

Betonarme kirişlerin optimum tasarımında maliyet-süneklik ilişkisinin metasezgisel algoritmalarla incelenmesi

Investigation of the cost-ductility relationship in the optimum design of reinforced concrete beams with metaheuristic algorithms

Hasan Tahsin ÖZTÜRK*¹ , Muhammed HAMMUDİ¹ 

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61830, Trabzon

• Geliş tarihi / Received: 04.10.2025

• Kabul tarihi / Accepted: 04.03.2026

Öz

Bu çalışmada, tek ve çift donatılı betonarme dikdörtgen kiriş kesitlerinin minimum maliyetli optimum tasarımları hedeflenmiş ve bu tasarımların süneklik düzeyleri incelenmiştir. Bu amaçla, tasarım eğilme momenti, kiriş genişliği ve beton sınıfı gibi parametreleri içeren 36 problemden oluşan üç farklı problem seti oluşturulmuştur. TS500 ve TBDY 2018 yönetmeliklerine uygun olarak tanımlanan kısıtlar altında maliyetin minimizasyonunu hedefleyen optimizasyon süreci, metasezgisel Rao-1, Rao-2 ve Rao-3 algoritmaları ile yürütülmüştür. Optimum kesitlerin süneklikleri ise eğrilik süneklik katsayısı kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, tasarım parametrelerinin süneklik ve maliyet üzerindeki etkilerini nicel olarak ortaya koymuştur. Elde edilen bulgulara göre, tasarım eğilme momentindeki artış sünekliği olumsuz etkilerken, basınç donatısı oranının %20'den %100'e çıkarılması bu etkiyi dengeleyerek süneklik katsayısında ortalama %81 oranında bir iyileşme sağlamıştır. Benzer şekilde, beton dayanım sınıfının C30/37'den C50/60'a yükseltilmesi, maliyeti yalnızca ortalama %3 oranında artırmasına karşın, kesit sünekliğinde ortalama %58 seviyesinde belirgin bir artışa neden olmuştur. Ayrıca, kiriş genişliğinin 300 mm'den 500 mm'ye çıkarılması, sünekliği yaklaşık %57 oranında artırarak, süneklikte etkili bir parametre olarak karşımıza çıkmıştır. İstatistiksel analizler sonucunda, Rao-1 algoritmasının diğer varyasyonlara (Rao-2 ve Rao-3) kıyasla daha kararlı ve minimum maliyetli çözümlere ulaştığı tespit edilmiştir. Bu çalışma, Rao algoritmalarını bu alanda ilk kez uygulaması ve optimum tasarımların sünekliklerini sistematik olarak analiz etmesiyle literatüre özgün bir katkı sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Betonarme kirişler, Maliyet Minimizasyonu, Optimizasyon, Rao Algoritmaları, Süneklik

Abstract

In this study, the minimum-cost optimum designs of singly and doubly reinforced concrete rectangular beam sections were targeted, and the ductility levels of these designs were investigated. For this purpose, three different problem sets consisting of 36 problems were created, considering various parameters such as design bending moment, beam width, and concrete class. The optimization process, which aimed at cost minimization under the constraints defined according to TS500 and TBDY 2018 regulations, was conducted using the metaheuristic Rao-1, Rao-2, and Rao-3 algorithms. The ductility of the obtained optimum sections was evaluated using the curvature ductility factor. The results quantitatively demonstrate the effects of design parameters on ductility and cost. According to the findings, while an increase in the design bending moment negatively affects ductility, increasing the compression reinforcement ratio from 20% to 100% compensates for this adverse effect, providing an average improvement of 81% in the ductility coefficient. Similarly, upgrading the concrete strength class from C30/37 to C50/60 resulted in a significant increase of approximately 58% in section ductility, while increasing the cost by only 3% on average. Furthermore, increasing the beam width from 300 mm to 500 mm increased ductility by approximately 57%, highlighting it as an influential parameter on ductility. Statistical analyses determined that the Rao-1 algorithm achieves more stable and lower-cost solutions compared to its other variations (Rao-2 and Rao-3). This study makes an original contribution to the literature by being the first to apply Rao algorithms to this problem and by systematically analyzing the ductility of optimum designs.

Keywords: Reinforced concrete beams, Cost Minimization, Optimization, Rao Algorithms, Ductility

*Hasan Tahsin ÖZTÜRK; htozturk@ktu.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Çerçeve sistemli yapıların önemli yatay taşıyıcıları olan kirişlerin minimum maliyetle optimum tasarımları, yapı tasarımlarının ekonomik ve sürdürülebilir bir şekilde gerçekleştirilmeleri bakımından büyük önem taşımaktadır. Bilgisayarların gelişmesiyle sezgisel algoritmalar yapısal problemlerin çözümünde sıklıkla kullanılan bir araç haline gelmiştir. Böylece her geçen gün, deneme yanılma yöntemiyle gerçekleştirilen geleneksel tasarımların yerini optimum tasarım süreçleri almaktadır (Öztürk vd., 2023; Dolapçı vd., 2024). Betonarme sistemlerin optimum tasarımlarında, kaynakların kısıtlı olması nedeniyle, dayanım ve dayanıklılıktan ödün vermeden maliyetin en aza indirilmesi arzulanan önemli bir hedef olmuştur. Bununla birlikte bu elemanların sünekliği yapısal bütünlük ve yüklerin yeniden dağılımı bakımından oldukça önemlidir. Bununla birlikte optimum tasarımlar metasezgisel arama algoritmalarından olan Rao-1, 2 ve 3 ile yürütülmüş ve incelenen problem için gerçekleştirilen algoritma performans testleriyle bunlardan en yüksek başarıma sahip olanı önerilmiştir.

Bu çalışmanın konusu olan betonarme kirişlerin optimizasyonu alanındaki literatürdeki ulaşılabilen çalışmalar incelendiğinde yayınların; tek ve/veya çift donatılı dikdörtgen (Chakrabarty, 1992; Coello vd., 1997; Barros vd., 2012; Öztürk vd., 2012; Chutani & Singh, 2017; Shariat vd., 2018) ve/veya tablalı kiriş kesitlerinin (Dole vd., 2000; Ferreira vd., 2003; Kayabekir vd., 2021) ve farklı açıklık sayılarına sahip sürekli kirişlerin (Koumousis & Arsenis, 1998; Lepš & Šejnoha, 2003; Govindaraj & Ramasamy, 2005; Jahjouh vd., 2013; Nigdeli & Bekdaş, 2017; Shaqfa & Orbán, 2019; Pierott vd., 2021; Zhang & Wang, 2023; Öztürk, 2024) optimizasyonunu konu edindiği görülmektedir. İncelenen çalışmaların çoğunda amaç fonksiyonu olarak kesit ya da kirişin maliyet fonksiyonu kullanıldığı anlaşılmaktadır. Bunun dışında bazı çalışmalarda ağırlığın minimizasyonu (Koumousis & Arsenis, 1998), kesitin taşıyabileceği eğilme momentinin maksimizasyonu (Ferreira vd., 2003), CO₂ salınımının (Kayabekir vd., 2021; Zhang & Wang, 2023) minimizasyonu hedeflenmiştir. Kiriş optimizasyon çalışmalarında kullanılan algoritmalar incelendiğinde; Geometrik programlama (Chakrabarty, 1992), Polinomal Optimizasyon (Dole vd., 2000), Kuhn-Tucker Yöntemi (Barros vd., 2012), Lagrange Çarpanı Yöntemi (Shariat vd., 2018), Rastgele Arama Tekniği (Nigdeli ve Bekdaş, 2017), Genetik Algoritma (GA) (Coello vd., 1997; Koumousis & Arsenis, 1998; Lepš & Šejnoha, 2003; Govindaraj & Ramasamy, 2005; Zhu vd., 2020; Pierott vd., 2021; Zhang & Wang, 2023), Yapay Arı Koloni Algoritması (ABC) (Jahjouh vd., 2013; Öztürk vd., 2012), Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması (PSO) (Chutani & Singh, 2017), Parametresiz Modifiye Armoni Arama Algoritması (mPSFHS) (Shaqfa & Orbán, 2019), Simulating Annealing Algoritması (SA) (Lepš & Šejnoha, 2003) ve Çiçek Tozlaşma Algoritmasının (Kayabekir vd., 2021) (FPA) kullanıldığı görülmektedir. Çalışmaların çoğunda farklı algoritmalarla karşılaştırma yapılmadığı için bir algoritma önerisi bulunmadığı görülmektedir. İncelenen karşılaştırmalı çalışmalarda kirişlerin optimum tasarımı için iki makalede ABC (Jahjouh vd., 2013; Öztürk vd., 2012), iki makalede GA (Coello vd., 1997; Pierott vd., 2021) ve bir makalede SA (Lepš & Šejnoha, 2003) algoritmasının önerildiği görülmektedir.

İncelenen çalışmaların hâkim çoğunluğunda durdurma ölçütü olarak maksimum iterasyon sayısının kullanıldığı görülmektedir. Önerilen çözümlerin kalitesi, optimizasyon sürecinin sonlandırılmasında kullanılan kritere bağlı olarak tamamen değişebilmektedir. Üstelik, her algoritmanın arama süreci yaşam döngüsü birbirinden farklıdır. Sonlandırma kriteri olarak iterasyon sayısının kullanılması durumunda algoritmaların amaç fonksiyon değerlendirme sayıları da birbirinden farklı olabilmektedir. Bu durum optimizasyon sürecinde adillığe aykırılık yaratmaktadır. Sonlandırma kriteri hakkındaki tüm bu açıklamalar dikkate alındığında, incelenen çalışmaların deneysel sonuçlarını birbirleriyle kıyaslayabilmek ya da bu sonuçları objektif bir şekilde yorumlayabilmek mümkün değildir. Bu nedenle söz konusu çalışmalarda yeniden kullanılabilirlik ve yaygın etki düşüktür. Bununla birlikte literatürdeki çalışmalarda elde edilen optimum çözümlerin sünekliklerinin karşılaştırıldığı bir çalışmaya da rastlanmamıştır. Bu çalışmanın özgün değeri, Rao algoritmalarının literatürde ilk kez betonarme kiriş kesitlerinin optimizasyonuna uyarlanması ve Rao-1, Rao-2 ve Rao-3 varyasyonlarının performanslarının 36 farklı tasarım senaryosu üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesidir. Buna ek olarak, optimum kesitlerin süneklik davranışının tasarım parametrelerine göre değişimi incelenerek, optimizasyon literatüründeki önemli bir boşluk doldurulmuştur.

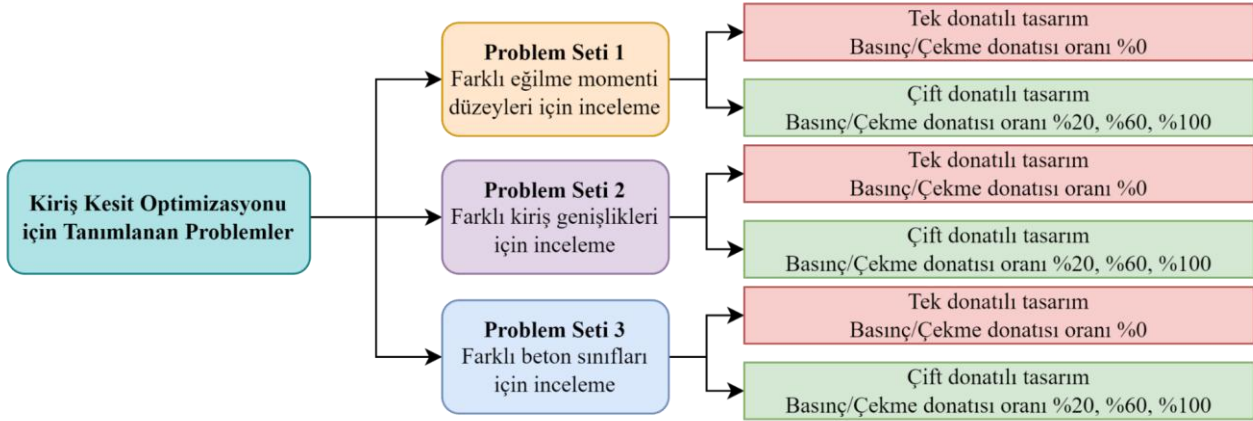
Bu çalışmanın amacı dikdörtgen kiriş kesitlerinin minimum maliyetli optimum tasarımlarına sırasıyla, çekme/basınç donatısı oranının, tasarım eğilme momentinin, kiriş genişliğinin ve beton sınıfının etkisini araştırmak, incelenen parametrelere göre optimum kesit sünekliklerinin değişimini incelemektir. Bu amaçla

gerçekleştirilen çalışma dört bölüme ayrılmıştır. Giriş bölümünü takip eden ikinci bölümde oluşturulan kiriş kesiti optimizasyon problemleri ve oluşturulan kıyaslama problemleri setleri tanıtılmaktadır. Gerçekleştirilen deneysel çalışma bulgularıyla tartışmalar üçüncü bölümde, sonuçlar ise dördüncü bölümde sunulmuştur.

2. Yöntem

2. Method

Yukarıdaki araştırma sorularına cevap aramak için, öncelikle dikdörtgen kesitler üzerinde optimum tasarımların gerçekleştirileceği optimizasyon problemleri hazırlanmıştır. Bu amaçla, aşağıdaki Şekil 1’de özetlenen üç farklı problem seti oluşturulmuştur.



