama (₺)	829,77	827,51	<b>827,14</b>	828,60
	Başarı Oranı (%)	33,33	84,31	<b>100</b>	62,75
	Friedman Skoru	3,255	2,177	<b>1,902</b>	2,667
	Ortalama Skor	2,673	2,409	<b>1,974</b>	2,944

Tablo 5 incelendiğinde, elde edilen en iyi çözüm olan 827,14 ₺ maliyete sahip tasarıma maksimum AFDS'nin 1000xD olduğu durumda sadece TLBO algoritmasıyla ulaşılabildiği görülmektedir. Ancak bağımsız testlerin ortalama maliyetleri incelendiğinde en küçük ortalamaya ABC algoritmasının sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum Friedman testi sıralamasında da görülmektedir. Friedman sıralamasına göre, en küçük ortalamaya sahip olan ABC algoritmasının birinci, TLBO algoritmasının ise sonuncu olduğu anlaşılmaktadır. Maksimum AFDS'nin 5000xD ve 10000xD olduğu durumlarda ise tüm algoritmalar bulunan en iyi çözüme ulaşabilmiştir. Bununla birlikte en yüksek başarı oranına ve en düşük ortalamaya sahip algoritmanın her iki durum için de TLABC algoritması olduğu görülmektedir. AFDS'nin 5000xD ve 10000xD olduğu durumlarda Friedman testi sıralamasında da TLABC algoritmasının birinci olduğu anlaşılmaktadır. Bu algoritmayı sırasıyla; FDB-TLABC, TLBO ve ABC algoritmaları izlemektedir.

İki açıklıklı kiriş problemi için en iyi ve ortalama çözümler, başarı oranları ve Friedman testi skorları Tablo 6'da sunulmaktadır. Tablo 6 incelendiğinde, iki açıklıklı kiriş tasarımı için en iyi çözüm olan 1033,21 ₺ maliyete sahip tasarıma, maksimum AFDS'nin 1000xD ve 5000xD olduğu durumlarda hiçbir algoritmayla ulaşamadığı görülmektedir. AFDS'nin 10000xD olduğu durumda ise en iyi çözüme sadece TLABC ve TLBO algoritmaları ulaşabilmiştir. Bağımsız testlerin ortalama maliyetleri incelendiğinde, her durumda en küçük ortalamaya TLABC algoritmasıyla ulaşıldığı anlaşılmaktadır. AFDS'nin 1000xD olduğu durumda Friedman testine göre yapılan sıralamada da TLABC algoritmasının birinci, FDB-TLABC algoritmasının ikinci olduğu, ABC ve TLBO algoritmalarının ise üçüncülüğü paylaştıkları görülmektedir. AFDS'nin 5000xD ve 10000xD olduğu durumlarda da ilk iki algoritmanın sıralamasının değişmediği, TLBO algoritmasının üçüncü, ABC algoritmasının ise dördüncü olduğu görülmektedir. Üç açıklıklı kiriş problemi için en iyi ve ortalama çözümler, başarı oranları ve Friedman testi skorları ise Tablo 7'de sunulmaktadır.

**Tablo 6. İki açıklıklı kiriş için bağımsız testlerden elde edilen en iyi ve ortalama çözümler, başarı oranları ve Friedman skorları**

Durdurma Kriteri		ABC	FDB TLABC	TLABC	TLBO
1000 x D	En iyi (₺)	1062,17	1049,83	1048,62	1057,12
	Ortalama (₺)	1106,86	1091,36	<b>1084,89</b>	1102,47
	Başarı Oranı (%)	0	0	0	0
	Friedman Skoru	2,961	2,235	<b>1,843</b>	2,961
5000 x D	En iyi (₺)	1033,29	1038,17	1038,17	1038,17
	Ortalama (₺)	1063,80	1046,09	<b>1044,46</b>	1056,97
	Başarı Oranı (%)	0	0	0	0
	Friedman Skoru	3,412	1,931	<b>1,755</b>	2,902
10000 x D	En iyi (₺)	1033,42	1035,78	<b>1033,21</b>	<b>1033,21</b>
	Ortalama (₺)	1054,50	1039,11	<b>1037,88</b>	1044,98
	Başarı Oranı (%)	0	0	5,88	3,92
	Friedman Skoru	3,569	2,069	<b>1,716</b>	2,647
	Ortalama Skor	3,314	2,078	<b>1,771</b>	2,837

