


Betonarme ön üretimli makas kirişlerin değişen tasarım momentleri altında beton dayanımlarına bağlı optimal kesit değerlerinin belirlenmesi

Determination of optimal cross-section values of precast roof beams under changing design bending moments and in terms of different concrete strengths

Mehmet Kevser DERDİMAN^{1*} 

¹İnşaat Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta, Türkiye.
mehmetderdیمان@isparta.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 06.03.2021
Kabul Tarihi/Accepted: 18.06.2021

Düzeltilme Tarihi/Revision: 03.06.2021

doi: 10.5505/pajes.2021.25477
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Birçok endüstriyel tasarımlar ve mühendislik uygulamalarında olduğu gibi betonarme yapı elemanlarında da optimal tasarımlar hem performans hem de ekonomi açısından çok önemlidir. Betonarme yapı elemanlarının ekonomik tasarımı yönetmeliklerdeki koşul ve sınırlamalardan dolayı karmaşık bir tasarım zorluğuna sahiptir. Ayrıca tasarım aşamasında çok sayıda kesit seçeneği mevcuttur, bu yüzden genelde başlangıç kesit tercihleri ampirik olarak gerçekleştirilir ve ekonomik olmayan kesitlerin tercihi söz konusudur. Tasarım mühendisinin farklı eğilme momentleri altında ve farklı beton sınıfları için optimal donatı oranları ile tasarım yapması ekonomik kesitlerin elde edilmesini sağlayacaktır. Bu çalışmada, ön üretimli makas kirişlerinin kesitleri TS 500 hesap yöntemleri ile değişen tasarım eğilme momentleri ve beton sınıfları altında optimal kesit değerlerinin belirlenmesi için optimizasyon analizi yapılmıştır. Optimizasyon TS 500 ve TBDY-2018 kısıtları ile gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon aracı olarak yaygın şekilde bilinen meta-sezgisel algoritmik yaklaşımlardan genetik algoritma tekniği kullanılmıştır. Bu amaçla model olarak farklı dayanımlı beton sınıflarına sahip makas kirişleri, basınç donatıları da dikkate alınarak, değişen tasarım eğilme momentleri altında kesit boyutları ve donatı kesit alanları minimum maliyeti verecek şekilde optimizasyonu yapılmıştır. Analiz sonuçlarında değişen tasarım eğilme momentleri altında beton sınıflarına bağlı olarak optimal kesit değerleri ve çekme donatısı oranlarındaki değişim belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Ön üretimli makas kirişi, Optimal donatı oranı, Kiriş optimizasyonu, Genetik algoritma.

Abstract

As with many industrial designs and engineering applications, optimal designs in reinforced concrete building elements are very important both in terms of performance and economy. The economic design of reinforced concrete building elements has complex design problems due to the conditions and limitations in design codes. In addition, a large number of cross-section options are available at the design stage, so usually initial cross-section preferences are performed empirically and non-economical cross-sections are preferred. The design engineer's design under different bending moments and with optimal reinforcement ratios for different concrete classes will ensure that economical sections are obtained. In this study, optimization analysis was performed to determine optimal cross-section values under the changing design bending moments and concrete classes using TS 500 calculation methods of cross-sections of precast RC roof beams. Optimization was carried out with TS 500 and TBDY-2018 constraints. In optimization, the genetic algorithm technique has been used from widely known meta-Heuristic Algorithmic approaches. For this purpose, precast roof beams with different strength concrete classes and compression reinforcements are taken into account as a model, and the cross-section dimensions and reinforcement cross-sectional areas are optimized under varying design bending moments to give minimum cost. In the results of the analysis, optimal cross-section values and change in ratio of the longitudinal steel reinforcement were determined depending on concrete classes under changing design bending moments.

Keywords: Precast roof beam, Optimal reinforcement ratio, Beam optimization, Genetic algorithm.

1 Giriş

Optimizasyon mühendislik, endüstriyel tasarımlar ve iş faaliyetleri gibi birçok uygulamada çok önemlidir. Optimizasyon işleminin amaçları enerji tüketimini ve maliyetleri en aza indirmek veya karı, çıktıyı, performansı veya verimliliği en üst düzeye çıkarmaktır [1]. Buna ek olarak, ürün tasarımları performansı, sürdürülebilirliği ve enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmalı ve maliyetleri en aza indirmelidir. Çünkü zaman ve kaynaklar sınırlıdır ve bu değerli kaynakların optimal kullanımı çok önemlidir [2]. Ayrıca yapılarının inşası çok büyük maliyetlerin yanında ilave olarak aşırı malzeme tüketimi açısından da büyük olumsuz çevresel ve sosyal sorunlara neden olmaktadır. Dolayısıyla, optimizasyon

birçok uygulama alanında olduğu gibi ekonominin en ağırlıklı kısmını oluşturan inşaat sektöründe de oldukça önemlidir [3].

Optimizasyon problemleri, üretilen çözümlere dayalı olarak iki türe ayrılabilir: Klasik matematiğe dayalı deterministik algoritmalar ve stokastik algoritmalar. Stokastik algoritmalar ayrıca sezgisel ve metasezgisel teknikler olarak sınıflandırılabilir [4].

Deterministik algoritmalar ile matematiksel optimizasyon, matematiksel araçlar ile analitik olarak tasarım problemlerinin incelenmesidir. Deterministik algoritmaya sahip doğrusal programlama bunun bir örneğidir. Bu algoritmaların çoğu türev ilişkilerine (çok boyutlu problemlerde gradyan ilişkilerine) dayanır. Fakat gerçekte karşılaşılan tasarım problemlerin çoğunluğu, değişkenleri ile doğrusal ilişkiye sahip

*Yazışılan yazar/Corresponding author

değildir bu nedenle doğrusal olmayan problemler şeklinde karşımıza çıkar. Bu şekilde çok boyutlu doğrusal olmayan bir problemin başarılı bir şekilde çözümlenmesi gelişmiş optimizasyon araçlarını gerektirir. Bu tür doğrusal olmayan ve kısıtlara tabi problemlerde meta-sezgisel arama algoritmaları optimizasyon çözümlerinde vazgeçilmez araçlardır.

Geçmişten beri bir çok problem çözümünde deneme yanılma kullanılmıştır ve bu genellikle sezgisel teknik olarak kabul edilir. Meta-sezgisel yöntemler ise mühendislikteki tasarım optimizasyonunda, özellikle deterministik yöntem ile çözülemeyen problemlerde başarı sağlamak için tasarlanmış üst düzey tekniklerdir. Bu yöntemler, çok çeşitli problemlere uygulanabilir ve çok az veya hiç hesaplama çabası olmadan, kombinasyonla iyi çözümler bulabilirler [4]. Bu yöntemlerin çoğunluğu doğadan ilham alan optimizasyon algoritmalarıdır. Bilimsel ve mühendislik optimizasyon problemlerinin çeşitli alanlarındaki yaygın uygulamalarda giderek daha fazla popülerlik kazanmış ve bu konuda çok sayıda bilimsel araştırma yapılmıştır [5].

