

# Metasezgisel Yöntemlerle Betonarme Yapı Elemanlarının Optimizasyonu

[Optimization of Reinforced Concrete  
Building Elements with Meta-Intuitive Methods]

Sinan Melih NİGDELİ  
Gebrail BEKDAŞ  
Aylin Ece KAYABEKİR



[iuc-universitypress.org](http://iuc-universitypress.org)

**IUC**  
UNIVERSITY  
PRESS




# Metasezgisel Yöntemlerle Betonarme Yapı Elemanlarının Optimizasyonu

Bu kitap, Cumhuriyetimizin kuruluşunun 100. yılı anısına  
“*Cumhuriyetin 100. Yılına 100 Kitap*” projesi kapsamında  
İstanbul Üniversitesi–Cerrahpaşa tarafından yayımlanmıştır.

Sinan Melih Nigdeli  
Gebrail Bekdaş  
Aylin Ece Kayabekir

Ekim 2023

## Metasegzisel Yöntemlerle Betonarme Yapı Elemanlarının Optimizasyonu

**Yazar:** Sinan Melih Niğdeli 


**Kurum:** İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mekanik Ana Bilim Dalı, İstanbul, Türkiye

**E-posta:** melihni@iuc.edu.tr

**Yazar:** Gebrail Bekdaş 

**Kurum:** İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mekanik Ana Bilim Dalı, İstanbul, Türkiye

**E-posta:** bekdas@iuc.edu.tr

**Yazar:** Aylin Ece Kayabekir 

**Kurum:** İstanbul Gelişim Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

**E-posta:** aekayabekir@gelisim.edu.tr

### Yayıncı



**Adres:** Üniversite Mahallesi, 34320 İstanbul/Türkiye

**E-posta:** iucpress@iuc.edu.tr

**E-ISBN:** 978-605-7880-17-8

**DOI:** 10.5152/2900

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Yayınevi Seri No: 06

### Yayıncılık Hizmetleri



© 2023. Telif hakkı yazarlara aittir. Bu kitaptaki bölümler açık erişimli olup Creative Commons Atıf 4.0 Uluslararası Lisansı altında dağıtılmaktadır. Bu lisans kullanıcılara, bölümleri herhangi bir amaç için indirme, çoğaltma ve yayımlanan bölümler üzerinde çalışma imkânı sunar. Böylece yayınlarımızın en geniş şekilde yayılmasını ve daha geniş bir etkiye sahip olmasını sağlar.

### Sorumluluk Reddi

Kitapta yayımlanan metinlerin/bölümlerin ifadeleri veya görüşleri yazar(lar)ın ve editör(ler)in görüşlerini yansıtır. İÜC Yayınevi ve İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa yazarların içeriğinden sorumlu değildir. Yayımlanan kitaplardaki çalışmaların doğru ve iyi araştırılmış olması ve metinlerde ifade edilen görüşlerin tutarlılığı yazar ve editörlerin sorumluluğundadır. İÜC Yayınevi ve İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, yazarlara çalışmalarını bilimsel toplulukla paylaşmak için bir platform sağlamaktadır.

Atıf için: Niğdeli, S.M., Bekdaş, G. & Kayabekir, A.E. (2023). *Metasegzisel yöntemlerle betonarme yapı elemanlarının optimizasyonu*. İstanbul: İÜC Yayınevi.

# İÇİNDEKİLER

REKTÖRÜN ÖN SÖZÜ .....	IV	BÖLÜM 3: BETONARME KİRİŞLERİN .....	18
ÖN SÖZ .....	V	OPTİMUM TASARIMI	
GİRİŞ.....	VII	1. Betonarme Kirişlerin Eurocode .....	18
BÖLÜM 1: MÜHENDİSLİKTE OPTİMİZASYONA		2. Yönetmeliğine Göre Optimum Tasarımı	
GİRİŞ .....	1	2. Betonarme Kirişlerin Acı .....	19
1. Mühendislikte Optimizasyon.....	1	318 Yönetmeliğine Göre Optimum Tasarımı	
1.1. İnşaat Mühendisliğinde Optimizasyon.....	1	BÖLÜM 4: BETONARME KOLONLARIN .....	25
1.2. Yapıların Optimizasyonunun Tarihçesi .....	2	OPTİMUM TASARIMI	
1.3. Betonarme Yapıların Optimizasyonu .....	2	1. Çift Eğilmeli Betonarme Kolonların .....	25
İçin Ele Alınan Metasezgisel Tabanlı Çalışmalar		Optimum Tasarımı	
BÖLÜM 2: METASEZGİSEL ALGORİTMALAR .....	10	BÖLÜM 5: BETONARME ÇERÇEVELERİN .....	31
1. Betonarme Yapılarının Optimizasyonunda .....	10	OPTİMİZASYONU	
Metasezgisel Algoritmaların Kullanımının		1. Yöntem .....	31
Nedenleri		2. Sayısal Örnekler .....	35
1.1. Optimizasyon Problemi .....	11	BÖLÜM 6: BETONARME TEMELLERİN .....	39
1.2. Metasezgisel Yöntemlerin Metodolojisi .....	11	OPTİMUM TASARIMI	
2. Genetik Algoritma .....	12	1. Çift Eksenli Eğilme Tekisi Altında .....	39
3. Diferansiyel Evrim Algoritması .....	13	Betonarme Tekil Temellerin Optimum	
3.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu .....	13	Tasarımı	
4. Çiçek Tozlaşma Algoritması .....	13	BÖLÜM 7: BETONARME İSTİNAT .....	45
5. Yarasa Algoritması .....	14	DUVARLARININ OPTİMUM TASARIMI	
6. Tavlama Benzeşimi Algoritması .....	14	1. Betonarme İstinat Duvarlarının .....	45
7. Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon .....	15	Optimum Tasarımı	
8. Armoni Arama Algoritması .....	15	2. Sayısal Örnek .....	47
9. Jaya Algoritması .....	15		

## REKTÖRÜN ÖN SÖZÜ

Türk milletinin bağımsızlık mücadelesi, 29 Ekim 1923'te Cumhuriyetin ilanı ile taçlanmıştır. Dünya tarihine altın harflerle kazınan büyük bir mücadele sonucu elde edilen şanlı zafer, Türk milletinin hür ve bağımsız yaşama kararlılığı ile çıktığı yolda; inanç, cesaret, güven ve sınırsız fedakârlıkla gösterdiği eşsiz kahramanlıkların eseridir. Egemenliğin kayıtsız şartsız millete teslim edildiği Türkiye Cumhuriyeti, Millî Mücadele'mizin önderi Gazi Mustafa Kemal Atatürk'ün milletimize en büyük armağanıdır.

Cumhuriyetin kazanımlarını koruma ve milletimizin muasır medeniyetler seviyesine ulaşma hedefinde, eğitim ve bilim her zaman en büyük rehberdir. Bu hedeflerin gerçekleştirilmesinde ise en büyük sorumluluk kuşkusuz üniversitelere düşmektedir.

Ülkemizin köklü ve öncü üniversiteleri arasında yer alan İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa; bilimsel yaklaşımı benimseyen, bilgi üreten ve uygulamalarıyla toplumun gelişmesine katkıda bulunmayı ilke edinen bir araştırma üniversitesidir. Cumhuriyet değerlerine bağlı bir yükseköğretim kurumu olarak Cumhuriyetimizin 100. yılına ithafen akademisyenlerimizin iş birliğiyle "*Cumhuriyetin 100. Yılına 100 Kitap*" projesini hayata geçiriyoruz. Proje kapsamında, akademisyenlerimizin kendi uzmanlık alanlarıyla ilgili kaleme aldıkları ve İÜC Yayınevi tarafından basılan kitaplar, açık erişimle tüm toplumun faydasına sunulmaktadır. Sağlıktan mühendisliğe, sosyal bilimlerden eğitime kadar pek çok alanda hazırlanan 100 kitap; eğitim-öğretim materyali, ders kitabı olarak kullanılabilen gibi araştırma geliştirme kapsamında yararlanılacak kaynak olarak da kullanılacak nitelikteki kitaplardan oluşmaktadır.

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa olarak köklü geçmişimizden aldığımız güçle Cumhuriyetimizi nice yüzyıllara taşımak için var gücümüzle çalışmaya ve üretmeye devam ediyor, 100. yılını kutladığımız Cumhuriyetin kurulmasında emeği geçen tüm kahramanlara adadığımız "*Cumhuriyetin 100. Yılına 100 Kitap*" projemizi; tüm akademisyenlerin, öğrencilerin ve araştırmacıların kullanımına sunuyoruz.

**Prof. Dr. Nuri Aydın**  
Rektör  
29 Ekim 2023

## ÖN SÖZ

Mühendislikte birçok karmaşık problemin çözümü geleneksel matematiksel yöntemler kullanılarak elde edilemez veya çözümü çok zordur. Bir mühendisten en büyük beklenti, kullanıcıların maksimum kazancı için mükemmel şekilde uyarlanmış bir çözüm bulmaktır. Genel olarak, en zorlu mühendislik problemleri bir tasarımın optimizasyonudur. İnşaat mühendisliğinde (özellikle yapı mühendisliğinde) tasarım değişkenlerinin sayısı diğer mühendislik disiplinlerine göre daha fazladır ve tasarım kısıtlamaları birçok tasarım değişkenine bağlıdır. Bu nedenle, problemler çözümü doğrusal değildir. Betonarme yapılar için daha fazla zorluk vardır. Bu yapıların maliyet optimizasyonunda farklı davranışa ve fiyata sahip iki farklı malzemenin kullanılması ve sünek davranışın sağlanması gerekliliği sayısal optimizasyonunun önündeki engellerden biridir.

Metasezgisel algoritmalar kullanılarak, gerçekçi faktörler göz önünde bulundurularak mükemmel bir şekilde uyarlanmış bir tasarım sağlanabilir ve yapay zekâ optimizasyon algoritmaları olan bu yöntemler, mühendislik problemlerinin çözümünde sıklıkla stokastik yöntemlerden yararlanmaktadır. Bu eserin Cumhuriyetimizin 100. Yılında güçlü Türkiye'mizin daha da güçlenerek bilim, teknoloji ve sanayide yenilikçi yöntemlerle dışa bağımsız olmakla beraber Dünya'da öncü ve kural koyucu konumunu güçlendirmesini umut ederiz.

Millî mücadele ve egemenlik sonucunda Mustafa Kemal Atatürk'ün kurduğu Cumhuriyetimizin kuruluşunun 100. Yılına taçlandırması amacıyla İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa'da oluşturulan 'Cumhuriyetin 100. Yılına 100 Kitap' projesinde yer almaktan gurur duyar, bu projeye destek sağlayan ve gerçekleşmesine için çabalarını eksik etmeyen herkese teşekkürlerimizi sunarız.

Büyük Önderimiz Gazi Mustafa Kemal Atatürk'ü, aziz şehitlerimizi ve gazilerimizi saygı ve rahmetle anıyoruz.

**Prof. Dr. Sinan Melih NİGDELİ**  
**Prof. Dr. Gebrail BEKDAŞ**  
**Dr. Öğr. Üyesi Aylin Ece KAYABEKİR**

*Bu eserin ana mimarı olan annelerimiz*

*İşmuni BEKDAŞ  
Oya NİGDELİ  
Oya TABAKOĞLU  
Ve tüm annelerimize...*



# GİRİŞ

Mühendislik tasarım sürecinde güvenlik, estetik, ekonomiklik vb. birçok faktör dikkate alınmaktadır. Tasarımın uygulanabilirliği ve başarımı, birçok farklı tasarım seçeneği arasından belirlenecek ve tüm etkin faktörleri en uygun şekilde bir araya getirilmesi ile mümkün olabilir. En uygun tasarım çok sayıda seçenek arasında belirlenmesi, tecrübenin bir faydası olmasına rağmen her zaman mümkün olmayabilir. Bunun sebebi tasarımda değişken sayısı arttıkça artan tasarım seçeneklerinin hemen hepsini göz önüne alarak uygun şartları sağlayacak seçenekler arasından en uygun olanın seçilmesi işleminin tasarımcı tarafından yapılması zaman ve kontrol bakımından oldukça zor ve bazı durumlarda imkansızla yakın olmasıdır. Örnek olarak İnşaat mühendisliği yapısal tasarım süreçlerinde, yapısal eleman sayısı ile her yapısal eleman için seçilebilecek farklı kesit boyutları dikkate alındığında, aynı yapı için eleman sayısına bağlı binler belki de milyonlarla ifade edilebilecek farklı tasarım kombinasyonu ortaya çıkacaktır. Tasarı ve buna bağlı seçenek sayısı değişkenlik gösterse dahi benzer durum hemen her mühendislik tasarımı için geçerli olduğu söylenebilir.

