



## BETONARME SÜREKLİ KİRİŞLERDE OPTİMAL KESİT VE DONATI ORANLARININ PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYON ALGORİTMASI İLE BELİRLENMESİ

Mehmet Kevser DERDİMAN

*Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, TÜRKİYE*

<sup>1</sup> [mehmetderdیمان@isparta.edu.tr](mailto:mehmetderdیمان@isparta.edu.tr)

(Geliş/Received: 02.07.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 22.09.2022)

**ÖZ:** Tüm dünyada mühendislik tasarımları için optimizasyon giderek büyük bir önem kazanmaktadır. Betonarme taşıyıcı sistem elemanlarında da optimal tasarımlar hem performans hem de ekonomi açısından çok önemlidir. Betonarme yapı elemanlarının ekonomik olarak tasarımı, boyutların belirlenmesinde izlenen prosedür gereği ve yönetmeliklerdeki koşul ve kısıtlamalardan dolayı karmaşık bir tasarım zorluğuna sahiptir. Ayrıca kesit boyutlarının tercihinde çok sayıda alternatif mevcuttur. Kesit tercihleri genelde deneyime dayalı ön boyut seçimi ile belirlenir ve ekonomik olmayan kesitler ortaya çıkar. Bunun yanında kesitte yer alan beton ve donatının birim fiyatları ve birbirine oranı zaman zaman değişmekte, bu da ekonomik kesit boyutlarını etkilemektedir. Bu çalışmada sürekli kirişlerde yer alan ve ön boyutlamada genelde esas alınan bir iç kirişin TS500 hesap yöntemleri ve kısıtları ile değişen tasarım yükleri ve beton sınıfları altında optimum kesit boyutları ve donatı oranlarının belirlenmesi için optimizasyon analizi yapılmıştır. Optimizasyonda çok kullanılan ve yaygın şekilde bilinen metasezgisel yaklaşımlardan parçacık sürü optimizasyon algoritması (PSO) kullanılmıştır. Çalışmada bir sürekli kirişin iç (ara) kirişi ele alınmıştır. Farklı beton sınıfları ve değişen tasarım yükleri ve kiriş boyları altında çok sayıda model oluşturulmuş ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Modellerin her biri için kesit boyutları ve donatı kesit alanları minimum maliyeti verecek şekilde optimize edilmiştir. Analiz sonuçlarında değişen kiriş boyu ve tasarım yükleri altında beton sınıflarına bağlı olarak kiriş kesit ve donatı oranlarındaki değişim belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** *Optimal Kiriş Kesiti, Optimal Donatı Oranı, Kiriş Optimizasyonu, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)*

### Determination of Optimal Cross-Section and Reinforcement Ratios in RC Continuous Beams by Particle Swarm Optimization Algorithm

**ABSTRACT:** Optimization is becoming increasingly important for engineering designs all over the world. Optimal designs in reinforced concrete structural system elements are also very important in terms of both performance and economy. The economical design of reinforced concrete structural elements has a complex design challenge due to the procedure followed in determining the dimensions and due to the conditions and restrictions in the regulations. In addition, there are many alternatives in the choice of cross-section dimensions. Cross-sectional preferences are usually determined by pre-size selection based on experience, and uneconomical cross-sections arise. In addition, the unit prices and the ratio of the concrete and reinforcement contained in the cross section to each other change from time to time, which affects the economic dimensions of the cross section. In this study, optimization analysis was performed to determine the optimum section dimensions and reinforcement ratios with TS500 calculation methods and constraints of an inner beam in continuous beams, which is generally taken as a basis for pre-sizing. Particle swarm optimization algorithm (PSO), one of the widely used and widely known metaheuristics, is used in optimization. In the study, the inner beam of a continuous beam is considered. A large number

of models have been created and optimized under different classes of concrete and varying design loads and beam lengths. For each of the models, the cross-sectional dimensions and the cross-sectional areas of the reinforcement are optimized to give the minimum cost. In the results of the analysis, the change in the cross-section and reinforcement ratios of the beams was determined depending on the concrete classes under varying beam length and design loads.

**Keywords:** *Optimal Beam Section, Optimal Reinforcement Ratio, Beam Optimization, Particle Swarm Optimization (PSO)*

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Optimizasyon son yıllarda oldukça yoğun araştırma konusu olmuş ve birçok yeni optimizasyon yöntemi gelişimi sağlanmış ve geliştirilen bu yeni yöntemler gerçek mühendislik problemlerini çözmek için yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Gerçek tasarım optimizasyon problemlerinin neredeyse tamamı, çok sayıda çözüm kümesine ve doğrusal olmayan karmaşık kısıtlamalara sahiptir. Karmaşıklığın arkasındaki temel nedenlerden biri de değişken sayısını fazlalığı ve bu değişkenlerin çok sayıda kısıtlamaları içermesidir (Altunbey Özbay ve Özbay, 2021). Dolayısıyla karmaşık sistemlerin optimal tasarımı, veri işleme ve çok sayıda hesaplama gerektirir. Yakın geçmişte, bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak optimizasyon algoritmalarında da önemli gelişmeler gerçekleşmiş ve benzeri görülmemiş bir popülerlik kazanmıştır. Bunun ana nedeni günümüzün güçlü bilgisayarlarının karmaşık hesaplamaları yapabilir ve çok miktarda veriyi hızla işleyebilir duruma gelmesidir. Mühendislik tasarımı ve optimizasyon işlemleri bu gelişmeden büyük ölçüde faydalanmıştır. Dolayısıyla daha iyi optimal sistemler artık daha kısa sürede optimize edilerek tasarlanabilmektedir. (Arora, 2012; Zolghadr-Asli ve diğ., 2018).

Optimizasyon, tasarıma ilişkin konulan kısıtlamalar altında mevcut çözüm kümeleri içinden, en uygun çözümü tespit etmeyi amaçlayan hesaplama teknikleridir. Temel amacı, amaç fonksiyonunu minimize veya maksimize etmek için en uygun değişken değerlerini belirlemektir. Optimizasyon problemleri, üretilen çözüm yöntemlerine bağlı olarak temelde iki türe ayrılır: Birisi klasik matematiğe dayalı deterministik çözüm yöntemini içeren algoritmalar diğeri ise sezgisel tabanlı stokastik algoritmalar. Stokastik algoritmalar ayrıca sezgisel ve metasezgisel teknikler olarak sınıflandırılabilir. Klasik matematiksel optimizasyon tekniklerinin çoğu, karmaşık tasarım optimizasyon problemlerine uygun çözümler sağlayamamaktadır. Bu optimizasyon yöntemleri genellikle, basit optimizasyon problemlerinde kullanılabilir. Ancak, mühendislikte karşılaşılan tasarım optimizasyon problemlerinin çoğunluğu klasik optimizasyon yöntemleri ile çözülmesi mümkün değildir. Bu tür karmaşık mühendislik problemlerinin çözümü artık bilgisayar teknolojilerinin avantajıyla ve metasezgisel algoritmaların kullanımıyla mümkün olmaktadır (Altunbey Özbay ve Özbay, 2021; Kim ve Kwak, 2022; Okwu ve Tartibu, 2021; Vasuki, 2020; Yang, 2014; Yang ve Karamanoglu, 2020).

Metasezgisel algoritmaların temel ilkesi, makul bir sürede karmaşık bir soruna kabul edilebilir bir çözüm üretmek için bir deneme yanılma yöntemidir (Zolghadr-Asli ve diğ., 2018) ve teknik anlamda, bir arama uzayını etkili bir şekilde araştırmak amacıyla temel sezgisel yöntemleri üst düzey çerçevelerde birleştirmeye çalışır. Başka bir deyişle, metasezgisel algoritmalar, genellikle evrim, biyolojik sistemlerin özellikleri, sosyal sistemler, sürü zekası ve temel fizik yasaları gibi doğal fenomenlerden esinlenen yöntemleri kullanmaya çalışır. Kısaca, arama alanını keşfetmek ve kullanmak için farklı kavramları akıllıca bir araya getirerek ikincil bir buluşsal yöntemi yönlendiren yinelemeli bir üretim süreci olarak tanımlanır (Kaveh, 2017). Bu yöntemler, makul hesaplama çabasıyla arama uzayında optimal bölgeleri keşfetme ve bulma yeteneklerinden dolayı tüm arama uzayı üzerinde global aramalar için uygundur. Sonuç olarak, metasezgisel algoritmalar çoğu optimizasyon problemi için oldukça iyi performans gösterme eğilimindedir (Yang, 2014; Yang ve He, 2019).

Doğa esinli olan metasezgisel algoritmalar genel olarak genetik algoritmalar ve sürü zekası algoritmaları olarak sınıflandırılır. Bunun yanında metasezgisel algoritmaların üçüncü bir kategorisi vardır, bu da fiziksel ve kimyasal süreçlere dayanır ve tavlama benzetimi algoritması bu sınıf altında ünlü

bir algoritmadır. Genetik algoritmalar, evrimin biyolojik süreçlerinden esinlenerek geliştirilirken, sürü zekası algoritmaları, hayvanların sürü davranışından esinlenerek geliştirilir. 1995 yılında parçacık sürüsü optimizasyonunun (PSO) icadından bu yana hayvan, kuş ve böcek sürülerinin davranışlarını taklit eden doğadan ilham alan algoritmaların geliştirilmesinde bir atılım olmuştur (Vasuki, 2020). Bu algoritmalar genetik algoritma, parçacık sürü algoritması, harmoni arama algoritması, tavlama benzetimi algoritması, karınca ve arı kolonisi optimizasyonu, martı ve guguk kuşu optimizasyon algoritmaları vb. gibi çok sayıda algoritmayı içerir (Kripka ve diğ., 2015). Bu geniş çeşitliliğe rağmen hala en fazla kullanılan yöntemler parçacık sürü algoritması, genetik algoritma, harmoni arama algoritması ve tavlama benzetimi algoritmalarıdır. Son yıllarda evrimsel tabanlı genetik algoritma ve harmoni arama algoritması çok sayıda araştırmaya konu olmuş en yaygın optimizasyon teknikleridir (Yousef ve diğ., 2016).