Meta-sezgisel yöntemler, genetik algoritma, tavlama benzetimi algoritması, karınca ve arı kolonisi optimizasyonu, harmoni arama algoritması ve parçacık sürü algoritması gibi çok sayıda algoritmayı içerir [6]. Bu geniş çeşitliliğe rağmen hala en fazla kullanılan yöntemler parçacık sürü algoritması, karınca kolonisi optimizasyonu, harmoni arama algoritması, genetik algoritma ve tavlama benzetimi algoritmalarıdır. Fakat son yıllarda evrimsel tabanlı harmoni arama algoritması ve genetik algoritma çok sayıda araştırmaya konu olmuştur en yaygın optimizasyon teknikleridir [7].

1.1 Genetik algoritma

Meta-sezgisel yöntemler arasında genetik algoritma (GA) en yaygın kullanılan evrimsel bir algoritmadır, algoritma yapısı doğal seleksiyon modeli üzerine kurgulanmıştır. Algoritmanın çekirdek yapısı en iyi bireylerin yaşatılması prensibine dayanır. Bir çok yükleme ve kısıtlar içeren ayrık değişkenlere sahip yapıların tasarım optimizasyonlarında uygulanabilme avantajına sahiptir [8].

Genetik algoritmaların özü, çözüm kümesini ifade eden bireylerin (kromozomların) vektör olarak kodlanmasını, popülasyonu oluşturan çok sayıda vektörün genetik operatörler tarafından değiştirilme işlemlerini ve ilgili soruna bir çözüm bulmak amacıyla uygunluğuna göre seçimini içerir.

Bu genellikle şu prosedürle yapılır:

- 1) Çözüm için problemin matematik modelinin geliştirilmesi, modeldeki amaç (fitness) fonksiyonu ve kısıtların kodlanması,
- 2) Çok sayıda değişken sayısına bireyleri olan rastgele popülasyon oluşturmak ve her bireyin performanslarının değerlendirilmesi,
- 3) Çaprazlama, mutasyon ve performans-orantılı üreme kullanılarak yeni bireylerin üretilmesi, performanslarına göre seçilmiş yeni bireylerin eski performansları düşük bireylerle değiştirilmesi ve bu işlemin çözüm kriteri sağlanıncaya kadar döngüsel olarak yapılması [2],[8].

Aşağıda genetik algoritma yapısı kısaca özetlemektedir:

1. Belirli bir sayıda rastgele çözüm kümelerinden oluşan bir başlangıç popülasyonu oluşturulur,
2. Başlangıç popülasyonun her bir üyesinin amaç fonksiyon değerleri hesaplanır ve puanlama yapılır.

3. Bu popülasyonun nesilden nesile güncellenmesi ve yeni popülasyonun elde edilmesi için aşağıdaki adımlar döngüsel olarak gerçekleştirilir:
 - a. Puanlar kullanışlı bir değer aralığına dönüştürmek için ölçeklendirilir. Bu ölçeklendirilmiş değerlere beklenti değerleri denir. Puanları yüksek bireylerden ebeveyn olarak adlandırılan üyeler seçilir (seleksiyon).
 - b. Ebeveyn çiftleri çaprazlanarak yeni bireyler üretilir (çaprazlama).
 - c. Yeni bireylerde belirlenen oranlarda rastgele mutasyonlar ile küçük değişiklikler yapılır (mutasyon).
 - d. Yeni bireylerin amaç fonksiyon değerleri hesaplanır, kısıtlara uymayan bireylerinin değerleri ceza (penalty) fonksiyonu ile artırılır ve puanlama yapılır. Yeni bireyler popülasyona ilave edilir. Popülasyondan ilave edilen yeni birey kadar en zayıf bireyler yok edilir.
4. Öngörülen jenerasyon sayısına erişildiğinde veya uygunluk kriteri karşılandığında veya zaman limiti dolduğunda algoritma döngüsü durdurulur.

Bu algoritmada seleksiyon, çaprazlama ve mutasyon olmak üzere üç temel operatör ve bunlara ait bir takım parametreler mevcuttur. Bu parametrelerin doğru seçimi optimizasyonun başarısı açısından önemlidir. Çaprazlama olasılığı, mutasyon olasılığı, jenerasyon sayısı ve popülasyon sayısı en önemli parametreler olarak sayılabilir.

Seleksiyon işlemi için geliştirilmiş bir çok algoritma mevcuttur, en yaygın kullanılan rulet çarkı ve turnuva yöntemleridir. Rulet çarkı yöntemi bireylerin amaç fonksiyonundaki performanslarının tüm bireylerin performanslarının toplamına oranını bir rulet çarkı üzerinde yüzde dilimi şeklinde temsil edilmesi mantığına dayanır. Bu durumda iyi bireylerin çark üzerindeki yoğunluğu arttığı için rastgele olarak seçilen ebeveynin iyi bireylerden seçimi sağlanmış olur.

Çaprazlama seçilen ebeveyn çiftlerinden yeni bireylerin üretilmesi işlemidir. Bu işlem bireylerin tek noktasından veya çift noktasından genlerin değişimini içerir (Tablo 1). Çaprazlamada popülasyonun ne kadarının kullanılacağı çaprazlama olasılığı ile belirlenir. Çaprazlama olasılığı genellikle 0.5~1 aralığında seçilir [9]. Çaprazlama sonucunda daha iyi performanslı bireyler de elde edilebilir, daha kötü bireyler de elde edilebilir.

Tablo 1. Beş boyutlu bir problem için tek noktadan ve çift noktadan genlerin çaprazlanması.

Table 1. Cross overing genes from single point and double point for a five-dimensional problem.

Değişkenler →	Tek Noktadan Çaprazlama					Çift Noktadan Çaprazlama				
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅
Ebeveyn 1 →	A1	B1	C1	D1	E1	A1	B1	C1	D1	E1
Ebeveyn 2 →	A2	B2	C2	D2	E2	A2	B2	C2	D2	E2
Yeni Birey 1 →	A1	B1	C2	D2	E2	A1	B1	C2	D2	E1
Yeni Birey 2 →	A2	B2	C1	D1	E1	A2	B2	C1	D1	E2

Mutasyon bazı genlerin değişime uğramasıdır. İki ana amacı vardır: (a) çözüm uzayında daha fazla bölgenin taranmasını sağlamak ve (b) iyi çözümlerin daha da iyileştirilmesini sağlamaktır [9]. Mutasyon prosedürü aşağıdaki gibi özetlenebilir: Yeni birey dizisinin her geni için, rastgele oluşturulmuş bir sayı mutasyon olasılığı ile karşılaştırılır ve rastgele sayı mutasyon olasılığından daha az ise, o konumdaki gen değeri değiştirilir; aksi takdirde, bir sonraki gene geçilerek işlem tekrarlanır [10]. Örneğin Tablo 1'deki yeni elde edilmiş bireyin genleri için rastgele 0-1 aralığında değerler seçilir. Rastgele değerler: $A1 \rightarrow 0.524$, $B1 \rightarrow 0.235$, $C2 \rightarrow 0.002$, $D2 \rightarrow 0.985$ ve $E2 \rightarrow 0.754$ olduğunu kabul edersek ve mutasyon olasılığı 0.05 ise bu değerden küçük olan yalnızca C2 geni mutasyona uğrar, bu işlem, C2 değerine belirli ölçek aralığında rastgele çok küçük bir sayının eklenmesi veya çıkartılması şeklinde yapılır. Çaprazlamada olduğu gibi, mutasyonda daha iyi veya daha kötü çözümler ortaya çıkarabilir.