**Tablo 7. Üç açıklıklı kiriş için bağımsız testlerden elde edilen en iyi ve ortalama çözümler, başarımları ve Friedman skorları**

Durdurma Kriteri		ABC	FDB TLABC	TLABC	TLBO
1000 x D	Min.	3588,28	3602,59	3605,37	3612,18
	Ortalama	3682,70	<b>3677,62</b>	3682,60	3735,22
	Başarı Oranı (%)	0	0	0	0
	Friedman Skoru	2,216	<b>2,098</b>	2,255	3,431
5000 x D	Min.	3501,92	3507,83	3492,34	3523,82
	Ortalama	3585,39	<b>3553,51</b>	3556,05	3612,98
	Başarı Oranı (%)	0	0	0	0
	Friedman Skoru	2,863	<b>1,726</b>	1,941	3,471
10000 x D	Min.	3526,32	<b>3451,21</b>	<b>3451,21</b>	3467,99
	Ortalama	3579,20	<b>3499,18</b>	3507,27	3554,89
	Başarı Oranı (%)	0	<b>1,96</b>	<b>1,96</b>	0
	Friedman Skoru	3,569	<b>1,608</b>	1,902	2,922
Ortalama Skor		2,882	<b>1,810</b>	2,033	3,275

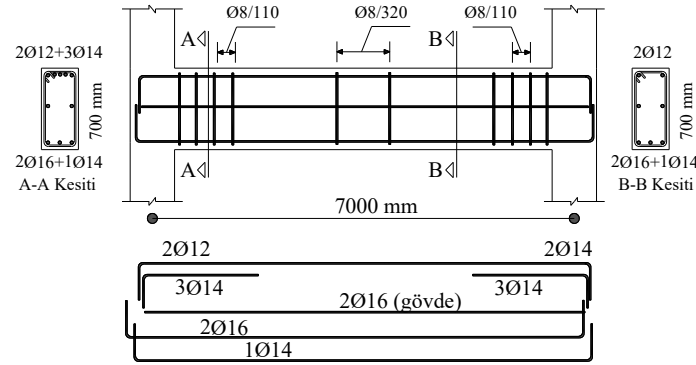
Tablo 7 incelendiğinde, üç açıklıklı kiriş tasarımı için en iyi çözüm olan 3451,21 ₺ maliyete sahip tasarıma maksimum AFDS'nin 1000xD ve 5000xD olduğu durumlarda hiçbir algoritmayla ulaşılamadığı görülmektedir. Maksimum AFDS'nin 1000xD olduğu durumda en düşük maliyetli çözüme ABC algoritmasıyla ulaşıldığı, en küçük ortalamaya sahip algoritmanın ise FDB-TLABC olduğu belirlenmiştir. Friedman testi sonuçlarına göre de FDB-TLABC algoritmasının birinci olduğu, bu algoritmayı sırasıyla; ABC, TLABC ve TLBO algoritmalarının izlediği görülmektedir. Maksimum AFDS'nin 5000xD olduğu durumda TLABC algoritmasının en düşük maliyetli çözüme ulaştığı, en düşük ortalamaya sahip algoritmanın ise FDB-TLABC olduğu görülmektedir. Friedman testi sonuçlarına göre de yine FDB-TLABC algoritmanın birinci olduğu, bu algoritmayı sırasıyla, TLABC, ABC ve TLBO algoritmalarının izlediği anlaşılmaktadır. Maksimum AFDS'nin 10000xD olduğu durumda FDB-TLABC ve TLABC algoritmalarının en iyi çözüme ulaşabildikleri, en düşük ortalamaya sahip algoritmanın ise FDB-TLABC olduğu görülmektedir. Friedman testi sonuçlarına göre de yine FDB-TLABC algoritmasının birinci olduğu, bu algoritmayı sırasıyla, TLABC, TLBO ve ABC algoritmalarının izlediği anlaşılmaktadır.