Şekil 1. Çalışmada incelenen problem setlerinin şematik özeti

Figure 1. Schematic summary of the problem sets analyzed in the study

2.1. Optimizasyon probleminin tanımı

2.1. Definition of optimization problem

Oluşturulan problemlerin amaç fonksiyonu, kiriş kesitinin maliyet fonksiyonunu içermekte ve Eşitlik 1 ile ifade edilmektedir. Burada C_c beton birim maliyeti, C_s çelik birim maliyeti, V_c kiriş birim uzunluğunda kullanılan beton hacmi ve W_s kiriş birim uzunluğunda kullanılan toplam çelik ağırlığıdır.

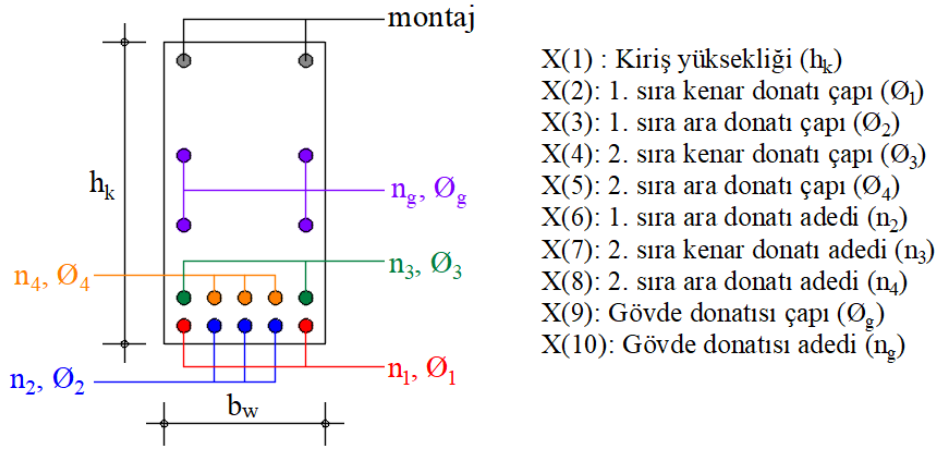
$$\text{minimize } f(x) = V_c C_c + W_s C_s \quad (1)$$

Tanımlanan problem kısıtlarına ilişkin ihlalleri, amaç fonksiyonuna işlemek için ceza katsayısı yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan kısıtlar ile yönetmelik koşullarının ve tasarım kriterlerinin optimum tasarımda dikkate alınmasını sağlanmıştır. Bu çalışmada ceza katsayısı (p_c) 10^8 olarak alınmış, böylece cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmıştır.

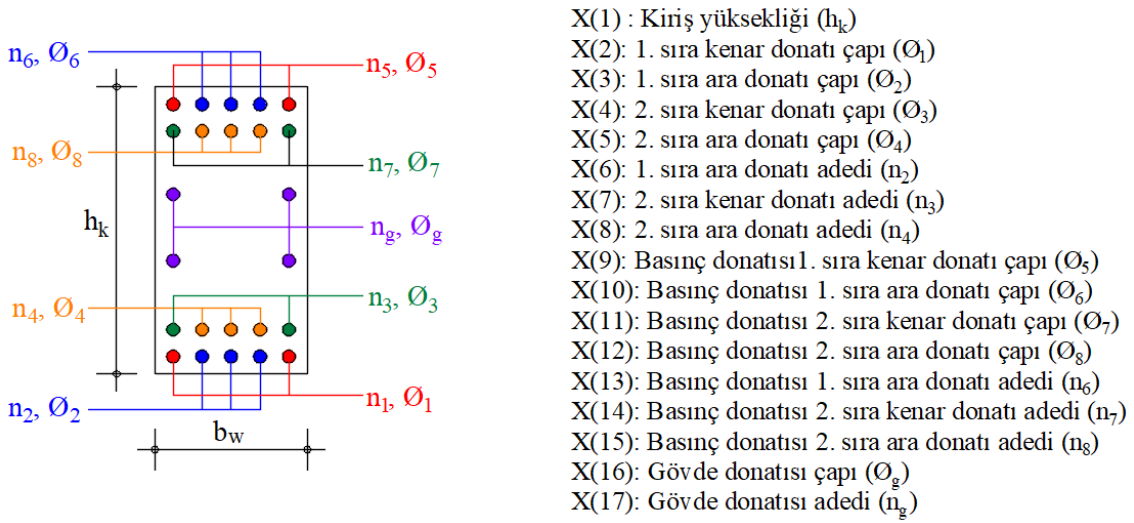
$$\text{minimize } P(x) = f(x) + p_c \sum \text{ihlal} \quad (2)$$

Problemlerin tasarım değişkenleri, kesitteki donatı çap ve adedi ile kiriş yüksekliklerinden oluşmaktadır. Çalışmada tek ve çift donatılı dikdörtgen kesitler için iki farklı optimizasyon problemi üretilmiştir. Tasarım değişkenlerinin sayısı problem türüne göre değişmektedir. Tek donatılı problemlerinde 10 tasarım değişkeni, çift donatılı problemlerinde 17 tasarım değişkeni bulunmaktadır. Tasarım değişkenlerinin şekil üzerinde gösterimi aşağıdaki Şekil 2-3’te gösterilmektedir.

Optimizasyon sürecinde minimum maliyetli tasarım aranırken, tasarımların dayanım ve dayanıklılık bakımından gerekli sınır durumları ve yönetmelik koşullarını sağlaması için çeşitli kısıtların tanımlanması gerekir. Burada sunulan kısıtlar Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları Standardı ile Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TS500, 2000; TBDY, 2018) koşullarına göre oluşturulmuştur. Kiriş yüksekliği (h_k) kiriş genişliğinin (b_w) üç buçuk katından küçük olması gerekir. Bu koşul Eşitlik 3’te verilen kısıt ile denetlenmektedir.



Şekil 2. Tek donatılı dikdörtgen kesitli kiriş probleminde tasarım değişkenleri
Figure 2. Design variables for single reinforced rectangular beam problem



Şekil 3. Çift donatılı dikdörtgen kesitli kiriş probleminde tasarım değişkenleri
Figure 3. Design variables for double reinforced rectangular beam problem

$$g_1(x) = \frac{h_k}{3,5 \cdot b_w} - 1 \leq 0 \quad (3)$$

Kiriş yüksekliği alt sınırı 300 mm olarak tasarım değişkeni X_1 'in alt sınırıyla dikkate alınmıştır. Dolayısıyla bunun için ayrıca bir kısıt tanımlanmamıştır. Gövde donatısı için TS 500'e göre kiriş yüksekliği 60 cm'yi aştığında 2 adet gövde donatısı kullanılmalıdır. Gövde donatıları arasındaki mesafe 30 cm'yi aştığında ikişer adet gövde donatısı karşılıklı yüzlere eklenmelidir. Ayrıca gövde donatısı alanının (A_{sl}), $0,001 \cdot b_w \cdot d$ ile hesaplanan alandan büyük olması gerekmektedir. Gövde donatıları arasındaki düşey mesafe $a_{göv}$ olmak üzere, gövde donatısı adedi koşulu,

$$g_2(x) = \begin{cases} 0 & \text{Eğer } h_k < 600 \text{ mm} \\ \frac{a_{göv}}{300} - 1 \leq 0 & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (4)$$

kısıtıyla, gövde donatısı alanı koşulu ise,

$$g_3(x) = \begin{cases} 0 & \text{Eğer } h_k < 600 \\ 1 & \text{Eğer } h_k \geq 600 \text{ ve } A_{sl} = 0 \\ \frac{(0,001 \cdot b_w \cdot d)}{A_{sl}} - 1 \leq 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (5)$$

kısıtıyla denetlenmektedir. Kesitlerde bulunması gereken minimum ve maksimum donatı oranları TS500 (2000)'de verilen koşullarla hesaplanmak üzere, bu oranlara göre kesitlerde donatı oranı denetimleri denklem 6 ve 7'de verilen kısıt 4 ve 5 ile yapılmaktadır.

$$g_4(x) = \frac{\rho_{min}}{\rho} - 1 \leq 0 \quad \rightarrow \quad \rho_{min} = 0,80 \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} \quad (6)$$

$$g_5(x) = \frac{\rho}{\rho_{maks}} - 1 \leq 0 \quad \rightarrow \quad \rho_{maks} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,02 \\ 0,85 \rho_b \end{array} \right. \quad (7)$$

Taşıma gücü momentlerinin (M_r), tasarım momentlerinden (M_d) büyük olması koşulu denklem 8'de verilen kısıt 6 ile denetlenmektedir.

$$g_6(x) = \frac{M_d}{M_r} - 1 \leq 0 \quad (8)$$

Betonun kesite yerleştirilebilmesi bakımından, donatı aralıklarının minimum aralık değerinden büyük olması gerektiği bilinmektedir. Bununla birlikte ikinci sırada ilk olarak kenar donatılarının yerleştirilmesi kuralı benimsenecektir. Bu kontroller için çekme donatılarının birinci sırasında, $e_{sıra 1}^{cd}$ çekme donatılarının birinci sırasında hesaplanan donatı aralığı, e_{min} donatılarında minimum donatı aralığı olmak üzere;

$$g_7(x) = \frac{e_{min}}{e_{sıra 1}^{cd}} - 1 \leq 0 \quad (9)$$

kısıtıyla birinci sıradaki donatı aralıklarının denetimi gerçekleştirilmektedir. Donatılar arası minimum mesafe (e_{min}); 25 mm, asal donatı en büyük çapı ve agrega en büyük tane boyutunun dörtte üçü dikkate alınarak, hesaplanan değerlerin en büyüğü olarak belirlenmektedir. Asal çekme donatılarının ikinci sırasında, $e_{sıra 2}^{cd}$ çekme donatılarının ikinci sırasında hesaplanan donatı aralığı olmak üzere,

$$g_8(x) = \begin{cases} 0 & \text{Eğer } n_3 = 0 \text{ ve } n_4 = 0 \text{ ise} \\ 1 & \text{Eğer } n_3 = 0 \text{ ve } n_4 > 0 \text{ ise} \\ \frac{e_{min}}{e_{sıra 2}^{cd}} - 1 \leq 0 & \text{Diğer durumlarda} \end{cases} \quad (10)$$

kısıtıyla ikinci sıradaki donatı aralıklarının denetimi gerçekleştirilmektedir. Bu kısıtla aynı zamanda ikinci sırada kenar donatı yerleştirilmeden ara donatı yerleştirilmesi de önlenmektedir. Eğer kesitte çift donatılı kesit hesabı yapılıyorsa aynı denetimler basınç donatısı için de gerçekleştirilmektedir. Basınç donatılarının birinci sırasında, $e_{sıra 1}^{bd}$ basınç donatılarının birinci sırasında hesaplanan donatı aralığı olmak üzere,

$$g_9(x) = \frac{e_{min}}{e_{sıra 1}^{bd}} - 1 \leq 0 \quad (11)$$

kısıtıyla birinci sıradaki basınç donatı aralıklarının denetimi gerçekleştirilmektedir. Basınç donatılarının ikinci sırasında, $e_{sıra 2}^{bd}$ basınç donatılarının ikinci sırasında hesaplanan donatı aralığı olmak üzere,

$$g_{10}(x) = \begin{cases} 0 & \text{Eğer } n_7 = 0 \text{ ve } n_8 = 0 \text{ ise} \\ 1 & \text{Eğer } n_7 = 0 \text{ ve } n_8 > 0 \text{ ise} \\ \frac{e_{min}}{e_{sıra 2}^{bd}} - 1 \leq 0 & \text{Diğer durumlarda} \end{cases} \quad (12)$$

denetimi yapılarak basınç donatısı için aralık kontrolü ve ikinci sırada kenar donatılar yerleşmeden ara donatı yerleşmesini engelleyen kontrol yapılmaktadır. Birinci sıradaki donatı sayısı, bu sıraya yerleşebilecek en çok sayıda donatıya ulaşmadan ikinci sıraya donatı yerleştirilmemesi kuralı benimsenmiştir. Böylece oluşturulan kesit detaylarında faydalı yükseklikten en üst düzeyde faydalanılması sağlanmaktadır. Bu denetim için;

$$g_{11}(x) = |n_{2max} - n_2| \leq 0 \quad (13)$$

kısıtı kullanılmaktadır. Burada n_{2max} ilk sıradaki çekme donatılarından kesit genişliğine göre yerleşebilen en fazla ara donatı sayısını göstermektedir. Eğer çift donatılı kesit hesabı yapılıyorsa aynı denetimler basınç donatı için de gerçekleştirilmektedir. Bu denetim için;

$$g_{12}(x) = |n_{6max} - n_6| \leq 0 \quad (14)$$

kısıtı kullanılacaktır. Burada n_{6max} ilk sıradaki ara basınç donatılarından kesit genişliğine göre yerleşebilen en fazla ara donatı sayısını göstermektedir. Bununla birlikte faydalı yükseklikten daha fazla faydalanmak için birinci sıraya yerleştirilen donatıların toplam alanının, ikinci sıraya yerleştirilene eşit yada daha büyük olması sağlanmaktadır. Bunun için:

$$g_{13}(x) = \frac{A_{s,sıra2}^{cd}}{A_{s,sıra1}^{cd}} - 1 \leq 0 \quad (15)$$

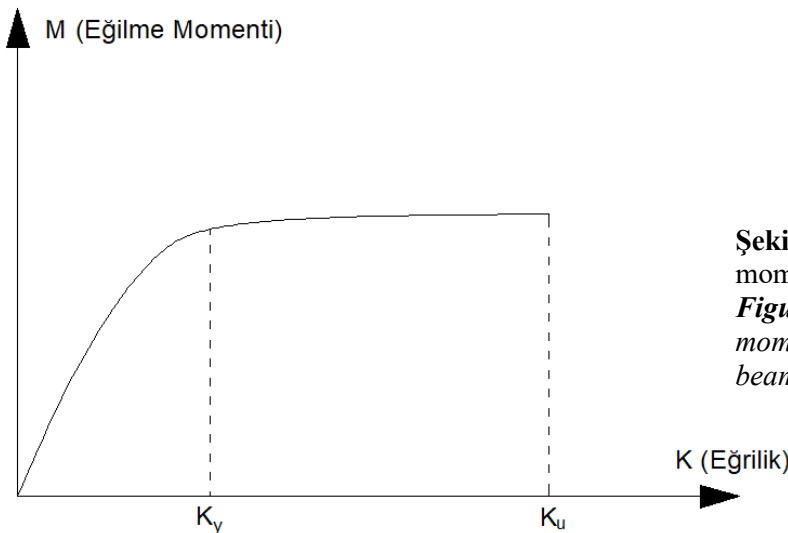
kısıtı kullanılmaktadır. Burada $A_{s,sıra1}^{cd}$ birinci sıradaki toplam çekme donatısı alanı, $A_{s,sıra2}^{cd}$ ikinci sıradaki toplam çekme donatısı alanıdır. Eğer kesitte çift donatılı kesit hesabı yapılıyorsa aynı denetimler basınç donatı için de gerçekleştirilmektedir. Bu denetim için;

$$g_{14}(x) = \frac{A_{s,sıra2}^{bd}}{A_{s,sıra1}^{bd}} - 1 \leq 0 \quad (16)$$

kısıtı kullanılmaktadır. Burada $A_{s,sıra1}^{bd}$ birinci sıradaki toplam basınç donatısı alanı, $A_{s,sıra2}^{bd}$ ikinci sıradaki toplam basınç donatısı alanıdır. Oluşturulacak kiriş kesiti optimizasyon problemlerinin Şekil 2-3'de görülen tasarım değişkenlerinin alt ve üst sınırları ve ayrıık olan tasarım değişkenlerinin alabileceği değerlerin artımı Tablo 1'de verilmiştir.

Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarından (36 problemin tamamından) elde edilen optimum kesitlerin süneklik düzeyleri belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Optimum kesitlerin süneklik düzeyi "eğrilik süneklik katsayısı" ile tanımlanmıştır. Bu amaçla kesitlerin moment eğrilik ilişkileri belirlenmiş ve eğrilik süneklik katsayısı, kırılma anındaki eğriliğin, çekme donatısının aktığı andaki eğriliğe oranı olarak Eşitlik 17 ile hesaplanmıştır (Şekil 4). Hesaplanan süneklik katsayıları ile elde edilen optimum kesitlerin süneklik değişimleri irdelenmiştir. Moment eğrilik hesabında Mander sargısız beton modeli kullanılmıştır (TBDY, 2018). Dolayısıyla kesitlerde sargı etkisi ihmal edilecektir.

$$\mu_c = \frac{K_u}{K_y} \quad (17)$$



Şekil 4. Optimum kiriş kesitleri için çizilecek moment eğrilik ilişkisinin şematik gösterimi
Figure 4. Schematic representation of the moment-curvature relationship for optimum beam sections

Tablo 1. Uygulamalara ilişkin tasarım değişkenleri alt ve üst sınırları, artımları
Table 1. Lower and upper limits and increments of design variables for applications

Tasarım Değişkeni	Tek Donatılı Problemlerde			Çift Donatılı Problemlerde		
	Alt limit	Üst limit	Artım	Alt limit	Üst limit	Artım
X ₁	300 mm	1400 mm	50 mm	300 mm	1400 mm	50 mm
X ₂	{12 14 16 18 20 22 24 26 28 30} mm			{12 14 16 18 20 22 24 26 28 30} mm		
X ₃	{12 14 16 18 20 22 24 26 28 30} mm			{12 14 16 18 20 22 24 26 28 30} mm		
X ₄	{12 14 16 18 20 22 24 26 28 30} mm			{12 14 16 18 20 22 24 26 28 30} mm		
X ₅	{12 14 16 18 20 22 24 26 28 30} mm			{12 14 16 18 20 22 24 26 28 30} mm		
X ₆	0	11 adet	1 adet	0	11 adet	1 adet
X ₇	0	2 adet	2 adet	0	2 adet	2 adet
X ₈	0	11 adet	1 adet	0	11 adet	1 adet
X ₉	{12 14 16 18 20 22 24 26 28 30} mm			{12 14 16 18 20 22 24 26 28 30} mm		
X ₁₀	0	6 adet	2 adet	{12 14 16 18 20 22 24 26 28 30} mm		
X ₁₁	{12 14 16 18 20 22 24 26 28 30} mm			{12 14 16 18 20 22 24 26 28 30} mm		
X ₁₂	{12 14 16 18 20 22 24 26 28 30} mm			{12 14 16 18 20 22 24 26 28 30} mm		
X ₁₃	0	11 adet	1 adet	0	11 adet	1 adet
X ₁₄	0	2 adet	2 adet	0	2 adet	2 adet
X ₁₅	0	11 adet	1 adet	0	11 adet	1 adet
X ₁₆	{12 14 16 18 20 22 24 26 28 30} mm			{12 14 16 18 20 22 24 26 28 30} mm		
X ₁₇	0	6 adet	2 adet	0	6 adet	2 adet

2.2. Oluşturulan problem setleri ve deneysel simülasyon ortamı

2.2. Problem sets and experimental simulation environment

Çalışmada, dikdörtgen kiriş kesitlerinde farklı tasarım momenti düzeyleri, kiriş genişlikleri, beton sınıfları ve basınç/çekme donatısı oranları için, optimum tasarımların belirlenmesini ve belirlenen optimum kesitlerin sünekliklerinin karşılaştırılarak değerlendirilmesini sağlamak üzere aşağıdaki Tablo 2-4'de verilen problem durumları oluşturulmuştur

Tablo 2-4 incelendiğinde tüm problem setlerinde toplam 36 problemin oluşturulduğu görülmektedir. Bu 36 problemin her biri için Rao 1, 2 ve 3 algoritmaları kullanılarak simülasyonlar yapılmıştır. Bu çalışmalarda tüm problem durumlarında sabit tutulacak tasarım parametreleri ve birim maliyetler aşağıdaki Tablo 5'te sunulmaktadır. Birim maliyetler Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının 2024 yılı inşaat ve tesisat birim fiyatlarından alınmıştır.

Tablo 2. Farklı tasarım momenti düzeyleri ve basınç/çekme donatısı oranları için problem durumları
Table 2. Problem cases for different design moment levels and compression/tensile reinforcement ratios

Problem Seti 1	b _w = 250 mm beton sınıfı C25/30			
	As' /As oranı (Basınç Donatısı Alanı/Çekme Donatısı oranı)			
	M _d (kNm)	0% (Tek Donatılı)	20%	60%
200	Durum 1-1	Durum 1-2	Durum 1-3	Durum 1-4
400	Durum 1-5	Durum 1-6	Durum 1-7	Durum 1-8
600	Durum 1-9	Durum 1-10	Durum 1-11	Durum 1-12

Tablo 3. Farklı kiriş genişlikleri ve basınç/çekme donatısı oranları için problem durumları
Table 3. Problem cases for different beam widths and compression/tensile reinforcement ratios

Problem Seti 2	M _d = 700 kNm beton sınıfı C25/30			
	As' /As oranı (Basınç Donatısı Alanı/Çekme Donatısı oranı)			
	b _w (mm)	0% (Tek Donatılı)	20%	60%
300	Durum 2-1	Durum 2-2	Durum 2-3	Durum 2-4
400	Durum 2-5	Durum 2-6	Durum 2-7	Durum 2-8
500	Durum 2-9	Durum 2-10	Durum 2-11	Durum 2-12

Tablo 4. Farklı beton sınıfları ve basınç/çekme donatısı oranları için problem durumları**Table 4.** Problem cases for different concrete grades and compression/tensile reinforcement ratios

Problem Seti 3	$M_d = 700 \text{ kNm}$ $b_w = 250 \text{ mm}$			
	As' /As oranı (Basınç Donatısı Alanı/Çekme Donatısı oranı)			
Beton Sınıfı	0% (Tek Donatılı)	20%	60%	100%
C30/37	Durum 3-1	Durum 3-2	Durum 3-3	Durum 3-4
C40/50	Durum 3-5	Durum 3-6	Durum 3-7	Durum 3-8
C50/60	Durum 3-9	Durum 3-10	Durum 3-11	Durum 3-12

Tablo 5. Tüm problem setlerinde sabit tutulacak tasarım parametreleri**Table 5.** Design parameters to be kept constant in all problem sets

Tasarım Parametresi	Değeri	Birimi
Donatı sınıfı	B420C	-
Etriye çapı	8	mm
Net beton örtüsü	25	mm
Beton birim ağırlığı	25	kN/m ³
Donatı birim ağırlığı	7850	kg/m ³
Çelik (B420C) birim maliyeti	33511.95	₺/ton
Beton (C25/30) birim maliyeti	2605.30	₺/m ³
Beton (C30/37) birim maliyeti	2692.80	₺/m ³
Beton (C40/50) birim maliyeti	3017.80	₺/m ³
Beton (C50/60) birim maliyeti	3167.80	₺/m ³

Çalışmadaki problem setlerinin optimum tasarımları, Rao 1, Rao 2 ve Rao 3 metasezgisel arama algoritmaları ile gerçekleştirilmiştir. Algoritmaların performans karşılaştırmalarının adil bir süreçle yürütülmesi için söz konusu algoritmaların geliştiricileri tarafından önerilen parametre ayarları kullanılmıştır. Bu ayarlar Tablo 6'da listelenmiştir. Rao algoritmaları parametresiz sezgisel algoritmalar oldukları için bu tabloda sadece popülasyon sayısı verilmiştir. Söz konusu simülasyon ortamının bilgileri Tablo 7'de verilmiştir. Algoritma durdurma kriteri olarak maksimum fonksiyon değerlendirme sayısı (maxFEs) kullanılacak ve maxFEs tasarım değişkeni sayısının (D) 10000 katı olarak alınmıştır. Her problem durumu için her bir algoritmayla 21 bağımsız simülasyon gerçekleştirilmiştir. Algoritmalarla ilgili ayrıntılı bilgiye ayar tablosundaki kaynaktan ulaşılabilmektedir.

Tablo 6. Algoritmaların parametre ayarları**Table 6.** Parameter settings for algorithms

Algoritma	Kaynak	Ayarlar
Rao 1		
Rao 2	(Rao, 2020)	Popülasyon boyutu = 50
Rao 3		

Tablo 7. Simülasyon ortamı bilgileri**Table 7.** Details of the simulation environment

	Bileşen	Tanım
Donanım	CPU ve Frekansı	Intel(R) Core(TM) i5-9400F CPU @ 2.90GHz
	RAM	8,00 GB
	Sabit Sürücü	500 GB sabit disk sürücüsü (SSD)
Yazılım	İşletim Sistemi	Windows 10 Pro 64 bit
	Kodlama Dili	MATLAB R2019a

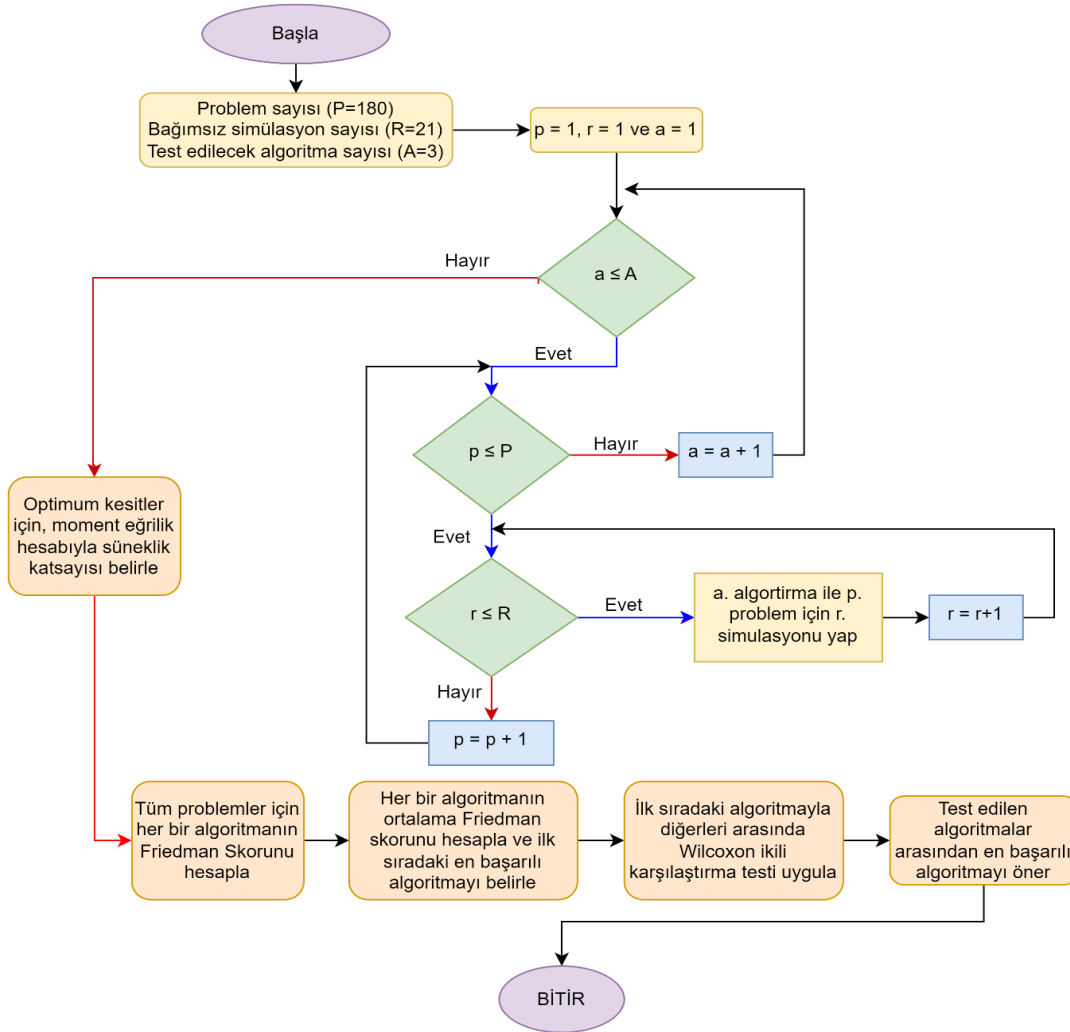
2.3. İstatistiksel performans değerlendirme yöntemleri