En uygun tasarım belirlenmesi üzerine yapılan araştırmaların tarihi eski olması rağmen, gelişen bilgisayar teknolojisinin sağladığı imkanlarla ivme kazanmış ve bu amaç doğrultusunda çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden metasezgisel algoritmalar, etkinliği bilimsel araştırmalar sonucunda ortaya konmuş, farklı alanlarda uygulanmış örnekler arasında yer almaktadır.

Bu eser kapsamında da metasezgisel algoritmalar betonarme yapısal eleman ve sistemlerin en uygun tasarımı süreci tanıtılmaktadır. Bu kapsamda eserin bölümlerinde öncelikle metasezgisel algoritmalar kısaca tanıtılmıştır. Sonraki bölümlerde sırasıyla giriş, kolon, iki boyutlu çerçeve sistemler ile tekil temellerin en uygun (optimum) tasarım süreçleri ele alınmıştır. Son bölümde uygulama örneklerine sık karşılaşılan konsol tipi istinat duvarı problemi tanıtılmıştır.

Eserimizin bu kapsamda teknoloji-inşaat mühendisliği tasarım sürecine bir katkısı olacağını umuyor ve ilerleyen süreçte araştırmacıların katkılarıyla geliştirilerek ülkemizin bu alanda etkin katkı sağlayacak düzeye erişeceğine inanıyoruz.

# **BÖLÜM 1**

## **MÜHENDİSLİKTE OPTİMİZASYONA GİRİŞ**

# Mühendislikte Optimizasyona Giriş

## *Introduction to Optimization in Engineering*

### BÖLÜM HAKKINDA

Bu giriş bölümünde, ilk başta mühendislikte optimizasyonun önemine ve niçin gerekli olduğuna değinilmiştir. Daha sonra inşaat mühendisliği için optimizasyonda karşılaşılabilecek gereksinimler belirtilmiştir. En son olarak yapıların optimizasyonunun tarihçesi Galilei Galileo'dan başlayarak son yıllarda yapılmış metasezgisel yöntemlere kadar sunulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Optimizasyon, metasezgisel, inşaat mühendisliği

### ABOUT the CHAPTER

In this introductory chapter, the importance of optimization in engineering and why it is necessary are mentioned in the first place. Then, the requirements to be encountered in optimization for civil engineering are specified. Finally, the history of optimization of structures is presented starting from Galileo Galileo to metaheuristic methods made in recent years.

**Keywords:** Optimization, metaheuristics, civil engineering

## Mühendislikte Optimizasyon

Bir mühendislik tasarımı yapılırken birkaç konu ele alınmalıdır. Bu önemli konular ekonomi, güvenlik, kullanım ve mimari ile ilgilidir. Bir tasarımın en iyi şekilde tasarlanmış bir nesne olduğunu doğrulamak için, bu önemli konulardan birinin veya sadece birkaçının dikkate alınması yeterli değildir. Bir mühendislik tasarımı, bireylerin ihtiyaçlarını karşılamak için tüm bu önemli hususları dikkate alınmalıdır. Bu durumda, bir mühendis, bu konular arasında mükemmel bir denge bulmak için tüm sorunları düşünmek için ağır bir yük altındadır. Sadece deneyimli mühendisler tüm unsurları mükemmel yakın bir şekilde halledebilir. Bu konuları dikkate almak için çeşitli ölçütler oluşturulmalı ve bu konular tasarımda formüle edilmelidir. Bu konular birbiriyle ilişkili olduğundan, tasarım problemleri genellikle doğrusal değildir ve çeşitli yöntemler geliştirilmeli ve bu yöntemler tasarım problemine özgü olmalıdır. Doğrusal olmamaları nedeniyle, bu sorunlar ancak yaklaşık olarak geleneksel yöntemler kullanılarak ele alınabilir. Artan talepler ve teknolojinin avantajları nedeniyle günümüz ihtiyaçları yaklaşık bir çözümün ötesindedir. Birkaç doğrusal olmama durumu güçlük veya yaklaşık olarak ele alınabilir veya birkaç faktörün varsayımı olmadan klasik bir çözüm bulunamaz. Bu durumda, deneyim büyük bir rol oynayabilir. Kesin ve optimum bir tasarım için, tasarım aşamalarının değerlendirilmesi bir algoritma kullanılarak yinelenmeli olarak yapılabilir.

## İnşaat Mühendisliğinde Optimizasyon

İnşaat mühendisliği, temel mühendislik disiplinlerinden biridir ve inşaat mühendisliği tasarımlarında ekonomi, güvenlik, kullanım ve mimari gibi konular son derece önemli olduğundan ve inşaat mühendislerinin ürünleri doğrudan bireyler üzerinde etkili olması optimizasyonu bir gereklilik haline getirmiştir. Yaşam ortamı sağlayan tüm tasarımların inşaat mühendisliği kapsamına girmesi nedeniyle inşaat mühendisliğinin birçok uygulaması vardır. İnşaat mühendisliğinin yapı mühendisliği, yapı mekaniği, yapı malzemeleri, yapı yönetimi, geoteknik mühendisliği, ulaştırma mühendisliği ve hidrolik gibi alt disiplinlerinde optimizasyon, su kaynakları, üst yapı ve altyapı projeleri, toprak dolgularının stabilizasyonu ve toprağın iyileştirilmesi toplu ulaşım ve kaynaklar, ulaşımda trafik gibi birçok uygulamayı ilgilendirir.

İnşaat mühendisliği tasarımları çevresel koşullardan etkilenir ve dünya, farklı kaynaklara ve farklı doğal afet risklerine sahip farklı coğrafi alanlara sahiptir. İnşaat mühendisliği



uygulamalarının tasarımında en önemli konu güvenlik olmakla birlikte diğer konular tercih edilebilirlik indeksidir.

Tasarımların güvenliği için yapısal mekanik teorisi ve deneysel araştırmalar çeşitli düzenlemelerde formüle edilmiştir. Yönetmeliklerde teori ve deneyler genel olarak aynı olmasına rağmen, bölgedeki malzeme üretim kalitesi, işçilik kalitesi ve spesifik doğal afetler nedeniyle farklı ülkelerde standartlar farklıdır veya farklı ülkelerde farklı standart ekleri bulunmaktadır. Mevzuat farklılıkları, bir bölgedeki kaynak olanakları da dahil olmak üzere insanların ve sosyal otoritelerin talepleri ile birleştirilir. Bu durumda, bir bölge veya kişi için optimum tasarım, başka bir yer için kabul edilebilir en iyi tasarım olmayabilir. Bu nedenle, bu faktörler belirli tasarım kısıtlamaları ve tasarım değişken aralıkları olarak kabul edilir.

Bir makine mühendisliği ürününün ve bir inşaat mühendisliği yapısının optimizasyonu, optimum tasarım sonuçlarının atanmasında büyük farklılıklar gösterebilir. En iyi optimum çözümleri bulmak için sürekli tasarım değişkenlerinin kullanılması en iyi seçenektir ve bir fabrikada hassas boyut değerleriyle bir makine parçası veya bir nesne üretilebilir. Bir şantiyede kesin ölçülü bina inşası sağlanamaz. Bu durumda, yapısal tasarım için ayırık değişkenler kullanılabilir veya sürekli değerler pratik boyuta yuvarlanmalıdır. Bu durumda, kesin optimum tasarım hiçbir zaman yapısal tasarım için kullanılamaz. Özellikle betonarme yapılar, sahada beton dökümünü içerir ve yerel pazarlarda bulunan boyutlardaki donatıların yerleştirilmesi, tasarım değişkenlerinin belirli değerlerde atmasını gerektirir. Bu nedenle donatı çeliği ölçüleri, optimizasyon işlemleri sırasında tasarımcı tarafından tanımlanan ölçülerden seçilmelidir. Ayrıca çelik yapılar için profil ölçüleri yerel pazarların sabit ölçülerine göre üretilmektedir. Yapıların optimum tasarımı, inşaatta pratik olan mümkün olan en iyi boyutları ve tasarım detayını içerir.

Yönetmelikte tasarım kuralları tasarım kısıtlamaları olarak tanımlanır ve bu kısıtlamalar ancak tasarımın nihai boyutu biliniyorsa bulunabilir. Bu kısıtlamalar nedeniyle, doğrusal matematiksel yöntemler kullanılarak bir amaç fonksiyonunun minimizasyonu mümkün değildir. Doğrusal olmayan yöntemler için, çeşitli tasarım kısıtlamalarının (gerilme limitleri, kesme kapasitesi, minimum ve maksimum limitler ve süneklik koşulları) ve değişkenlerin (farklı gerilme ve kesit türleri için enine kesit boyutu ve donatı miktarı) mevcut olması optimizasyonu kompleks bir problem yapmaktadır. Bu durumda yinelemeli analizler kullanan sayısal optimizasyon yöntemleri optimizasyon için uygundur.

Son yıllarda inşaat mühendisliği yapılarının optimum tasarımı için metasezgisel tabanlı optimum tasarım metodolojileri geliştirilmiştir. Metasezgisel yöntemler, sosyal hayattan veya doğadan bir süreci, olayı veya davranışı formüle eden algoritmalar, çünkü mühendislik problemlerinde hedefleri optimize etmek gibi her süreç, olay veya davranışın nihai bir amacı vardır. Mühendislik problemlerinde potansiyel olarak kullanılan çeşitli metasezgisel algoritmaların detayları Bölüm 2'de verilecektir.

### Yapıların Optimizasyonunun Tarihçesi

İlk deneme fikri olarak, kiriş elemanlarını optimize etmek amacıyla statik olarak belirli kirişlerin şeklini iyileştirmek için Galilei Galileo 1665'te çalışmıştır (Galilei, 1950). Akademik olarak ise,

Haug & Kirmser (1967) tarafından kirişlerin ağırlığını en aza indirmek için kirişin optimizasyonuna ilişkin erken yinelemeli hesaplamalar, gerilme ve sapma ile ilgili tasarım kısıtlamalarını kullanarak yapılmıştır. Venkaya (1971), çoklu yüklenme koşulları altında elemanların boyutları, gerilme ve yer değiştirme ile ilgili tasarım kısıtlamalarını tamamen göz önünde bulundurarak kirişler, çerçeveler ve kafes kirişler dahil yapıları optimize etmek için enerji kriterlerini kullanan bir arama prosedürü önermiştir.

Betonarme kirişlerin optimum tasarımı için Friel (1974), betonarme kirişin sadece momente maruz kaldığını dikkate alarak çeliğin oranı için optimum tasarım formülasyonu geliştirmiştir. Chou (1977), Lagrange çarpanları yöntemini kullanarak, betonarme T-kiriş kesitlerinin derinliğini ve eğilme donatısı alanını optimize etmiştir. Krishnamoorthy ve Munro (1973), uyumluluk, sınırlı süneklik, denge ve hizmet verilebilirlik ile ilgili çeşitli kısıtlama türleri ile optimize edilmiş betonarme çerçeveleri için bir doğrusal programlama modeli önermiştir. Kirsch (1983), çok açıklıklı sürekli betonarme kirişin maliyet optimizasyonu için üç seviyeli yinelemeli bir metodoloji önermiştir ve donatılar, kesit boyutları ve tasarım momentleri sonuç olarak ele alınmıştır. Lakshmanan ve Parameswaran (1985), betonarme kesitlerin optimum eğilme tasarımında deneme ve yanılma yaklaşımlarından kaçınmak için açıklık-etkili derinlik oranlarının belirlenmesi için bir yöntem önermiştir. Prakash vd. (1988) tek ve çift donatılı kirişler, T-kirişler ve eksantrik yüklü kolonlar için basit optimizasyon teknikleri geliştirmiştir. Hoit vd. (1991), çerçevelerin ağırlığını azaltmak için artırılmış Lagrange çarpanları ve doğrusal olmayan programlama teknikleri kullanmışlardır. Chakrabarty (1992a, 1992b), geometrik programlama ve Newton-Raphson yöntemlerini kullanarak çeşitli kısıtlamaları kullanan bir optimizasyon modeli geliştirmiştir. Al-Salloum ve Husainsiddiqi (1994), artırılmış Lagrange fonksiyonunun türevlerini alarak, maliyet ve dayanım parametrelerine göre alan ve derinlik için kapalı bir form çözümünde elde etmiştir. 90'ların sonlarında, betonarme kirişler için sıralı doğrusal programlama ve gradyan projeksiyon yöntemini içeren hesaplama yöntemleri (Chung & Sun 1994), betonarme kirişler için sürekli tip optimalite kriterleri yöntemi (Adamu vd., 1994), betonarme kısa bağlı kolonlar için dahili ceza fonksiyonu algoritması (Zielinski vd., 1995), üç boyutlu yapılar için optimal kriterler (Fadaee & Grierson, 1996) ve üç boyutlu çerçeveler için çok seviyeli yöntem (Balling & Yao, 1997) önerilmiştir.