Mutasyon olasılığı genellikle küçüktür 0.001~0.05 aralığında seçilir. Eğer çok küçükse, çözüme yakınsama yavaşlayacak ve bu evrim için verimli olmayacaktır [1]. Mutasyon olasılığı çok yüksekse, arama rastgele hale gelecek ve optimal çözüme yaklaşırken başka bir noktaya sıçrama ihtimali ortaya çıkacaktır.

Doğru popülasyon büyüklüğünün seçimi de çok önemlidir. Eğer çok küçükse, yeterince evrim devam etmez ve tüm popülasyonun yok olma riski vardır. Çok büyük popülasyon ise optimizasyon süresini uzatacaktır.

Genetik algoritmanın 1990'lı yıllarda uygulamaları yaygınlaşmaya başlamış bu çerçevede betonarme yapı elemanlarının tasarımına dair örnekleri ortaya çıkmıştır. Paki Turgut ve diğ. [11] tarafından yapılan çalışmada basit mesnetli 6 m'lik açıklığa sahip ve düzgün yayılı tasarım yükü altındaki kirişi genetik algoritma ile optimize etmişlerdir. Betonarme kirislere ait benzer optimizasyon çalışmaları da çokça mevcuttur [10], [12]-[15]. Betonarme yapıların tasarımında ve yapımında malzeme maliyeti önemli bir konudur. Dolayısıyla betonarme elemanların optimum tasarımı, araştırmacıların ve profesyonel mühendislerin artan ilgisini çekmektedir.

Çelik yapılar için optimizasyon problemi bir ağırlık minimizasyonu iken, betonarme yapılar için optimizasyon problemi, farklı malzemeler söz konusu olduğu için bir maliyet minimizasyonu problemidir ve buna göre formüle edilmelidir [16]. Betonarme yapı elemanların maliyeti, kalıp, beton ve donatı olmak üzere bir dizi maliyet kaleminden etkilenir. Bu nedenle, minimum ağırlık tasarımı, minimum maliyeti sağlamayacaktır. Bu elemanlar için optimum maliyet tasarımı, beton, donatı ve kalıp miktarı ve iççiklik değişkenlerini içeren bir

problemdir. Betonarme elemanların maliyet optimizasyonunda, elemanların enine kesit boyutları ve donatı miktarının optimum değerleri elde edilmelidir [14], [15].

FIB Bültenine (FIB 2002) göre, karma yapı (ön üretim ve yerinde üretimin aynı yapı inşasında kullanılma durumu), son 10-15 yılda ön üretimli betonarme elemanların artmasından dolayı, Avrupa ve Kuzey Amerika'da yeni çok katlı yapıların %75'inden fazlasında kullanılmakta ve ilgili yapı elemanları daha fazla fabrikasyon olarak üretilmektedir [17]. Dolayısıyla bu elemanların optimal tasarım önem arz etmektedir.

Bu çalışmanın amacı, TBDY 2018 [18] kısıtları altında 15 m uzunluğundaki betonarme makas kirişinin artan yük ile ortaya çıkan farklı eğilme momentlerinde optimal kesit değişkenlerinin ve optimal donatı oranlarının maliyeti minimize edecek şekilde belirlenmesidir. Bu çerçevede geçmişteki araştırmalardan farklı olarak,

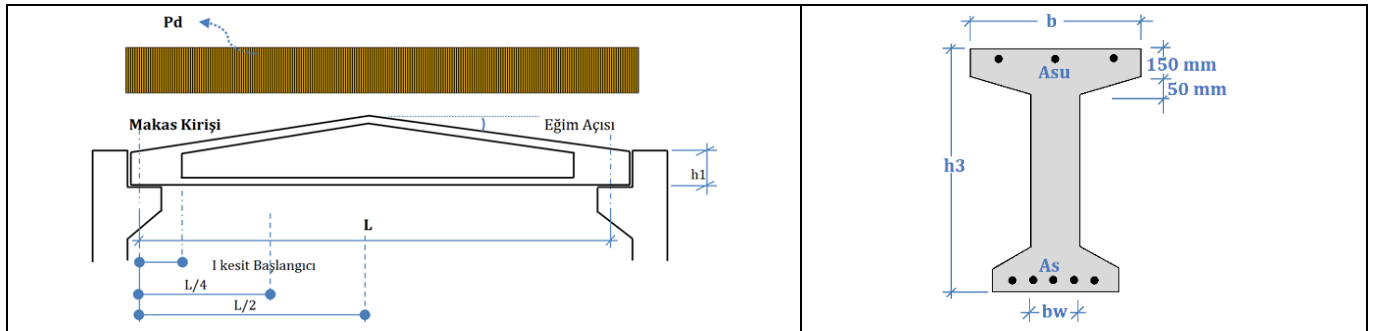
- Eğimli I kesitli ön üretimli makas kirişinin optimizasyonu yapılmıştır,
- Basınç donatısının optimal tasarımda değişip değişmediği incelenmiştir,
- Farklı beton sınıflarının optimal tasarım üzerine etkisi incelenmiştir,
- Optimizasyon makas kirişi üzerine etki eden farklı tasarım yükleri için gerçekleştirilmiştir.

2 Optimizasyon modeli

Şekil 1'de verilen ön üretimli makas kirişi Pd yayılı yüküne maruzdur. Kirişte bu yük etkisi ile ortaya çıkan kesit zorlarından eğilme momentini karşılayacak, kiriş kesit değerleri ile çekme ve basınç donatısı kesit alanlarının, TS 500 taşıma gücü yöntemi ve TBDY 2018 konstruktif kısıtları altında maliyet açısından optimizasyonu kurgulanmıştır.

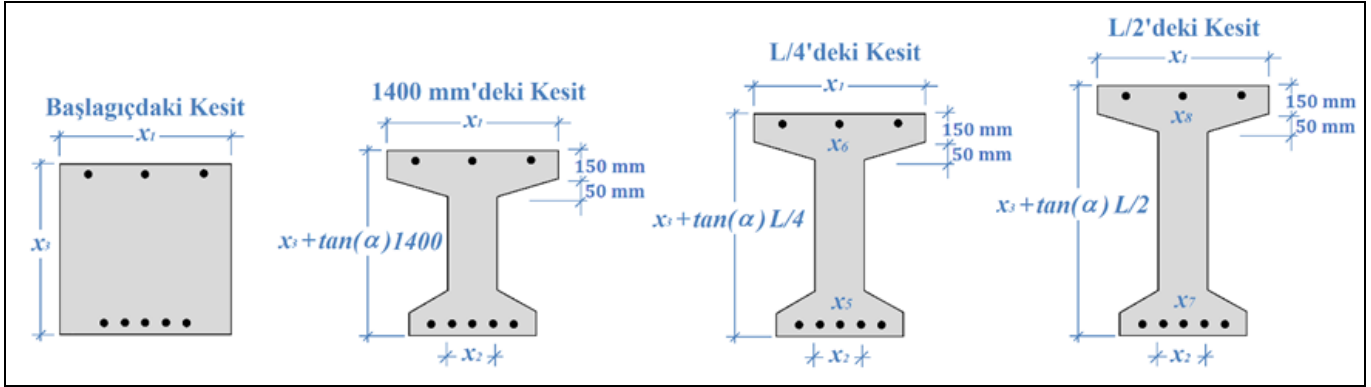
Problem çözümü için Matlab programlama dili ile bir program geliştirilmiş, bu program ile değişen tasarım yükleri için analiz yapılmıştır.