2.3. Statistical performance evaluation methods

Bu çalışmada, dikdörtgen kiriş kesitlerinin minimum maliyetli optimum tasarım problemlerinin çözümünde kullanılan Rao-1, Rao-2 ve Rao-3 algoritmalarının performansları arasındaki farkların istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek amacıyla, parametrik olmayan (non-parametric) testler kullanılmıştır. Verilerin normal dağılım göstermeme ihtimaline karşı, algoritmaların genel başarısını karşılaştırmak ve

aralarında anlamlı bir farkın bulunup bulunmadığını test etmek için Friedman Testi uygulanmıştır. Friedman testi, çoklu algoritmaların sıralama (ranking) performanslarını değerlendirmek için literatürde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Friedman, 1940).

Friedman testi sonucunda algoritmalar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark tespit edilmesi durumunda, farkın hangi algoritmalar arasında olduğunu belirlemek amacıyla ikili karşılaştırmalar (pairwise comparisons) için Wilcoxon İşaretli Sıralar Testi (Wilcoxon Signed-Rank Test) kullanılmıştır (Wilcoxon, 1945). Wilcoxon testi, iki ilişkili örneklem arasındaki farkların medyanını analiz ederek algoritmaların birbirlerine göre üstünlüğünü ortaya koymaktadır. Tüm istatistiksel analizlerde anlamlılık düzeyi %5 olarak kabul edilmiştir. Çalışmada kullanılan algoritmaların problemlere uygulanma ve algoritma performanslarının değerlendirme süreci Şekil 5'te özetlenmektedir.



Şekil 5. Algoritmaların değerlendirilmesinde yürütülecek sürecin akış diyagramı

Figure 5. Flow diagram of the process to be carried out in the evaluation of algorithms

3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

3.1. Farklı tasarım momenti düzeyleri ve basınç/çekme donatısı oranları için değerlendirme

3.1. Evaluation for different design moment levels and compression/tensile reinforcement ratios

Bu problem setinde farklı tasarım momenti düzeyleri ve basınç/çekme donatısı oranları için dikdörtgen kesitli kirişlerin optimum tasarımları ve süneklik değişimleri incelenmiştir. Elde edilen optimum çözümler tek donatılı dikdörtgen kesit tasarımı için Tablo 8'de, Çift donatılı dikdörtgen kesit tasarımında basınç donatısının çekme donatısına oranının %20, %60 ve %100 olduğu durumlar için Tablo 9'da sunulmaktadır.

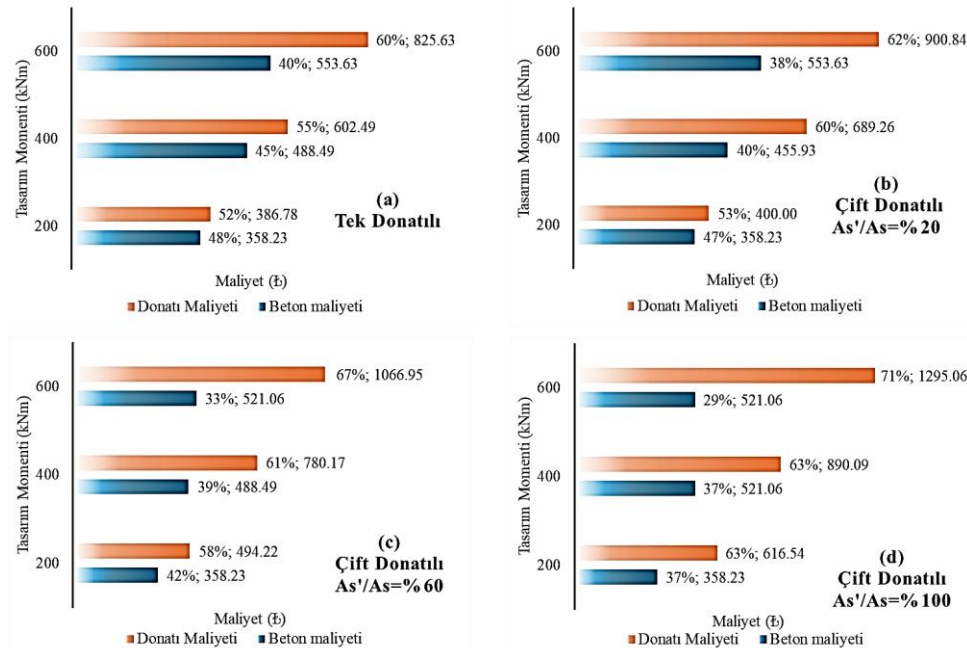
Tablo 8. Tek donatılı dikdörtgen kesit tasarımında farklı tasarım momentleri için optimum kesit detayı**Table 8.** Optimal section details for different design moments in single-reinforced rectangular section design

M_d (kNm)	200	400	600
Kiriş Genişliği (mm)	250	250	250
Kiriş Yüksekliği (mm)	550	750	850
Montaj	2 Ø 12	2 Ø 12	2 Ø 12
Çekme Donatıları			
Birinci Sıra	2 Ø 20+1 Ø 28	2 Ø 24+1 Ø 30	2 Ø 30+1 Ø 30
İkinci Sıra	YOK	2 Ø 12	2 Ø 12
Gövde Donatıları	YOK	2 Ø 12	4 Ø 12
Toplam Maliyet (₺)	745.01	1090.98	1379.25

Tablo 9. Çift donatılı dikdörtgen kesit tasarımında farklı tasarım momentleri için optimum kesit detayı**Table 9.** Optimal section details for different design moments in double-reinforced rectangular section design

M_d (kNm)	$As'/As=0,2$			$As'/As=0,6$			$As'/As=1,0$		
	200	400	600	200	400	600	200	400	600
Kiriş Genişliği	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Kiriş Yüksekliği	550	700	850	550	750	800	550	800	800
Çekme Donatıları									
1 Sıra Kenar Donatı	2 Ø 14	2 Ø 22	2 Ø 26	2 Ø 12	2 Ø 12	2 Ø 28	2 Ø 12	2 Ø 20	2 Ø 30
1. Sıra Ara Donatı	2 Ø 24	2 Ø 28	2 Ø 26	3 Ø 20	2 Ø 28	1 Ø 26	3 Ø 20	1 Ø 30	1 Ø 30
2. Sıra Kenar Donatı	YOK	YOK	2 Ø 12	YOK	2 Ø 12	2 Ø 20	YOK	2 Ø 12	2 Ø 12
2. Sıra Ara Donatı	YOK	YOK	1 Ø 12	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK
Basınç Donatıları									
1 Sıra Kenar Donatı	2 Ø 14	2 Ø 16	2 Ø 18	2 Ø 16	2 Ø 12	2 Ø 14	2 Ø 26	2 Ø 26	2 Ø 26
1. Sıra Ara Donatı	YOK	YOK	YOK	2 Ø 14	3 Ø 16	2 Ø 24	1 Ø 12	2 Ø 14	2 Ø 26
2. Sıra Kenar Donatı	YOK	YOK	YOK	YOK	2 Ø 12	2 Ø 12	YOK	2 Ø 12	2 Ø 12
2. Sıra Ara Donatı	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK
Gövde Donatıları	YOK	2 Ø 12	4 Ø 12	YOK	2 Ø 12	2 Ø 12	YOK	2 Ø 12	2 Ø 12
Toplam Maliyet (₺)	758.23	1145.19	1454.46	852.45	1268.67	1588.01	974.76	1411.15	1816.12

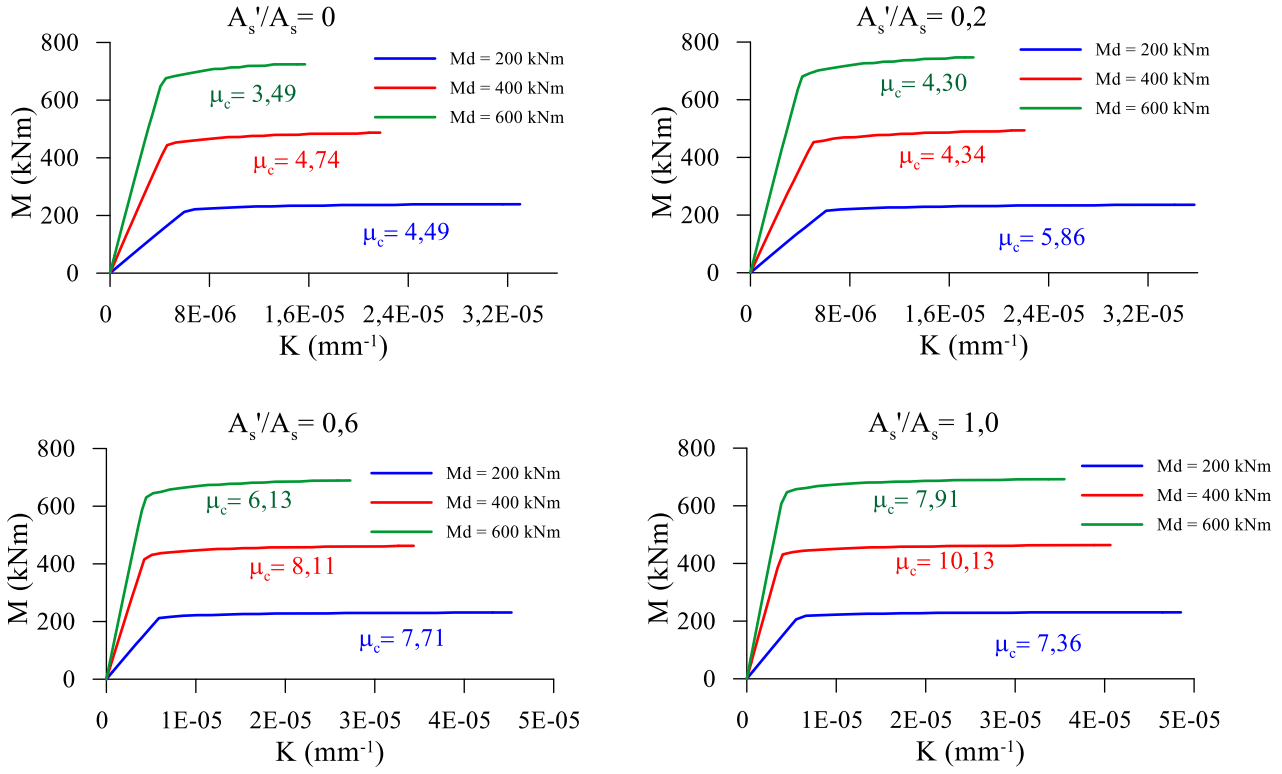
Bu problem setinde kiriş genişliği 250 mm olarak sabit alınmış, beton sınıfı da C25 olarak dikkate alınmıştır. Tablo 8’de sunulan tek donatılı kirişle ilişkin optimum tasarım tablosu incelendiğinde, tasarım eğilme momenti arttıkça kiriş yüksekliğinin arttığı, gövde donatısının 400 kNm’lik eğilme momenti ve üzerinde kesitte gerekli olduğu görölmektedir. Toplam maliyet de eğilme momenti arttıkça gerekli donatı miktarına ve kesitteki büyümeye bağlı olarak artmaktadır. Benzer yorum basınç donatısı bulunan Tablo 9’da görölen çift donatılı tasarımlar için de geçerlidir. Ayrıca aynı tasarım eğilme moenti etkisindeki kiriş kesitlerinin maliyeti, basınç donatısı oranı arttıkça yükselmektedir. Farklı tasarım momenti düzeyleri ve basınç/çekme donatısı oranlarında elde edilen optimum tasarımlarda toplam maliyet içinde beton ve donatının paylarını gösteren grafikler Şekil 6’da sunulmaktadır.