Tüm bu incelemeler ışığında, özetle; ABC algoritmasının düşük amaç fonksiyonu değerlendirme sayılarında (AFDS) daha iyi sonuç verdiği, algoritmaların arama için daha fazla imkan tanındığında (AFDS'nin 5000xD ya da 10000xD olduğu durumlarda) ABC algoritmasının sıralamada geriye düştüğü anlaşılmaktadır. Bu durumda ABC algoritmasının erken aşamada keşfettiği çözümleri geliştirmede diğer algoritmalar kadar başarılı olamadığı, diğer bir ifadeyle algoritmanın sömürü özelliğinin diğerlerine göre daha az etkin olduğu kanısına varılabilmektedir.

Tablo 5-7'nin son satırındaki ortalama Friedman skorları incelendiğinde, bir ve iki açıklıklı kiriş için yapılan çözümlerde TLABC algoritmasının, üç açıklıklı kiriş için yapılan çözümlerde ise FDB-TLABC algoritmasının başarımlarının en yüksek algoritma olduğu sonucuna varılmaktadır. Bu durum tasarım değişkeni sayısına bağlı olarak yorumlanırsa, tasarım değişkeni sayısının artması, diğer bir deyişle arama uzayının büyümesiyle FDB yönteminin algoritmanın başarımlarını daha etkin bir şekilde artırdığı kanısına varılmaktadır. Metasezgisel algoritmalar arama süreçlerinde kendilerine özgü operatörlerle keşif ve sömürü gereksinimlerini karşılayarak optimal çözüme ulaşmaya çalışmaktadırlar. Algoritmalar sömürü gereksinimini rehber çözümlere yakın arama yapan diğer bir deyişle komşuluk araması yapan operatörlerle sağlarlar. Keşif gereksinimi ise özellikle arama uzayında uygun bölgenin belirsizliklerinin daha fazla olduğu büyük boyutlu problemlerde önem kazanmaktadır. Zira algoritma, keşif özelliği ile çeşitlilik sağlamakta, arama sürecinin tamamen durduğu durumlarda popülasyonu yerel çözüm

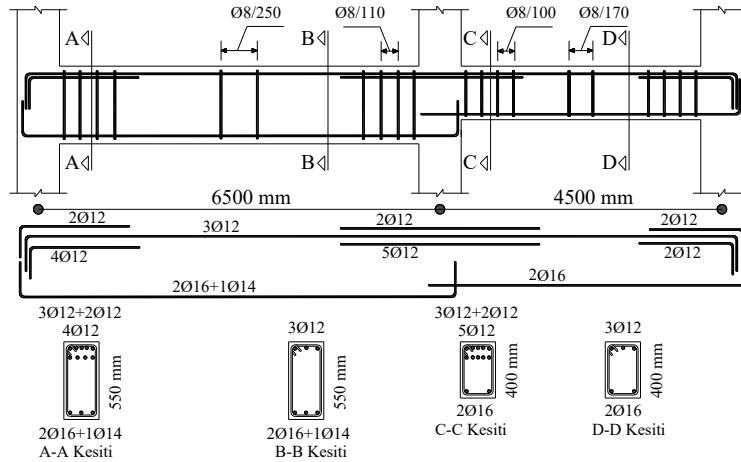
tuzaklarınsan kurtarmaktadır. Çeşitliliği sağlayan mutasyon benzeri algoritma operatörlerinin etkin ve yerinde kullanılmaması durumunda, özellikle arama uzayında belirsizliklerin çok olduğu daha büyük boyutlu problemlerde, algoritmalar yerel optimum tuzaklarına yakalanıp erken yakınsama yapmaktadır. Algoritmaların rehber belirleme sürecinde FDB yönetim kullanılarak yapılan seçimle, algoritmaların sömürü ve keşif özelliklerini dengeleyerek yerel minimum tuzaklarından kurtulmasına olanak sağlanmaktadır.