Optimizasyon problemi 9 boyutlu dolayısıyla $k = 9$ değişkenli olarak ele alınmıştır. Değişkenlerimiz $x_1 = b$ kiriş üst tabla genişliğini, $x_2 = b_w$ kiriş gövde genişliğini, $x_3 = h_1$ kiriş başlangıç yüksekliğini, $x_4 = \alpha$ çatı dolayısıyla kiriş eğim açısını, $x_5 = A_s$ L/4'de çekme donatısı kesit alanını, $x_6 = A'_s$ L/4'de basınç donatısı kesit alanını, $x_7 = A_s$ L/2'de çekme donatısı kesit alanını, $x_8 = A'_s$ L/2'de basınç donatısı kesit alanını ve $x_9 = f_{ck}$ beton karakteristik basınç dayanımını ifade etmektedir. Şekil 2'de kiriş kesiti ve ilgili değişkenler verilmiştir.



Şekil 1. Ön Üretimli Makas kirişi ve kesiti.

Figure 1. Precast Roof beam and its cross section.



Şekil 2. Kirişin kesitleri ve optimizasyon modelindeki kesit değişkenleri.

Figure 2. Beam sections and section variables in optimization model.

Kodlanan programda beton karakteristik basınç dayanımı f_{ck} değişkeni TBDY 2018 minimum şartı gereği 30 MPa (C30/37) 'dan 50 MPa (C50/60)'a kadar ve farklı tasarım eğilme momentlerini veren Pd tasarım yükü 8 kN/m den 45 kN/m ye her adımda 1 kN/m döngüsel olarak artırılarak, farklı beton sınıfları ve L=15000 mm kiriş boyu için optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Çatı eğimi 8°, kirişin üst ve alt tabla kalınlığı 150 mm ve gövde genişliği 150 mm alınmıştır. Yani x_2 , x_4 ve x_9 değişkenleri genetik olarak değişime girmiştir. Ayrıca kiriş üst tablasından kiriş gövdesine geçiş bölgesinde yer alan trapez bölge de hesaplarda dikkate alınmıştır. Paspayı tüm kesitler için 40 mm, kesitte ikinci sıra donatı durumu için ise 60 mm alınmıştır.

Betonarme çeliği ise hesaplarda sabit $f_{yk} = 420 \text{ N/mm}^2$ ve betonarme çeliği için malzeme katsayısı $\gamma_{ms} = 1.15$ alınmıştır. Tüm analizde denetimli bir kaynaktan elde edildiği varsayımı ile beton için malzeme katsayısı $\gamma_{mc} = 1.4$ ile hesap yapılmıştır.

Tüm analizlerde TS500 'ün [19] taşıma gücü varsayımları altında analizler gerçekleştirilmiştir. Bu varsayımlar şunlardır:

1. Beton ve donatı arasında tam kenetlenme vardır, uzama ve kısalmayı aynı oranda yaparlar,
2. Betonun çekme dayanımı ihmal edilir,
3. Birim şekil değiştirme dağılımı doğrusaldır (düzlem olan kesit şekil değiştirdikten sonra da düzlem kalır (BERNOULLI/NAVIER hipotezi),
4. Betonarme çeliğinin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi elasto-plastiktir ve Hooke kanununun geçerli olduğu bölgede elastisite modülü $E_s = 200 \text{ GPa}$ dır,
5. Taşıma gücüne erişildiğinde basınç bölgesinin en çok zorlanan beton lifindeki maksimum birim kısalma 0.003 dür,
6. Beton basınç bloğundaki gerilme dağılımı TS500:2000 Madde 7.1'de tanımlanan eşdeğer dikdörtgen basınç bloğu modelindeki gibidir.

Amaç fonksiyonu, beton ve betonarme çeliğinin Tablo 2'de verilen 2020 fiyatları dikkate alınarak maliyeti minimize edecek şekilde kodlanmıştır.

Ön üretimli beton konstrüksiyonun temel amacı, kalıp maliyetini azaltmaktır. Aynı kalıpta, çeşitli bileşenler üretilebilir ve kalıp yeniden defalarca kullanılabilir [21]. Makas kirişleri fabrika üretimi olduğundan dolayı kalıplar ilk üretimi yüksek fakat defalarca kullanılabilirliğinden dolayı üretimde

kalıp maliyeti oldukça düşük olmaktadır. Çevre ve şehircilik bakanlığının birim fiyat listelerinde yer almadığından dolayı normal kalıp fiyatının yaklaşık 1/3 'ü oranında (20 ₺/m²) alınmıştır.

Tablo 2. 2020 yılına ait birim fiyatlar [20].

Table 2. Unit prices for the year 2020 [20].

C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60	B420C	B420C
₺/m ³	₺/m ³	₺/m ³	₺/m ³	₺/m ³	₺/m ³	₺/kg	₺/m ³
185	192	205	217	222	228	2.68	20904

2.1 Optimizasyon probleminin matematiksel ifadesi

Optimizasyon probleminin genel matematiksel ifadesi Denklem (1)'deki gibidir.

$$\text{Optimizasyon: } \begin{cases} \min_{x_i \in [x_i^l, x_i^u]} f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{Kısıtlar: } \begin{cases} g_j(x) \leq g_j^* \\ j = 1, 2, \dots, k \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

Minimize edilmesi istenen amaç fonksiyonunun ($f(x_1, x_2, \dots, x_n)$) doğru ifade edilmesi, uygunluk düzeyi yüksek çözümlerin verimli bir şekilde seçilmesini sağlayacaktır. Zayıf amaç fonksiyonu yanlış veya anlamsız çözümlere neden olabilir [1]. Burada amaç fonksiyonu ağırlığı minimize edecek şekilde değil, fiyatı minimize edecek şekilde kurgulanmıştır. Fonksiyon içerisinde kullanım için beton ve betonarme çeliğinin her ikisi içinde birim fiyat ₺/m³ şekline dönüştürülmüştür.

Kirişin birim boy maliyetini veren amaç fonksiyonu şunları içermektedir:

- Hacimsel mesnet, gövde, üst ve alt tabla bölgelerindeki toplam beton miktarı ile fiyatını çarpımını,
- Betonarme çeliği olarak kesme donatısı, gövde donatısı, L/4 ve L/2 deki çekme ve basma eğilme donatılarının toplam miktarı ile fiyatının çarpımını,
- Kirişin yüzey kalıp alanı miktarı ile fiyatını çarpımını.

Amaç fonksiyonu içerisindeki hesaplamada kirişin gövde donatısı kiriş yüksekliğine bağlı olarak ve kesme donatısı ise kiriş yüksekliğine, kiriş gövde genişliğine, kiriş üst tabla genişliğine, malzemeye ve kesme kuvvetine bağlı olarak her noktada dikkate alınmıştır.