Şekil 6. Farklı tasarım momenti düzeylerinde tek donatılı (a), $As'/As=20$ (b), $As'/As=60$ (c) ve $As'/As=100$ (d) basınç/çekme donatısı oranları için elde edilen optimum tasarımlarda toplam maliyet içinde beton ve donatının payları

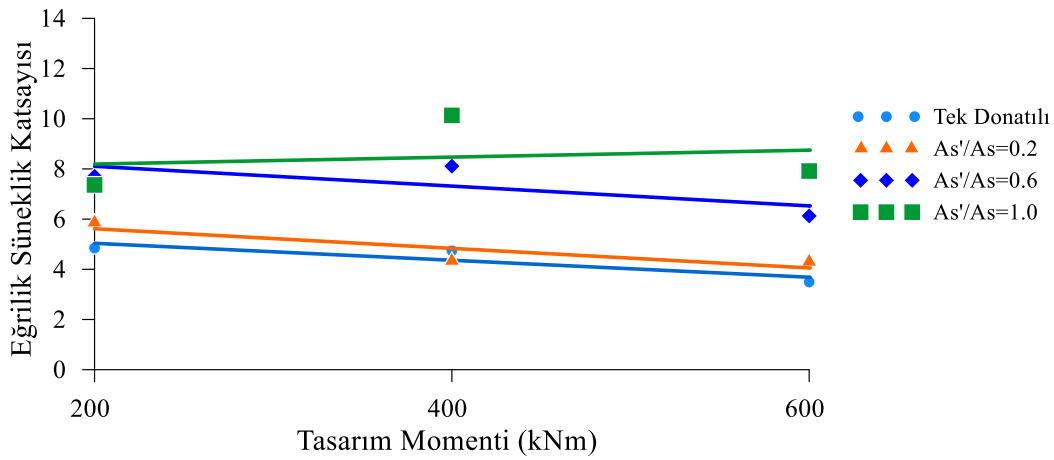
Figure 6. The proportions of concrete and reinforcement in the total cost for the optimum designs obtained for compression/tensile reinforcement ratios of single reinforcement (a), $As'/As=0.2$ (b), $As'/As=0.6$ (c), and $As'/As=1.0$ (d) for different design moment levels.

Şekil 6'da verilen farklı tasarım momenti düzeyleri ve basınç/çekme donatısı oranlarında dikdörtgen kesitli kirişler için elde edilen optimum tasarımlarda toplam maliyet içinde beton ve donatının payları incelendiğinde, tüm problem durumlarında donatı maliyetinin beton maliyetinden yüksek olduğu, eğilme momenti düzeyi artışıyla toplam maliyet içinde donatının payının giderek arttığı, betonun payının ise giderek düştüğü görülmektedir. Bununla birlikte aynı eğilme momentine sahip kirişlerde, basınç donatısının çekme donatısına oranının artmasıyla donatının toplam maliyet üzerindeki payı da artmaktadır. Farklı tasarım momenti düzeyleri ve basınç/çekme donatısı oranları için dikdörtgen kesitli kirişlerin moment-eğrilik grafikleri Şekil 7'de ve eğilme süneklik katsayılarının değişimlerini gösteren eğilim grafikleri ise Şekil 8'de sunulmaktadır.



Şekil 7. Farklı tasarım momenti düzeyleri ve basınç/çekme donatısı oranları için elde edilen optimum tasarımların moment-eğrilik grafikleri

Figure 7. Moment-curvature graphs of optimum designs obtained for different design moment levels and compression/tension reinforcement ratios.



Şekil 8. Farklı tasarım momenti düzeyleri ve basınç/çekme donatısı oranları için elde edilen optimum tasarımlarda eğilme süneklik katsayılarının değişimleri

Figure 8. Changes in bending ductility coefficients in the optimum designs obtained for different design moment levels and compression/tension reinforcement ratios

Şekil 7’de sunulan moment-eğrilik grafikleri ve Şekil 8’de verilen eğilme süneklik katsayıları eğilim grafikleri incelendiğinde, tasarım momenti arttıkça, elde edilen optimum kesit tasarımlarının süneklik katsayılarının azalma eğiliminde olduğu söylenebilmektedir. Tasarım momentinin 200 kNm’den 600 kNm’ye artmasıyla süneklik katsayısının yaklaşık %17 oranında azaldığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, Şekil 7’de sunulan moment-eğrilik grafikleri ve Şekil 8’de verilen eğilme süneklik katsayıları eğilim grafikleri, basınç donatısının çekme donatısına oranı arttıkça elde edilen optimum kesitlerin daha yüksek sünekliğe sahip olduğunu, basınç/çekme donatısı oranının %20’den %100’e çıkarılmasıyla süneklik katsayısında ortalama %81 oranında bir iyileşme sağlandığını göstermektedir.

3.2. Farklı kiriş genişlikleri ve basınç/çekme donatısı oranları için değerlendirme

3.2. Evaluation for different beam widths and compression/tensile reinforcement ratios

Bu problem setinde farklı kiriş genişlikleri ve basınç/çekme donatısı oranları için dikdörtgen kesitli kirişlerin optimum tasarımları ve süneklik değişimleri incelenmiştir. Elde edilen optimum çözümler tek donatılı dikdörtgen kesit tasarımı için Tablo 10’da, çift donatılı dikdörtgen kesit tasarımında basınç donatısının çekme donatısına oranının %20, %60 ve %100 olduğu durumlar için Tablo 11’de sunulmaktadır.

Tablo 10. Tek donatılı dikdörtgen kesit tasarımında farklı kiriş genişlikleri için optimum kesit detayı

Table 10. Optimal section details for different beam widths in single-reinforced rectangular section design

b_w (mm)	300	400	500
Kiriş Genişliği (mm)	300	400	500
Kiriş Yüksekliği (mm)	1000	850	750
Montaj	2 Ø 12	2 Ø 12	2 Ø 12
Asal Donatılar (Çekme)			
Birinci Sıra	2 Ø 16 + 3 Ø 28	2 Ø 16 + 5 Ø 24	2 Ø 16 + 7 Ø 22
İkinci Sıra	YOK	YOK	YOK
Gövde Donatıları	4 Ø 12	4 Ø 12	4 Ø 12
Toplam Maliyet (₺)	1551.85	1765.15	1961.30

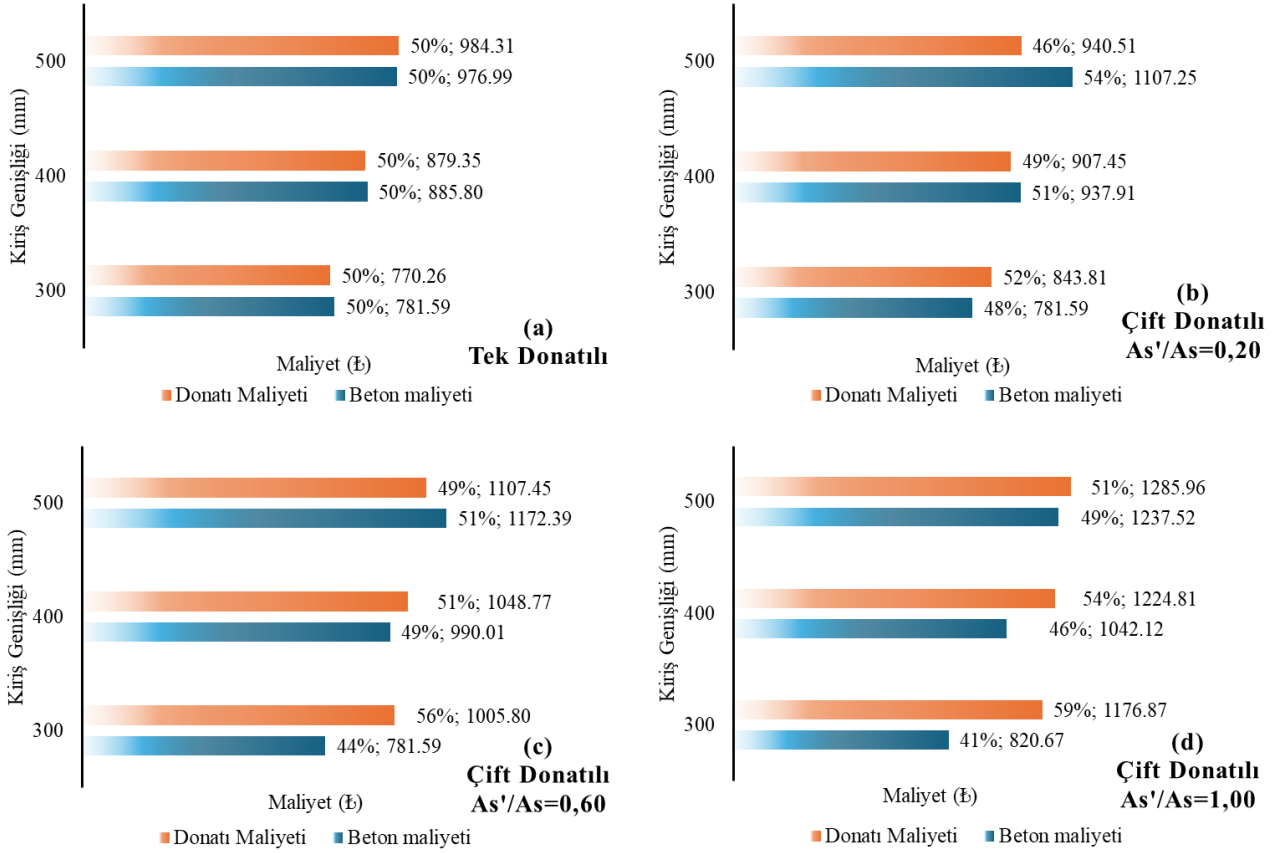
Tablo 11. Çift donatılı dikdörtgen kesit tasarımında farklı kiriş genişlikleri için optimum kesit detayı

Table 11. Optimal section details for different beam widths in double-reinforced rectangular section design

b_w (mm)	As'/As =0,2			As'/As =0,6			As'/As =1,0		
	300	400	500	300	400	500	300	400	500
Kiriş Genişliği	300	400	500	300	400	500	300	400	500
Kiriş Yüksekliği	1000	900	850	1000	950	900	1050	1000	950
Çekme Donatıları									
1 Sıra Kenar Donatı	2 Ø 28	2 Ø 28	2 Ø 14	2 Ø 18	2 Ø 14	2 Ø 14	2 Ø 22	2 Ø 18	2 Ø 30
1. Sıra Ara Donatı	2 Ø 26	4 Ø 20	6 Ø 22	3 Ø 26	5 Ø 22	8 Ø 18	3 Ø 20	3 Ø 26	4 Ø 16
2. Sıra Kenar Donatı	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	2 Ø 14	YOK	YOK
2. Sıra Ara Donatı	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK
Basınç Donatıları									
1 Sıra Kenar Donatı	2 Ø 14	2 Ø 18	2 Ø 14	2 Ø 22	2 Ø 16	2 Ø 18	2 Ø 22	2 Ø 18	2 Ø 30
1. Sıra Ara Donatı	1 Ø 14	YOK	2 Ø 12	2 Ø 18	6 Ø 14	8 Ø 12	3 Ø 20	7 Ø 14	4 Ø 16
2. Sıra Kenar Donatı	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	2 Ø 14	2 Ø 16	YOK
2. Sıra Ara Donatı	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	1 Ø 12	YOK
Gövde Donatıları	4 Ø 12	4 Ø 12	4 Ø 12	4 Ø 12	4 Ø 12	4 Ø 12	4 Ø 12	4 Ø 12	4 Ø 12
Toplam Maliyet (₺)	1625.40	1845.36	2047.76	1787.39	2038.79	2279.83	1997.54	2266.93	2523.48

Bu problem setindeki tüm problemlerde tasarım eğilme momenti 700 kNm, beton sınıfı C25 olarak dikkate alınmıştır. Tablo 10’da sunulan tek donatılı kirişe ilişkin optimum tasarım tablosu incelendiğinde, kiriş genişliği arttıkça kiriş yüksekliğinin giderek azaldığı, gövde donatısının tüm tasarımlarda gerekli olduğu görülmektedir. Toplam maliyetin ise kiriş genişliği arttıkça, giderek arttığı görülmektedir. Benzer yorum basınç donatısı bulunan Tablo 11’de görülen tasarımlar için de geçerlidir. Basınç donatısı kullanılan tasarımlarda da kiriş genişliğinin artmasıyla daha yüksek maliyete çıkıldığı görülmektedir. Ayrıca aynı genişlikteki kiriş kesitlerinin maliyeti, basınç donatısı oranı arttıkça yükselmektedir. Çekme donatısının %20’si kadar basınç donatısı içeren tasarımda, kiriş genişliğinin 300 mm’den 500 mm’ye yükselmesiyle maliyette 1,26 kat artış meydana gelirken, çekme donatısına eşit miktarda basınç donatısı içeren tasarımda (As'/As=1,00) aynı kiriş genişliği artışında da 1,26 kat artış meydana gelmektedir. Böylece farklı As'/As oranlarında, kiriş genişliğinin artmasıyla minimum maliyetli optimum tasarımın maliyetinde benzer oranda

artışa neden olduğu anlaşılmaktadır. Farklı kiriş genişlikleri ve basınç/çekme donatısı oranlarında elde edilen optimum tasarımlarda toplam maliyet içinde beton ve donatının paylarını gösteren grafikler Şekil 9'da sunulmaktadır.