### Betonarme Yapıların Optimizasyonu İçin Ele Alınan Metasezgisel Tabanlı Çalışmalar

İnşaat yapılarının tasarımında temel amaç genellikle tüm unsurları kısıt olarak alarak mühendislik tasarımlarının maliyetlerinin minimize edilmesidir. Betonarme elemanların veya yapıların optimum tasarımı ile ilgili çalışmalardan bu bölümde bahsedilmiştir.

Tüm mühendislik optimizasyon çalışmalarında olduğu gibi, genetik algoritma (GA) da betonarme tasarımı için en çok kullanılan algoritmadır. Coello vd. (1997), GA ile beton, çelik ve kalıp maliyetlerini en aza indirerek dikdörtgen kesitli betonarme kirişleri optimize etmiştir. GA, kapasite kontrolü için çift eksenli moment yüklü betonarme kolonlarının optimizasyon metodolojisine de dahil edilmiştir (Rafiq & Southcombe, 1998). Koumoussis ve Arsenis (1998), gerekli donatı alanını, sürekli kirişlerin farklı kısımlarında bulunan belirli çap ve uzunluk ile tanımlanan bir dizi donatı çubu-

ğuna dönüştürmek için GA'yı kullanmıştır. Betonarme yapı elemanları için Rath vd. (1999), maliyet optimizasyonu için GA ve şekil optimizasyonu için sıralı ikinci dereceden programlama tekniğini kullanan bir hibrit yöntem önermiştir. Camp vd. (2003), kirişleri, tek eksenli yüklü kolonları ve çok katlı çerçeveleri optimize etmek için GA tabanlı metodoloji kullanmıştır. Govindaraj ve Ramasamy (2005), GA tabanlı yaklaşımla betonarme sürekli kirişleri optimize etmiştir. Yaklaşımda boyuna donatılar 4 grup olarak düşünülmüş ve grupların olası çap kombinasyonları 861 kombinasyonu içeren bir şablondan seçilmiştir. Yine klasik bir metasezgisel yöntem olan tavlama benzeşimi (SA) betonarme optimizasyon çalışmalarına dahil edilmiştir. Lepš ve Šejnoha [2003], betonarme sürekli kirişlerin optimizasyonu için GA ve SA'yı birleştiren hibrit bir yöntem önermiştir. Fedghouche ve Tiliouine [2012] GA kullanarak T-şekilli kesitli betonarme kirişleri optimize etmiştir. Bu yaklaşımda Eurocode 2 [2002] kurallarının tasarım kısıtları olarak alınmış ve bu kısıtlamalar tek donatılı betonarme kiriş için formüle edilmiştir.

Bekdaş ve Nigdeli [2013], T-kesitli betonarme kirişi, Armoni Arama (HS) kullanarak ve kirişin çekme ve basınç taraflarında iki sıradaki donatıların ayrıntılı optimizasyonunu dikkate alan bir optimizasyon yaklaşımıyla optimize etmiştir. HS ayrıca Bekdaş ve Nigdeli [2014a, 2014b] tarafından narinlik dikkate alınarak betonarme kolonların maliyet optimizasyonu için kullanılmıştır. Betonarme perde duvarların optimizasyonu da Nigdeli ve Bekdaş [2014a] tarafından HS algoritması kullanılarak geliştirilmiştir. Betonarme perde duvarlar için optimize edilmiş tasarım değişkenleri, perde duvar kalınlığı, kolon başlıklarının gövde donatıları, perde duvarın gövde donatıları ve etriyelerdir.

Nigdeli ve Bekdaş [2017a], betonarme sürekli kirişlerin maliyet optimizasyonu için bir rastgele arama tekniği (RST) geliştirmiştir. Şekil 1'de iki açıklıklı bir sürekli kiriş için görüldüğü gibi, elverişsiz canlı yük dağılımları göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 1'de LP, yük düzenini tanımlar ve D ve L sırasıyla sabit ve hareketli yayılı yüklerdir. Sürekli kirişin iç kuvvetlerinin çözümü için Clapeyron teorisini kullanan üç moment denklemi kullanılmıştır. RST kullanan metodoloji, tasarım değişkeni nesillerinin yinelenmesini tamamlamak için üç koşul kullanır. Bunlardan ilki eğilme kapasitesi, kesme kapasitesi ve sünek davranış ile ilgili yedi tasarım kısıtlaması sağlanmasıdır. İkinci olarak ekonomik koşulu sağlamak için rastgele atanan donatılar, kritik enkesit için gerekli donatıdan %5 daha fazla olmalıdır. Son olarak ise, çift donatılı bir

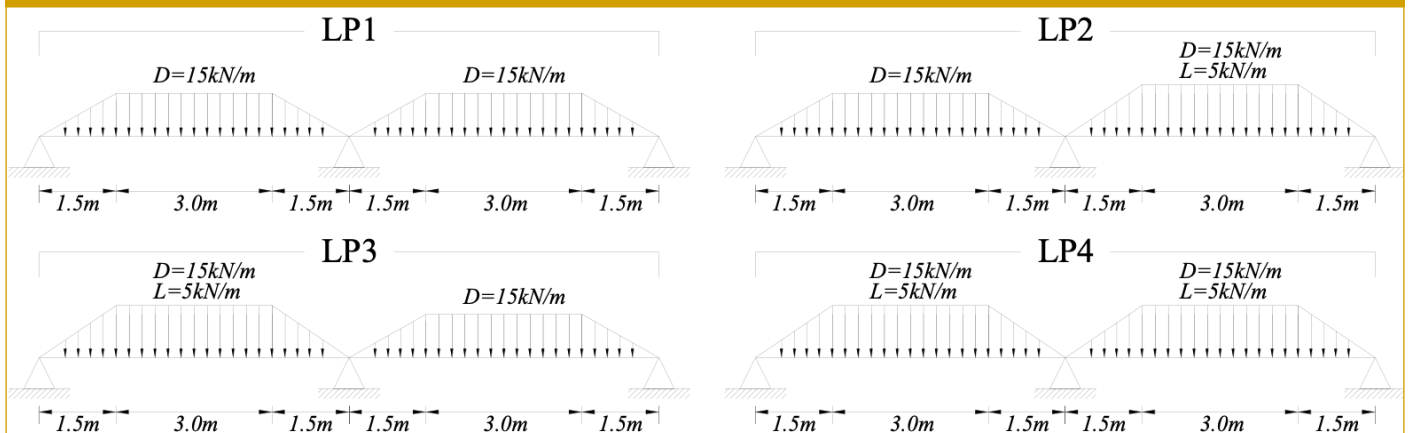
kirişe ihtiyaç duyulursa, ekonomik olmayan aday çözümlerin önüne geçmek için basınç kısmındaki donatılar, çekme kısmındaki donatılardan daha az olmalıdır.

Jahjouh vd. [2013] yapay arı kolonisi (ABC) algoritması kullanarak betonarme sürekli kirişleri optimize etmiş ve birden fazla değişkenden oluşan üyelerle uğraşırken performansı artırmak için değişken bir değiştirme yüzdesi ekleyerek algoritmayı modifiye etmiştir. Akın ve Saka [2010], ayrıntılı bir donatı konumlandırmasını dikkate alarak betonarme sürekli kirişleri optimize etmek için HS'yi kullanmıştır. Bekdaş ve Nigdeli [2015a], eksenel yük ve eğilme momentine maruz kalan betonarme kolonlara tek boyutlu olarak RST uygulamıştır. Betonarme kolonun tasarım değişkenleri, kesit boyutları, üst ve alt kısımdaki çubuklar (iki sıra halinde), gövde donatıları ve kesme donatılarıdır. Nigdeli vd. [2015] optimizasyon sürecinde farklı aşamalar kullanarak geliştirilmiş bir HS yöntemini çift eksenli yüklü kolonları optimize etmekte kullanmışlardır.

Nigdeli ve Bekdaş [2014b] HS kullanarak maliyet optimizasyonu için betonarme kolonunun narinlik etkilerini dikkate almıştır. Kolonun eksenel kuvvetinin ikinci dereceden etkileri dikkate alınarak bir moment büyütme faktörü, metodolojide ACI 318 [2005] yönetmeliği gereksinimlerine göre hesaplanmıştır. Narin betonarme kolonlar için yarasa algoritması [Bekdaş & Nigdeli, 2016a] ve öğretim öğrenme tabanlı optimizasyon (TLBO) [Bekdaş & Nigdeli, 2016b] da kullanılmıştır.

GA ve Hook and Jeeves yöntemi, betonarme kirişsiz döşemeli binaların optimum tasarımında hibrit bir yöntem olarak kullanılmaktadır [Sahab vd., 2005a, 2005b]. Bu yaklaşımda nüfus büyüklüğünü dinamik olarak değiştirmek için GA, Sahab vd. tarafından modifiye edilmiştir [2005a]. Değiştirilmiş GA, global optimizasyon aşaması olarak kullanılırken, daha iyi optimum sonuçları bulmak için global optimizasyon aşamasından sonra yerel optimizasyon için Hook and Jeeves yönteminin ayrılaştırılmış formu kullanılmıştır. Ayrıca, kirişsiz döşemeli binalar, Sahab vd. [2005b] tarafından kolonların yerleşim optimizasyonu, kolonların ve her bir kolon düzeni için döşemenin boyut optimizasyonu ve sayı ve boyutlarla donatı optimizasyonu olmak üzere üç aşamada optimize edilmiştir. Bunlara ek olarak, Kaveh ve Abadi [2011] tarafından tek yönlü kirişli döşeme sisteminin beton ve çelik donatı maliyetlerini en aza indirmek için HS kullanılmıştır. Ghandi vd. [2017], Guguk Kuşu

Şekil 1. İki Açıklıklı Sürekli Kirişin Hareketli Yük Durumları İçin Yükleme Koşulu [Nigdeli & Bekdaş, 2017a]



Algoritması (CS) kullanarak tek yönlü ve iki yönlü betonarme (betonarme) döşemelerin minimum maliyeti ile optimum tasarımı araştırmış ve CS'nin optimum çözümler bulmada etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Guerra ve Kioussis (2006), kısıtlı doğrusal olmayan problem için Sıralı Karesel Programlama (SQP) kullanarak betonarme çerçeveleri optimize etmiştir. SQP fonksiyonuna ACI 318 kuralları uygulanarak çok açıklıklı ve çok katlı çerçevelerin kiriş ve kolon elemanlarının optimum boyutlandırılması ve güçlendirilmesi düşünülmüştür. Yol yapımında, betonarme kutu çerçevelerin maliyet optimizasyonu, rastgele yürüyüş ve iniş yerel arama gibi iki sezgisel algoritma ile eşik kabul etme ve tavlama benzeşimi gibi iki metasezgisel algoritma kullanılarak araştırılmıştır (Perea vd., 2008).

GA (Camp vd., 2003; Lee & Ahn, 2003; Govindaraj & Ramasamy, 2007; Rajeev & Krishnamoorthy, 1998), SA (Paya-Zaforteza vd., 2008) ve HS (Akin & Saka, 2015; Bekdaş & Nigdeli, 2014c; Ulusoy vd., 2018) gibi birçok iyi bilinen metasezgisel algoritma betonarme çerçevelerin optimum maliyetle optimizasyonunda kullanılmıştır. Ayrıca, benzer amaç için betonarme çerçevelerin tasarım optimizasyonu için hibrit yöntemler kullanılmıştır. Maliyet optimizasyon problemlerini çözmek için Kaveh ve Sabzi (2011, 2012), Büyük Patlama Büyük Çöküş (BB-BC) algoritmasını ve hibrit olarak birleştirilmiş Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Karınca Kolonisi Optimizasyonunu (ACO) kullanmıştır. Esfandiary vd. (2016), betonarmenin malzeme ve yapım maliyetini en aza indirmek için parçacık yığını optimizasyonu (PSO) ve çok kriterli karar vermeyi birleştirmiştir. Chutani & Singh (2018), PSO ve standart yerçekimi arama algoritmasını (GSA) birlikte kullanmıştır.

Genel olarak tasarım statik yük koşulları altında yapılır. Nigdeli ve Bekdaş, deprem uyarılarının zaman tanım alanı analizini de dahil ederek, farklı tasarım kısıtları için farklı çerçeve elemanlarının gereksiz aşamalarını atlamak için birkaç rastgele arama aşamasını içeren modifiye edilmiş bir HS metodolojisi geliştirmiştir. Bu metodoloji çok açıklıklı ve çok katlı çerçevelere uygulanmıştır (Nigdeli & Bekdaş, 2016; Bekdaş & Nigdeli, 2017). Ayrıca, Arroyo ve Gutiérrez (2017) betonarme çerçeve binaların sismik performansını iyileştirmeyi amaçlamış ve bu öneri için öz frekans optimizasyonu adı verilen bir metodoloji kullanılmıştır.