Elde edilen en iyi (minimum maliyetli) tasarımların detayları Şekil 7-9’de ve bu şekillerde görülemeyen diğer bilgiler ise Tablo 8’de verilmektedir.



**Şekil 7:**

*Bir açıklıklı kiriş probleminde elde edilen en iyi tasarım detayı*

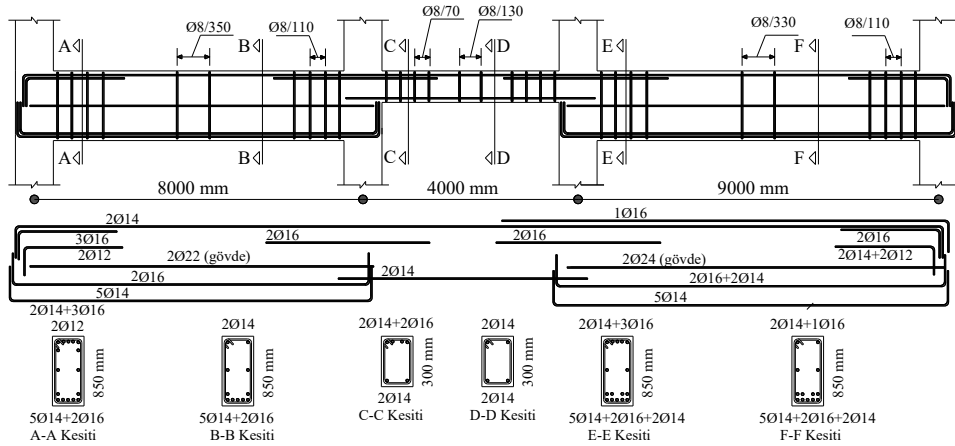


**Şekil 8:**

*İki açıklıklı kiriş probleminde elde edilen en iyi tasarım detayı*

### 3.4. Kararlılık Analizi

Bu bölümde bir, iki ve üç açıklıklı sürekli kiriş problemlerinde kullanılan algoritmaların belirlenen makul bir çözüme ulaşmada değerlendirdikleri ortalama amaç fonksiyonu değerlendirme sayıları ile ortalama hesaplama süreleri belirlenerek, söz konusu algoritmaların kararlılıkları (Gürgen ve diğ., 2022), diğer bir deyişle arama başarımları belirlenmiştir. Bunun için kararlılık analizinde her bir problem için kullanılacak makul çözümlerin belirlenmesi gerekmektedir. Makul çözümler kullanılan algoritmalarından Tablo 5’de sunulan bağımsız testlerin ortalama maliyet değerlerinin ortalamasıyla hesaplanmıştır.



**Şekil 9:**

*Üç açıklıklı kiriş probleminde elde edilen en iyi tasarım detayı*

**Tablo 8. En iyi tasarım detaylarına ilişkin veriler, malzeme miktarları ve maliyetleri**

Değişken Tanımı	Bir Açıklıklı	İki Açıklıklı	Üç Açıklıklı
1. Kirişin yüksekliği	700 mm	550 mm	850 mm
2. Kirişin yüksekliği	-	400 mm	300 mm
3. Kirişin yüksekliği	-	-	850 mm
Beton Sınıfı	C25	C25	C30
Donatı Sınıfı	B500C	B500C	B500C
Kullanılan toplam donatı ağırlığı	113,71 kg	151,73 kg	539,30 kg
Kullanılan beton hacmi	1,27 m <sup>3</sup>	1,42 m <sup>3</sup>	4,02 m <sup>3</sup>
Donatı maliyeti	505,34 ₺	674,33 ₺	2396,77 ₺
Beton maliyeti	321,79 ₺	358,89 ₺	1054,44 ₺
Toplam maliyet	827,14 ₺	1033,21 ₺	3451,21 ₺

Bu tanımla makul çözüm:

$$\text{makul çözüm} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left( \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R f_i \right) \quad (29)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Burada  $f_i$  i. bağımsız test için elde edilen minimum maliyet (uygunluk değeri),  $R$  toplam bağımsız test sayısı ve  $N$  ise makul çözümün hesaplanmasında dikkate alınan algoritma sayısıdır (Bu çalışmada  $R=51$ ,  $N=4$ 'dür). Bir, iki ve üç açıklıklı sürekli kiriş problemleri için elde edilen makul çözümler Tablo 9'da verilmektedir.