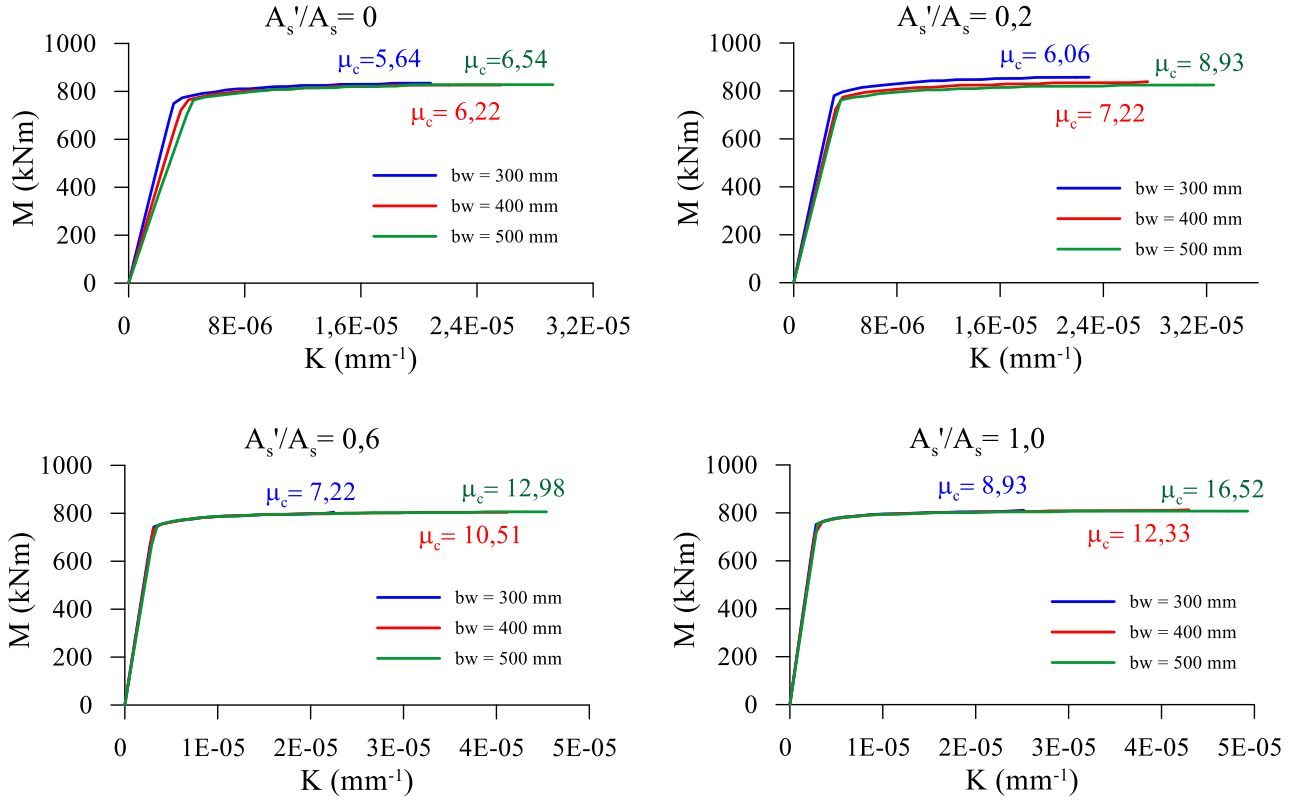


Şekil 9. Farklı kiriş genişliklerinde tek donatılı (a), $As'/As=0,2$ (b), $As'/As=0,6$ (c) ve $As'/As=1,0$ (d) basınç/çekme donatısı oranları için elde edilen optimum tasarımlarda toplam maliyet içinde beton ve donatının payları

Figure 9. The proportions of concrete and reinforcement in the total cost for the optimum designs obtained for compression/tension reinforcement ratios of single reinforcement (a), $As'/As=0.2$ (b), $As'/As=0.6$ (c), and $As'/As=1.0$ (d) for different beam widths.

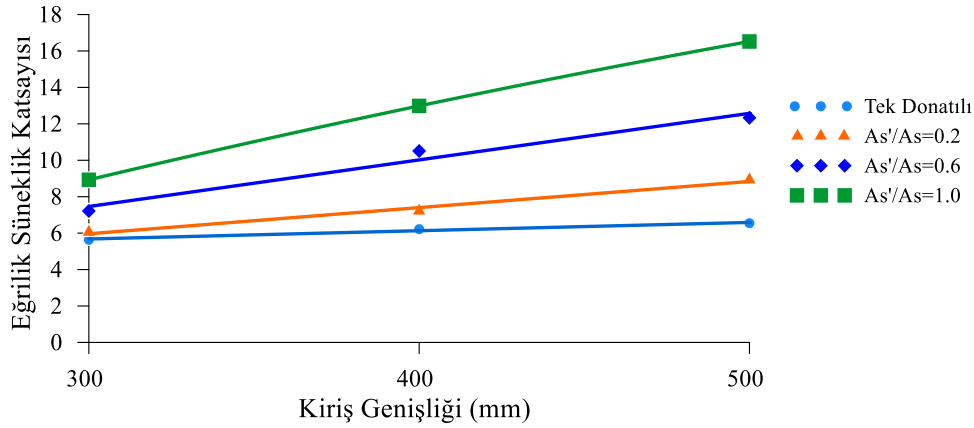
Şekil 9'da sunulan farklı kiriş genişlikleri ve basınç/çekme donatısı oranlarında dikdörtgen kesitli kirişler için elde edilen optimum tasarımlarda toplam maliyet içinde beton ve donatının payları incelendiğinde, kiriş genişliğinin artışıyla toplam maliyet içinde donatının payının giderek azaldığı, betonun payının ise giderek arttığı görülmektedir. Tek donatılı kirişte, beton maliyetinin hemen hemen donatı maliyetine eşit olduğu diğer durumlarda ise çoğunlukla donatı maliyetinin beton maliyetinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte basınç donatısının çekme donatısına oranının artmasıyla aynı genişliğe sahip kirişlerde donatının toplam maliyet üzerindeki payı da artmaktadır. Farklı kiriş genişlikleri ve basınç/çekme donatısı oranları için dikdörtgen kesitli kirişlerin moment-eğrilik grafikleri Şekil 10'da ve eğilme süneklik katsayılarının değişimlerini gösteren eğilim grafikleri ise Şekil 11'de sunulmaktadır.

Şekil 10'da sunulan moment-eğrilik grafikleri ve Şekil 11'de verilen eğilme süneklik katsayıları eğilim grafikleri incelendiğinde, kiriş genişliğinin artmasıyla, elde edilen optimum kesit tasarımlarına ilişkin süneklik katsayılarının arttığı görülmektedir. Kiriş genişliğinin 300 mm'den 500 mm'ye yükselmesiyle süneklik katsayısının ortalama %57 arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, Şekil 11'de verilen eğilme süneklik katsayıları eğilim grafikleri, optimum kesitlerin, basınç donatısının çekme donatısına oranı arttıkça daha yüksek sünekliğe sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu grafikten, özellikle çift donatılı kesitlerde kiriş genişliğinin artmasıyla oluşan süneklik artışının, tek donatılı kesitlere göre daha yüksek düzeyde olduğu anlaşılmaktadır. Sunulan grafikler analiz edildiğinde, basınç/çekme donatısı oranının %20'den %100'e çıkarılmasıyla süneklik katsayısında ortalama %68 oranında bir iyileşme sağlandığı görülmektedir.



Şekil 10. Farklı kiriş genişlikleri ve basınç/çekme donatısı oranları için elde edilen optimum tasarımların moment-eğrilik grafikleri

Figure 10. Moment-curvature graphs of optimum designs obtained for different beam widths and compression/tension reinforcement ratios.



Şekil 11. Farklı kiriş genişlikleri ve basınç/çekme donatısı oranları için elde edilen optimum tasarımlarda eğilme süneklik katsayılarının değişimleri

Figure 11. Changes in bending ductility coefficients in the optimum designs obtained for different beam widths and compression/tensile reinforcement ratios

3.3. Farklı beton sınıfları ve basınç/çekme donatısı oranları için değerlendirme

3.3. Evaluation for different concrete grades and compressive/tensile reinforcement ratios

Bu problem setinde farklı beton sınıfları ve basınç/çekme donatısı oranları için dikdörtgen kesitli kirişlerin optimum tasarımları ve süneklik değişimleri incelenmiştir. Elde edilen optimum çözümler tek donatılı dikdörtgen kesit tasarımı için Tablo 12'de, çift donatılı dikdörtgen kesit tasarımında basınç donatısının çekme donatısına oranının %20, %60 ve %100 olduğu durumlar için Tablo 13'te sunulmaktadır.

Bu problem setindeki tüm problemlerde kiriş genişliği 250 mm, tasarım eğilme momenti ise 700 kNm olarak dikkate alınmıştır. Tablo 12’de sunulan tek donatılı kirişe ilişkin optimum tasarım tablosu incelendiğinde, beton sınıfı değiştikçe kiriş yüksekliğinin sabit kaldığı, gövde donatısının tüm tasarımlarda gerekli olduğu görülmektedir. Tablo 12’nin son satırında sunulan tek donatılı kirişin maliyet değişimi grafiği incelendiğinde, kalite arttıkça, toplam maliyetin arttığı görülmektedir. Tablo 13’te çift donatılı kesitlere ilişkin optimum tasarım tabloları incelendiğinde, beton sınıfı değiştikçe, çift donatılı kesitlerde de kiriş yüksekliğinin değişmediği görülmektedir. Tablo 13’te son satırında sunulan çift donatılı kirişlerin maliyet değişimi grafikleri incelendiğinde, beton kalitesi arttıkça, toplam maliyetin arttığı görülmektedir. Farklı beton sınıfları ve basınç/çekme donatısı oranlarında dikdörtgen kesitli kirişler için elde edilen optimum tasarımlarda toplam maliyet içinde beton ve donatının paylarını gösteren grafikler Şekil 12’de sunulmaktadır.

Tablo 12. Tek donatılı dikdörtgen kesit tasarımında farklı beton sınıfları için optimum kesit detayı

Table 12. Optimal section details for different concrete grades in single-reinforced rectangular section design

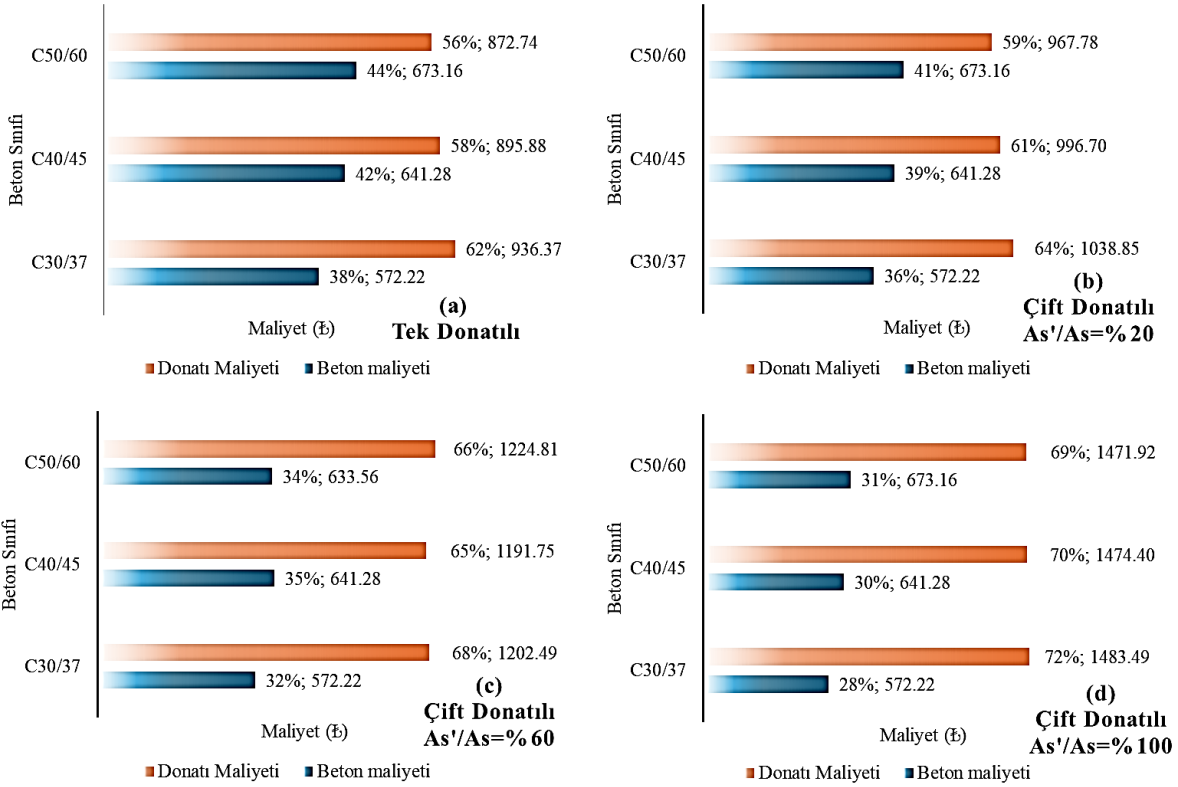
Beton Sınıfı	C30/37	C40/45	C50/60
Kiriş Genişliği (mm)	250	250	250
Kiriş Yüksekliği (mm)	850	850	850
Montaj	2 Ø 12	2 Ø 12	2 Ø 12
Asal Donatılar (Çekme)			
Birinci Sıra	2 Ø 26 + 2 Ø 26	2 Ø 26 + 2 Ø 26	2 Ø 26 + 2 Ø 26
İkinci Sıra	2 Ø 12 + 1 Ø 26	2 Ø 16 + 1 Ø 16	2 Ø 16 + 1 Ø 12
Gövde Donatıları	4 Ø 12	4 Ø 12	4 Ø 12
Toplam Maliyet (₺)	1508.59	1537.16	1545.89