Maliyet en küçüklemesinden farklı olarak, inşaat sırasındaki CO<sub>2</sub> emisyonu da Paya-Zaforteza et al. (2009) SA kullanarak ve Camp ve Huq (2013) BB-BC kullanarak en aza optimum olarak indirilmesini incelemiştir. Martinez-Martin vd. (2012) betonarme köprü ayaklarının çok amaçlı optimizasyon problemini çözmek için SA ve GA'nın mutasyon operatörüne dayalı bir komşuluk hareketini kullanan birkaç hibrit metasezgisel yöntem geliştirmiştir. Dikkate alınan hedefler, maliyetin en aza indirilmesi, aderans için sağlayacak çelik yoğunluğunun belirlenmesi ve CO<sub>2</sub> emisyonlarının en aza indirilmesidir. Park vd. (2014), CO<sub>2</sub> emisyonunu veya malzeme maliyetini en aza indirmek için betonarme kolonların yapısal tasarım aşamasında yapısal malzemeleri dikkate alan parametrik bir çalışma sunmuştur. Kaveh ve Ardalani (2016) tarafından yapılan çalışmada, hem CO<sub>2</sub> emisyonunun en aza indirilmesini hem de malzeme maliyetini sağlayan çerçevelerin optimum tasarımı araştırılmıştır. Bu çok amaçlı optimizasyon sürecinde, iki tip çarpışan cisimler optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır.

Bu yöntemlere ek olarak, optimizasyon sürecinde yapay zeka yöntemleri de kullanılmıştır. Bu paragrafta bunlardan bazıları özetlenmiştir. Adeli ve Park (1995) tarafından geliştirilen nöral dinamik modeli, betonarme yapıları optimize eden metodolojilerde de kullanılmıştır. Ahmadkhanlou ve Adeli (2005), ACI 318'e göre betonarme döşemelerin maliyetini en aza indirmek için nöral dinamik modelini kullanmıştır. Sirca Jr. ve Adeli (2005), maliyet minimizasyonu için nöral dinamik modelini kullanarak ön gerilimli beton I-kiriş köprü sistemini optimize etmiştir. Bunlara ek olarak, betonarme elemanlarının optimizasyonu için sinir ağı tabanlı yöntemler kullanılmıştır. Saini vd. (2006), minimum maliyetle tek ve çift betonarme kirişlerin tasarımı için genetik olarak optimize edilmiş yapay sinir ağı (NN) tabanlı optimizasyon önermiştir. Çağlar (2009), dairesel betonarme kolonun kesme dayanımını belirlemek için yapay sinir ağı yaklaşımını kullanmıştır. Babiker vd. (2012) tarafından ACI 318-08 kodunun gereklilikleri göz önünde bulundurularak, basit kirişlerin maliyet optimizasyonu için yapay sinir ağı modeli kullanılmıştır. Ayrıca Kao ve Yeh (2014), betonarme çerçevelerinin optimizasyonunda sinir ağları yöntemini kullanmışlardır.

İnşaat mühendisliği yapıları zemin üzerine inşa edilir. Bu durumda zeminin özelliği de önemlidir ve yapılar zeminle etkileşim halindedir. Zeminin bilinmeyen özelliği ve teorinin karmaşıklığı nedeniyle, genel zemin-yapı etkileşimi (SSI) ihmal edilir veya büyük güvenlik faktörleri kullanılarak varsayımlar yapılır. Temel ve toprak istinat duvarları gibi ana elemanlar ve yapı türleri için geoteknik tasarım kısıtlamaları kontrol edilmelidir. Temel ve istinat duvarlarının optimizasyonu hem yapısal hem de geoteknik tasarım kısıtlamaları birlikte ele alındığından diğer yapılara göre karmaşıktır. Bu karmaşıklık, optimum tasarımcıları gelişmiş yöntem kullanmaya zorlamıştır. İstinat duvarları için, devrilme stabilitesi, kayma stabilitesi ve taşıma kapasitesi ile ilgili geoteknik tasarım kısıtlamaları, farklı faktör güvenliği kullanılarak kontrol edilmelidir. İstinat duvarları için, Ceranic vd. (2001) toplam malzeme ve inşaat maliyetlerini en aza indirmek için SA tabanlı bir metodoloji önermiştir. Yepes vd. (2008), SA kullanarak bulunan optimum sonuçları kullanarak parametrik bir çalışma geliştirerek dolgu istinat duvarlarını araştırmışlardır. Konsol betonarme istinat duvarları da maliyeti en aza indirmek için HS kullanılarak optimize edilmiştir (Kaveh & Abadi, 2011). Ghazavi ve Salavati (2011), betonarme konsol istinat duvarlarının maliyet en küçükleme problemini çözmek için *Escherichia coli*'nin sosyal yiyecek arama davranışından ilham alan bakteriyel yiyecek arama optimizasyon algoritmasını kullanmış ve tasarım değişkenlerinin, parametrelerinin ve güvenlik faktörlerinin ayrıntılı bir duyarlılık analizi dahil edilmiştir. Camp ve Akin (2011) sürşarj yükü, dolgu eğimi, tutulan zeminin iç sürtünme açısı ve taban kesmesinin etkisini dikkate alarak örnek durumları inceleyerek düşük maliyetli ve düşük ağırlıklı amaçlar için betonarme istinat duvarlarının optimizasyonunda BB-BC'yi kullanmıştır. Talatahari vd. (2012) toplam ağırlığı azaltarak optimize edilmiş yerçekimi istinat duvarları için fizikte elektrostatik yasaları ile geliştirilen yüklü sistem aramasını (CSS) kullanılmıştır. Kaveh vd. (2013) betonarme istinat duvarlarını iki amacı göz önünde bulundurarak optimize etmiştir. Maliyet en küçüklemesine ek olarak, inşa edilebilirliği sağlamak için donatı yoğunluğu da hedef olarak alınmış ve metodolojide baskın olmayan sıralama genetik algoritması kullanılmıştır. Khajehzadeh vd. (2014), maliyet ve CO<sub>2</sub> emisyonunun en aza indirilmesini hedefleyen çok amaçlı



optimizasyon problemi için, adaptif yerçekimi arama algoritması (AGSA) ile görüntü arama (PS) algoritmalarını birlikte kullanan bir hibrit optimizasyon yöntemi önerilmiştir. Gandomi vd. (2015), istinat duvarlarının optimum tasarımını bulmada hızlandırılmış parçacık sürüsü optimizasyonu (APSO), ateş böceği algoritması (FA) ve guguk kuşu aramasının (CS) etkinliğini araştırmış ve bu algoritmaların etkinliği gösterilmiştir. Çarpışan Parçacık Sürüsü Optimizasyonu gibi kullanılan iki metasezgisel algoritmanın performansı, Kaveh ve Soleimani (2015) tarafından betonarme istinat duvarlarının maliyet optimizasyonu ile değerlendirilmiş ve optimizasyon, Coulomb ve Rankine teorisine göre bulunan statik yüklemeye altındaki toprak basınçlarına ve Mononobe-Okabe yöntemine göre bulunan dinamik yüklere göre yapılmıştır. TLBO, dinamik yüklemeye (Kayabekir vd., 2016) ve inşaat alanının alan kısıtlanması (Bekdaş vd., 2016) dikkate alınarak betonarme istinat duvarı optimizasyon problemi için de kullanılmıştır. Sheikholeslami vd. (2016) ayrıca statik yükler altında istinat duvarının ekonomik bir tasarımını bulmak için ateş böceği algoritması ve armoni arama algoritmasını birleştiren hibrit bir yöntem önermiştir. Aynı amaçla Aydoğdu (2017), sismik yükler altında istinat duvarlarının optimum tasarımı için Levy uçuş dağılımı ile coğrafya tabanlı optimizasyon algoritmasını tanıtmıştır. Ayrıca Molina-Moreno (2017) tarafından payandalı toprak istinat duvarlarının ekonomik tasarımı için eşik kabulü yoluyla yoğunlaştırma aşamasına sahip armoni arama algoritması kullanılmıştır. Ardından, Temür vd. (2018) tarafından kesme anahtarı içeren betonarme istinat duvarının optimum tasarımı için bozkurt (GW) algoritması kullanılmıştır.

Temeller, hem yapısal hem de geoteknik kurallara göre tasarlanması gereken bir diğer yapı elemanıdır. Genel olarak, betonarme tekil temeller metasezgisel yöntemler kullanılarak optimize edilmiştir. Khajehzadeh vd. (2011), betonarme temel ve istinat duvarlarının optimum tasarımı için modifiye edilmiş bir PSO kullanmıştır. Optimize edilmiş temel, çift eksenli eğilme momenti ile yüklü bir kolona sahiptir. Newton Yasasına göre geliştirilen Yerçekimi Arama algoritması, tekil temeller için kullanılan bir diğer sezgisel yöntemdir (Khajehzadeh vd., 2012). Ateşböceği algoritmasını ve sıralı küresel programlamayı (Khajehzadeh vd., 2013) entegre eden hibrit bir algoritma kullanan çalışmada, ikinci bir amaç olarak temelinin maliyet en küçüklemesine ek olarak CO<sub>2</sub> emisyon azaltımı da düşünülmüştür. Betonarme tekil temeller için hem yapısal tasarım hem de geoteknik tasarım kısıtlamalarını dikkate alınarak boyut ve donatı tasarım değişkenlerini bulmak için HS (Bekdaş & Nigdeli, 2015b) ve PSO (Nigdeli & Bekdaş, 2017b) kullanılmıştır. Boyut ve güçlendirme değerlerini dikkate alan çok aşamalı metodoloji, bunun sonucunda ayrı aşamalar kullanılarak Çiçek Tozlaşma algoritması (FPA) ve öğretim-öğrenme tabanlı optimizasyon (TLBO) kullanılarak da incelenmiştir. Betonarme temelin boyut tasarım değişkenleri, temelin şekli ve desteklenen kolonun eksantrikliği dikkate alınarak detaylı bir şekilde optimize edilmiştir (Nigdeli vd., 2018).

İç kuvvetlere göre kapasiteyi artırmak için betonarme yapılar güçlendirilebilir. Tahribatsız bir güçlendirme yöntemi olarak, betonarme kesiti karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) şeritlerle kaplamaktır. Betonarme kirişlerin kesme kuvveti kapasitesini artırmak için FPA, TLBO (Kayabekir vd., 2018b) ve Jaya algoritması (Kayabekir vd., 2018a; Kayabekir vd., 2018c) gibi metasezgisel yöntemler kullanılarak CFRP'nin optimum genişliği, aralığı ve açısı araştırılmıştır.

Yol yapımında kullanılan betonarme tonozların minimum maliyetini sağlayan optimum tasarım Carbonell vd. (2011) tarafından araştırılmıştır. Optimizasyon sürecinde çok başlangıçlı global en iyi iniş yerel arama (MGB), meta-tavlama benzeşimi ve meta-eşik kabul yöntemleri kullanılmış ve MGB'nin sonucu bulmada daha verimli olduğu kanısına varılmıştır.

Eksenel simetrik silindirik duvar olarak modellenen betonarme sıvı tankları, maliyet minimizasyonu için süperpozisyon yöntemi ile HS kullanılarak betonun kalınlığı ve basınç dayanımı için optimize edilmiştir (Bekdaş, 2014). Bu tasarım değişkenlerine ek olarak, ardgermeli yüklerin konumları, yoğunlukları ve donatıların çapları ve mesafeleri de tasarım değişkenleri olarak kabul edilmiştir (Bekdaş, 2015). Maliyet en küçüklemesinden farklı olarak, optimum kuvvetleri sağlayan ardgermeli kablolarının optimum yerleşimi ile duvardaki maksimum boyuna momentin azaltımı sağlanmıştır (Bekdaş & Nigdeli, 2018). Hem ardgermeli hem de betonarme tasarımın ele alındığı metasezgisel tabanlı yöntemler de önerilmiştir (Bekdaş, 2018; Bekdaş, 2019).