Amaç fonksiyonu değişkenlerin kısıt şartlarına uymaması durumunda ceza (penalty) eklemesi olacak şekilde programlanmıştır. Kısıtlara uymayan bireylerin uygunluk

değerine belirli ceza değerleri eklenmesi o bireyin seleksiyonda yok edileceği anlamına gelir.

Probleme ait değişkenlerin alt ve üst sınırları Tablo 3'te verilmiştir. Çekme donatısı ve basınç donatısının alt sınırı ise 2Ø12 'in kesit alanı 226 mm² olarak alınmıştır.

Burada donatı miktarlarının, kiriş yükseklik ve genişliğinin 1 mm değişim hassasiyetinde tercih edilme sebebi, farklı tasarım momentleri altında optimum donatı oranlarının elde edilmek istenilmesindedir. Gerçekten bu problem kombinatorik optimizasyon problemidir fakat burada hedeflenen eğilme momentlerine göre optimal donatı oranının aranması olduğu için problem kısıt bölgeleri hariç sürekli optimizasyon problemi olarak incelenmiştir.

Tablo 3. Optimizasyon değişkenlerinin alt ve üst sınır aralıkları.

Table 3. Lower and upper bounds of optimization variables.

Değişkenler	Alt sınır	Üst sınır	Değişim Hassasiyeti
b (mm)	200	800	1
b_w (mm)	150	150	0
h₁ (mm)	300	900	1
α (derece)	8	8	0
A_s (mm²) L/4'de	226	10000	1
A'_s (mm²) L/4'de	226	5000	1
A_s (mm²) L/2'de	226	10000	1
A'_s (mm²) L/2'de	226	5000	1

Problemdeki kısıtlar fonksiyonu içerisinde ise çekme donatısı oranının (ρ) kısıtları Denklem (2)-(4)'te gösterilmiştir.

$$\rho - \rho' \leq 0.85 \rho_b \rightarrow (A_s - A'_s) - (0.85 \rho_b b_w d) \leq 0 \quad (2)$$

$$\rho \leq 0.02 \rightarrow A_s - 0.02 b_w d \leq 0 \quad (3)$$

$$\rho \geq 0.8 \frac{f_{cta}}{f_{yd}} \rightarrow 0.8 \frac{f_{cta}}{f_{yd}} b_w d - A_s \leq 0 \quad (4)$$

Kirişin sehim kontrolü gerektirmeyecek şekilde tasarımı için [22]'de verilen sehim kontrolü gerektirmeyen donatı oranı (ρ_l = 0.235 f_{cd}/f_{yd}) üst sınırı kısıtı da Denklem (5)'te verilen şekliyle optimizasyona dahil edilmiştir.

$$\rho \leq 0.235 \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \rightarrow \rho - 0.235 \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \leq 0 \quad (5)$$

Kirişin üst tabla genişliğine ilişkin kısıt ise Denklem (6)'da verildiği gibidir.

$$b \geq L_n/50 \rightarrow L_n/50 - b \leq 0 \quad (6)$$

Yönetmelik gereği yüksek asal basınç gerilmeleri nedeni ile gövde betonunun ezilmesini önlemek amacıyla, hesap kesme kuvveti Denklem (7)'de gösterildiği gibi sınırlanmıştır. Buradaki hesap kesme kuvveti makas kirişinin I kesit başlangıcındaki değerdir. Yani mesnetten 1400 mm uzaklıktaki kesme kuvvetidir.

$$V_d \leq 0.22 f_{cd} b_w d \rightarrow V_d - 0.22 f_{cd} b_w d \leq 0 \quad (7)$$

Optimizasyonda popülasyonun her bireyi ve her jenerasyon için, kesite, malzemeye ve kesme kuvvetine bağlı olarak kesme donatısı (A_{sw} ve s) hesaplanıp kısıtları sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmiştir. Kesme donatısı açıklık boyunca minimum bir oranda ve aralıkta bulunmak zorunluluğu mevcuttur, bu kısıt Denklem (8) ve (9)'da verilmiştir.

$$A_{sw} \geq \frac{0.3 f_{cta} b_w s}{f_{ywd}} \rightarrow \frac{0.3 f_{cta} b_w s}{f_{ywd}} - A_{sw} \leq 0 \quad (8)$$

$$s \leq d/2 \rightarrow s - d/2 \leq 0 \quad (9)$$

Buradaki tüm optimizasyon kısıtlarının sırasıyla kodlamaya esas teşkil eden matematiksel ifadeleri ve optimizasyondaki kısıt fonksiyonları, yukarıdaki koşullar bağlamında Denklem (10)-(20)'deki gibidir.

$$g_1(x) = (x_5 - x_6) - 0.85 \rho_b x_2 \left((x_3 + \frac{L}{4} \tan x_4) - d' \right) \leq 0 \quad (10)$$

$$g_2(x) = (x_7 - x_8) - 0.85 \rho_b x_2 \left((x_3 + \frac{L}{2} \tan x_4) - d' \right) \leq 0 \quad (11)$$

$$g_3(x) = x_5 - 0.02 x_2 \left((x_3 + \frac{L}{4} \tan x_4) - d' \right) \leq 0 \quad (12)$$

$$g_4(x) = x_7 - 0.02 x_2 \left((x_3 + \frac{L}{2} \tan x_4) - d' \right) \leq 0 \quad (13)$$

$$g_5(x) = (x_5 - x_6) - \rho_l x_2 \left((x_3 + \frac{L}{4} \tan x_4) - d' \right) \leq 0 \quad (14)$$

$$g_6(x) = (x_7 - x_8) - \rho_l x_2 \left((x_3 + \frac{L}{2} \tan x_4) - d' \right) \leq 0 \quad (15)$$

$$g_7(x) = (0.8 f_{cta}/f_{yd}) x_2 \left((x_3 + \frac{L}{4} \tan x_4) - d' \right) - x_5 \leq 0 \quad (16)$$

$$g_8(x) = (0.8 f_{cta}/f_{yd}) x_2 \left((x_3 + \frac{L}{2} \tan x_4) - d' \right) - x_7 \leq 0 \quad (17)$$

$$g_9(x) = x_{10}/50 - x_1 \leq 0 \quad (18)$$

$$g_{10}(x) = \frac{0.3 f_{cta} x_2 s}{f_{ywd}} - A_{sw} \leq 0 \quad (19)$$

$$g_{10}(x) = s - ((x_3 + 1400 \tan x_4) - d')/2 \leq 0 \quad (20)$$

Güvenlik kısıtlamaları da, Denklem (21)-(25)'de verilmiştir.

$$V_d(x, P_d) - V_{max}(b_w, d, f_{cd}) \leq 0 \quad (21)$$

$$g_{11}(x) = V_d(x, P_d) - V_{max}(x_2, x_3, x_4, f_{cd}) \leq 0 \quad (22)$$

$$M_d - M_r(b, b_w, h, A_s, A'_s, f_{ck}, f_{yk}) \leq 0 \quad (23)$$

$$g_{12}(x) = M_d(x, P_d, \frac{L}{4}) - M_r(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, f_{ck}, f_{yk}) \leq 0 \quad (24)$$

$$g_{13}(x) = M_d(x, P_d, \frac{L}{2}) - M_r(x_1, x_2, x_3, x_4, x_7, x_8, f_{ck}, f_{yk}) \leq 0 \quad (25)$$