### Güvenilirlik Tabanlı Optimizasyon (Reliability-Based Optimization)

Yapıların tasarımı, maliyet, güvenlik, performans ve dayanıklılık gibi bir dizi farklı kriteri yerine getirmeli ve aynı anda mühendis tarafından dikkate alınan ve çelişkili olabilen gereksinimleri de sağlamalıdır. Bu nedenle, tasarım sürecindeki zorluk, çelişkili tasarım gereksinimleri arasındaki en iyiyi nasıl tanımlayacağınızdır. Bazen de tasarım sürecinin karmaşıklığı, tasarım kriterlerinin tüm parametrelere göre eşzamanlı olarak optimizasyonuna izin vermez. Tasarımcı, dolayısıyla çabasını sadece bir hedefe, genel olarak maliyete yoğunlaştırabilir ve daha sonra diğer gereksinimlerin, daha az ya da çok olamayacağını kontrol eder. Gerekirse, elde edilen çözümü geliştirmek için daha fazla ayarlamalar (kısıtlar) konulur. Bu prosedür performansa dayalı optimum tasarımı sağlar (Tsompanakis ve diğ., 2008). Performans sınırları ise güvenilirlik kısıtlarıdır.

Mekanik sistemlerde güvenilirlik havacılık, uzay, savunma endüstrileri, otomobil ve inşaat mühendisliğinde rekabetin merkezindedir (El Hami ve Radi, 2013).

Bir yapıda aranan en önemli özellik, yapıda öngörülen yüklerin olası en elverişsiz etkiye durumunda göçmemesi ve kullanım yükleri altında yapı elemanlarında deformasyon, çatlama ve titreşim sınır değerlerinin aşılmamasıdır (Ersoy ve diğ., 2019). Bu temel güvenilirlik ilkesi olarak adlandırılır ve bu ilke dayanım değerlerinin en az yük etkilerine eşit olmasını ve deplasman miktarı ile çatlak genişliğinin yapı kullanım amacı doğrultusunda belirlenecek kısıtlar içinde kalması zorunluluğunu gerektirir. Dayanım ait en önemli değişkenler kullanılan malzemelerin mekanik özellikleridir. Betonarmada bu özelliklerin üretim aşamasındaki belirsizlikler ve zamana bağlı değişkenliği nedeniyle dayanımın deterministik yöntemle kesin bir değer olarak belirlenmesi mümkün değildir. Ayrıca yük etkisinin belirlenmesinde kullanılacak olan yüklerin de belirsizliği söz konusudur. Bunun için malzeme özelliklerinin ve yük değerlerinin belirlenmesi ancak istatistiksel yaklaşımlarla mümkündür.

Geçmiş yılların veri birikimi ile istatistiksel değerlendirmeler yapılarak TS498'de (TSE, 1997) yük katsayıları ve TS500'de (TSE, 2000) dayanım, malzeme şartları ve bunlara ait güvenlik katsayıları verilmiştir.

Denklem (1)'de TS500'deki "taşıma gücü" şartı verilmiştir. Buna göre betonarme elemanların Denklem (2)'de belirtilen biçimde hesaplanmış malzeme tasarım dayanım değerleri, katsayılarla çarpılmış tasarım yükü ile hesaplanan iç kuvvet değerlerinden hiçbir zaman büyük eşit olduğu kanıtlanmalıdır.

$$R_d \geq F_d \quad (1)$$

Buradaki  $R_d$ : dayanım ve  $F_d$ : yük etkisini değerlerini göstermek üzere Denklem (2)'deki gibi hesaplanır.

$$R_d = R_k / \gamma_m \quad F_d = \gamma_Q F_Q + \gamma_G F_G \quad (2)$$

Buradaki  $\gamma_m$ : malzeme katsayıları,  $\gamma_Q, \gamma_G$ : yük katsayıları,  $R_k$ : karakteristik dayanım ve  $F_Q, F_G$ : karakteristik yük etkileridir.

Şayet optimizasyon içinde Denklem (1)'deki şartların (moment ve kesme kuvveti açısından) kısıt olarak tanımlanması durumunda güvenilirlik esaslı bir optimizasyon yapılmış olacaktır. Güvenilirlik esaslı bir optimizasyon Denklem (3)'deki gibi matematiksel olarak ifade edilebilir.

$$\text{Güvenilirlik Kısıtları: } \begin{cases} (g_R)_i(x) \leq (g_F^*)_i \\ i = 1, 2, \dots, j \end{cases} \quad (3)$$

Kullanım yükü etkisindeki yapıda aşırı yer değiştirme veya sehim olmamalıdır. Kullanım yükü, servis yükü veya işletme yükü şeklinde adlandırılan yükler sabit ve hareketli yüklerdir. Deprem ve rüzgar yükleri kullanım yükü değildir. Aşırı sehim taşıyıcı olmayan elemanlarda hasara neden olur ve eğer varsa, hassas makinelerin işlevini bozar.

Taşıma gücü ilkelerine göre tasarlanmış, yani dayanım açısından güvenli donatılmış bir kirişin veya döşemenin ne kadar sehim yapacağını belirlenmesi ve izin verilen sınırı aşp aşmadığının kontrol edilmesi de gerekir. Son yıllarda, artan beton kalitesi ve dayanımı (C30/37, C40/50 gibi) sonucu mühendisler kiriş, döşeme ve kolonların kesitlerini küçültme eğilimindedirler. Bunun sonucu olarak aşırı sehim oluşmaktadır (Topçu, 2019a).

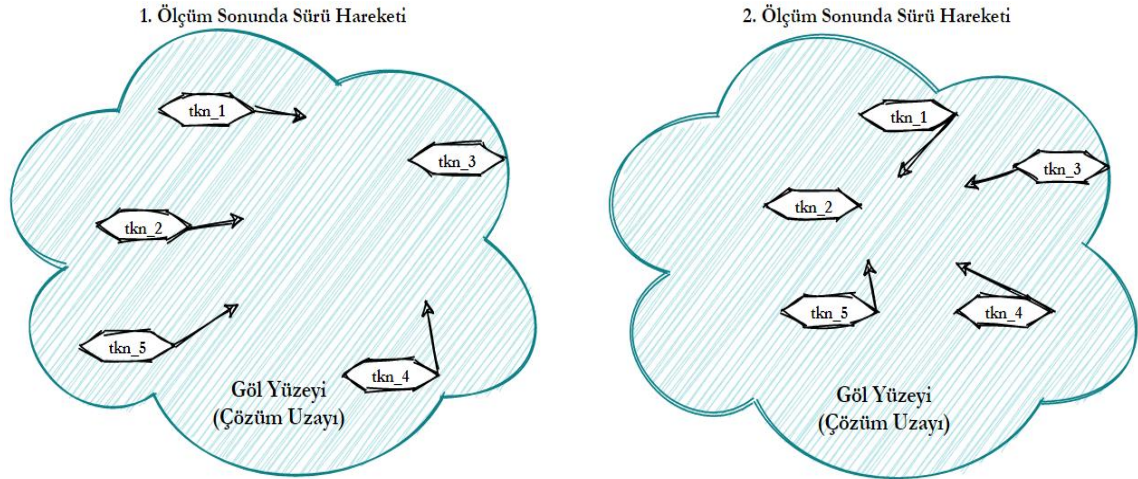
Kullanım yükleri altında çelik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi doğrusaldır fakat beton için aynı durum geçerli değildir. Çünkü betonun elastisite modülü gerilme düzeyine ve zamana bağlı olarak değişir. Fakat çatlamamış betonun, gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin doğrusal davranışa çok yakın olduğu varsayılabilir. Sehim hesaplarında çeliğin doğrusal davrandığı betonun ise çatlama durumu dikkate alınarak hesaplanan etkili atalet momenti ile doğrusal davrandığı kabulü ile hesap yapılır. Sehim ve çatlak hesapları için daha doğru ve daha basit bir hesap yolu yoktur. Dolayısıyla sehim hesabı yaklaşıktır, kesin değeri hesaplamak imkansızdır.

### Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)

Parçacık sürü optimizasyonu (PSO), Purdue Üniversitesi'nde James Kennedy ve Russell C. Eberhart tarafından 1995 yılında geliştirildi (Eberhart ve Kennedy, 1995). PSO'nun kökleri, kuş sürülerinin sürü davranışında dayanmaktadır. Bir kuş sürüsü birbirine çarpmadan birlikte uçar, komşularıyla optimum mesafeyi korur ve faaliyetlerini topluca yürütür. PSO, kuşların sürü davranışı üzerine modellenen ilk popülasyon tabanlı sürü zekası algoritmasıdır. PSO kısıtlı veya kısıtsız, doğrusal ve doğrusal olmayan optimizasyon problemleri için önerilen bir optimizasyon algoritmasıdır. Türevlerin hesaplanmasını gerektirmez ve sürekli ve ayrık kombinatoriyal optimizasyon problemleri için uygundur. PSO, tekli ve çoklu amaç fonksiyonlarını optimize edebilir, sürekli, ayrık ve karışık arama uzaylarına uygulanabilir (Vasuki, 2020; Yang, 2018, 2017, 2014).

PSO algoritmasını benzersiz kılan özellik parçacıkların d-boyutlu bir hiperuzay olan arama uzayı boyunca uçması, daha iyi konumlara doğru hızlanarak sonunda global olarak en iyi konuma ulaşmasıdır. PSO, arama uzayında uçan kuşlar tarafından temsil edilen aday çözüm kümesine sahiptir. Bu, uzayda bilinen ve bilinmeyen bölgeleri aramayı mümkün kılar. Her yinelemede, aday çözümlerin her birinin uygunluk değerleri, arama uzayındaki konumlarına göre hesaplanır. Çözümler, girdileri parçacıkların konum vektörleri olan amaç fonksiyonu ile değerlendirilir. Parçacıkların başlangıç konumları rastgele seçilir ve popülasyon büyüklüğü probleme göre belirlenir. PSO'da arama alanında (mümkün olan çözüm aralığında) bulunan ve her biri bir çözümü temsil eden sürü elemanına parçacık, parçacıkların oluşturduğu topluluğa (popülasyona) ise sürü adı verilir. Parçacıkların içerdikleri değişkenler amaç fonksiyonda yerine konması ile uygunluk (fitness) değerleri belirlenir. Uygunluk değeri en iyi olan belirlenir ve en iyi çözüm olarak adlandırılır ve sonraki döngüde diğer parçacıkların hız ve yön tayini için saklanır. Tüm parçacıkların amaç fonksiyonu hesaplanırken her parçacığın kendine ait en uygun değeri de parçacık bilgisi içinde saklanır ve bu da parçacığın en iyisi olarak bir sonraki döngüde o parçacığın hız ve yön tayini için saklanır. Yani parçacıkların yeni yön ve hızı bu iki bilgi ile belirlenmiş olur (Li ve Liu, 2011; Shukla ve Tiwari, 2018; Vasuki, 2020; Yang, 2014).