---

**Çıkar Çatışması:** Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

**Hakem Değerlendirmesi:** Dış bağımsız

---

**Peer-review:** Externally peer-reviewed.

**Declaration of Interests:** The authors declare that they have no competing interest.

## Kaynaklar

- ACI-318, Building code requirements for structural concrete and commentary, metric version, American Concrete Institute, 2005.
- Adamu, A., Karihaloo, B. L., & Rozvany, G. I. N. (1994). Minimum cost design of reinforced concrete beams using continuum-type optimality criteria. *Structural optimization*, 1(1-2), 91-102. [\[Crossref\]](#)
- Adeli, H., & Park, H. S. (1995). Optimization of space structures by neural dynamics. *Neural networks*, 8(5), 769-781. [\[Crossref\]](#)
- Ahmadkhanlou, F., & Adeli, H. (2005). Optimum cost design of reinforced concrete slabs using neural dynamics model. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 18(1), 65-72. [\[Crossref\]](#)
- Akın, A. & Saka, M.P (2010), Optimum Detailed Design of Reinforced Concrete Continuous Beams using the Harmony Search Algorithm, In *The Tenth International Conference on Computational Structures Technology*, Paper 131, Stirlingshire, UK.
- Akın, A., & Saka, M. P (2015). Harmony search algorithm based optimum detailed design of reinforced concrete plane frames subject to ACI 318-05 provisions. *Computers & Structures*, 147, 79-95. [\[Crossref\]](#)
- Al-Salloum, Y. A., & Husainsiddiqi, G. (1994). Cost-optimum design of reinforced concrete (RC) beams. *Structural Journal*, 91(6), 647-655. [\[Crossref\]](#)
- Arroyo, O., & Gutiérrez, S. (2017). A seismic optimization procedure for reinforced concrete framed buildings based on eigenfrequency optimization. *Engineering Optimization*, 49(7), 1166-1182. [\[Crossref\]](#)
- Aydoğdu, I. (2017). Cost optimization of reinforced concrete cantilever retaining walls under seismic loading using a biogeography-based optimization algorithm with Levy flights. *Engineering Optimization*, 49(3), 381-400. [\[Crossref\]](#)
- Babiker, S., Adam, F., & Mohamed, A. (2012). Design optimization of reinforced concrete beams using artificial neural network. *Int. J. Eng. Inventions*, 1(8), 07-13.

- Balling, R. J., & Yao, X. (1997). Optimization of reinforced concrete frames. *Journal of structural engineering*, 123(2), 193-202. [\[Crossref\]](#)
- Bekdas, G. (2014). Optimum design of axially symmetric cylindrical reinforced concrete walls. *Structural Engineering and Mechanics*, 51(3), 361-375. [\[Crossref\]](#)
- Bekdas, G. (2015). Harmony search algorithm approach for optimum design of post-tensioned axially symmetric cylindrical reinforced concrete walls. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 164(1), 342-358. [\[Crossref\]](#)
- Bekdas, G. (2018). New improved metaheuristic approaches for optimum design of posttensioned axially symmetric cylindrical reinforced concrete walls. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27(7), e1461. [\[Crossref\]](#)
- Bekdas, G. (2019). Optimum design of post-tensioned axially symmetric cylindrical walls using novel hybrid metaheuristic methods. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 28(1), e1550. [\[Crossref\]](#)
- Bekdas, G., & Nigdeli, S. M. (2013). Optimization of T-shaped RC flexural members for different compressive strengths of concrete. *International Journal of Mechanics*, 7, 109-119.
- Bekdas, G., & Nigdeli, S. M. (2014a). The optimization of slender reinforced concrete columns. *PAMM*, 14(1), 183-184. [\[Crossref\]](#)
- Bekdas, G., & Nigdeli, S. M. (2014b). The Effect of Eccentricity for Optimum Compressively Loaded Reinforced Concrete Column. In *15th EU/ME Workshop: Metaheuristic and Engineering*, Istanbul, Turkey.
- Bekdas, G., & Nigdeli, S. M. (2014c). Optimization of RC Frame Structures Subjected to Static Loading. 11th. World Congress on Computational Mechanics, Barcelona, Spain
- Bekdas, G., & Nigdeli, S. M. (2015a). Optimization of Reinforced Concrete Columns Subjected to Uniaxial Loading. In *Engineering and Applied Sciences Optimization*. Edited by Lagaros, Nikos, Papadrakakis, Manolis, Springer, Chapter 11. [\[Crossref\]](#)
- Bekdas, G., & Nigdeli, S. M. (2015b). Multi-objective optimization of reinforced concrete footings using harmony search. In *23rd International Conference on Multiple Criteria Decision Making (MCDM 2015)*, Hamburg, Germany.
- Bekdas, G., & Nigdeli, S. M. (2016a). T Bat algorithm for optimization of reinforced concrete columns. In *Joint Annual Meeting of GAMM and DMV*, Braunschweig, Germany. [\[Crossref\]](#)
- Bekdas, G., & Nigdeli, S. M. (2016b). Optimum Design Of Reinforced Concrete Columns Employing Teaching Learning Based Optimization. In *12th International Congress on Advances in Civil Engineering*, Istanbul, Turkey.
- Bekdas, G., & Nigdeli, S. M. (2017). Modified Harmony Search for Optimization of Reinforced Concrete Frames. In *3rd International Conference on the Harmony Search Algorithm (ICHSA 2017)*, Bilbao, Spain. [\[Crossref\]](#)
- Bekdas, G., & Nigdeli, S. M. (2018). Optimum reduction of flexural effect of axially symmetric cylindrical walls with post-tensioning forces. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 1-8. [\[Crossref\]](#)
- Bekdas, G., Nigdeli, S. M., Temür R, Kayabekir A. E. (2016). Restricted Optimum Design of Reinforced Concrete Retaining Walls. In *7th European Conference of Civil Engineering (ECCIE '16)*, Bern, Switzerland.
- Camp, C. V., & Akin, A. (2011). Design of retaining walls using big bang-big crunch optimization. *Journal of Structural Engineering*, 138(3), 438-448. [\[Crossref\]](#)
- Camp, C. V., & Huq, F. (2013). CO2 and cost optimization of reinforced concrete frames using a big bang-big crunch algorithm. *Engineering Structures*, 48, 363-372. [\[Crossref\]](#)
- Camp, C. V., Pezeshk, S., & Hansson, H. (2003). Flexural design of reinforced concrete frames using a genetic algorithm. *Journal of Structural Engineering*, 129(1), 105-115. [\[Crossref\]](#)
- Carbonell, A., González-Vidosa, F., & Yepes, V. (2011). Design of reinforced concrete road vaults by heuristic optimization. *Advances in Engineering Software*, 42(4), 151-159. [\[Crossref\]](#)
- Ceranic, B., Fryer, C., & Baines, R. W. (2001). An application of simulated annealing to the optimum design of reinforced concrete retaining structures. *Computers & Structures*, 79(17), 1569-1581. [\[Crossref\]](#)
- Chakrabarty, B. K. (1992). Model for Optimal Design of Reinforced Concrete Beam. *Journal of Structural Engineering*, 118(11), 3238-3242. [\[Crossref\]](#)
- Chakrabarty, B. K. (1992). Models for optimal design of reinforced concrete beams. *Computers & structures*, 42(3), 447-451. [\[Crossref\]](#)
- Chou, T. (1977). Optimum reinforced concrete T-beam sections. *Journal of the Structural Division*, 103(ASCE 13120). [\[Crossref\]](#)
- Chung, T. T., & Sun, T. C. (1994). Weight optimization for flexural reinforced concrete beams with static nonlinear response. *Structural optimization*, 8(2-3), 174-180. [\[Crossref\]](#)
- Chutani, S., & Singh, J. (2018). Use of modified hybrid PSOGSA for optimum design of RC frame. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 41(4), 342-352. [\[Crossref\]](#)
- Coello, C. C., Hernández, F. S., & Farrera, F. A. (1997). Optimal design of reinforced concrete beams using genetic algorithms. *Expert systems with Applications*, 12(1), 101-108. [\[Crossref\]](#)
- Çağlar, N. (2009). Neural network based approach for determining the shear strength of circular reinforced concrete columns. *Construction and Building Materials*, 23(10), 3225-3232. [\[Crossref\]](#)
- Esfandiary, M. J., Sheikholarefin, S., & Bondarabadi, H. R. (2016). A combination of particle swarm optimization and multi-criterion decision-making for optimum design of reinforced concrete frames. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 6(2), 245-268.
- European Committee for Standardization. 'Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1: General rules and rules for buildings'. Final Draft, July 2002
- Fadaee, M. J., & Grierson, D. E. (1996). Design optimization of 3D reinforced concrete structures. *Structural optimization*, 12(2-3), 127-134. [\[Crossref\]](#)
- Fedghouche, F., & Tiliouine, B. (2012). Minimum cost design of reinforced concrete T-beams at ultimate loads using Eurocode2. *Engineering Structures*, 42, 43-50. [\[Crossref\]](#)
- Friel, L. L. (1974, November). Optimum singly reinforced concrete sections. In *Journal Proceedings*, 71(11), 556-558. [\[Crossref\]](#)
- Galilei, G. (1950). *Dialogues concerning two new sciences*. Evanston, IL: Northwestern University Press (originally published in 1665).
- Gandomi, A. H., Kashani, A. R., Roke, D. A., & Mousavi, M. (2015). Optimization of retaining wall design using recent swarm intelligence techniques. *Engineering Structures*, 103, 72-84. [\[Crossref\]](#)
- Ghandi, E., Shokrollahi, N., & Nasrollahi, M. (2017). Optimum cost design of reinforced concrete slabs using cuckoo search optimization algorithm. *Iran University of Science & Technology*, 7(4), 539-564.
- Ghazavi, M., & Salavati, V. (2011). Sensitivity analysis and design of reinforced concrete cantilever retaining walls using bacterial foraging optimization algorithm. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR)*, München (pp. 307-314).
- Govindaraj, V., & Ramasamy, J. V. (2005). Optimum detailed design of reinforced concrete continuous beams using genetic algorithms. *Computers & structures*, 84(1-2), 34-48. [\[Crossref\]](#)
- Govindaraj, V., & Ramasamy, J. V. (2007). Optimum detailed design of reinforced concrete frames using genetic algorithms. *Engineering Optimization*, 39(4), 471-494. [\[Crossref\]](#)
- Guerra, A., & Kiousis, P. D. (2006). Design optimization of reinforced concrete structures. *Computers and Concrete*, 3(5), 313-334. [\[Crossref\]](#)
- Haug, E. J., & Kirmser, P. G. (1967). Minimum weight design of beams with inequality constraints on stress and deflection. *Journal of Applied Mechanics*, 34(4), 999-1004. [\[Crossref\]](#)
- Hoit, M., Soeiro, A., & Fagundo, F. (1991). Probabilistic design and optimization of reinforced concrete frames. *Engineering optimization*, 17(3), 229-235. [\[Crossref\]](#)
- Jahjough, M. M., Arafa, M. H., & Alqedra, M. A. (2013). Artificial Bee Colony (ABC) algorithm in the design optimization of RC continuous