**Tablo 9. Bir, iki ve üç açıklıklı sürekli kiriş problemleri için elde edilen makul çözümler**

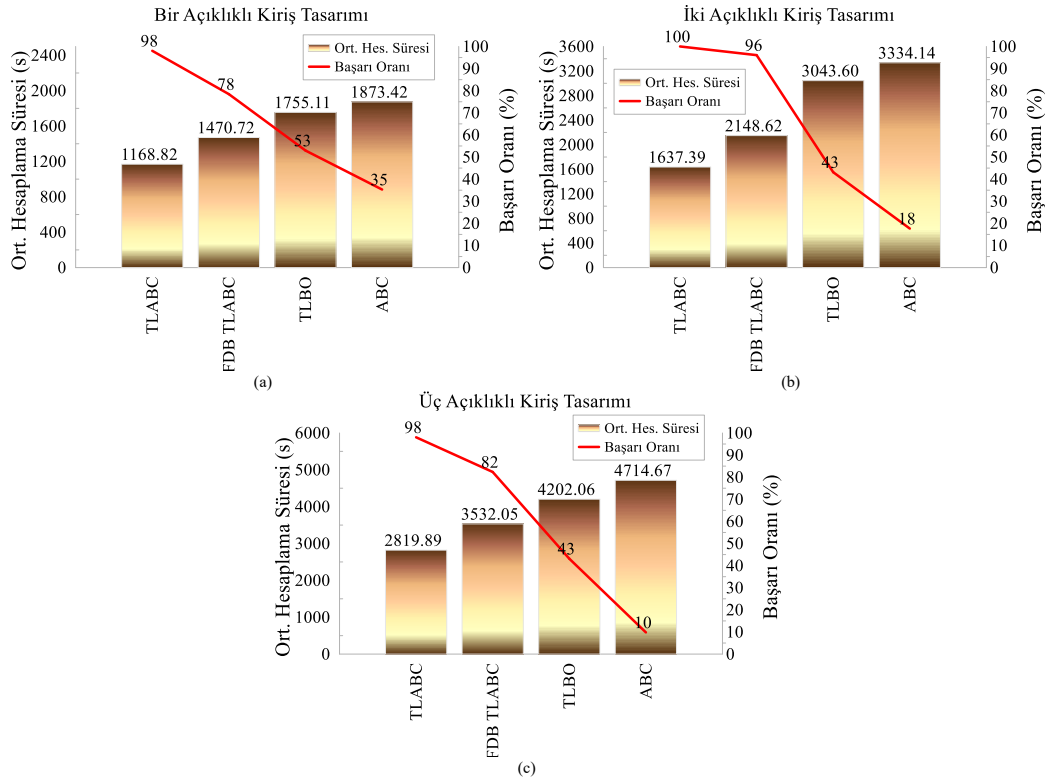
Problem	Bir Açıklıklı Kiriş Problemi	İki Açıklıklı Kiriş Problemi	Üç Açıklıklı Kiriş Problemi
Makul Çözüm	828,255	1044,118	3535,137

Kararlılık analizinde de her bir algoritma için 51 bağımsız test yapılmıştır. Kararlılık analizinde sonlandırma ölçütü yukarıdaki Tablo 7'de verilen makul çözümlere ulaşmaktır. Bununla birlikte makul çözüme ulaşamayan algoritmaların sonsuz döngüye girmemesi için amaç fonksiyonu değerlendirme sayıları 10000xd olarak sınırlandırılmıştır. Bu değerlendirme



sayısı sonunda makul çözüme ulaşamayan çalıştırmalar başarısız sayılmıştır. Başarılı testlerin, bağımsız test sayısına oranıyla algoritmaların kararlılıkları (başarı oranları) elde edilmiştir. Diğer taraftan algoritmaların bağımsız testlerde kararlılık analizi sürecini tamamlamak için harcadıkları sürelerin ortalaması hesaplanarak ortalama hesaplama süreleri belirlenmiştir. Böylece algoritmaların hesaplama karmaşıklıkları karşılaştırılabilmektedir. Bir, iki ve üç açıklıklı sürekli giriş problemleri için yapılan kararlılık analizinde elde edilen başarı oranları ve ortalama hesaplama süreleri sırasıyla Şekil 10a, Şekil 10b ve Şekil 10c'de verilmektedir.