PSO'daki sürünün yön ve hareketliliği bir göl benzetmesi ile anlatılabilir. Örneğin bir göl üzerinde bulunan tekneler tarafından gölün en derin noktası tespit edilmeye çalışılıyor olsun. Göl yüzeyi sıfır noktası kabul edilirse, maksimum derinlik aranan noktayı yani çözümü ifade edecektir. Göl yüzeyinde bulunan ve başlangıçta rastgele dağıtılmış birbirleri ile bilgi paylaşımı yapabilen ve ölçüm yapabilen  $tkn_1$ ,  $tkn_2$ ,  $tkn_3$ ,  $tkn_4$  ve  $tkn_5$  tekneleri olduğunu varsayalım. İlk ölçümde (ilk döngü) sürünün en iyi değeri  $tkn_3$  tarafından alınmış ise diğer tekneler doğrudan ve hızlarını (kendi en iyilerine de bir miktar bağlı olarak)  $tkn_3$ 'e yönlendirecek ve en iyi değere uzaklığı oranında iyi olana yaklaşma hızına sahip olacaktır. Sonraki ölçümde (takip eden döngü) parçacıklar değişen konumları ile ölçümleri tekrar yaparak kendi en iyi değerine ve sürünü en iyi değerine göre ikinci ölçümün yön ve hızlarını elde edeceklerdir. Bu süreç yinelemeli olarak devam ettirildiğinde ve çok sayıda parçacık varsa tüm göl yüzeyi (çözüm uzayı) ölçülmüş olacaktır. Yukarıda anlatılan parçacık hareketliliği Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu örnekte teknelerin sayısı sürü sayısını (popülasyon nüfusunu), her ölçüm ve en iyilerin belirlenmesi döngü içi işlemleri, göl yüzeyi arama alanını ve bulunan en büyük derinlik noktası çözümü ifade etmektedir (Derdiman, 2022b).



Şekil 1. Sürü-Parçacık hareketliliğinin göl benzetmesi ile gösterimi (Derdiman, 2022b).

Figure 1. Example of a lake showing Swarm-Particle activity.

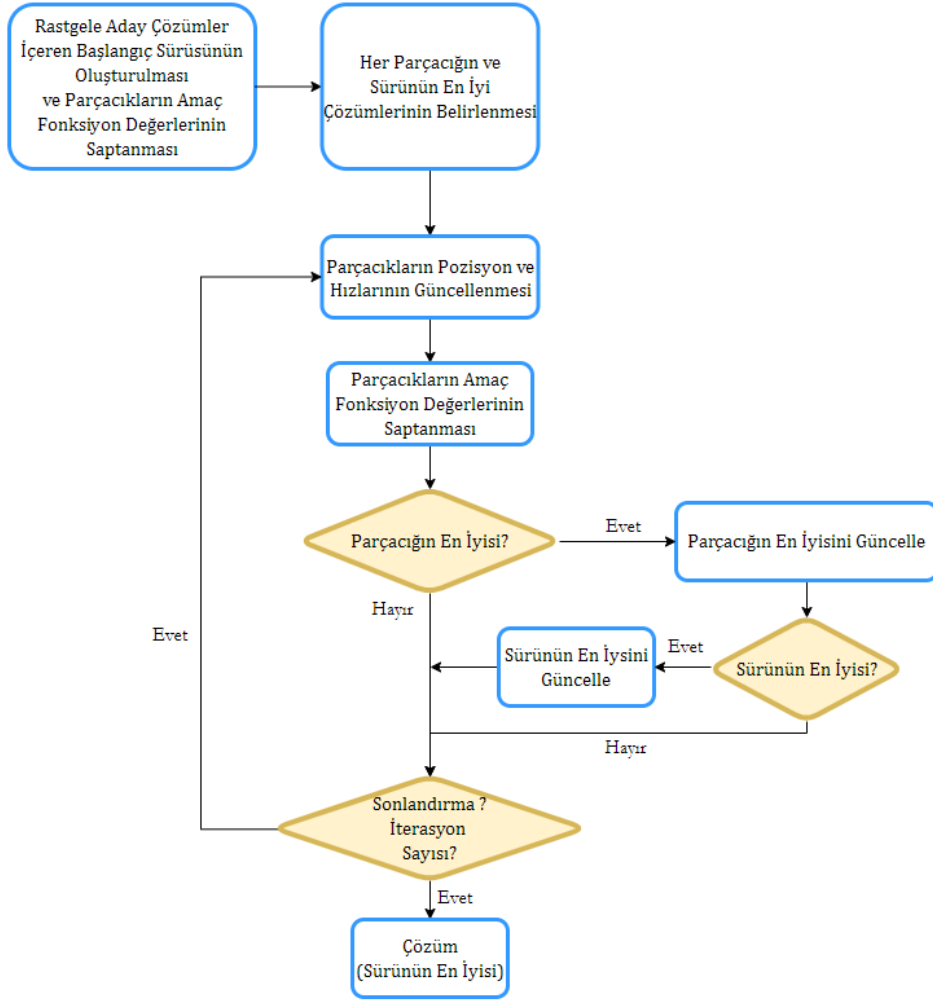
Parçacıklar arama alanı boyunca hareket eder ve konumları, her yinelemede tek tek parçacıkların en iyi konumlarına göre güncellenir. Parçacıkların konumu, her yinelemede tüm parçacıkların en iyi konumlarına ve kendi en iyi konumuna göre güncellenir. Belirli bir sayıda (100-1000) döngü sonrası artık en iyi parçacık vektörünün (çözüm kümesi) değişmemesi döngünün durdurulmasını gerektirir. Prathab Rao ve diğ. (2017) yaptıkları araştırmada bu döngü sayısının 100-1000 arasında olduğunu belirtmişlerdir. Sheikhalishahi ve diğ. (2013) yaptıkları araştırmada değişen parçacık sayısının, döngü (iterasyon) sayısını etkilediğini vurgulamaktadırlar.

PSO algoritmasının genel akış şeması Şekil 2'de, k döngüsünde parçacığın pozisyonu ve k+1'nci döngü için hızının ve yönünün vektörel gösterimi Şekil 3'de verilmiştir.

Şekil 3'de gösterilen konum ve hızların hesabı Denklem (4),(5)'de verilmiştir (Li ve Liu, 2011).

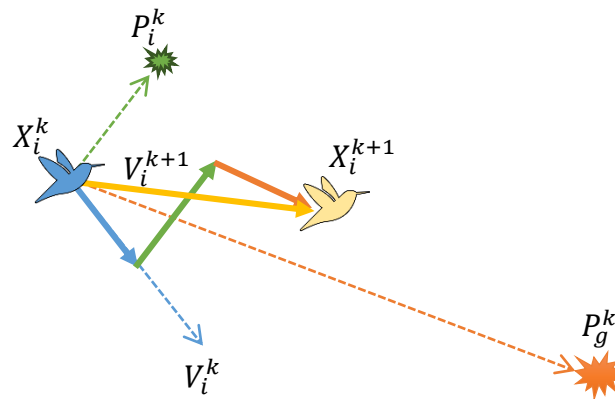
$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + c_1 r_1 (P_i^k - X_i^k) + c_2 r_2 (P_g^k - X_i^k) \quad (4)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (5)$$



Şekil 2. PSO algoritmasının genel akış şeması (Derdiman, 2022b; Yang, 2014).

Figure 2. The general flowchart of the PSO algorithm.



Şekil 3.  $k$  döngüsünde parçacığın pozisyonu ve  $k+1$ 'nci döngü için hızının ve yönünün vektörel gösterimi (Derdiman, 2022b).

Figure 3. Position of the particle in the  $k$  cycle and the vector representation of its velocity and direction for the  $k+1$ st cycle.

Burada  $X_i^k$  ve  $V_i^k$  parçacığın geçerli pozisyon ve hızını,  $X_i^{k+1}$  ve  $V_i^{k+1}$  parçacığın güncellenmiş pozisyon ve hızını,  $\omega$  atalet katsayısını,  $c_1$  ve  $c_2$  parçacığın bilişsel ve sosyal bileşen ivme değerlerini (kendi ve sürü en iyisine doğru ivme katsayılarını),  $r_1$  ve  $r_2$  birden küçük sıfırdan büyük uniform bir rastgele sayı değerini,  $P_i^k$  ve  $P_g^k$  ise parçacık ve sürüye ait en iyi çözüm değerlerini,  $c_1 r_1 (P_i^k - X_i^k)$  bilişsel bileşen katkı

değerini ve  $c_2 r_2 (P_g^k - X_i^k)$  sosyal bileşen katkı değerini ifade etmektedir. PSO temel algoritmasında atalet katsayısı  $\omega$  her döngüde azaltılır. Dolayısıyla iterasyon içinde sönüm katsayısı olan  $\omega_{dam}$  ile çarpılarak bu işlem gerçekleştirilir. Örneğin atalet katsayısının 0.99 ve sönümün 0.95 olduğu bir durum için sonraki döngüde  $\omega = \omega * \omega_{dam}$  işlemi sonucu atalet katsayısı 0.9405 olacaktır (Derdiman, 2022b).

Metasezgisel algoritmaların popülaritesine ve başarılarına rağmen, hala daha fazla araştırma gerektiren bazı problemler mevcuttur. Bu tür algoritmaları analiz etmek için titiz bir matematiksel formüllerin bulunmaması nedeni ile önemli bir araştırma alanı da parametre ayarlama ve parametre kontrolüdür. Hemen hemen tüm algoritmalar içlerinde etkin olan parametrelere sahip olduğundan, bunların ayarları söz konusu algoritmanın performansını büyük ölçüde etkilemektedir. Bununla birlikte, bir algoritmanın verimli bir şekilde nasıl ayarlanacağı ve parametrelerinin nasıl değiştirileceği/kontrol edileceği hala tam olarak çözülememiştir (Yang, 2018).

Kirişlerin kesit optimizasyonu ile ilgili araştırmalar 1960'lara kadar uzanmaktadır (Haug ve Kirmser, 1964; Kirsch, 1973, 1972). O tarihten bu yana farklı açı ve yönleriyle ilgili çok sayıda araştırma gerçekleştirilmiştir.