- beams. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 47(6), 963-979. [\[Crossref\]](#)
- Kao, C. S., & Yeh, I. (2014). Optimal design of reinforced concrete plane frames using artificial neural networks. *Computers and Concrete*, 14(4), 445-462. [\[Crossref\]](#)
- Kaveh, A., & Abadi, A. S. M. (2011). Cost optimization of reinforced concrete one-way ribbed slabs using harmony search algorithm. *Arabian Journal for science and engineering*, 36(7), 1179-1187. [\[Crossref\]](#)
- Kaveh, A., & Abadi, A.S.M. (2011). Harmony search based algorithms for the optimum cost design of reinforced concrete cantilever retaining walls. *Int. J Civil Eng.*, 9(1), 1-8.
- Kaveh, A., & Ardalani, S. (2016). Cost and CO2 emission optimization of reinforced concrete frames using enhanced colliding bodies algorithm. *Asian Journal of Civil Engineering*, 17(6), 831-858. [\[Crossref\]](#)
- Kaveh, A., & Sabzi, O. (2011). A comparative study of two meta-heuristic algorithms for optimum design of reinforced concrete frames. *Int J Civil Eng.* 9(3), 193-206.
- Kaveh, A., & Sabzi, O. (2012). Optimal design of reinforced concrete frames using big bang-big crunch algorithm. *International journal of civil engineering*, 10(3), 189-200.
- Kaveh, A., & Soleimani, N. (2015). CBO and DPSO for optimum design of reinforced concrete cantilever retaining walls. *Asian J Civil Eng*, 16(6), 751-774.
- Kaveh, A., Kalateh-Ahani, M., & Fahimi-Farzam, M. (2013). Constructability optimal design of reinforced concrete retaining walls using a multi-objective genetic algorithm. *Structural Engineering and Mechanics*, 47(2), 227-245. [\[Crossref\]](#)
- Kayabekir A. E., Bekdaş G., Nigdeli S. M., & Temür R. (2016). Optimum design of retaining walls under static and dynamic loads, In *International Science Symposium (ISS2016)*, Istanbul, Turkey.
- Kayabekir A. E., Bekdaş G., Nigdeli S. M., & Temür R. (2018a). Investigation of cross-sectional dimension on optimum carbon fiber reinforced polymer design for shear capacity increase of reinforced concrete beams. In *7th International Conference on Applied and Computational Mathematics (ICACM '18)*. Rome, Italy. [\[Crossref\]](#)
- Kayabekir A. E., Sayin B., Bekdas G., Nigdeli S. M. (2018b). The factor of optimum angle of carbon fiber reinforced polymers. In *4th International Conference on Engineering and Natural Sciences (ICENS 2018)*. Kiev, Ukraine
- Kayabekir, A. E., Sayin, B., Nigdeli, S. M., & Bekdaş, G. (2018c). Jaya algorithm based optimum carbon fiber reinforced polymer design for reinforced concrete beams. In *AIP Conference Proceedings* (vol. 1978, No. 1). AIP Publishing. [\[Crossref\]](#)
- Khajehzadeh, M., Taha, M. R., & Eslami, M. (2013). A new hybrid firefly algorithm for foundation optimization. *National Academy Science Letters*, 36(3), 279-288. [\[Crossref\]](#)
- Khajehzadeh, M., Taha, M. R., & Eslami, M. (2014). Multi-objective optimisation of retaining walls using hybrid adaptive gravitational search algorithm. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 31(3), 229-242. [\[Crossref\]](#)
- Khajehzadeh, M., Taha, M. R., El-Shafie, A., & Eslami, M. (2011). Modified particle swarm optimization for optimum design of spread footing and retaining wall. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 12(6), 415-427. [\[Crossref\]](#)
- Khajehzadeh, M., Taha, M. R., El-shafie, A., & Eslami, M. (2012). Optimization of Shallow Foundation Using Gravitational Search Algorithm. *Journal of Applied Engineering and Technology*, 4(9), 1124-1130.
- Kirsch, U. (1983). Multilevel optimal design of reinforced concrete structures. *Engineering Optimization*, 4(4), 207-212. [\[Crossref\]](#)
- Koumousis, V. K., & Arsenis, S. J. (1998). Genetic algorithms in optimal detailed design of reinforced concrete members. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 13(1), 43-52. [\[Crossref\]](#)
- Krishnamoorthy, C. S., & Munro, J. (1973). Linear program for optimal design of reinforced concrete frames. *Proceedings of IABSE*, 3(1), 119-41.
- Lakshmanan, N., & Parameswaran, V. S. (1985). Minimum weight design of reinforced concrete sections for flexure. *Journal of the Institution of Engineers. India. Civil Engineering Division*, 66(2), 92-98.
- Lee, C., & Ahn, J. (2003). Flexural design of reinforced concrete frames by genetic algorithm. *Journal of structural engineering*, 129(6), 762-774. [\[Crossref\]](#)
- Lepš, M., & Šejnoha, M. (2003). New approach to optimization of reinforced concrete beams. *Computers & structures*, 81(18-19), 1957-1966. [\[Crossref\]](#)
- Martinez-Martin, F. J., Gonzalez-Vidosa, F., Hospitaler, A., & Yepes, V. (2012). Multi-objective optimization design of bridge piers with hybrid heuristic algorithms. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 13(6), 420-432. [\[Crossref\]](#)
- Molina-Moreno, F., García-Segura, T., Martí, J. V., & Yepes, V. (2017). Optimization of buttressed earth-retaining walls using hybrid harmony search algorithms. *Engineering Structures*, 134, 205-216. [\[Crossref\]](#)
- Nigdeli S.M., & Bekdaş G. (2014a). Optimization of reinforced concrete shear walls using harmony search. In *11th International Congress on Advances in Civil Engineering*, Istanbul, Turkey.
- Nigdeli SM., & Bekdaş G. (2014b). Optimum Design of RC Columns According to Effective Length Factor in Buckling. In *The Twelfth International Conference on Computational Structures Technology*, Naples, Italy.
- Nigdeli S.M., & Bekdaş G. (2016). Detailed Optimum Design of Reinforced Concrete Frame Structures. In *7th European Conference of Civil Engineering (ECCIE '16)*, Bern, Switzerland.
- Nigdeli, S. M., & Bekdaş, G. (2017a). Optimum design of RC continuous beams considering unfavourable live-load distributions. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(4), 1410-1416. [\[Crossref\]](#)
- Nigdeli S.M., & Bekdaş G. (2017b) Optimization of Reinforced Concrete Footings Using Particle Swarm Optimization. 2nd International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICOCEE 2017), Cappadocia, Turkey.
- Nigdeli, S. M., Bekdas, G., Kim, S., & Geem, Z. W. (2015). A novel harmony search based optimization of reinforced concrete biaxially loaded columns. *Structural Engineering and Mechanics*, 54(6), 1097-1109. [\[Crossref\]](#)
- Nigdeli, S. M., Bekdaş, G., & Yang, X. S. (2018). Metaheuristic optimization of reinforced concrete footings. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(11), 4555-4563. [\[Crossref\]](#)
- Park, H. S., Lee, H., Kim, Y., Hong, T., & Choi, S. W. (2014). Evaluation of the influence of design factors on the CO2 emissions and costs of reinforced concrete columns. *Energy and Buildings*, 82, 378-384. [\[Crossref\]](#)
- Paya-Zaforteza, I., Yepes, V., González-Vidosa, F., & Hospitaler, A. (2008). Multiobjective optimization of concrete frames by simulated annealing. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 23(8), 596-610. [\[Crossref\]](#)
- Paya-Zaforteza, I., Yepes, V., Hospitaler, A., & Gonzalez-Vidosa, F. (2009). CO2-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing. *Engineering Structures*, 31(7), 1501-1508. [\[Crossref\]](#)
- Perea, C., Alcalá, J., Yepes, V., Gonzalez-Vidosa, F., & Hospitaler, A. (2008). Design of reinforced concrete bridge frames by heuristic optimization. *Advances in Engineering Software*, 39(8), 676-688. [\[Crossref\]](#)
- Prakash, A., Agarwala, S. K., & Singh, K. K. (1988). Optimum design of reinforced concrete sections. *Computers & Structures*, 30(4), 1009-1011. [\[Crossref\]](#)
- Rafiq, M. Y., & Southcombe, C. (1998). Genetic algorithms in optimal design and detailing of reinforced concrete biaxial columns supported by a declarative approach for capacity checking. *Computers & Structures*, 69(4), 443-457. [\[Crossref\]](#)
- Rajeev, S., & Krishnamoorthy, C. S. (1998). Genetic algorithm-based methodology for design optimization of reinforced concrete frames. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 13(1), 63-74. [\[Crossref\]](#)
- Rath, D. P., Ahlawat, A. S., & Ramaswamy, A. (1999). Shape optimization of RC flexural members. *Journal of Structural Engineering*, 125(12), 1439-1446. [\[Crossref\]](#)

Sahab, M. G., Ashour, A. F., & Toropov, V. V. (2005a). A hybrid genetic algorithm for reinforced concrete flat slab buildings. *Computers & structures*, 83(8-9), 551-559. [\[Crossref\]](#)

Sahab, M. G., Ashour, A. F., & Toropov, V. V. (2005b). Cost optimisation of reinforced concrete flat slab buildings. *Engineering Structures*, 27(3), 313-322. [\[Crossref\]](#)

Saini, B., Sehgal, V. K., & Gambhir, M. L. (2006). Genetically optimized artificial neural network based optimum design of singly and doubly reinforced concrete beams.

Sheikholeslami, R., Khalili, B. G., Sadollah, A., & Kim, J. (2016). Optimization of reinforced concrete retaining walls via hybrid firefly algorithm with upper bound strategy. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(6), 2428-2438. [\[Crossref\]](#)

Sirca Jr, G. F., & Adeli, H. (2005). Cost optimization of prestressed concrete bridges. *Journal of Structural Engineering*, 131(3), 380-388. [\[Crossref\]](#)

Talatahari, S., Sheikholeslami, R., Shadfaran, M., & Pourbaba, M. (2012). Optimum design of gravity retaining walls using charged system search algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012. [\[Crossref\]](#)

Temür R, Kayabekir A. E., Bekdaş G., & Nigdeli S. M. (2018). Grey Wolf Optimizer Based Design of Reinforced Concrete Retaining Walls Considering Shear Key. In *7th International Conference on Applied and Computational Mathematics (ICACM '18)*. Rome, Italy.

Ulusoy S., Kayabekir A.E., Bekdaş G., & Nigdeli S.M. (2018) Optimum Design of Reinforced Concrete Multi-Story Multi-Span Frame Structures under Static Loads. In *8th International Conference on Environment Science and Engineering (ICESE 2018)*, Barcelona, Spain. [\[Crossref\]](#)

Venkayya, V. B. (1971). Design of optimum structures. *Computers & Structures*, 1(1-2), 265-309. [\[Crossref\]](#)

Yepes, V., Alcalá, J., Perea, C., & González-Vidosa, F. (2008). A parametric study of optimum earth-retaining walls by simulated annealing. *Engineering Structures*, 30(3), 821-830. [\[Crossref\]](#)

Zielinski, Z. A., Long, W., & Troitsky, M. S. (1995). Designing reinforced concrete short-tied columns using the optimization technique. *Structural Journal*, 92(5), 619-626. [\[Crossref\]](#)

# **BÖLÜM 2**

# **METASEZGİSEL ALGORİTMALAR**

# Metasezgisel Algoritmalar

## Metaheuristic Algorithms

### BÖLÜM HAKKINDA

Metasezgisel algoritmalar ile ilgili bu bölümde, betonarme yapıların optimizasyonunda direk çözüm ile yapılan optimizasyon yerine niçin metasezgisel yöntemlere gereksinim olduğu açıklanmıştır. Bir optimizasyon problemi genel unsurları olan tasarım sabitleri, tasarım değişkenler, amaç fonksiyonları ve tasarım kısıtları ile açıklanmış ve metasezgisel yöntemlerin genel işlem adımları özetlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Metasezgisel, optimizasyon, yapı mühendisliği

### ABOUT the CHAPTER

In this section about metaheuristic algorithms, it is explained why metaheuristic methods are needed instead of direct solution optimization in the optimization of reinforced concrete structures. An optimization problem is explained with the general elements of design constants, design variables, objective functions and design constraints, and the general operation steps of metaheuristic methods are summarized.

**Keywords:** Metaheuristics, optimization, structural engineering

## Betonarme Yapılarının Optimizasyonunda Metasezgisel Algoritmaların Kullanımının Nedenleri

Optimizasyon problemlerini çözmek için geleneksel yöntemler kullanılabilir, ancak mühendislik problemlerinin genellikle çok sayıda tasarım kısıtlaması vardır. Bu durumda optimum tasarım değişkenlerinin çözümü, bu değişkenler tasarım kısıtlarının analizinde etkili olduğu için doğrudan hesaplanamaz. Bu durum mühendislik probleminin çoğunu doğrusal olmayan hale getirir.

Doğrusal olmayan bir sorunu çözmenin en kolay yolu, yinelemeli çözümlerle denemeler kullanmaktır, ancak bu süreç çok uzun sürebilir. Bu nedenle, aday tasarım değişkenlerinin rastgeleleştirilmesi ve seçimi, yinelemeli algoritmalar kullanan metodolojiler kullanılarak sistematik bir şekilde yapılmalıdır. Bu yinelemeli algoritmalar esas olarak metasezgisel yöntemlerdir. Metasezgisel yöntemlerin geliştirilmesi, optimum bir tasarım hedefi için aynı amaca sahip bir süreci içerir. Her prosesin sağlamak için amaçları veya en aza indirmek veya en üst düzeye çıkarmak için amaç işlevleri vardır.

Özellikle betonarme yapıların optimum tasarımı, aşağıdaki nedenlerden dolayı diğer mühendislik problemlerinden daha karmaşıktır.

1. Betonarme eleman beton ve çelik olmak üzere iki farklı malzemeden oluşmaktadır. Bu malzemeler tamamen farklı mukavemet davranışına ve maliyetine sahiptir. Çelik, çekme ve basma altında aynı mukavemete sahiptir. Beton gevrek bir malzemedir ve çekme dayanımı ihmal edilir. Çeliğin yangından ve çevre koşullarından korunması için beton, düşük maliyetli mükemmel bir örtüdür. Betonarme elemanın bir bölümünün bir kısmı çekme altında ise, donatı çubukları eklenerek kompozit, güvenli ve ekonomik bir çözüm bulunmaktadır. Yapılar için sünek tasarım sağlanmalıdır. En genel olarak, çelikte akma dayanımı aşıldığında beton ezilmeden statik ve dinamik kuvvetlerden kaynaklanan iç kuvvetler taşınmaya devam etmelidir. Süneklik nedeniyle tasarım kodlarında çeşitli kurallar verilmiştir. Bu kurallar, optimizasyonda tasarım kısıtlamaları olarak ayrı ayrı matematiksel olarak modellenir.