Bu şekillerden bir, iki ve üç açıklıklı giriş problemlerinde belirlenen makul çözüme başarıyla ulaşma oranları incelendiğinde, TLABC algoritmasının en yüksek başarıya sahip olduğu görülmektedir. Belirlenen makul çözümlere ulaşma sürelerinin ortalamaları incelendiğinde de en hızlı makul çözüme ulaşan algoritmanın TLABC algoritması olduğu görülmektedir. Elde edilen bu bulgular FDB yönteminin TLABC algoritması üzerinde belirlenen makul çözüme ulaşma hızı ve başarımı bakımından etkili olmadığı, ABC ve TLBO algoritmalarının melezlenmesiyle geliştirilmiş olan TLABC algoritmasının ise ABC ve TLBO algoritmalarından çok daha etkin ve hızlı olduğu anlaşılmaktadır. Burada elde edilen sonuçların incelenen problem için geçerli olduğunu belirtmekte fayda bulunmaktadır.



**Şekil 10.**

Bir (a), iki (b) ve üç (c) açıklıklı sürekli giriş problemleri için yapılan kararlılık analizinden elde edilen kararlılıkları (başarı oranları) ve ortalama hesaplama süreleri

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada bir, iki ve üç açıklıklı betonarme sürekli kirişlerin optimum tasarımlarının minimum maliyetle yapılabileceği bir süreç planlanmış ve sürece ilişkin yazılım geliştirilmiştir. Bu problemin oluşturulmasında TS500 ve TBDY-2018 yönetmelikleri kullanılarak araştırmanın Türk standart ve yönetmeliklerine uygun olarak yapılması hedeflenmiştir. Çalışmada Yapay Arı Koloni (ABC) ve Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) algoritmaları ile bunların melezlenmesiyle türetilmiş Öğretme-Öğrenme Tabanlı Yapay Arı Koloni (TLABC) algoritması ve uzaklık uygunluk dengesi (FDB) yöntemi uygulanmış TLABC algoritmasının (FDB-TLABC) başarımları ve etkinlikleri söz konusu optimizasyon problemi üzerinde belirlenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında; bir, iki ve üç açıklıklı sürekli kiriş örnekleriyle oluşturulan problem takımı üzerinde, amaç fonksiyonu değerlendirme sayılarının (maksAFDS) çeşitli değerleri (1000xD, 5000xD ve 10000xD) için bağımsız testlerden elde edilen istatistiksel bulgular incelenerek algoritmaların başarımları incelenmiş ve elde edilen en iyi çözümlerin detayları verilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında elde edilen başlıca iki sonuç aşağıda verilmektedir.

- ABC algoritmasının düşük amaç fonksiyonu değerlendirme sayılarında (AFDS) daha iyi sonuç verdiği, algoritmalara arama için daha fazla imkan tanındığında (AFDS'nin 5000xD ya da 10000xD olduğu durumlarda) ABC algoritmasının sıralamada geriye düştüğü anlaşılmaktadır. Bu durumda ABC algoritmasının erken aşamada keşfettiği çözümleri geliştirmede diğer algoritmalar kadar başarılı olmadığı, diğer bir ifadeyle algoritmanın sömürü özeliğinin diğerlerine göre daha az etkin olduğu kanısına varılabilmektedir.