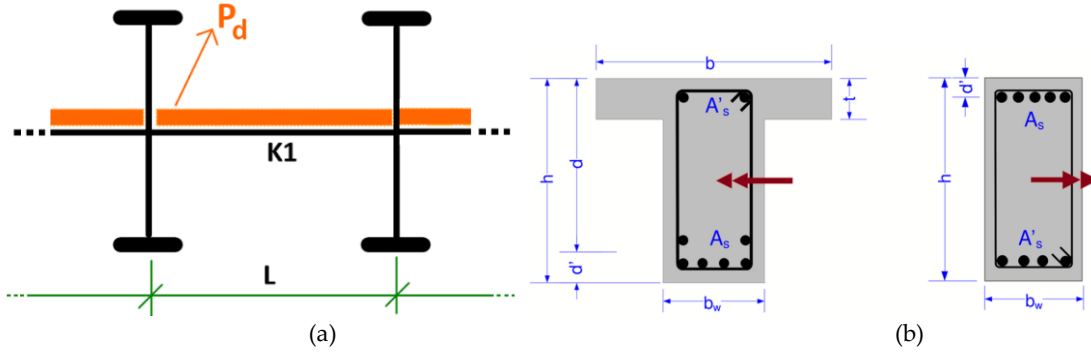
Metasezgisel algoritmaların uygulamaları ise 1990'lı yıllarda yaygınlaşmaya başlamış ve giderek artmıştır. Bu algoritmalar ile betonarme yapı elemanlarının optimal tasarımı geçmişte pek çok araştırmaya konu olmuştur. Malasri ve diğ. (1994) betonarme kiriş örneği üzerinden genetik algoritmanın nasıl çalıştığını, Coello ve diğ. (1997) genetik algoritma ile sabit tasarım yükü altında basit mesnetli bir kirişin optimizasyonunu, Koumoussis ve Arsenis (1998) betonarme yapı elemanlarının genetik algoritma ile optimal tasarımını irdeleyen çalışmaları bu alandaki araştırmaların ilk örneklerindedir.

Bu çalışmada, TS500 kısıtları altında betonarme dikdörtgen (mesnet) ve tablalı (açıklık) kesite sahip sürekli kirişteki bir iç kirişin optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon güvenilirlik ve sehim şartları çerçevesinde, artan yük ile ortaya çıkan farklı eğilme momentleri ve farklı beton sınıfları dikkate alınarak, optimum kesit değişkenleri ve donatı oranlarının maliyeti minimize edecek şekilde belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu çerçevede geçmişteki araştırmalardan farklı olarak bu çalışmada,

- Analizlerde basınç donatısı dikkate alınmıştır (çünkü basınç donatısı taşıma gücünde ve daha çok sehim üzerinde etkisi mevcuttur ve her kiriş basınç bölgesinde donatı içerir),
- Sürekli kirişlerin boyutlandırılmasında genelde ön planda olan bir iç kiriş optimizasyonu gerçekleştirilmiştir,
- Sehim kısıtlaması dikkate alınmıştır (optimizasyon içinde her döngü ve her parçacık için sehim hesaplatılarak maksimum değeri aşmayacak şekilde analiz yapılmıştır),
- Her yıl birim fiyat oranları (çelik/beton fiyat oranı) değişmektedir, bu optimizasyonda 2022 birim fiyatları ile çalışılmıştır,
- Ve optimizasyon güvenilirlik tabanlı gerçekleştirilmiştir.

## OPTİMİZASYON YÖNTEMİ VE MALZEME ÖZELLİKLERİ (OPTIMIZATION METHOD AND MATERIAL PROPERTIES)

Şekil 4'de verilen sürekli kirişi değişen  $P_a$  ve kiriş uzunlukları nedeniyle  $M_d$  kesit zoruna maruzdur. Bu eğilme momentini karşılayacak, kiriş kesit değerleri ile çekme ve basınç donatısı kesit alanlarının, TS500 taşıma gücü yöntemi ve konstrüktif kısıtları dikkate alınarak maliyet açısından optimizasyonu kurgulanmıştır. Optimizasyonda yaygın şekilde kullanılan sürekli kirişteki iç kirişin kesit optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.



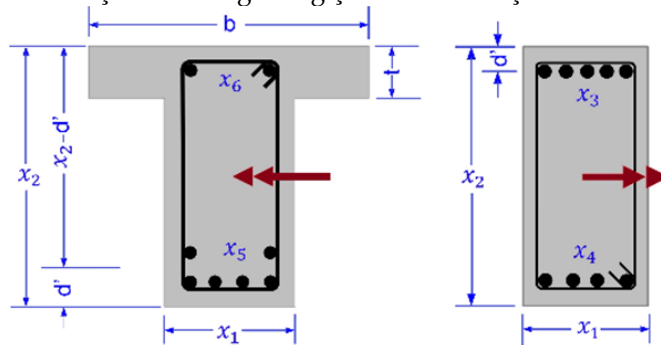
Şekil 4. a. Optimizasyonu yapılan kiriş, b. Açıklık ve mesnet bölgesi kiriş kesitleri

Figure 4. a. The optimized beam, b. Cross-sections of the span and support zone beams

Problem çözümü için Python programlama dili (Python Software Foundation, 2021) ve NumPy modülleri (NumPy Project, 2021) ile bir program geliştirilmiş ve bu program ile değişen tasarım etkileri için analiz yapılmıştır.

Optimizasyon problemi 6 boyutlu dolayısıyla  $k = 6$  değişkenli olarak ele alınmıştır. Değişkenlerimiz  $x_1 = b_w$  kiriş gövde genişliği,  $x_2 = h$  kiriş yüksekliği,  $x_3 = A_{s1}$  mesnet çekme donatısı,  $x_4 = A'_{s1}$  mesnet bölgesi basınç donatısı,  $x_5 = A_s$  açıklık bölgesi çekme donatısı,  $x_6 = A'_s$  açıklık bölgesi basınç donatısıdır.

Ayrıca çalışma içerisinde  $L$  kiriş uzunluğunu ve  $f_{ck}$  beton karakteristik basınç dayanımını,  $P_d$  kiriş yayılı yükünü,  $t$  tabla kalınlığını ve  $b$  etkili tabla genişliğini,  $d'$  çekme ve basınç donatısı için paspayını ifade etmektedir. Şekil 5 'de kiriş kesiti ve ilgili değişkenler verilmiştir.



Şekil 5. Optimizasyon modelinin kiriş kesit değişkenleri.

Figure 5. The beam cross-sectional variables of the optimization model.

Analizlerde  $t = 120 \text{ mm}$ ,  $b = 1000 \text{ mm}$  ve  $d' = 40 \text{ mm}$  alınmıştır. Beton karakteristik basınç dayanımı  $f_{ck}$ , 25 MPa (C25/30) 'dan 50 MPa (C50/60) 'a kadar değişen değerlerde ve  $L$  kiriş boyu 3.0 m den başlayıp 0.5 m artış ile 7.5 m'ye kadar değişen değerlerde alınmıştır. Betonarme çeliğinin karakteristik dayanımı hesaplarında  $f_{yk} = 420 \text{ N/mm}^2$  ve malzeme katsayısı  $\gamma_{ms} = 1.15$  alınmıştır. Tüm analizde denetimli beton kullanıldığı kabul edilerek malzeme katsayısı  $\gamma_{mc} = 1.5$  ile hesaplar yapılmıştır. Sisteme mesnetlik yapan kolonlar 300x300 mm kesitinde ve 3 m boyunda kabul edilmiştir. Kirişin mesnet ve açıklık momentleri yaklaşık yöntemlerle belirlenmiştir.

Analizler TS500 'ün (TSE, 2000) taşıma gücü yöntemi ve varsayımları ile yapılmıştır. Bu varsayımlar şunlardır:

- Beton ve donatı arasında tam kenetlenme vardır, uzama ve kısalmayı aynı oranda yaparlar.
- Betonun çekme dayanımının olmadığı kabul edilir.
- Kesit yüksekliği boyunca birim şekil değiştirme değişimi doğrusaldır (Bernoulli/Navier hipotezi geçerlidir).
- Betonarme çeliğinin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi elasto-plastiktir ve Hooke kanununun geçerli olduğu bölgede elastisite modülü  $E_s = 200 \text{ GPa}$  dır.
- Taşıma gücüne erişildiğinde basınç bölgesindeki maksimum birim kısalma 0.003 dür.
- Beton basınç bölgesinde gerilme dağılımı eşdeğer dikdörtgen basınç bloğu modelidir.



Programda amaç fonksiyonu, beton, betonarme çeliği ve kalıp yapılması birim fiyatları için Çizelge 1’de verilen değerler dikkate alınmış ve maliyeti minimize edecek şekilde kodlanmıştır.

**Çizelge 1.** 2022 yılına ait birim fiyatlar (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2022).

C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60	B420C	B420C
₺/m <sup>3</sup>	₺/m <sup>3</sup>	₺/m <sup>3</sup>	₺/m <sup>3</sup>	₺/m <sup>3</sup>	₺/m <sup>3</sup>	₺/Ton	₺/m <sup>3</sup>
951.48	982.73	1045.23	1101.48	1120.23	1151.48	18858.88	148042.21
<b>Plywood ile düz yüzeyli betonarme kalıbı yapılması, ₺/m<sup>2</sup></b>							
142.14							

Optimizasyon probleminin genel matematiksel ifadesi Denklem (6)’deki gibidir. Minimize edilmesi istenen amaç fonksiyonun ( $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ) doğru ifade edilmesi, optimizasyon çözümünün kabul edilebilir ve verimli olmasını sağlayacaktır. Zayıf amaç fonksiyonu yanlış veya anlamsız çözümlere neden olabilir (Yang, 2014). Burada amaç fonksiyonu ağırlığı değil, fiyatı minimize edecek şekilde kurgulanmıştır. İşlem hacmini azaltmak için program içerisinde beton ve betonarme çeliğinin her ikisi içinde metreküp (m<sup>3</sup>) birim fiyatına (₺/m<sup>3</sup>) dönüştürülerek analizler yapılmıştır.

$$\text{Optimizasyon: } \begin{cases} \min_{x_i \in [x_i^L, x_i^U]} f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{Kısıtlar: } \begin{cases} g_j(x) \leq g_j^* \\ j = 1, 2, \dots, k \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

Kirişin birim boy maliyetini veren amaç fonksiyonun yapısı Denklem (7)’de ki gibidir. Amaç fonksiyonu, değişkenlerin kısıtlamalara uymaması durumunda ceza (penalti) değeri eklemesi olacak ve amaç fonksiyon değeri minimum değerden uzaklaşacak şekilde programlanmıştır. Dolayısıyla kısıtlara uymayan parçacıkların amaç fonksiyon değerleri arttığı için sürünün davranışı üzerine etkisi olmayacağı anlamına gelir.