Tablo 13. Çift donatılı dikdörtgen kesit tasarımında farklı beton sınıfları için optimum kesit detayı

Table 13. Optimal section details for different concrete grades in double-reinforced rectangular section design

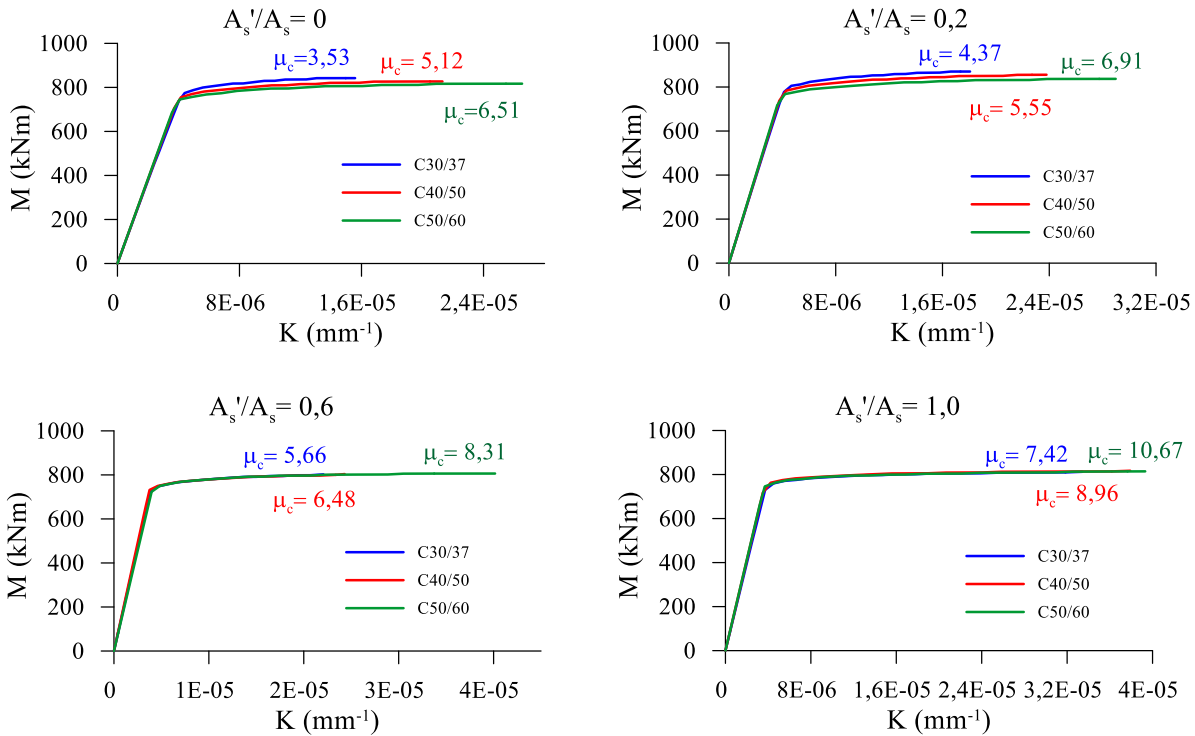
b _w (mm)	As'/As = %20			As'/As = %60			As'/As = %100		
	C30/37	C40/45	C50/60	C30/37	C40/45	C50/60	C30/37	C40/45	C50/60
Kiriş Genişliği	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Kiriş Yüksekliği	850	850	850	850	850	800	850	850	850
Çekme Donatıları									
1 Sıra Kenar Donatı	2 Ø 26	2 Ø 26	2 Ø 26	2 Ø 30	2 Ø 26	2 Ø 26	2 Ø 24	2 Ø 26	2 Ø 24
1. Sıra Ara Donatı	2 Ø 26	2 Ø 26	2 Ø 26	1 Ø 30	2 Ø 26	2 Ø 26	2 Ø 24	2 Ø 26	2 Ø 26
2. Sıra Kenar Donatı	2 Ø 14	2 Ø 16	2 Ø 14	2 Ø 12	2 Ø 14	2 Ø 14	2 Ø 20	2 Ø 12	2 Ø 16
2. Sıra Ara Donatı	3 Ø 14	1 Ø 18	1 Ø 18	2 Ø 12	1 Ø 12	1 Ø 20	1 Ø 14	2 Ø 12	1 Ø 16
Basınç Donatıları									
1 Sıra Kenar Donatı	2 Ø 16	2 Ø 16	2 Ø 12	2 Ø 28	2 Ø 24	2 Ø 28	2 Ø 26	2 Ø 26	2 Ø 30
1. Sıra Ara Donatı	1 Ø 16	1 Ø 14	1 Ø 20	1 Ø 20	2 Ø 20	2 Ø 12	2 Ø 24	2 Ø 26	1 Ø 30
2. Sıra Kenar Donatı	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	2 Ø 12	2 Ø 12	2 Ø 12	2 Ø 12
2. Sıra Ara Donatı	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	2 Ø 16	2 Ø 12	2 Ø 12
Gövde Donatıları	4 Ø 12	4 Ø 12	4 Ø 12	4 Ø 12	4 Ø 12	2 Ø 12	4 Ø 12	4 Ø 12	4 Ø 12
Toplam Maliyet (₺)	1611.07	1637.99	1640.94	1774.71	1833.03	1858.37	2055.71	2115.68	2145.07

Şekil 12’de verilen farklı beton sınıfları ve basınç/çekme donatısı oranlarında dikdörtgen kesitli kirişler için elde edilen optimum tasarımlarda toplam maliyet içinde beton ve donatının payları incelendiğinde, beton kalitesinin artmasıyla toplam maliyet içinde donatının payının giderek azaldığı, betonun payının ise giderek arttığı görülmektedir. Ayrıca basınç donatısı oranı arttıkça, aynı beton sınıfına sahip kirişte, toplam maliyet içinde donatının payının arttığı ve tüm tasarımlarda donatının toplam maliyet içindeki payının, betonun toplam maliyet içindeki payından daha yüksek olduğu görülmektedir. Farklı beton sınıfları ve basınç/çekme donatısı oranları için dikdörtgen kesitli kirişlerin moment-eğrilik grafikleri Şekil 13’de ve eğilme süneklik katsayılarının değişimlerini gösteren eğilim grafikleri ise Şekil 14’de sunulmaktadır.



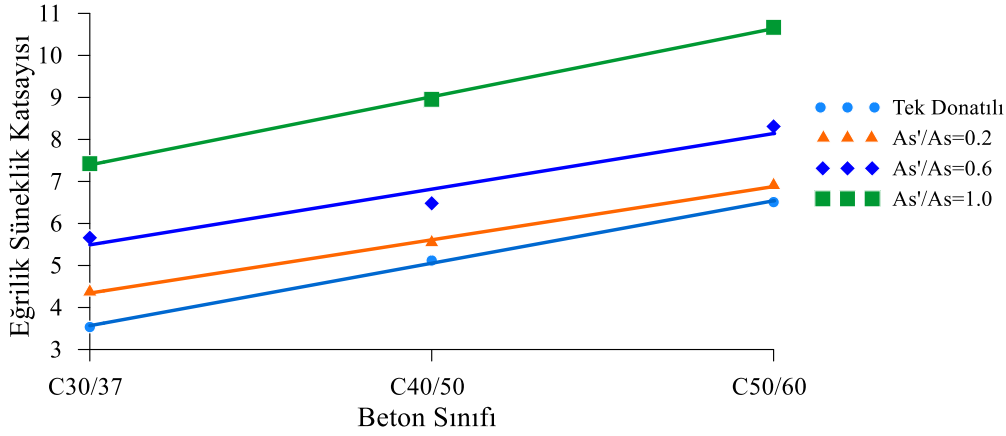
Şekil 12. Farklı beton sınıflarında tek donatılı (a), $A_s'/A_s=0,2$ (b), $A_s'/A_s=0,6$ (c) ve $A_s'/A_s=1,0$ (d) basınç/çekme donatısı oranları için elde edilen optimum tasarımlarda toplam maliyet içinde beton ve donatının payları

Figure 12. The proportions of concrete and reinforcement in the total cost for the optimum designs obtained for compression/tension reinforcement ratios of single reinforcement (a), $A_s'/A_s=0.2$ (b), $A_s'/A_s=0.6$ (c), and $A_s'/A_s=1.0$ (d) for different concrete grades.



Şekil 13. Farklı beton sınıfları ve basınç/çekme donatısı oranları için elde edilen optimum tasarımların moment-eğrilik grafikleri

Figure 13. Moment-curvature graphs of optimum designs obtained for different concrete grades and compression/tension reinforcement ratios.



Şekil 14. Farklı beton sınıfları ve basınç/çekme donatısı oranları için elde edilen optimum tasarımlarda eğilme süneklik katsayılarının değişimleri

Figure 14. Changes in bending ductility coefficients in the optimum designs obtained for different concrete grades and compression/tensile reinforcement ratios

Şekil 13’de sunulan moment-eğrilik grafikleri ve Şekil 14’de verilen eğilme süneklik katsayıları eğilim grafikleri incelendiğinde, kiriş beton kalitesinin artmasıyla, elde edilen optimum kesit tasarımlarına ilişkin süneklik katsayılarının arttığı görülmektedir. Bununla birlikte, Şekil 14’de verilen eğilme süneklik katsayıları eğilim grafikleri, optimum kesitlerin, basınç donatısının çekme donatısına oranı arttıkça daha yüksek sünekliğe sahip olduğunu göstermektedir.

Elde edilen bulgular, mühendislik pratiği açısından değerlendirildiğinde, bu çalışmanın sonuçları tasarımcılara maliyet ve güvenlik dengesi konusunda önemli bir perspektif sunmaktadır. Geleneksel tasarım yaklaşımında mühendisler, yönetmelik limitlerini sağlayan en düşük maliyetli kesite odaklanma eğilimindedir. Ancak elde edilen bulgular, minimum maliyetli tasarımın her zaman optimum performanslı tasarım olmadığını göstermektedir. Özellikle deprem riski yüksek bölgelerde, yapının enerji sönmüleme kapasitesinin (sünekliğin) hayati önem taşıdığı bilinmektedir. Çalışma sonuçları, tasarımcının beton sınıfını yükselterek (örneğin C30/35 yerine C50/60 seçerek), toplam maliyette ihmal edilebilir bir artışla (ortalama %3 mertebesinde) kesit sünekliğinde ciddi kazanımlar (ortalama %58 mertebesinde) elde edebileceğini ortaya koymuştur. Dolayısıyla, tasarımcıların sadece maliyet optimizasyonuna değil, optimum tasarımlarda sünekliği de bir birleşen olarak kullanmaları gerektiği sonucuna varılmıştır.

3.4. Kullanılan metasezgisel arama algoritmalarının performanslarının karşılaştırılması

3.4. Comparing the performance of metaheuristic search algorithms

Çalışmada kullanılan sezgisel algoritmaların performans değerlendirmesinde, “yöntem” bölümünde açıklanan, Friedman ve Wilcoxon istatistiksel testleri kullanılmıştır. Çalışmada incelenen tüm problem durumları (36 problem) için hesaplanan Friedman skorlarının ortalamaları hesaplanmış, Tablo 14’te sunulmuş ve algoritmalar bu skorlara göre sıralanmıştır (Friedman, 1940). Tablo 14’ün son satırındaki genel Friedman skorları incelendiğinde, çalışmada ele alınan optimizasyon problemi için, rakip üç metasezgisel algoritma içinden en başarılı algoritmanın, en küçük skora sahip, Rao-1 algoritması olduğu görülmektedir. Rao-1 algoritmasını sırasıyla Rao-2 ve Rao-3 algoritmaları izlemektedir. İncelenen üç algoritma içinden en kötü performansa sahip algoritmanın Rao-3 algoritması olduğu görülmektedir.

İlk sıradaki algoritma belirlendikten sonra bu algoritmayla diğerleri arasında ikili karşılaştırmalar yapılmıştır. İkili karşılaştırmada Wilcoxon testi (Wilcoxon, 1945) kullanılmıştır. Bu test ile en başarılı algoritmanın diğer algoritmalara göre galibiyet, beraberlik ya da mağlubiyet durumları araştırılmıştır. Sonuç olarak bu karşılaştırmalarla dikdörtgen kiriş kesitlerinin optimizasyonu için kullanılan üç algortmadan (Rao 1, Rao 2 ve Rao 3) en yüksek başarıya sahip olan algoritma önerilmiştir. İlk sıradaki algoritma olarak belirlenen Rao-1 algoritması ile diğerleri arasında Wilcoxon testiyle 36 problem için gerçekleştirilen ikili karşılaştırmalar Tablo 15’te sunulmuştur.