- Tüm farklı AFDS çalışmalarının ortalama Friedman skorları ve buna göre yapılan sıralamalar incelendiğinde, bir ve iki açıklıklı kiriş için yapılan çözümlerde TLABC algoritmasının, üç açıklıklı kiriş için yapılan çözümlerde ise FDB-TLABC algoritmasının başarımlarının en yüksek algoritma olduğu görülmüştür. Bu durum tasarım değişkeni sayısına bağlı olarak yorumlanırsa, tasarım değişkeni sayısının artması, diğer bir deyişle arama uzayının büyümesiyle FDB yönteminin algoritmanın başarımlarını daha etkin bir şekilde artırdığı kanısına varılmaktadır.

İkinci aşamada ise algoritmaların belirlenen bir makul çözüme ulaşma süreleri ve başarımlarının test edildiği kararlılık analizi gerçekleştirilmiştir: Buna göre:

- Tüm problemler için TLABC algoritmasının en yüksek kararlılığa sahip olduğu görülmektedir. Belirlenen makul çözümlere ulaşma sürelerinin ortalamaları incelendiğinde de en hızlı makul çözüme ulaşan algoritmanın da TLABC algoritması olduğu görülmektedir. Bu durum uzaklık uygunluk dengesi (FDB) yönteminin TLABC algoritması üzerinde belirlenen makul çözüme ulaşma hızı ve kararlılığı bakımından TLABC üzerinde bir performans artışı sağlamadığı, ABC ve TLBO algoritmalarının melezlenmesiyle geliştirilmiş olan TLABC algoritmasının ise ABC ve TLBO algoritmalarından çok daha kararlı ve hızlı olduğu anlaşılmaktadır.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

#### YAZAR KATKISI

Hasan Tahsin Öztürk çalışmanın inceleme, yazılım geliştirme, doğrulama, kavramsallaştırma ve metodoloji aşamalarında, Sebahat Temiz ise orijinal taslak hazırlanmasında, yazının inceleme ve düzenlenmesinde, görselleştirme aşamalarında katkı sunmuştur.

## KAYNAKLAR

1. Ajayan S. ve Immanuel Selvakumar A. (2022) Metaheuristic optimization techniques to design solar-fuel cell-battery energy system for locomotives, *Int J Hydrogen Energy*, 47, 1845–62. doi:10.1016/j.ijhydene.2021.10.130
2. Ali E.S., Elazim S.M.A, ve Balobaid A.S. (2023) Implementation of coyote optimization algorithm for solving unit commitment problem in power systems, *Energy*, 263, 125697. doi: 10.1016/j.energy.2022.125697
3. Chen X., Xu B., Mei C., Ding Y. ve Li K. (2018) Teaching–learning–based artificial bee colony for solar photovoltaic parameter estimation, *Applied Energy*, 212, 1578-1588. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.12.115
4. Chutani S. ve Singh J. (2017) Design optimization of reinforced concrete beams, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 98, 429–35. doi:10.1007/s40030-017-0232-0
5. Duan H., Yin X., Kou H., Wang J., Zeng K., Ma F. (2023) Regression prediction of hydrogen enriched compressed natural gas (HCNG) engine performance based on improved particle swarm optimization back propagation neural network method (IMPSON-BPNN), *Fuel*, 331, 125872. doi: 10.1016/j.fuel.2022.125872
6. Duman S., Kahraman H.T., Sonmez Y., Guvenc U., Kati M. ve Aras S. (2022) A powerful meta-heuristic search algorithm for solving global optimization and real-world solar photovoltaic parameter estimation problems. *Eng Appl Artif Intell*, 111, 104763. doi: 10.1016/j.engappai.2022.104763
7. Ferreira C.C., Barros M.H.F.M. ve Barros A.F.M. (2003) Optimal design of reinforced concrete t-sections in bending. *Eng Struct*, 25, 951–64. doi: 10.1016/S0141-0296(03)00039-7
8. Friedman M. (1940) A comparison of alternative tests of significance for the problem of m rankings. *Annals of Mathematical Statistics*, 11, 86–92.
9. Govindaraj V. ve Ramasamy J.V. (2005) Optimum detailed design of reinforced concrete continuous beams using genetic algorithms. *Comput Struct*, 84, 34–48. doi: 10.1016/j.compstruc.2005.09.001
10. Gürgen S., Kahraman H.T., Aras S. ve Altın İ. (2022) A comprehensive performance analysis of meta-heuristic optimization techniques for effective organic rankine cycle design. *Appl Therm Eng*, 213, 118687. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118687
11. Jahjouh M.M., Arafa M.H. ve Alqedra M.A. (2013) Artificial bee colony (ABC) algorithm in the design optimization of rc continuous beams. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 47, 963–79. doi: 10.1007/s00158-013-0884-y
12. Kahraman H.T., Aras S. ve Gedikli E. (2019) Fitness-distance balance (FDB): a new selection method for meta-heuristic search algorithms. *Knowl Based Syst*, 105169. doi: 10.1016/j.knosys.2019.105169
13. Karaboga D. ve Akay B. (2009) A comparative study of artificial bee colony algorithm. *Appl Math Comput*, 214, 108–32. doi: 10.1016/j.amc.2009.03.090
14. Koumousis V.K. ve Arsenis S.J. (1998) Genetic algorithms in optimal detailed design of reinforced concrete members. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 13, 43–52. doi: 10.1111/0885-9507.00084
15. Mardani-Aghabaglou, A., Öztürk, H. T., Kankal, M. ve Ramyar, K. (2021). Assessment and prediction of cement paste flow behavior; Marsh-funnel flow time and mini-slump