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = \begin{cases} BF \frac{x_1 x_2}{1e6} + CF \frac{((x_3 + x_4)L/2 + (x_5 + x_6)L/2)/L + 226}{1e6} + \frac{KF(x_1 + 2(x_2 - t))}{1e3} + penlt, & x_2 \geq 600 \\ BF \frac{x_1 x_2}{1e6} + CF \frac{((x_3 + x_4)L/2 + (x_5 + x_6)L/2)/L}{1e6} + \frac{KF(x_1 + 2(x_2 - t))}{1e3} + penlt, & x_2 < 600 \end{cases} \quad (7)$$

Probleme ait değişkenlerin alt ve üst sınırları Çizelge 2’de verilmiştir. Fark edileceği üzere alt sınır değerleri kısıtları çerçevesinde belirlenmiştir. Kiriş yüksekliği, konut tipi yapılar için genelde mimari kısıt gereği (kapı ve pencere engeli) nedeni ile 750 mm alınmıştır. Çekme donatısı ve basınç donatısının alt sınırı ise 3Ø12’in kesit alanı 339 mm<sup>2</sup> olarak alınmıştır. Ayrıca amaç fonksiyonu içerisindeki hesaplamada  $h > 600 \text{ mm}$  olması durumu için kesit içindeki gövde donatısı dikkate alınarak toplam donatı alanı 226 mm<sup>2</sup> artırılmıştır.

**Çizelge 2.** Optimizasyon değişkenlerinin alt ve üst sınır aralıkları.

Table 2. The lower and upper bound ranges of the optimization variables.

Değişkenler	Alt sınır (mm)	Üst sınır (mm)
$b_w = x_1$	250	600
$h = x_2$	360	750
$A_{s1} = x_3$	339	7000
$A'_{s1} = x_4$	339	7000
$A_s = x_5$	339	7000
$A'_s = x_6$	339	7000

Uygulamadaki kiriş yüksekliği ve genişliğinin 50 mm'nin katları olacak şekilde ve donatı çubuklarının da sağladığı kesit alanlarının belirli sayıları vermesinden dolayı gerçekte bu problem kombinatorik ayrık optimizasyon problemidir. Fakat bu çalışmada problem sürekli optimizasyon olarak modellenmiştir. Bunun nedeni farklı tasarım momentleri için optimum kesit boyutları ve donatı oranlarının elde edilmek istenilmesindedir.

Problemdeki kısıtlar fonksiyonu içerisinde çekme donatısı oranının ( $\rho$ ) kısıtları Denklem (8)-(10)'da gösterilmiştir.

$$\rho - \rho' \leq 0.85 \rho_b \rightarrow (A_s - A'_s)/(0.85 \rho_b b_w d) - 1 \leq 0 \quad (8)$$

$$\rho \leq 0.02 \rightarrow (A_s/b_w d)/0.02 - 1 \leq 0 \quad (9)$$

$$\rho \geq 0.8 f_{ctd}/f_{yd} \rightarrow (0.8 f_{ctd}/f_{yd})/(b_w d/A_s) - 1 \leq 0 \quad (10)$$

TBDY-2018 (AFAD, 2018) de Deprem Tasarım Sınıfı; DTS 1, 1a, 2 ve 2a olan betonarme taşıyıcı sistemlerde, mesnet alt donatı, aynı mesnetteki üst donatının %50'sinden daha büyük olmalı ve açıklık bölgesindeki basınç donatısı da mesnetlerdeki üst donatının %25 'den daha büyük olmalı koşulları da Denklem (11) ve (12)'de verilmiştir.

$$\rho'_1 \geq 0.5 \rho_1 \rightarrow 0.5 \rho_1/\rho'_1 - 1 \leq 0 \quad (11)$$

$$\rho' \geq 0.25 \rho_1 \rightarrow 0.25 \rho_1/\rho' - 1 \leq 0 \quad (12)$$

Kirişin yüksekliği ve gövde genişliği ile ilgili kısıtlar ise Denklem (13) ve (14)'de verildiği gibidir.

$$h \leq 3.5 b_w \rightarrow h/(3.5 b_w) - 1 \leq 0 \quad (13)$$

$$b_w \leq h + 300 \rightarrow b_w/(h + 300) - 1 \leq 0 \quad (14)$$

Yönetmelikteki kirişin gövde genişliğinin maksimum değeri kirişin yüksekliği ile saplandığı kolon kenarının toplamını aşamaz koşulu nedeniyle Denklem (14)'deki kısıt saplandığı kolonun minimum 300 mm olduğu düşünülerek tanımlanmıştır.

Buradaki tüm optimizasyon kısıtlarının sırasıyla kodlamaya esas teşkil eden kısıt fonksiyonları, yukarıdaki koşullar bağlamında Denklem (15)-(20)'de verilmiştir.

$$g_1(x) = \frac{(x_3 - x_4)}{0.85 \rho_b x_1 (x_2 - d')} - 1 \leq 0 \quad (15)$$

$$g_2(x) = \frac{x_3}{0.02 x_1 (x_2 - d')} - 1 \leq 0 \quad (16)$$

$$g_3(x) = \frac{(0.8 f_{ctd}/f_{yd})}{x_3/(x_1(x_2 - d'))} - 1 \leq 0 \quad (17)$$

$$g_4(x) = \frac{0.5 x_4}{x_3} - 1 \leq 0 \quad (18)$$

$$g_5(x) = \frac{x_2}{3.5 x_1} - 1 \leq 0 \quad (19)$$

$$g_6(x) = \frac{x_1}{x_2 + 300} - 1 \leq 0 \quad (20)$$

Güvenilirlik kısıtlamalarından olan  $g_8(x)$  ve  $g_9(x)$ , Denklem (21)-(24)'de verilmiştir.  $g_8(x)$  kısıtı hem mesnette hem açıklıkta koşulları sağlayacak şekilde programda kodlanmıştır.

$$M_d/M_r(b, t, b_w, h, A_s, A'_s, A_{s1}, A'_{s1}, f_{ck}, f_{yk}) - 1 \leq 0 \quad (21)$$

$$g_8(x) = M_d/M_r(b, t, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, f_{cd}, f_{yd}) - 1 \leq 0 \quad (22)$$

$$V_d/V_r(b_w, h, f_{ctk}) - 1 \leq 0 \quad (23)$$

$$g_9(x) = V_d/V_r(x_1, x_2, f_{cd}) - 1 \leq 0 \quad (24)$$

Burada  $M_d$  tasarım momentini,  $M_r$  taşıma gücü momentini,  $V_d$  tasarım kesme kuvvetini,  $V_r$  ise kesitte müsaade edilen maksimum kesme kuvveti değerini ifade etmekte olup,  $M_d$  ve  $V_d$  yük dikkate alınarak,  $M_r$  ve  $V_r$  ise malzeme dikkate alınarak hesaplandığı için bu kısıt kirişin taşıma gücü güvenliğini ifade eder. Bu ifadedeki  $M_r$  ve  $V_r$  ise Denklem (25) ve (27)'de verilmiştir.

$$M_r(x_1, x_2, x_3, x_4, f_{cd}, f_{yd}) = \begin{cases} 0.85 f_{cd} x_1 c(x) k_1 \left( x_2 - d' - \frac{c(x) k_1}{2} \right) + x_4 f_{yd} (x_2 - 2 d'), & \sigma' \geq f_{yd} \\ 0.85 f_{cd} x_1 c(x) k_1 \left( x_2 - d' - \frac{c(x) k_1}{2} \right) + x_4 \sigma'(x) (x_2 - 2 d'), & \sigma' < f_{yd} \end{cases} \quad (25)$$

$$V_r(x_1, x_2, f_{cd}) = 0.22 f_{cd} x_1 (x_2 - d') \quad (26)$$

Denklem (25)'de verilen moment kapasitesi basınç donatısına da bağımlı olarak değişir. Bu durum kendi içinde ilave bir kısıtlamayı beraberinde getirmektedir. Buna ilişkin kısıt, basınç donatısında akma olup olmadığına dairdir. Eğer basınç donatısındaki birim kısalma değeri  $\varepsilon'_s \geq f_{yd}/E_s$  ise (akmış) basınç donatı gerilme değeri  $f_{yd} = 365.22 \text{ N/mm}^2$ ,  $\varepsilon'_s < f_{yd}/E_s$  ise Hooke kanununa uygun olarak gerilme değeri  $\sigma'_s = E_s \varepsilon'_s$  alınmıştır.

Deplasman hesabında, analizi yapılan iç kirişin mesnetlerinde ankastrelik momentlere yakın büyük momentler olacağı dikkate alınarak Denklem (27)'de verilen eşitlik ile hesaplanmıştır. Tüm kullanım yüklerinden (G+Q) oluşan ani sehime değeri ( $\delta_i$ ) ve ani sehime bağlı olarak da TS500'e göre zamana bağlı sehime ( $\delta_{ig}\lambda$ ) hesaplanmıştır (TSE, 2000).

$$\delta_i = \frac{5PL^4}{384E_c I_{ef}} - \frac{1}{16} \frac{M_{mes1} L^2}{E_c I_{ef}} - \frac{1}{16} \frac{M_{mes2} L^2}{E_c I_{ef}} \quad (27)$$

$$I_{ef} = \left( \frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 I_c + \left[ 1 - \left( \frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 \right] I_{cr} \quad (28)$$

$$M_{cr} = 2.5 f_{cta} \frac{I_c}{y} \quad (29)$$

$$\delta_t = \delta_i + \delta_{ig}\lambda \quad (30)$$

$$\lambda = \frac{\gamma_t}{1 + 50\rho'} \quad (31)$$

$$\delta_{ig} = \delta_i \frac{\sum \text{KalıcıYükler}}{\sum \text{TümYükler}} \quad (32)$$

Denklem (27) de yer alan efektif atalet momenti ve kesitin çatlama momenti Denklem (28) ve (29)'de verilmiştir. Sünme ve büzülme etkisi ile oluşan zamana bağlı ek sehimlerin hesabı, TS500'de verilen değişkenlere göre hesaplanır. Toplam sehime ise Denklem (30)'ten hesaplanır (TSE, 2000). Denklem (30) ile  $\lambda$  değeri yine TS500-Çizelge 13.2'den alınan kalıcı yük süre katsayısı,  $\gamma_t = 2$  alınarak hesaplanmıştır. Buradaki  $\rho'$  kirişin açıklık ve mesnetlerinde genelde farklı olur, dolayısıyla ortalama alınmıştır (Topçu, 2019a). Kısıtlamadaki sınır değer ise  $L_k/240$  olarak TS500'den alınmıştır.

### ARAŞTIRMA BULGULARI (RESEARCH FINDINGS)

Analizinde 600 modelin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın tipik değerlerini oluşturan sonuçlar beton sınıfı, tasarım yükü ve kiriş boyuna bağlı olarak optimal kiriş kesit yüksekliği, kiriş gövde genişliği ve mesnet donatısı oranları Çizelge 3’de verilmiştir.