Burada, M_d tasarım momentini, M_r ise taşıma gücü momentini ifade etmekte olup, M_d yük katsayıları dikkate alınarak, M_r ise malzeme katsayıları dikkate alınarak hesaplandığı için Denklem (24) ve (25)'te verilen şart kirişin taşıma gücü güvenliğini ifade eder. Bu ifadedeki M_r taşıma gücü kapasitesi basınç donatısına da bağımlı olarak değişmektedir. Bu durum kendi içinde ilave bir kısıtlamayı beraberinde getirmektedir. Buna ilişkin kısıt, kesitin Bernoulli-Navier hipotezine uygun olarak eğilme sonrası düzlem kaldığı varsayımı ile elde edilecek şekil değiştirme (süreklilik) bağıntısı gereği basınç donatısında akma olup olmadığına dairdir. Eğer basınç donatısındaki birim kısalma değeri ε_s' ≥ f_{yd}/E_s ise basınç donatı akmış kabulüyle gerilme değeri f_{yd} = 365.22 N/mm², tersi durumda ise Hooke kanununa uygun olarak gerilme değeri σ_s' = E_s ε_s' alınmıştır.

Optimizasyon modeli tek amaçlı olarak kurgulanmış, optimal sehim, optimal eğrilik kapasitesi ve optimal mimari gereksinim durumları amaç fonksiyonuna dahil edilmemiştir.

2.2 Genetik parametrelerin seçimi

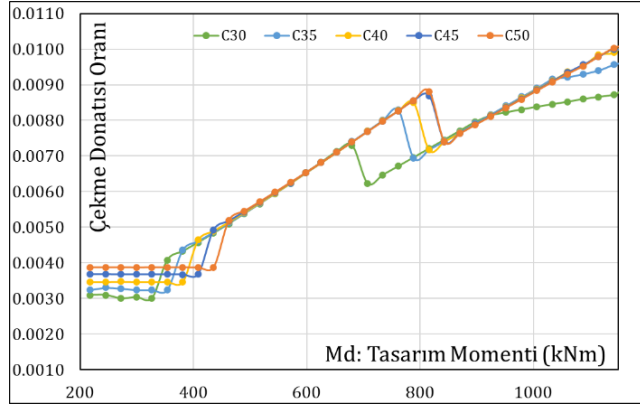
Bu çalışmada seleksiyon işleminde ebeveyn çiftlerinin seçimi rulet çarkı yöntemine göre yapılmıştır. Popülasyonun %80'i (çaprazlama olasılığı 0.8) ebeveyn olarak kullanılmış, ebeveyn çiftleri arasında tek noktadan çaprazlama yapılmıştır.

Yeni jenerasyonlar üniform dağılımlı ve 0.01 olasılık değerli mutasyon fonksiyonu kullanılarak üretilmiştir. Maksimum jenerasyon sayısı 350 alınmıştır.

Popülasyon büyüklüğü normalde problem boyutuna bağlı olmakla birlikte bu problem boyutu için 500 almak yeterli iken burada 1000 alınmıştır.

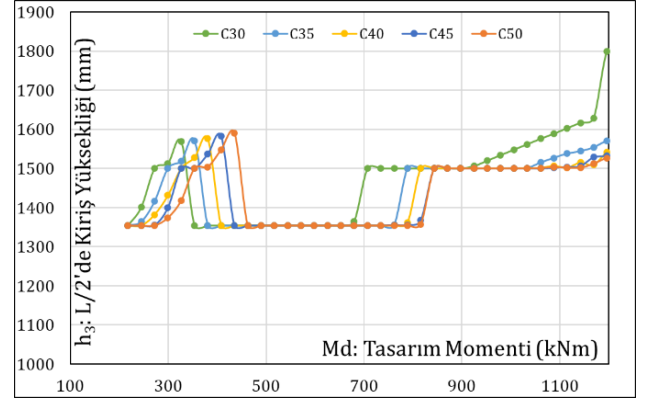
3 Optimizasyon sonuçları

Beton sınıfı ve artan tasarım eğilme momentlerine bağlı olarak optimal donatı oranlarındaki ve kiriş yüksekliğindeki değişim sırasıyla Şekil 3 ve 4'te verilmiştir.



Şekil 3. Beton sınıflarına göre tasarım eğilme momenti-optimal donatı oranları ($M_d - \rho_3$) ilişkisi.

Figure 3. Relationship between design bending moment and optimal reinforcement ratios ($M_d - \rho$) according to concrete classes.



Şekil 4. Beton sınıflarına göre tasarım eğilme momenti-optimal kiriş yüksekliği ($M_d - h_3$) ilişkisi.

Figure 4. Relationship between design bending moment and optimal beam height ($M_d - h_3$) according to concrete classes.

Tasarım yükü Pd değerleri, 3'ün katı olacak şekilde filtrelenerek kiriş ortasında ve kirişin dörtte birindeki optimal donatı oranları ve bu donatı oranları için seçilmesi gereken optimal kesit yükseklikleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tüm analizlerde üst tabla genişliği b değeri TBDY 2018 kısıtını ($b \geq L/50$) sağlayan en küçük değerde (300 mm) kalmıştır. Bunun nedeni, kesitte yükseklik ve çekme donatılarındaki değişim miktarlarının moment taşıma gücü üzerindeki etkisinden kaynaklanmaktadır. Yani en uygun değer için maksimum fayda sağlayacak parametreler değişmiştir.

Kirişte basınç donatısı da, moment taşıma gücü üzerindeki etkisinin az olmasından dolayı optimizasyonda tanımlanmış olan alt sınır değerinde kalmıştır.

Yaklaşık 350-400 kNm tasarım eğilme momenti değerlerine (bu yaklaşık Pd=13-15 kN/m tasarım yükü etkisidir) kadar optimal donatı oranının %0.3-0.4 civarında yani minimum donatı oranında çıkmıştır fakat beton sınıfına bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Burada beton dayanımındaki artış ile donatı oranının artması, örneğin C50/60 beton sınıfı için daha yüksek oranda donatı çıkması, ilgili beton için minimum donatı oranının da yüksek olması nedeniyledir.

Tablo 4. Optimal kesit yüksekliği ve donatı oranları.

Table 4. Optimal section height and reinforcement ratios.