2. Betonarme yapıları, farklı yüklem türleri altında olan çeşitli tipte elemanlar içerir. Örneğin, kiriş baskın olarak eğilme etkisi altındayken kolonlar baskın olarak ekstenel bir kuvvet altındadır. Temeller ve istinat duvarları, yapısal kısıtlara ek olarak geoteknik kısıtların da etkilidir.
3. Aynı türden farklı elemanlar, farklı şiddetteki kuvvetlerin etkisi altındadır. Bu durumda, her elemanın ayrı bir optimum tasarımı vardır. Hiperstatik sistemler nedeniyle rijitlik değişimi çözümü etkiler.
4. Beton şantiye sahasında dökülmektedir. Kesin boyutlar sağlanamaz. Bu durum, kesin bir optimum tasarımdan taviz vermeden ayrık tasarım değişkenlerini kullanmamıza neden olur.
5. Yerel piyasada sabit ebatlarda çelik donatı çubukları bulunur. Bu durumda, rastgele atamalarda mevcut boyutlar kullanılmalıdır.
6. Yapılar spesifik sistemlerdir ve yapıların yükleri kesin değildir. Yapısal ve yapısal olmayan elemanların öz ağırlıkları bilinmektedir, ancak hareketli yük miktarı ve bir açıklıktaki canlı yükün varlığı bilinmemektedir ve değişkendir. Ek olarak, dinamik yükler tamamen bilinmemektedir. Deprem ivmeleri ve rüzgar hızı tahmin edilemez. Sadece titreşim periyotları ve maksimum genlikleri tahmin edilebilir. Belirli yüklere ek olarak, farklı tasarım kodlarının kullanılması nedeniyle bir ülkenin gereksinimleri farklı olabilir. Ayrıca inşa edilen yapının zemin durumu ve kullanım amaçları farklı olabilir. Bu durumdan dolayı ihtiyaç ve konuma göre benzer binaların güvenli ve optimum tasarımı farklılık gösterir.

## Optimizasyon Problemi

Optimizasyon problemlerinde aşağıdaki gibi 4 unsur vardır:

1. Tasarım sabitleri
2. Tasarım değişkenleri
3. Amaç fonksiyonları
4. Tasarım kısıtları

Optimizasyon problemlerinin temel amacı, "tasarım sabitleri" olarak adlandırılan sabit ve bilinen değerlerle tanımlanan bir problem için, tek veya çoklu "amaç fonksiyonu"nun en küçükleme ya da en büyükleme sağlayan "tasarım değişkenlerinin" en uygun (optimum) değerlerini kısıtlar altında sağlamaktır.  $g_k(x)$  eşitsizlik ve  $h_j(x)$  eşitlik olarak "tasarım kısıtlamaları" olarak tanımlanır. Bir dizi tasarım değişkeni  $(x)$  n tasarım değişkenli bir problem için denklem (1) olarak gösterilebilir. Tasarım değişkenlerine bağlı olan, 'a' sayıda amaç fonksiyonu  $(f_m(x))$ , 'b' sayıda eşitlik fonksiyonu  $(h_j(x))$  ve 'c' sayıda eşitsizlik fonksiyonu  $(g_k(x))$  denklemler (2)-(4) olarak verilmiştir.

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n]^T \quad i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$f_m(x), x \in \mathbb{R}^n, (m=1, 2, \dots, a) \quad (2)$$

$$h_j(x)=0, (j=1, 2, \dots, b) \quad (3)$$

$$g_k(x) \leq 0, (k=1, 2, \dots, c) \quad (4)$$

Yapı mühendisliğinde tasarım değişkenleri genellikle sistemin boyutu, kullanılan malzeme miktarı (örneğin donatı çapı ve miktarı) ve malzeme veya sistem özellikleridir. Bir optimizasyon proble-

minde, farklı değişken türleri dikkate alınabilir ve bu değişkenler sürekli veya ayrık olabilirken tek bir problem karışık değişkenler içerebilir.

Tasarım sabitleri genellikle inşaatçı tarafından sağlanan tasarım sınırları, malzeme özellikleri, zemin koşulları ve çevre koşulları gibi unsurlardır. Bazı değerler sabit olarak alınabilirken bu değerler başka bir problem veya optimizasyon durumu için tasarım değişkenleri olarak da tanımlanabilir.

Yapı mühendisliği problemindeki tasarım kısıtlamaları, mekanik teorisine göre tasarım kodlarında tanımlanan kurallardır veya bunların yanında tasarımcı taleplerine göre mimari kısıtlamalar da sağlanabilir.

Yapı mühendisliği problemlerinin amaç fonksiyonları, maliyetin en aza indirilmesi, iç kuvvetlerin azaltılması, üretimde CO<sub>2</sub> emisyonunun en aza indirilmesi, optimum olarak tasarlanan ek bir sistem (örneğin kontrol sistemleri, sönümleyiciler, sismik yalıtım) kullanımı ile performansının artırılması olabilir. Bazı durumlarda, birkaç faktör bir amaç veya tasarım kısıtı olarak ele alınabilir.

## Metasezgisel Yöntemlerin Metodolojisi

Bu bölümde, metasezgisel yöntemlerin genel bir metodolojisi verilmektedir. Çeşitli yöntemlerin ayrıntılı metodolojisi bu bölümün sonraki bölümlerinde açıklanmıştır.

Metasezgisel algoritmaların ana fikri, aday çözümler üretmek, bu çözümleri değiştirmek ve optimizasyon amaçları için en iyisinin seçilmesidir. Şekil 1'de akış şeması olarak gösterilen bir metodoloji için süreç, tasarım sabitlerinin tanımlanmasıyla başlar. Tasarım sabitleri ile birlikte tasarım değişkenlerinin aralığı ve algoritmaya özel parametreler tanımlanmalıdır. Popülasyon tabanlı algoritmalar birkaç tasarım değişkenine sahiptir ve popülasyon (p) tanımlanmalıdır.

Ardından, tasarım değişkenleri kümesini içeren bir başlangıç çözüm matrisi oluşturulur. Başlangıç değerleri genellikle minimum ( $x_{imin}$ ) ve maksimum ( $x_{imax}$ ) limitler ile çözüm aralığından rastgele seçilir. Örneğin, Denklem 5'de j. bireyin i. tasarım değişkeninin üretilmesi için fonksiyon verilmiştir. Rand (1), 0 ile 1 arasında tanımlanan rastgele bir sayıdır.

$$x_j^i = x_{imin} + \text{rand}(1) \cdot (x_{imax} - x_{imin}) \quad i=1, 2, \dots, n \text{ and } j=1, 2, \dots, p \quad (5)$$

Ön optimizasyon aşamaları olarak isimlendirecek işlemlerden sonra, tüm üretilen aday çözümler için amaç fonksiyonları hesaplanır ve değiştirilmiş değerlerin gelecekteki karşılaştırması için kaydedilir. Bu süreçte, tasarım kısıtlamaları da kontrol edilir. Bir veya birden çok tasarım kısıtlamaları ihlal edilirse, hedeflerin minimize edilmesi için artan bir değer eklenerek amaç fonksiyonları cezalandırılır. Maksimize edilmiş çözüm için ceza fonksiyonu, amaç fonksiyonunun bir indirgenmesi olarak alınır. Bu adımlardan akış şemasının analiz aşaması olarak bahsedilmiştir.

Ardından esas optimizasyon başlar ve algoritmaların ilham özelliklerine göre formüle edilmiş metasezgisel algoritmanın özel formülasyonu uygulanır. Tasarım değişkenlerinin modifikasyonunun formülasyonunda, birkaç algoritmaya özel parametre kullanılabilir. Ayrıca, optimizasyonun birkaç aşaması (fazı) olabilir. Bu fazlar genellikle bir algoritma parametresine göre seçilir. Mevcut

tasarım değişkenlerinin modifikasyonundan sonra, tasarım kısıtları dikkate alınarak amaç fonksiyonları kontrol edilir. Amaç fonksiyonunun çözümünde bir gelişme görülürse, mevcut sonuçlar yeni türetilmiş olanlarla değiştirilir. Bu süreç, durdurma kriterleri sağlanana kadar iteratif olarak devam eder.

En çok kullanılan durdurma kriteri, sabit sayıda yinelemeyi değerlendirmektir. Bu durumda, bir maksimum yineleme sayısı tanımlanmalıdır. Bu kriterden farklı olarak, bir miktar amaç fonksiyonunun indirgenmesi, amaç fonksiyonunun yakınsaması vb. de seçilebilir.

Algoritmaların spesifik optimizasyon aşamaları alt bölümlerde kısaca açıklanmıştır.

## Genetik Algoritma

Metasezgisel algoritmalarda kullanılan ana fikir evrim teorisidir. Biyolojik evrimin özellikleri üreme, mutasyon, rekombinasyon ve seleksiyondur. Yinelemeli bir optimizasyonda genellikle benzer özellikler kullanılır. Örnekler aşağıdaki gibidir:

**Yeniden Üretim:** Yinelemelerde yeni aday tasarım değişkenleri üretmemiz gerekir.

**Mutasyon:** Aday çözümlerin üretilmesinde, iyi bir yakınsama ile daha iyi çözümlere ulaşmak için mevcut çözümlerin kullanılması gerekir.

**Rekombinasyon:** Yeni oluşturulan çözümler mevcut olanlardan daha iyi veya daha kötü olabilir. Bu durumda amaç fonksiyonlarına göre daha iyi çözümler saklanmalıdır.

**Seçim:** Optimizasyon süreçleri, çeşitli seçim ve karar vermeyi içerir. Örneğin, tasarım değişkenlerinin oluşturulma türü seçilebilir. Veya bir modifikasyon formülasyonunda, mevcut çözümlerin ve en iyi veya en kötü çözümlerin rastgele seçilmesi gerekir.

Geliştirilen metasezgisel algoritmaların çoğu, bu algoritmalarda biyolojik bir metafor veya evrim özellikleri bulunduğu evrimsel algoritmalar olarak da anılır, ancak genetik algoritma (GA), evrimsel özellikleri taklit eden en eski algoritmadır. GA esas olarak Charles Darwin'in evrim teorisindeki çaprazlama, mutasyon ve seçilimi kullanır ve ilk kez John Holland tarafından bahsedilmiştir (Holland, 1975). Daha sonra GA ile ilk yapısal optimizasyon denemesi Goldberg ve Samtani (1986) tarafından yapılmıştır. İlk bahsedilen klasik GA'da kodlama ve kod çözme ihtiyacı vardır. Örneğin, bir görev kabul edilir veya reddedilir. Kabul edilenler 1 olarak gösterilirken reddedilen görevler için 0 atanır. Tasarım değişkenleri olarak alınan bu görevler için, görev olarak kabul edilen genleri içeren bir kromozom popülasyonu, Şekil 2'de gösterildiği gibi kodlanmıştır.

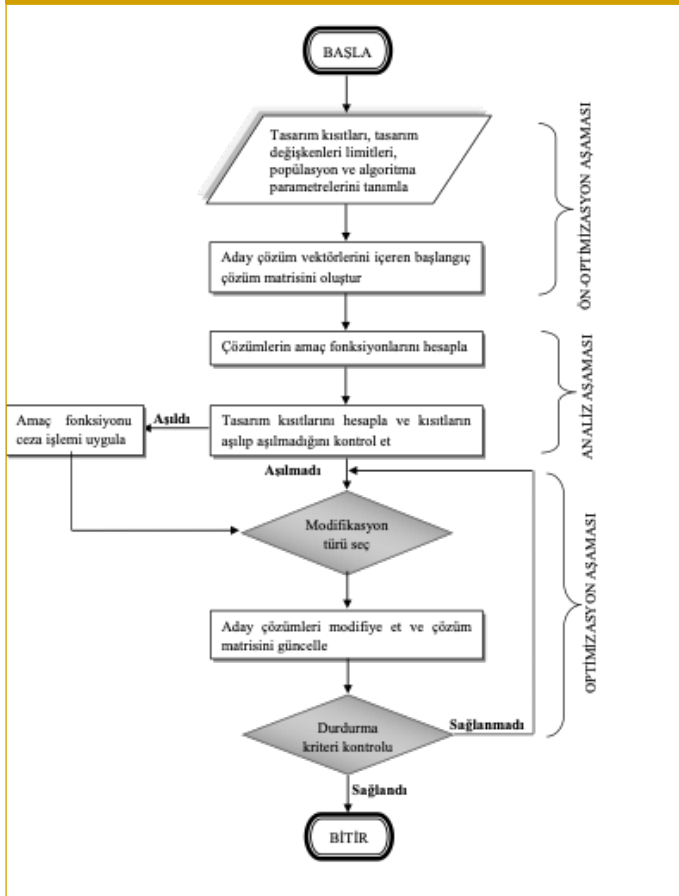
Şekil 2'de, popülasyon olarak 3 kromozom ve tasarım değişkenleri olarak 5 gen kullanan bir problem temsil edilmektedir. Aday tasarım değişkenlerinin değerlerini içeren bu kromozomlar için amaç fonksiyonu ya da uygunluk fonksiyonu hesaplanır. Örneğin her genin kabul edildiği takdirde bir değeri vardır. Sıraya göre seçim, çaprazlama ve mutasyon işlemleri bir yinelemede uygulanacaktır.