Çizelge 3’de görüldüğü gibi kiriş gövde genişliği, kiriş boyunun 6.5 m ve yayılı yükünün 200 kN/m ve daha büyük değerlerinde artış göstermiştir. Çünkü kiriş yüksekliğinin 750 mm den daha büyük olamayacağı (optimizasyonda ilgili değişkenin üst sınırı) durumlarda kiriş gövde genişliği artış göstermiştir. Bu değerler ilgili çizelgede koyu olarak yazdırılmıştır.

Optimizasyon algoritması kirişin yüksekliğini ilgili kısıt nedeni artıramadığında diğer taşıma gücü ve deplasman kısıtlarını sağlayabilmek için büyük tasarım yükü ve kiriş uzunluklarında kiriş gövde genişliğini artırdığı görülmüştür.

**Çizelge 3.** Optimizasyon sonuçları (L ve h: mm,  $f_{ck}$ : MPa)

*Table 3. Optimization results (L and h: mm,  $f_{ck}$ : MPa)*

	$f_{ck}=30$			$f_{ck}=40$			$f_{ck}=50$				$f_{ck}=30$			$f_{ck}=40$			$f_{ck}=50$			
	$P_d$	L	$\rho_1$	h	$b_w$	$\rho_1$	h	$b_w$	$\rho_1$		h	$b_w$	$P_d$	L	$\rho_1$	h	$b_w$	$\rho_1$	h	$b_w$
P <sub>at</sub> : 50 kN/m	3000	0.005	360	250	0.005	360	250	0.005	360	250	3000	0.015	386	250	0.016	374	250	0.016	371	250
	3500	0.006	360	250	0.006	360	250	0.005	360	250	3500	0.011	505	250	0.013	474	250	0.014	450	250
	4000	0.008	360	250	0.008	360	250	0.008	360	250	4000	0.011	584	250	0.012	541	250	0.014	520	250
	4500	0.010	360	250	0.010	360	250	0.010	360	250	4500	0.013	599	250	0.013	595	250	0.014	578	250
	5000	0.012	360	250	0.012	360	250	0.012	360	250	5000	0.016	600	250	0.016	600	250	0.016	600	250
	5500	0.015	360	250	0.015	360	250	0.015	360	250	5500	0.012	750	250	0.012	750	250	0.012	750	250
	6000	0.015	385	250	0.016	374	250	0.016	371	250	6000	0.014	750	250	0.014	750	250	0.014	750	250
	6500	0.013	444	250	0.014	423	250	0.015	419	250	6500	0.016	750	250	0.016	750	250	0.016	750	250
	7000	0.011	506	250	0.015	443	250	0.014	458	250	7000	0.019	750	250	0.019	750	250	0.019	750	250
7500	0.010	554	250	0.013	503	250	0.014	480	250	7500	0.020	750	<b>277</b>	0.020	750	<b>273</b>	0.020	750	<b>271</b>	
P <sub>at</sub> : 100 kN/m	3000	0.009	360	250	0.009	360	250	0.009	360	250	3000	0.014	427	250	0.015	409	250	0.015	404	250
	3500	0.012	360	250	0.012	360	250	0.012	360	250	3500	0.010	561	250	0.014	477	250	0.014	476	250
	4000	0.016	360	250	0.016	360	250	0.016	360	250	4000	0.011	596	250	0.013	570	250	0.014	542	250
	4500	0.014	427	250	0.015	408	250	0.015	405	250	4500	0.014	599	250	0.014	600	250	0.014	597	250
	5000	0.011	515	250	0.013	477	250	0.015	449	250	5000	0.018	600	250	0.018	600	250	0.018	600	250
	5500	0.011	566	250	0.013	521	250	0.016	468	250	5500	0.013	750	250	0.013	750	250	0.013	750	250
	6000	0.012	587	250	0.012	584	250	0.015	522	250	6000	0.016	750	250	0.016	750	250	0.015	750	250
	6500	0.013	600	250	0.013	599	250	0.013	599	250	6500	0.019	750	250	0.018	750	250	0.018	750	250
	7000	0.011	696	250	0.015	600	250	0.015	599	250	7000	0.020	750	<b>272</b>	0.020	750	<b>268</b>	0.020	750	<b>266</b>
7500	0.011	750	250	0.011	738	250	0.011	750	250	7500	0.020	750	<b>312</b>	0.020	750	<b>308</b>	0.020	750	<b>305</b>	
P <sub>at</sub> : 150 kN/m	3000	0.013	360	250	0.013	360	250	0.013	360	250	3000	0.012	469	250	0.014	446	250	0.014	442	250
	3500	0.015	393	250	0.016	377	250	0.016	375	250	3500	0.011	566	250	0.013	517	250	0.013	512	250
	4000	0.012	487	250	0.013	471	250	0.014	446	250	4000	0.013	598	250	0.013	595	250	0.013	582	250
	4500	0.012	548	250	0.013	512	250	0.014	494	250	4500	0.016	599	250	0.016	600	250	0.016	600	250
	5000	0.012	597	250	0.013	576	250	0.014	551	250	5000	0.020	600	250	0.012	750	250	0.012	750	250
	5500	0.014	600	250	0.014	600	250	0.014	600	250	5500	0.015	750	250	0.015	750	250	0.014	750	250
	6000	0.017	600	250	0.017	600	250	0.017	600	250	6000	0.018	750	250	0.017	750	250	0.017	750	250
	6500	0.012	750	250	0.012	750	250	0.012	750	250	6500	0.020	750	<b>260</b>	0.020	750	<b>257</b>	0.020	750	<b>254</b>
	7000	0.014	750	250	0.014	750	250	0.014	750	250	7000	0.020	750	<b>302</b>	0.020	750	<b>298</b>	0.020	750	<b>295</b>
7500	0.016	750	250	0.016	750	250	0.016	750	250	7500	0.020	750	<b>347</b>	0.020	750	<b>342</b>	0.020	750	<b>339</b>	

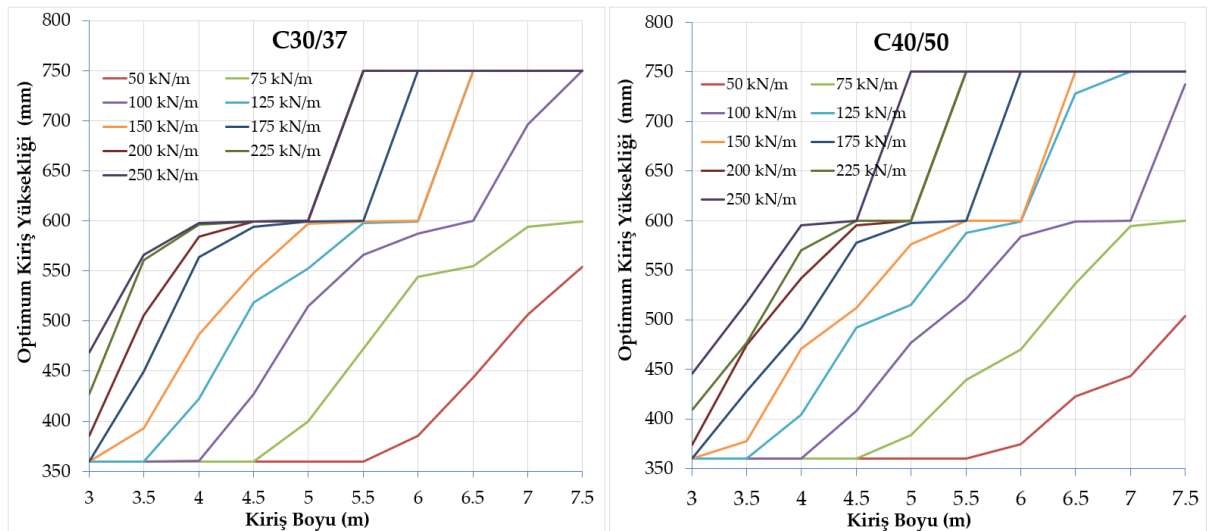
Kiriş boyunun 5 m'den küçük ve tasarım yüklerinin düşük olduğu durumlarda optimal kesit yüksekliği ve donatı oranlarının beton sınıflarına bağlı olarak değişmediği, artan kiriş boyu ve yüksek tasarım yüklerinde ise beton sınıfının optimal kesit yüksekliği ve donatı oranları üzerinde etkisi olduğu tabloda gözlemlenmektedir. Beton sınıfının taşıma gücü üzerinde önemli bir etken olmadığı gerçeği (Derdiman, 2022a; Topçu, 2019b) dikkate alındığında, buradaki etkinin deplasman kısıtından kaynaklandığı görülmektedir.

Çizelge 4'de optimizasyonda elde edilen donatı oranları beton sınıflarına ve boy aralıklarına göre ortalama değerleri verilmiştir. Burada verilen  $\rho$  açıklık bölgesi çekme donatısı oranını,  $\rho'$  açıklık bölgesi basınç donatısı oranını,  $\rho_1$  mesnet bölgesi çekme donatısı oranını ve  $\rho_1'$  mesnet bölgesi basınç donatısı oranını ifade etmektedir.

**Çizelge 4.** Optimizasyonda elde edilen ortalama donatı oranları

*Table 4. Average reinforcement ratios found in optimization*

$P_d$	L:3500 mm-5000 mm				L:5500 mm-7500 mm			
	$\rho$	$\rho_1$	$\rho'$	$\rho_1'$	$\rho$	$\rho_1$	$\rho'$	$\rho_1'$
25	0.00457	0.00478	0.00424	0.00424	0.00457	0.01040	0.00424	0.00528
50	0.00457	0.00794	0.00424	0.00472	0.00395	0.01384	0.00359	0.00687
75	0.00448	0.01137	0.00415	0.00586	0.00446	0.01304	0.00329	0.00648
100	0.00428	0.01272	0.00391	0.00630	0.00503	0.01251	0.00314	0.00622
125	0.00418	0.01315	0.00369	0.00652	0.00605	0.01286	0.00321	0.00640
150	0.00419	0.01326	0.00352	0.00658	0.00750	0.01435	0.00357	0.00715
175	0.00441	0.01340	0.00345	0.00666	0.00865	0.01577	0.00391	0.00785
200	0.00497	0.01382	0.00347	0.00687	0.00920	0.01647	0.00409	0.00821
225	0.00562	0.01420	0.00356	0.00706	0.00991	0.01746	0.00434	0.00870
250	0.00552	0.01353	0.00338	0.00673	0.01054	0.01840	0.00457	0.00917
<b>Ortalama</b>	<b>0.0047</b>	<b>0.0118</b>	<b>0.0038</b>	<b>0.0062</b>	<b>0.0070</b>	<b>0.0145</b>	<b>0.0038</b>	<b>0.0072</b>



**Şekil 6.** Farklı beton sınıfları için tasarım yükü ve artan kiriş uzunluğuna bağlı olarak optimal kiriş yüksekliğini gösteren grafikler

*Figure 6. Graphs showing the optimal beam height depending on the design load and the increased beam length for different classes of concrete*

Tasarım yükü ve artan kiriş uzunluğuna bağlı olarak optimal kiriş yüksekliğindeki değişim C30/37 ve C40/50 beton sınıfları için Şekil 6'da verilmiştir. Betonarme elemanların tasarımında ilk önce eleman kesiti ön tasarım olarak gerçekleştirildiği için optimal kiriş yüksekliğinin doğru belirlenmesi

önem kazanmaktadır. Grafiklerden de görüleceği üzere çok düşük tasarım yüklerinde boyu 5.5 m'ye kadar olan kirişler için minimum boyutlar tercih edilmelidir. Normal tasarım yüklerinde ( $\sim 150 \text{ kN/m}$ ) ise boyu 5.0-6.0 m olan kirişler için kesit yüksekliğin optimal değerinin 600 mm olduğu görülmektedir.