- values. *Construction and Building Materials*, 301, 124072. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124072
16. Öztürk H.T., Durmuş A. ve Durmuş A. (2012) Optimum Design of a Reinforced Concrete Beam Using Artificial Bee Colony Algorithm. *Computers and Concrete*, 10, 295–306. doi: 10.12989/cac.2012.10.3.295
  17. Öztürk N., Şentürk H.B., Gündoğdu A. ve Duran C. (2018) Modelling of Co(II) Adsorption by Artificial Bee Colony and Genetic Algorithm. *Membrane Water Treatment*, 9, 363–71. doi: 10.12989/mwt.2018.9.5.363
  18. Raheem F.S. ve Basil N. (2023) Automation Intelligence Photovoltaic System for Power and Voltage Issues based on Black Hole Optimization Algorithm with FOPID. *Measurement: Sensors*, 25, 100640. doi: 10.1016/j.measen.2022.100640
  19. Rahimi Z. ve Maghrebi M. (2023) Minimizing rebar cost using design and construction integration. *Autom Constr*, 147, 104701. doi: 10.1016/j.autcon.2022.104701
  20. Rao R.V., Savsani V.J. ve Balic J. (2012) Teaching-learning-based optimization algorithm for unconstrained and constrained real-parameter optimization problems. *Engineering Optimization*, 44, 1447–62. doi: 10.1080/0305215X.2011.652103
  21. Riaz M., Bashir M. ve Younas I. (2022) Metaheuristics based covid-19 detection using medical images: a review, *Comput Biol Med*, 144, 105344. doi: 10.1016/j.compbiomed.2022.105344
  22. Sahebi M. ve Dehestani M. (2023) Sustainability assessment of reinforced concrete beams under corrosion in life-span utilizing design optimization. *Journal of Building Engineering*, 65, 105737. doi: 10.1016/j.jobe.2022.105737
  23. Shaqfa M. ve Orbán Z. (2019) Modified parameter-setting-free harmony search (PSFHS) algorithm for optimizing the design of reinforced concrete beams. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 60, 999–1019. doi: 10.1007/s00158-019-02252-4
  24. Shariat M., Shariati M., Madadi A. ve Wakil K. (2018) Computational lagrangian multiplier method by using for optimization and sensitivity analysis of rectangular reinforced concrete beams. *Steel and Composite Structures*, 29, 243–56. doi: 10.12989/scs.2018.29.2.243
  25. TBDY (2018) *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
  26. TS 500 (2000) *Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
  27. Xia X., Ning D., Liu P., Du H. ve Zhang N. (2023) Electrical network optimization for electrically interconnected suspension system. *Mech Syst Signal Process*, 187, 109902. doi: 10.1016/j.ymsp.2022.109902