Pd kN/m	C30/37						C40/50				C50/60			
	Md ₃ kNm	Md ₂ kNm	h ₃ mm	ρ_3	h ₂ mm	ρ_2	h ₃ mm	ρ_3	h ₂ mm	ρ_2	h ₃ mm	ρ_3	h ₂ mm	ρ_2
9	245	184	1401	0.0031	874	0.0057	1354	0.0035	827	0.0064	1354	0.0039	827	0.0066
12	326	245	1569	0.0030	1042	0.0050	1500	0.0035	973	0.0058	1418	0.0039	891	0.0069
15	408	306	1354	0.0046	827	0.0095	1354	0.0046	827	0.0095	1548	0.0039	1021	0.0064
18	490	367	1354	0.0054	827	0.0114	1354	0.0054	827	0.0113	1354	0.0055	827	0.0113
21	571	428	1354	0.0062	827	0.0134	1354	0.0062	827	0.0132	1354	0.0063	827	0.0132
24	653	490	1354	0.0071	827	0.0154	1354	0.0071	827	0.0152	1354	0.0071	827	0.0151
27	734	551	1500	0.0065	973	0.0122	1354	0.0080	827	0.0172	1354	0.0080	827	0.0170
30	816	612	1500	0.0072	973	0.0136	1500	0.0072	973	0.0134	1357	0.0088	830	0.0189
33	897	673	1500	0.0080	973	0.0151	1500	0.0079	973	0.0148	1500	0.0079	973	0.0147
36	979	734	1534	0.0083	1007	0.0154	1500	0.0086	973	0.0163	1500	0.0086	973	0.0161
39	1061	795	1576	0.0085	1049	0.0153	1501	0.0094	974	0.0177	1501	0.0093	974	0.0175
42	1142	857	1617	0.0087	1090	0.0152	1515	0.0099	988	0.0186	1502	0.0100	975	0.0189
45	1224	918	1800	0.0075	1273	0.0116	1545	0.0102	1018	0.0187	1528	0.0104	1001	0.0191

Tablo 6. Optimal donatı oranlarının farklı çalışmalar ile karşılaştırması (Birimler: Md: kN.m; fck: MPa; As': mm²).
Table 6. Comparison of optimal reinforcement ratios with different studies (Units: Md: kN.m; fck: MPa; As': mm²).

	Donatı Oranı	Bu Çalışmada L/2'deki Donatı Oranları	Bu Çalışmada L/4'deki Donatı Oranları
Champ ve diğ. [15].	0.007	0.003	0.006
	Md≈180	Md=218	Md=218
	fck≈27.6	fck=30	fck=30
Paki ve diğ. [11].	As'=568	As'=226	As'=226
	0.009	0.003	0.006
	Md≈225	Md=245	Md=245
Mathern ve diğ. [3].	fck=16	fck=30	fck=30
	As'=0	As'=226	As'=226
	0.014	0.006	0.013
Coello ve diğ. [24].	Md≈?	Md=544	Md=544
	fck=45	fck=45	fck=45
	As'=980	As'=226	As'=226
Algedra ve diğ. [14].	0.015	0.008	0.016
	Md≈700-800	Md=952	Md=952
	fck=?	fck=35	fck=35
	As'=0	As'=226	As'=226
	0.005	0.003	0.006
	Md≈200-220	Md=218	Md=218
	fck=?	fck=30	fck=30
	As'=0	As'=226	As'=226

4 Sonuç

Birçok endüstriyel tasarımlar ve mühendislik uygulamalarında olduğu gibi betonarme yapı elemanlarında da optimal tasarımlar hem performans hem de ekonomi açısından çok önemlidir. Betonarme yapı elemanların tasarımı aşamasında çok sayıda kesit seçeneği mevcuttur ve genelde başlangıç kesit tercihleri ampirik olarak gerçekleştirilir, ekonomik olmayan kesitlerin tercihi söz konusudur. Tasarım mühendisinin farklı eğilme momentleri altında ve farklı beton sınıfları için optimal donatı oranları ile tasarım yapması ekonomik kesitlerin elde edilmesini sağlayacaktır.

Bu çalışmada değişen tasarım yükleri ile ortaya çıkan farklı eğilme momentleri altında basınç donatılı makas kirişlerinin farklı beton dayanımlarındaki optimal kesit tasarımları yapılmış ve buradan optimal kiriş yüksekliği ve donatı oranları belirlenmiştir. Tasarımda bu donatı oranlarına uyulması ekonomik kesitlerin ortaya çıkmasını sağlayacaktır.

Yapılan analiz sonuçlarında şunlar gözlemlenmiştir,

- Optimizasyon değişkenlerinden kirişin yüksekliği ve çekme donatısının optimal tasarımında büyük oranda etkili olduğu görülmüştür,
- Basınç donatısının moment kapasitesine katkısının az olmasından dolayı optimal tasarımda minimum değerinde kalmıştır,
- Üst tabla genişliği de yönetmelikteki minimum kısıt değerinde kalmıştır,
- Beton sınıfları arasında önemli bir fark olmamakla birlikte C30/37 en avantajlı tercih olduğu görülmüştür,
- Ön üretilmiş makas kirişlerinde yaygın kullanılan C40/50 beton sınıfı ve 15 m açıklık için çoğunlukla karşılaşılan 400-700 kNm tasarım momenti aralığı için, 400 kNm'de optimal çekme donatısı oranı yaklaşık %0.5, 700 kNm'de ise doğrusal artarak yaklaşık %0.8 olmaktadır. Bu tasarım momentleri için kiriş başlangıç yüksekliği 300 mm, kirişin orta noktasındaki yüksekliği ise 1354 mm'de sabit kalmaktadır.

5 Conclusions

As in many industrial designs and engineering applications, optimal designs in reinforced concrete building elements are very important in terms of both performance and economy. During the design phase of reinforced concrete structural elements, there are many section options available, and generally the initial section preferences are made empirically, the preference of uneconomic sections may arise. The design engineer's design under different bending moments and with optimal reinforcement ratios for different concrete classes will provide economic cross-sections.

In this study, optimal cross-section designs of precast roof beams at different concrete strengths were made under different bending moments resulting from changing design loads, and from this, optimal beam height and reinforcement ratios were determined. Compliance with these reinforcement ratios in the design will lead to economic cross-sections.

In the results of the analysis, the following were observed:

- From the optimization variables, the height of the beam and the tensile reinforcement were largely effective in the optimal design,
- Due to the small contribution of the compressive reinforcement to the moment capacity, it remained at its minimum value in the optimal design,
- The width of the top table also remained at the minimum limit in the regulation,
- Although there is no significant difference between concrete classes, the C30/37 was the most advantageous choice,
- For the C40/50 concrete class commonly used in pre-production precast roof beams and the design moment range of 400-700 kNm, which is mostly encountered for 15 m span, the optimal reinforcement ratio at 400 kNm is about 0.5%, and at 700 kNm is about 0.8%, with a linear increase. For these design moments, the initial height of the beam remains constant at 300 mm, and the height at the midpoint of the beam remains constant at 1354 mm.