Basınç donatılarının optimizasyon algoritması tarafından sadece kısıtları sağlayacak şekilde belirlendiği görülmektedir. Örneğin 100 kN/m tasarım yükünde 5.5 m den küçük kirişler için mesnet çekme donatı oranı 0.0127, basınç donatısı oranı ise 0.0127'in %50'si yani 0.0063 olarak bulunmuştur. Bulgulara göre optimal tasarımı belirleyen donatı oranı mesnet bölgesindeki değerler olup,  $\sim 150 \text{ kN/m}$  gibi normal tasarım yüklerinde 5.5 m den küçük kirişler için optimum mesnet çekme donatısı oranı %1.33, açıklık optimum çekme donatısı oranı %0.42, 5.5 m'den büyük kirişlerde optimum mesnet çekme donatısı oranı %1.43, açıklık optimum çekme donatısı oranı %0.74 civarında elde edilmiştir.

**Çizelge 5.** Kiriş boyu ve beton sınıfına göre optimal  $L/h$  (kiriş boyu/kiriş yüksekliği) oranları

*Table 5. Optimal  $L/h$  (beam length/beam height) ratios according to beam length and concrete class*

Pa (kN/m)	$f_{ck}$ (MPa)																	
	25	30	35	40	45	50	25	30	35	40	45	50	25	30	35	40	45	50
25	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
50	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
75	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
100	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	10.7	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	9.8	10.5	10.9	11.0	11.1	11.1
125	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.0	9.5	9.8	9.9	10.1	9.9	8.6	8.7	9.3	9.2	9.6	9.7
150	8.3	8.9	9.2	9.3	9.2	9.3	7.5	8.2	8.5	8.5	8.8	9.0	7.7	8.2	8.3	8.8	8.7	9.1
175	7.2	7.8	8.1	8.2	8.3	8.2	6.9	7.1	7.8	8.1	8.0	8.5	7.6	7.6	7.6	7.8	8.0	8.4
200	6.4	6.9	7.3	7.4	8.1	7.8	6.7	6.8	7.1	7.4	7.8	7.7	7.5	7.5	7.5	7.6	7.6	7.8
225	6.2	6.2	6.9	7.3	7.3	7.4	6.7	6.7	6.8	7.0	7.2	7.4	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
250	6.0	6.2	6.5	6.8	7.1	6.8	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.9	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
25	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7
50	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	14.5	15.6	16.0	16.0	16.2	16.2
75	11.6	12.5	12.5	13.0	13.1	13.1	10.8	11.6	12.2	12.5	12.5	12.4	13.6	11.0	11.6	12.8	12.7	12.9
100	10.0	9.7	10.7	10.5	11.2	11.1	10.0	9.7	10.2	10.6	11.3	11.8	10.0	10.2	10.1	10.3	10.8	11.5
125	9.0	9.0	9.2	9.7	9.6	9.9	9.2	9.2	9.2	9.4	9.4	9.8	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
150	8.4	8.4	8.7	8.7	8.7	9.1	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	8.2	10.0	8.0	10.0	10.0	10.0
175	8.4	8.3	8.4	8.4	8.4	8.4	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
200	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	7.5	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
225	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
250	6.7	8.3	6.7	6.7	6.7	6.7	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
25	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8
50	13.6	14.7	15.3	15.4	15.4	15.5	13.0	13.8	14.6	15.8	15.2	15.3	13.5	13.5	14.7	14.9	15.2	15.6
75	10.9	11.7	12.0	12.1	12.9	12.9	11.9	11.8	11.7	11.8	12.4	12.6	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
100	10.9	10.8	10.9	10.9	10.8	10.9	9.3	10.1	10.1	11.7	11.7	11.7	10.1	10.0	10.0	10.2	10.0	10.0
125	9.0	8.7	10.8	8.9	8.8	10.8	9.3	9.3	9.4	9.3	9.3	9.3	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
150	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
175	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
200	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
225	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
250	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0

Çizelge 5 beton sınıfına ve tasarım yüküne göre optimal  $L/h$  (kiriş boyu/kiriş yüksekliği) oranlarını ve Çizelge 6 ise beton sınıfına ve tasarım yüküne göre 5.5 m'den küçük ve büyük olan kirişlerin ortalama optimal  $L/h$  (kiriş boyu/kiriş yüksekliği) oranlarını göstermektedir.  $L/h$  oranı genelde ön tasarımda bir kriter olarak kullanıldığı için bu çizelgeler verilmiştir. Boyu 3.5-5.0 m olan kirişlerde  $\sim 150 \text{ kN/m}$  tasarım yüklerinde analizdeki tüm beton sınıflarının ortalaması için optimal  $L/h \approx 8.6$  çıkarken, boyu 5.5-7.5 m olan kirişlerde  $\sim 150 \text{ kN/m}$  tasarım yüklerinde analizdeki tüm beton sınıflarının ortalaması için optimal  $L/h \approx 9.3$  bulunmuştur. Ayrıca Çizelge 5'de belirli boy ve belirli tasarım yükü değerleri aşıldığında  $L/h$

oranlarının aynı çıktığı görülmektedir. Bu şu şekilde de yorumlanabilir, örneğin 6.5 m kiriş boyunda tasarım yükü  $\sim 150 \text{ kN/m}$  değeri, 7.0 m kiriş boyunda tasarım yükü  $\sim 125 \text{ kN/m}$  değeri ve 7.5 m kiriş boyunda tasarım yükü  $\sim 100 \text{ kN/m}$  değeri aşılnca, optimal kesit yüksekliği algoritma tarafından 750 mm olarak belirlenmiştir.

Buradaki çizelgelerde yer alan değerlerin hem taşıma gücü hem de sehim güvenilirlik koşullarını sağlayan optimal değerler olduğu unutulmamalıdır.

**Çizelge 6.** Beton sınıfına ve tasarım yüküne göre optimal  $L/h$  (kiriş boyu/kiriş yüksekliği) oranları

*Table 6. Optimal  $L/h$  (beam length/beam height) ratios according to concrete classes and design load*

	P <sub>a</sub>	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60	Tüm Beton Sınıfları İçin Ortalama $L/h$
L=3000 mm-5000 mm aralığı için ortalama $L/h$	50	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1
	75	10.7	10.8	10.8	10.9	11.0	11.0	10.9
	100	9.7	9.9	10.2	10.1	10.3	10.3	10.1
	125	8.9	9.0	9.3	9.4	9.5	9.5	9.3
	150	8.0	8.4	8.6	8.7	8.7	9.0	8.6
	175	7.6	7.8	8.0	8.2	8.2	8.4	8.0
	200	7.3	7.5	7.6	7.7	8.0	7.9	7.7
	225	7.1	7.2	7.4	7.5	7.5	7.6	7.4
	250	6.6	7.0	6.8	6.9	7.0	6.9	6.9
L=5500 mm -7500 mm aralığı için ortalama $L/h$	50	14.0	14.6	15.2	15.5	15.5	15.6	15.0
	75	11.9	11.7	12.0	12.3	12.6	12.6	12.2
	100	10.1	10.2	10.3	10.7	10.9	11.2	10.5
	125	9.5	9.4	9.9	9.5	9.5	10.0	9.6
	150	9.1	9.4	9.0	9.4	9.4	9.4	9.3
	175	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
	200	8.7	8.7	9.0	8.7	8.7	8.7	8.7
	225	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7
	250	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7

**Çizelge 7.** Optimal donatı oranlarının farklı çalışmalar ile karşılaştırması (Birimler: Md: kN.m; fck: MPa;  $A_s'$ :mm<sup>2</sup>)

*Table 7. Comparison of optimal reinforcement ratios with different studies (Units: Md: kN.m; fck: MPa;  $A_s'$ : mm<sup>2</sup>)*

	Donatı Oranı (Basit mesnetli kirişin açıklık donatı oranı)	Bu çalışmada Açıklıkta (T kesit) donatı oranları	Bu çalışmada Mesnette donatı oranları
Camp ve diğ. (2003)	<b>0.007</b> Md≈180; fck≈27.6; $A_s'$ =568	<b>0.005</b> Md=180; fck=30; $A_s'$ =395	<b>0.0128</b> Md=179; fck=30; $A_s'$ =650
Turgut ve diğ. (1997)	<b>0.009</b> Md≈225; fck=16; $A_s'$ =0	<b>0.0082</b> Md=225 fck=25; $A_s'$ =495	<b>0.0199</b> Md=225 fck=25 $A_s'$ =610
Mathern ve diğ. (2020)	<b>0.014</b> Md≈?; fck=45; $A_s'$ =980	<b>0.0056</b> Md=228; fck=45; $A_s'$ =359	<b>0.0142</b> Md=380; fck=45; $A_s'$ =986
Coello ve diğ. (1997)	<b>0.015</b> Md≈700-800; fck=?; $A_s'$ =0	<b>0.0115</b> Md=703; fck=30; $A_s'$ =1226	<b>0.0176</b> Md=750; fck=30; $A_s'$ =1560
Algedra ve diğ. (2011)	<b>0.005</b> Md≈200-220 fck=? $A_s'$ =0	<b>0.0068</b> Md=211 fck=30 $A_s'$ =459	<b>0.0133</b> Md=211 fck=30 $A_s'$ =648