Tablo 14. İncelenen rakip algoritmaların tüm problemler için Friedman skorları
Table 14. Friedman scores of the examined competing algorithms for all problems

	Friedman skorları		
	Rao-1	Rao-2	Rao-3
SET 1	1.532	2.194	2.274
SET 2	1.540	2.216	2.244
SET 3	1.472	2.252	2.276
Ortalama Skor	1.515	2.221	2.265

Tablo 15. İncelenen rakip algoritmaların tüm problemler için Wilcoxon testi sonuçları
Table 15. Wilcoxon test results of the examined competing algorithms for all problems

Referans algoritma	Rao-1	
	Rao-2	Rao-3
SET 1	0 / 2 / 10	0 / 5 / 7
SET 2	0 / 2 / 10	0 / 1 / 11
SET 3	0 / 2 / 10	0 / 2 / 10
Toplam	0 / 6 / 30	0 / 8 / 28

Tablo 15'te verilen test sonuçları sırasıyla Rao-1 algoritmasına göre test edilen algoritmanın galibiyet, beraberlik ve mağlubiyet durumunu göstermektedir. Örneğin son satırdaki genel toplam satırına bakılırsa, Rao-2 algoritmasının Rao-1 algoritmasına 36 problemin 30'unda mağlup olduğu, 6 problemde ise berabere kaldığı anlaşılmaktadır. Benzer durum Rao-3 algoritması için de geçerlidir. Rao-3 algoritmasının Rao-1 algoritmasına 36 problemin 28'inde mağlup olduğu, 8 problemde ise berabere kaldığı anlaşılmaktadır. Bu durum, Friedman testinden elde edilen bulgularla örtüşerek Rao-1 algoritmasının en başarılı algoritma olduğunu doğrulamaktadır.

Çalışmada elde edilen bulgular, Rao-1 algoritmasının Rao-2 ve Rao-3 varyasyonlarına kıyasla daha kararlı ve etkin bir performans sergilediğini göstermiştir. Bu durum, algoritmanın basit matematiksel yapısı ve parametresiz doğası ile ilişkilendirilebilir. Özellikle TS500 ve TBDY 2018 yönetmeliklerinden kaynaklanan karmaşık kısıtlar altında, Rao-1'in en iyi ve en kötü çözümler arasındaki doğrudan etkileşimi kullanmasının, arama uzayının daha efektif taranmasını ve yerel minimumlara takılmadan global optimuma ulaşılmasını kolaylaştırdığı düşünülmektedir. Bu sonuç, optimizasyon literatüründeki 'No Free Lunch' (NFL) teoremi perspektifiyle değerlendirildiğinde daha anlamlı hale gelmektedir. NFL teoremine göre, tüm optimizasyon problemleri için evrensel olarak en iyi performansı gösteren tek bir algoritma yoktur; algoritmaların başarısı, problemin yapısı ile algoritmanın arama stratejisi arasındaki uyuma bağlıdır (Wolpert & Macready, 1997). Bu bağlamda, Friedman testi sonuçlarıyla da istatistiksel olarak doğrulandığı üzere; incelenen betonarme kiriş optimizasyonu probleminin matematiksel karakteristiği (kısıt yapısı ve arama uzayı) ile Rao-1 algoritmasının arama dinamiği arasında güçlü bir uyum olduğu, bu nedenle algoritmanın bu spesifik problem sınıfında diğer varyasyonlara göre üstünlük sağladığı sonucuna varılmıştır.

4. Sonuçlar

4. Conclusions

Bu çalışmada, tek ve çift donatılı betonarme dikdörtgen kiriş kesitlerinin minimum maliyetli optimum tasarımları hedeflenmiş ve bu tasarımların süneklik düzeyleri çeşitli parametrelere göre incelenmiştir. Bu amaçla, farklı tasarım eğilme momenti düzeyleri, kiriş genişlikleri ve beton sınıflarını içeren toplam 36 problemden oluşan üç farklı problem seti oluşturulmuştur. Optimizasyon süreci, metasezgisel arama algoritmalarından olan Rao-1, Rao-2 ve Rao-3 ile yürütülmüş ve bu algoritmaların performansı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmadan elde edilen temel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Tasarım eğilme momentinin artması, beklenen şekilde kiriş yüksekliğini ve toplam maliyeti artırmıştır. Donatı maliyetinin toplam maliyet içindeki payı, moment artışıyla birlikte yükselmiştir. Daha da önemlisi, tasarım momentinin artmasının, elde edilen optimum kesitlerin sünekliğini genel olarak azalttığı gözlemlenmiştir.

- Kiriş genişliğinin artırılması, gerekli kiriş yüksekliğini azaltmasına rağmen toplam maliyeti yükseltmiştir. Genişlik arttıkça, toplam maliyet içinde betonun payı artarken donatının payı azalmıştır. Kiriş genişliğindeki artışın, optimum kesitlerin süneklik katsayısını artırdığı tespit edilmiştir.
- Beton sınıfının (kalitesinin) yükseltilmesi, toplam maliyeti artırmıştır. Beton kalitesi arttıkça maliyet içinde betonun payı artarken donatının payı azalmıştır. Beton kalitesinin artmasının, optimum kesitlerin sünekliğini olumlu yönde etkileyerek artırdığı görülmüştür.
- Tüm problem setlerinde, basınç donatısının çekme donatısına oranının artırılmasının, maliyeti yükseltmesine rağmen optimum kesitlerin sünekliğini önemli ölçüde artırdığı anlaşılmıştır. Bu durum, sünekliğin kritik olduğu tasarımlarda basınç donatısının önemini ortaya koymaktadır.
- Çalışmada ele alınan 36 optimizasyon problemi için Rao-1, Rao-2 ve Rao-3 algoritmalarının performansları Friedman ve Wilcoxon gibi istatistiksel testler kullanılarak adil bir şekilde karşılaştırılmıştır. Yapılan testler sonucunda, Rao-1 algoritmasının incelenen diğer iki algoritmaya göre istatistiksel olarak anlamlı düzeyde daha başarılı olduğu belirlenmiştir. Rao-1'i sırasıyla Rao-3 ve Rao-2 algoritmaları takip etmiştir. Bu bulgular ışığında, betonarme dikdörtgen kiriş kesitlerinin maliyet optimizasyonu problemi için Rao-1 algoritmasının kullanılması önerilmektedir.

Bu çalışma, Rao algoritmalarını betonarme kiriş kesiti optimizasyonunda ilk kez kullanarak literatüre katkı sağlamıştır. Daha da önemlisi, literatürdeki bir boşluğu doldurarak, farklı tasarım parametrelerine göre elde edilen optimum çözümlerin sünekliklerinin karşılaştırıldığı ilk çalışma olma özelliğini taşımaktadır. Elde edilen sonuçlar, tasarımcıların sadece minimum maliyeti değil, aynı zamanda hedeflenen süneklik düzeyini de göz önünde bulundurarak daha bilinçli ve ekonomik tasarımlar yapmalarına olanak tanıyacaktır.

Gerçekleştirilen çalışma, dikdörtgen kesitli kirişlerin optimum tasarımında Rao algoritmalarının etkinliğini ortaya koymuştur. Gelecekte yapılacak çalışmalarda; optimizasyon çalışmalarının T-kesitli kirişler, kolonlar ve çerçeve sistemler gibi daha karmaşık yapı elemanlarına genişletilmesi, maliyetin yanı sıra CO₂ emisyonunun da dikkate alındığı çok amaçlı optimizasyon modellerinin geliştirilmesi ve yerel takılma sorunlarını aşmak için hibrit versiyonlarının geliştirilmesi veya son yıllarda önerilen diğer güncel metasezgisel algoritmalarla kapsamlı performans kıyaslamalarının yapılması önerilmektedir.

Teşekkür

Acknowledgement

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 1919B012403350 numaralı 2209-A projesi ile maddi olarak desteklenmiştir. Yazarlar olarak, makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör ve hakemlere teşekkür ederiz.

Yazar katkısı

Author contribution

Hasan Tahsin Öztürk makalenin metodoloji, kavramsallaştırma, görselleştirme, yazım ve süpervizyonunu yönetti. Muhammed Hammudi literatür araştırmalarını yürüttü ve verileri analiz etti. Kodlama ve yazım aşamalarında yazarlar eşit katkıya sahiptir.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar*References*

- Barros, A. F. M., Barros, M. H. F. M., & Ferreira, C. C. (2012). Optimal design of rectangular RC sections for ultimate bending strength, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 45(6), 845-860. <https://doi.org/10.1007/s00158-011-0717-9>
- Chakrabarty, B. K. (1992). Models for optimal design of reinforced concrete beams, *Computers & Structures*, 42(3), 447-451. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(92\)90040-7](https://doi.org/10.1016/0045-7949(92)90040-7)
- Chutani, S., & Singh, J. (2017). Design optimization of reinforced concrete beams, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 98(4), 429-435. <https://doi.org/10.1007/s40030-017-0232-0>
- Coello, C. C., Santos, F., & Farrera, F. A. (1997). Optimal design of reinforced concrete beams using genetic algorithms, *Expert systems with Applications*, 12(1), 101-108. [https://doi.org/10.1016/S0957-4174\(96\)00084-X](https://doi.org/10.1016/S0957-4174(96)00084-X)
- Dolapçı, B., Özcan, C., & Özkaynak, E. (2024). Hiperspektral görüntülerin graf tabanlı boyut indirgenerek sınıflandırılmasında parçacık sürü optimizasyonu yaklaşımı. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 14(4), 1219-1234. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1493821>
- Dole, M. R., Ronghe, G. N., & Gupta, L. M. (2000). Optimum design of reinforced concrete beams using polynomial optimization technique, *Advances in Structural Engineering*, 3(1). <https://doi.org/10.1260/1369433001502021>
- Ferreira, C. C., Barros, M. H. F. M., & Barros, A. F. M. (2003). Optimal design of reinforced concrete T-sections in bending, *Engineering Structures*, 25(7), 951-964. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(03\)00039-7](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00039-7)
- Friedman, M. (1940). A Comparison of Alternative Tests of Significance for the Problem of m Rankings, *The Annals of Mathematical Statistics*, 11(1), 88-92.
- Govindaraj, V., & Ramasamy, J. V. (2005). Optimum detailed design of reinforced concrete continuous beams using Genetic Algorithms, *Computers and Structures*, 84(1-2), 34-48. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2005.09.001>
- Jahjouh, M. M., Arafa, M. H., & Alqedra, M. A. (2013). Artificial Bee Colony (ABC) algorithm in the design optimization of RC continuous beams, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 47(6), 963-979. <https://doi.org/10.1007/s00158-013-0884-y>
- Kayabekir, A. E., Bekdaş, G., & Nigdeli, S. M. (2021). Optimum design of reinforced concrete T-beam considering environmental factors via flower pollination algorithm, *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(4), 166-178. <https://doi.org/10.24107/ijeas.1037908>
- Koumoussis, V. K., & Arsenis, S. J. (1998). Genetic algorithms in optimal detailed design of reinforced concrete members, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 13, 43-52. <https://doi.org/10.1111/0885-9507.00084>
- Lepš, M., & Šejnoha, M. (2003). New approach to optimization of reinforced concrete beams, *Computers and Structures*, 81(18-19), 1957-1966. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(03\)00215-3](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(03)00215-3)
- Nigdeli, S. M., & Bekdaş, G. (2017). Optimum design of RC continuous beams considering unfavourable live-load distributions, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(4), 1410-1416. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-2045-5>
- Öztürk, H. T. (2024). Research on optimal solutions and algorithm stability analyses in RC continuous beam problems, *Structures*, 62, 106239. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106239>
- Öztürk, H. T., Durmuş, A., & Durmuş, A. (2012). Optimum design of a reinforced concrete beam using artificial bee colony algorithm, *Computers and Concrete*, 10(3), 295-306. <https://doi.org/10.12989/cac.2012.10.3.295>
- Öztürk, Ö., Akyazı, Ö., & Çavdar, B. (2023). Fotovoltaik sistemlerde gri kurt optimizasyon (gko) algoritması ve artımlı iletkenlik (ai) yönteminin maksimum güç noktası takibi (mgnt) için karşılaştırılması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(4), 962-978. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1220816>
- Pierott, R., Hammad, A. W. A., Haddad, A., Garcia, S., & Falcón, G. (2021). A mathematical optimisation model for the design and detailing of reinforced concrete beams, *Engineering Structures*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112861>

- Rao, R. V. (2020). Rao algorithms: Three metaphor-less simple algorithms for solving optimization problems, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 11(1), 107-130. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112861>
- Shaqfa, M., & Orbán, Z. (2019). Modified parameter-setting-free harmony search (PSFHS) algorithm for optimizing the design of reinforced concrete beams, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 60(3), 999-1019. <https://doi.org/10.1007/s00158-019-02252-4>
- Shariat, M., Shariati, M., Madadi, A., & Wakil, K. (2018). Computational Lagrangian Multiplier Method by using for optimization and sensitivity analysis of rectangular reinforced concrete beams, *Steel and Composite Structures*, 29(2), 243-256. <https://doi.org/10.12989/scs.2018.29.2.243>
- TBDY (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- TS500 (2000). *Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Wilcoxon, F. (1945). Individual Comparisons by Ranking Methods, *Biometrics Bulletin*, 1(6), 80-83. <https://doi.org/10.2307/3001968>
- Wolpert, D. H., & Macready, W. G. (1997). No free lunch theorems for optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1), 67-82. <https://doi.org/10.1109/4235.585893>
- Zhang, X., & Wang, F. (2023). Influence of parameter uncertainty on the low-carbon design optimization of reinforced concrete continuous beams, *Structural Concrete*, 24(1), 855-871. <https://doi.org/10.1002/suco.202100903>
- Zhu, E., Najem, R. M., Dinh-Cong, D., Shao, Z., Wakil, K., Ho, L. S., ... & Mohamed, A. M. (2020). Optimizing reinforced concrete beams under different load cases and material mechanical properties using genetic algorithms, *Steel and Composite Structures*, 34(4), 467-485. <https://doi.org/10.12989/scs.2020.34.4.467>