6 Semboller

$f(x)$: Minimum olması istenen amaç fonksiyonu veya fitness fonksiyonu (burada x birden fazla değişkeni olan bir vektördür)

$g(x)$: Kısıtlara ait fonksiyonlar,

ρ : Çekme donatısı oranı,

ρ_2 : L/4'de çekme donatısı oranı,

ρ_3 : L/2'de çekme donatısı oranı,

ρ' : Basınç donatısı oranı,

ρ'_2 : L/2'de basınç donatısı oranı,

ρ'_3 : L/2'de basınç donatısı oranı,

ρ_l : Sehim kontrolü gerektirmeyecek donatı oranı,

ρ_b : Dengeli donatı oranı,

x_i^L, x_i^U : Değişkenler için alt ve üst sınırlar,

$x_1 = b$: Kiriş üst tabla genişliği,

$x_2 = b_w$: Kiriş gövde genişliği,

$x_3 = h_1$: Kirişin başlangıç (mesnet) noktasında yüksekliği,

$x_4 = \alpha$: Kiriş eğim açısı,

$x_5 = A_{s2}$: L/4'de çekme donatısı kesit alanı,

$x_6 = A'_{s2}$: L/4'de basınç donatısı kesit alanı,

$x_7 = A_{s3}$: L/2'de çekme donatısı kesit alanı,

$x_8 = A'_{s3}$: L/2'de basınç donatısı kesit alanı,

$x_9 = f_{ck}$: Beton silindirik karakteristik basınç dayanımı,

P_d : Tasarım yükü,

M_d : Tasarım eğilme momenti,

M_r : Eğilme taşıma gücü momenti,

V_d : Tasarım kesme kuvveti,

A_{s2} : L/4'te çekme donatısı kesit alanı,

A'_{s2} : L/4'te basınç donatısı kesit alanı,

A_{s3} : L/2'de çekme donatısı kesit alanı,

A'_{s3} : L/2'de basınç donatısı kesit alanı,

A_{sw} : Kesme donatısı kesit alanı,

s : Kesme donatısı aralığı,

L : Kiriş uzunluğu,

d : Faydalı yükseklik,

f_{yk} : Donatının karakteristik akma dayanımı,

f_{yd} : Donatının tasarım akma dayanımı,

E_s : Betonarme çeliğinin elastisite modülü,

ε'_s : Basınç donatısındaki birim boy kısalması,

σ' : Basınç donatısının akma öncesi gerilme dayanımı,

f_{cd} : Beton tasarım basınç dayanımı,

f_{ctd} : Beton tasarım çekme dayanımı,

γ_{mc} : Beton için malzeme katsayısı,

k_1 : Dikdörtgen beton basınç blok derinliğinin tarafsız eksen derinliğine oranı,

$c(x)$: Tarafsız eksen derinliği,

d' : Donatının ağırlık merkezinden beton yüzeyine mesafe ($paspayı = d'$).

7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Mehmet Kevser DERDİMAN fikrin oluşması, tasarımın yapılması, literatür taraması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve yazılması, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuştur.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

9 Kaynaklar

- [1] Yang XS. *Nature-Inspired Optimization Algorithms*. 1st ed. London, United Kingdom, Elsevier Inc. 2014.
- [2] Yang XS. *Introduction to Algorithms for Data Mining and Machine Learning*. 1st ed. London, United Kingdom, Elsevier Inc., 2019.
- [3] Mathern A, Steinholtz OS, Sjöberg A, Önnheim M, Ek K, Rempling R, Gustavsson E, Jirstrand M. "Multi-objective constrained Bayesian optimization for structural design". *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 63, 689-701, 2020.
- [4] Okwu MO, Tartibu LK. *Metaheuristic Optimization : Nature-Inspired Algorithms Swarm and Computational Intelligence, Theory and Applications*. 1st ed. Cham, Switzerland, Springer Nature, 2021.
- [5] Shukla A, Tiwari R. *Discrete Problems in Nature Inspired Algorithms*. 1st ed. Boca Raton, Florida, USA, CRC Press, 2018.
- [6] Kripka M, Medeiros GF, Lemonge ACC. "Use of optimization for automatic grouping of beam cross-section dimensions in reinforced concrete building structures". *Engineering Structures*, 99, 311-318, 2015.
- [7] Yousef AH, Salama C, Jad MY, El-Gafy T, Matar M, Habashi SS. "A GPU based genetic algorithm solution for the timetabling problem". *ICCES 2016-11th International Conference on Computer Engineering and Systems*, Barcelona, Spain, 23 - 27 July 2016.
- [8] Camp C, Pezeshk S, Cao G. "Optimized design of two-dimensional structures using a genetic algorithm". *Journal of Structural Engineering*, 124(5), 551-559, 1998.
- [9] Katsifarakis KL, Kontos YN. *Genetic Algorithms: A Mature Bio-inspired Optimization Technique for Difficult Problems*. Editors: Bennis F, Bhattacharjya R. Nature-Inspired Methods for Metaheuristics Optimization, 3-26, Cham, Switzerland, Springer Nature, 2020.
- [10] Pezeshk BS, Camp CV, Chen D. "Design of nonlinear framed structures using genetic optimization". *Journal of Structural Engineering*, 126(3), 382-388, 2000.
- [11] Turgut P, Gürel MA, Arslan A. "Genetik algoritma ile betonarme bir kirişin optimum tasarımı". *Prof. Dr. A. Rifat Yarar Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 10 Aralık 1997.
- [12] Deliktaş B, Türker HT, Coşkun H, Bikçe M, Özdemir E. "Betonarme kirişlerin optimum tasarımında genetik algoritma parametrelerinin etkisinin belirlenmesi". *Fırat Üniv. Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(2), 125-132, 2009.

- [13] Chehade FEH, Younes R, Mroueh H, Chehade FH. "Use of genetic optimization in parameter identification of reinforced concrete bridge girders". *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(3), 1-13, 2020.
- [14] Algedra M, Arafa M, Ismail M. "Optimum cost of prestressed and reinforced concrete beams using genetic algorithms". *Journal of Artificial Intelligence*, 4(1), 76-88, 2011.
- [15] Camp C V., Pezeshk S, Hansson H. "Flexural design of reinforced concrete frames using a genetic algorithm". *Journal of Structural Engineering*, 129(1), 105-115, 2003.
- [16] Adeli H, Sarma KC. *Cost Optimization of Structures*. 1st ed., West Sussex, England, John Wiley & Sons Ltd, 2006.
- [17] Elliott KS. *Precast Concrete Structures*. 2nd ed. Boca Raton, Florida, USA, Taylor & Francis Group, 2017.
- [18] Afet ve Acil Durum Başkanlığı. "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği". Ankara, Türkiye, 30364, 2018.
- [19] Türk Standartları Enstitüsü. "TS 500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları". Ankara, Türkiye, 500, 2000.
- [20] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. "İnşaat Birim Fiyatlarına Esas İşçilik-Araç ve Gereç Rayiç Listeleri". <https://webdosya.csb.gov.tr/db/yfk/icerikler//insaat-birim-fiyatları-2020-turkce-20200207124629.pdf> (01.02.2021).
- [21] Bachmann H, Steinle A. *Precast Concrete Structures*. 1st ed., Berlin, Germany, Ernst & Sohn, 2011.
- [22] Ersoy U, Özcebe G, Canbay E. *Betonarme: Davranış ve Hesap İlkeleri*. 9. baskı, İstanbul, Türkiye, 2019.
- [23] Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi, "Betonarme_1_4". http://mmf2.ogu.edu.tr/atopcu/index_dosyalar/Dersler/Betonarme1/Sunular/Betonarme_1_4.pdf (26.10.2018).
- [24] Coello CC, Hernández FS, Farrera FA. "Optimal design of reinforced concrete beams using genetic algorithms". *Expert Systems with Applications*, 12(1), 101-108, 1997.