Çizelge 7'de optimal donatı oranlarının farklı çalışmalar ile karşılaştırması verilmiştir. Buradaki çalışmalar sabit tasarım yüküne göre ve basit mesnetli kiriş için yapılmış, bazılarında eğilme momenti

bazılarında ise beton dayanımları verilmediğinden dolayı moment değerleri kesit taşıma gücü hesabı ile yeter yakınlıkta hesaplanmıştır. Bu çalışmalarda hesaplanan optimal kesit ve donatı oranları ile bu çalışmada elde edilen sonuçlar birbirlerine yakındır, farklılıkların bu çalışmada ele alınan kirişlerin tablalı (T kesit) olmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

### SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu çalışmada, TS500 kısıtları altında betonarme dikdörtgen (mesnet) ve tablalı (açıklık) kesite sahip sürekli kirişteki bir iç kirişin genelde ön tasarıma esas teşkil etmesi nedeniyle optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon güvenilirlik ve sehim şartları çerçevesinde, artan yük ve farklı beton sınıfları dikkate alınarak, kirişin güvenilirlik ve deplasman koşullarını sağlayacak şekilde kesit değişkenleri ve donatı oranlarının optimizasyonu yapılmış ve şu sonuçlar elde edilmiştir:

- Kiriş boyu 3.5 – 5.0 m olan kirişlerde  $\sim 150 \text{ kN/m}$  tasarım yüklerinde hem güvenilirlik hem deplasman koşullarını sağlayan analizdeki tüm beton sınıflarının ortalaması için optimal  $L/h \approx 8.6$  ( $L/h$  oranı genelde ön tasarımda bir kriterdir) bulunmuştur.
- Kiriş boyu 5.5 – 7.5 m olan kirişlerde  $\sim 150 \text{ kN/m}$  tasarım yüklerinde hem güvenilirlik hem deplasman koşullarını sağlayan analizdeki tüm beton sınıflarının ortalaması için optimal  $L/h \approx 9.3$  bulunmuştur.
- Kiriş boyu ve tasarım yükü büyük değerlere ulaştığında  $L/h$  oranlarının aynı çıktığı görülmektedir. (Konutlardaki ortalama kat yüksekliği ve kapı yüksekliği nedeni ile maksimum kiriş yüksekliğinin 750 mm ile kısıtlanması buna neden olmaktadır).
- Kiriş boyu 5.0 m den küçük kirişler için tasarım yükünün ortalama  $\sim 150 \text{ kN/m}$  olduğu durumda mesnet çekme donatı oranı 0.0133, açıklık çekme donatısı oranı 0.0042 (analizdeki tüm beton sınıflarının ortalama değeri) olduğu görülmektedir.
- Kiriş boyu 5.5 m den büyük kirişler için tasarım yükünün ortalama  $\sim 150 \text{ kN/m}$  olduğu durumda mesnette optimal çekme donatısı oranı 0.0143, açıklık optimal çekme donatısı oranı 0.0075 bulunmuştur (buradaki değerler hem kiriş boyları hem de beton sınıfları için ortalama değerdir).
- Kiriş boyu ve tasarım yükü artarken optimal donatı oranının da hem mesnette hem de açıklıkta arttığı görülmektedir (donatı oranının açıklıkta düşük değerlerde çıkması tabla etkisindedir).
- Hem mesnette hem açıklıktaki optimal basınç donatı oranları yönetmelikteki kısıtlarda kaldığı görülmüştür.
- Sürekli kirişlerde kesit boyutlarının genelde bir iç kirişe bağımlı olarak yapıldığı dikkate alınır, ön tasarım yapılırken yüküne ve boyuna bağımlı olarak optimal sonuçların dikkate alınması sehim ve taşıma gücü şartlarını sağlayan kesin boyutlama hassasiyetinde ekonomik bir boyutlama yapılmasını sağlayacaktır.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- AFAD, 2018, Türk Bina Deprem Yönetmeliği (Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar), Ankara.
- Algedra, M., Arafa, M., Ismail, M., 2011, Optimum Cost of Prestressed and Reinforced Concrete Beams using Genetic Algorithms, Journal of Artificial Intelligence 4, 76–88.
- Altunbey Özbay, F., Özbay, E., 2021, Martı Optimizasyon Algoritmasının Kısıtlı Mühendislik Tasarım Problemleri için Performans Analizi, Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 15, 469–485.
- Arora, J., 2012, Introduction to Optimum Design, 2nd ed. Elsevier Ltd., California.
- Camp, C. V., Pezeshk, S., Hansson, H., 2003, Flexural Design of Reinforced Concrete Frames Using a Genetic Algorithm, Journal of Structural Engineering 129, 105–115.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2022, İnşaat Birim Fiyatlarına Esas İşçilik-Araç ve Gereç Rayiç Listeleri, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.



- Coello, C.C., Hernández, F.S., Farrera, F.A., 1997, Optimal design of reinforced concrete beams using genetic algorithms. *Expert Systems with Applications* 12, 101–108.
- Derdiman, M.K., 2022a, Betonarme ön üretimli makas kirişlerin değişen tasarım momentleri altında beton dayanımlarına bağlı optimal kesit değerlerinin belirlenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 28, 409–418.
- Derdiman, M.K., 2022b, Ayrık PSO algoritması ile sehim kısıtı altında iki doğrultudaki kirişli döşemelerin güvenilirlik tabanlı optimizasyonu, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi* 9, 1, 2022 (49–64).
- Eberhart, R., Kennedy, J., New optimizer using particle swarm theory, *MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japan, 39–43, 04-06 October 1995.
- El Hami, A., Radi, B., 2013, *Uncertainty and optimization in structural mechanics*, John Wiley & Sons, Inc., London.
- Ersoy, U., Özcebe, G., Canbay, E., 2019, *Betonarme : Davranış ve Hesap İlkeleri*, Evrim Kitapevi, İstanbul.
- Haug, E.J., Kirmsier, P.G., 1964, Minimum weight design of beams with inequality constraints on stress and deflection, *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME* 34, 999–1004.
- Kaveh, A., 2017, *Applications of Metaheuristic Optimization Algorithms in Civil Engineering*, Springer Nature, Cham, Switzerland.
- Kim, S.H., Kwak, H.G., 2022, Optimization of an RC frame structure based on a plastic analysis and direct search of a section database, *Journal of Building Engineering* 48, 103959.
- Kirsch, U., 1973, Optimized prestressing by linear programming, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 7, 125–136.
- Kirsch, U., 1972, Optimum design of prestressed beams, *Computers and Structures* 2, 573–583.
- Koumousis, 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.
- Kripka, M., Medeiros, G.F., Lemonge, A.C.C., 2015, Use of optimization for automatic grouping of beam cross-section dimensions in reinforced concrete building structures, *Engineering Structures* 99, 311–318.
- Li, L., Liu, F., 2011, *Group Search Optimization for Applications in Structural Design*, Springer International Publishing, Berlin.
- Malasri, S., Halijan, D., Keough, M., 1994, Concrete Beam Design Optimization with Genetic Algorithms, *Journal of the Arkansas Academy of Science* 48, 111–115.
- Mathern, A., Steinholtz, O.S., Sjöberg, A., Önnheim, M., Ek, K., Rempling, R., Gustavsson, E., Jirstrand, M., 2020, Multi-objective constrained Bayesian optimization for structural design, *Structural and Multidisciplinary Optimization* 63, 689–701.
- Okwu, M.O., Tartibu, L.K., 2021, *Metaheuristic Optimization : Nature-Inspired Algorithms Swarm and Computational Intelligence , Theory and Applications*, Springer Na, Cham, Switzerland.
- Prathabrao, M., Nawawi, A., Sidek, N.A., "Swarm size and iteration number effects to the performance of PSO algorithm in RFID tag coverage optimization", *7th International Conference on Mechanical and Manufacturing Engineering*, Jogjakarta, Indonesia, AIP Conf. Proc. 1831, 020051-1–020051-6, 21-April 2017.
- Python Software Foundation, Python [WWW Document], URL <http://www.python.org>, ziyaret tarihi: 5.1.21.
- Sheikhalishahi, M., Ebrahimipour, V., Shiri, H., Zaman, H., Jeihoonian, M., 2013, A hybrid GA-PSO approach for reliability optimization in redundancy allocation problem, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 68, 317–338.
- Shukla, A., Tiwari, R., 2018, *Discrete Problems in Nature Inspired Algorithms*, CRC Press Taylor & Francis Group, London.
- The NumPy Project and Community, NumPy [WWW Document], URL <https://numpy.org>, ziyaret tarihi: 5.1.21.
- Topçu, A., 2019a, *Betonarme II*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.

- Topçu, A., 2019b, Betonarme I, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- TSE, 2000, TS 500: Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TSE, 1997, TS 498: Yapi Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tsompanakis, Y., Lagaros, N.D., Papadrakakis, M., 2008, Structural design optimization considering uncertainties, Taylor & Francis, Balkema.
- Turgut, P., Gürel, M.A., Arslan, A., "Genetik Algoritma ile Betonarme Bir Kirişin Optimum Tasarımı", İstanbul Teknik Üniversitesi Prof.Dr. A. Rifat Yarar Sempozyumu, Maslak, İstanbul, pp. 349–361, 10 Aralık 1997.
- Vasuki, A., 2020, Nature-Inspired Optimization Algorithms, Taylor & Francis, Oxford.
- Yang, X.S., 2018, "Mathematical Analysis of Nature-Inspired Algorithms", Nature-Inspired Algorithms and Applied Optimization, Ed.:Yang, X.S., Springer, London, p. 330.
- Yang, X.S., 2014, Nature-Inspired Optimization Algorithms, First. ed., Elsevier, London.
- Yang, X.S., He, X.S., 2019, Mathematical Foundations of Algorithms, Springer, Switzerland.
- Yang, X.S., Karamanoglu, M., 2020, "Nature-inspired computation and swarm intelligence: a state-of-the-art overview", Nature-Inspired Swarm Intelligence Computation and Algorithms, Theory and Applications, Ed.: Yang, X.S., Oxford, United Kingdom, pp. 3–18.
- Yousef, A.H., Salama, C., Jad, M.Y., El-Gafy, T., Matar, M., Habashi, S.S., "A GPU based genetic algorithm solution for the timetabling problem", ICCES 2016 - 11th International Conference on Computer Engineering and Systems, Cairo, Egypt, pp. 103–109, December 2016.
- Zolghadr-Asli, B., Bozorg-Haddad, O., Chu, X., 2018, "Advanced Optimization by Nature-Inspired Algorithms", Studies in Computational Intelligence, Vol. 720, Ed.: Bozorg-Haddad, O., Singapore, p. 166.