Seçimde, iki ebeveyn kromozomu seçilir. Ebeveynleri bulmak için bir yöntem veya rastgele seçim kullanılabilir. Daha sonra, seçilen iki ebeveyn çaprazlamada yavru oluşturmak için kullanılır. Örneğin, ebeveyn olarak birinci ve ikinci kromozomlar seçilir ve yavrular Şekil 3'te görüldüğü gibi olacaktır.

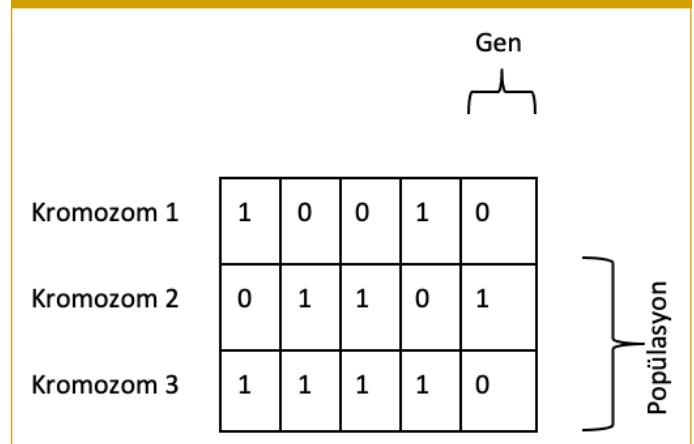
Daha sonra mutasyon aşaması (Şekil 4) başlar, çünkü bir çocuk ebeveynlerinin birebir kopyası olmayabilir.

Finalde, yeni oluşturulan çocuk kromozomlar, en düşük uygunluk fonksiyonuna sahip kromozomlarla değiştirilir.

Şekil 1. Metasezgisel Algoritmaların Genel Akış Şeması



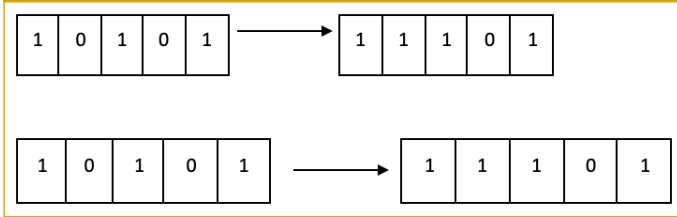
Şekil 2. Genetik Algoritmada Popülasyon



Şekil 3. Genetik Algoritmada Çaprazlama



Şekil 4. Genetik Algoritmada Mutasyon



## Diferansiyel Evrim Algoritması

Mutasyon, çaprazlama ve seçim gibi evrim özellikleri, Storn ve Price (1997) tarafından diferansiyel evrim (DE) algoritmasının geliştirilmesinde kullanılmıştır. DE, aşağıdaki kullanıcı taleplerini karşılamak için geliştirilmiştir.

- Türevlenemeyen, doğrusal olmayan ve çok modlu amaç fonksiyonlarını çözebilme
- Tasarım aşamaları ile yoğun amaç fonksiyonlarının analizleri ile başa çıkma
- Daha az ve sağlam parametrelerle kullanıcı dostu bir algoritma olmak
- Hesaplama zamanından tasarruf etmek için iyi bir yakınsama sağlamak

DE'nin formülasyonu, mutasyona uğramış vektörün oluşturulmasını içerir.  $n$  adet tasarım değişkenlerinin  $i$ . değeri, popülasyonun ( $p$ )  $j$ . bireyi ve  $t_{\max}$  maksimum yinelemenin  $t+1$ . yinelemesi için mutasyona uğramış değer ( $v_i^{j,t+1}$ ) denklem 6'de verilmiştir.

$$v_i^{j,t+1} = x_i^{a,t} + F(x_i^{b,t} - x_i^{c,t}) \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, p; t=1, 2, \dots, t_{\max} \quad (6)$$

Denklem 6'deki  $a$ ,  $b$  ve  $c$  değerleri 1 ile  $p$  arasında rastgele tanımlanmış bireysel sayılardır.  $x_i^{a,t}$ ,  $x_i^{b,t}$  ve  $x_i^{c,t}$  ise  $t$ . yineleme ve  $i$ . tasarım değişkeninin rastgele seçilen değerlerini tanımlar. 0 ile 2 arasında gerçel bir sabit sayı olarak alınması tavsiye edilen,  $F$  kontrol parametresidir.

Mutasyona uğramış vektörlerin üretilmesinden sonra, mevcut vektör ile bir çaprazlama işlemi sonraki iterasyonun ( $t+1$ ) çözüm vektörlerini üretmek için yapılır. Bu işlem Denklem 7'de gösterilmiştir.

$$x_i^{j,t+1} = \begin{cases} v_i^{j,t+1} & \text{if } \text{rand}(1) \leq CR \text{ or } j = r \\ x_i^{j,t} & \text{if } \text{rand}(1) > CR \text{ or } j \neq r \end{cases} \quad (7)$$

0 ile 1 arasında atanan rastgele bir sayı  $\text{Rand}(1)$  olarak tanımlanır. Çaprazlama sabiti  $CR$  olarak gösterilir ve ayrıca kullanıcı tarafından 0 ile 1 arasında atanır;  $r$ ; 1 ile  $p$  arasında rastgele seçilen bir tam sayıdır. Rastgele bir değer kullanmanın nedeni, mutasyona

uğramış vektörlerden en az birinin seçilmesini sağlamaktır. Aksi takdirde, tüm çözümler mevcut olanla aynı olabilir.

Seçim olarak adlandırılan son aşamada, var olan sonuçlar ( $x_i^{j,t}$ ) ile yeni oluşturulan sonuçları ( $x_i^{j,t+1}$ ) amaç fonksiyonuna göre karşılaştırılır ve en iyi çözüm saklanır. Yineleme yapılarak en iyi sonuca ulaşılar.

## Parçacık Sürü Optimizasyonu

Sürülerin davranışı, metasezgisel algoritmanın en yaygın ilhamlarından biridir. İlk olarak parçacık sürü optimizasyonu (PSO) olarak formüle edilmiş ve PSO'nun geliştirilmesinden sonra belirli doğal oluşumların davranışları optimizasyon algoritmaları olarak kodlanmıştır. Sürü zekâsı ile ilgili detaylı bilgi Parpinelli ve Lopez (2011) çalışmasında bulunabilir.

Mutasyon ve çaprazlama gibi evrimsel özelliklerden farklı olarak, sürü tabanlı algoritmalar, doğal olayların doğrudan formülasyonu ile basitleştirilmiş özellikleri kullanır.

Kennedy ve Eberhart (1995) tarafından geliştirilen PSO'da bir konum vektörü ( $v_i^{j,t+1}$ ) oluşturulur ve Denklem 8'de görüldüğü gibi mevcut çözüme eklenir. Konum değerini denklem 9 ile hesaplamak mümkündür.

$$x_i^{j,t+1} = x_i^{j,t} + v_i^{j,t+1} \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, p; t=1, 2, \dots, t_{\max} \quad (8)$$

$$v_i^{j,t+1} = \theta(v_i^{j,t} + \alpha(\text{rand}(1))(q_i^* - x_i^{j,t}) + \beta(\text{rand}(1))(x_i^{j,t} - x_i^{j,t})) \quad (9)$$

$\alpha$  ve  $\beta$  gibi iki öğrenme parametresi kullanılır. Bu parametrelerin 2 alınması önerilir. Bir atalet fonksiyonu;  $\theta(t)$  iterasyona ( $t$ ) göre hızın ağırlığını kontrol etmek için kullanılması önerilmektedir ve bir fonksiyon veya sabit bir değer olabilir.  $i$ . tasarım değişkeninin global en iyi optimum çözümü  $q_i^*$  olarak gösterilmiştir. Bu değer, geçmiş yinelemelerdeki tüm çözümlerin en iyisidir.  $x_i^{j,t}$  yerel en iyi çözümdür ve son oluşturulan değerlerin en iyi çözümüdür. Her yineleme sonrası var olan ve yeni oluşturulan çözüm amaç fonksiyonuna göre karşılaştırılır ve sadece en iyileri kabul edilir ve böylelikle optimum sonuca ulaşılar.

## Çiçek Tozlaşma Algoritması

Yang (2012), çiçekli bitkilerin tozlaşma sürecini taklit ederek Çiçek Tozlaşma Algoritmasını (FPA) geliştirmiştir. Algoritmanın geliştirilmesinde, belirli çiçek tozlaşma türleri ve çiçek sabitliği, metasezgisel bir algoritmanın oluşturulmasındaki temel özelliklerdir.

Bilindiği gibi tozlaşma, çiçekli bitkilerin çoğaltılması işlemidir. Çiçek sabitliği, özel bir çiçek tozlayıcı ortaklığını içeren özelliktir. Bu ortaklıkta, belirli bir çiçek yalnızca belirli tozlayıcıları çeker. Sabitlik, algoritmanın geliştirilmesinde anahtar özelliktir ve bu fikir, küresel ve yerel tozlaşma aşamalarını sağlamak için tozlaşma türleri ile birleştirilir. Küresel ve yerel tozlaşma aşamaları, bir geçiş olasılığı ( $sp$ ) kontrol edilerek seçilir. Örneğin,  $sp$  0,5 olarak seçilmiştir. 0 ile 1 arasında rastgele bir sayı üretilir. Üretilen sayı  $sp$ 'den küçükse, global optimizasyon uygulanacaktır. Aksi takdirde, yerel optimizasyon devam edecektir.

Küresel tozlaşma iki tür tozlaşmayı kapsar, çünkü tozlaşmanın farklı tozlayıcı ve çiçek türleri vardır. Tozlayıcının farklılığına göre,



biyotik tozlaşma, küresel tozlaşma veya küresel optimizasyonun ilham kaynağıdır. Biyotik tozlaşmada, canlı biyo-organizma tozlaşmadan sorumludur. Tozlayıcı olarak bu biyo-organizmalar böcekler, arılar veya diğer hayvanlardır ve çiçek tozlaşmasının %90'ı biyotik tozlaşma yoluyla yapılır. Tozlayıcılar, polenleri uçarak uzun mesafelere aktarabilirler. Bu durumda, küresel tozlaşma olarak biyotik tozlaşma kullanılır. Çiçek türleri ile ilgili diğer tür ise çapraz tozlaşmadır. Çapraz tozlaşma, farklı çiçekler arasında polen transferinin yapılabildiği türdür. Bu durumda aday çiçekler tüm çiçeklerin yüksek miktarını oluşturur.

Küresel tozlaşmada, bir sonraki yinelemenin (i. tasarım değişkeni, j. çiçek ve (t+1). yineleme için  $x_i^{j,t+1}$ ) güncellenmiş bir çözümü denklem 10 ile hesaplanabilir.

$$x_i^{j,t+1} = x_i^{j,t} + L(x_i^{j,t} - g^*) \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, p; t=1, 2, \dots, t_{max} \quad (10)$$

L, rastgele bir uçuşu temsil eden bir Lévy dağılımını belirtir. Tozlayıcı Lévy uçuş kurallarına uyar.  $g^*$ , oluşturulan matris içindeki mevcut en iyi sonucu belirtir.

Yerel optimizasyon, abiyotik ve kendi kendine tozlaşmayı taklit eder. Abiyotik tozlaşmada polen transfer işlemi, canlı biyo-organizmalar kullanılmadan rüzgar veya suda difüzyon yoluyla yapılır. Kendi kendine tozlaşmada çiçeğin şeftali gibi bir tozlayıcı olmadan kendi kendine döllenmesidir. Kendi kendine tozlaşma sadece bir bitki türünü kapsar. Bu sebeplerden dolayı abiyotik ve kendi kendine tozlaşmalara yerel tozlaşma adı verilir. FPA'da yerel optimizasyon Denklem 11 olarak formüle edilir.

$$x_i^{j,t+1} = x_i^{j,t} + \epsilon(x_i^{a,t} - x_i^{b,t}) \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, p; t=1, 2, \dots, t_{max} \quad (11)$$

Denklem 11, doğrusal bir dağılım ( $\epsilon$ ) kullanılır. Bu doğrusal dağılım genellikle 0 ile 1 arasında rastgele bir sayıdır. Yerel optimizasyonda, rastgele seçilmiş iki mevcut değer kullanılır ( $x_i^{a,t}$  ve  $x_i^{b,t}$ ). a ve b, tozlaşmada seçilen bireyleri gösterir. Çözümler, yeni hesaplanan değerlerle elde edilen amaç fonksiyonunun çözümü için daha iyiye yinelemelerde güncellenir.

## Yarasa Algoritması

Yang (2010) tarafından geliştirilen Yarasa Algoritması'nda (BA) mikro yarasaların ekolokasyon davranışı metasezgisel bir algoritma olarak idealleştirilmiştir. Mikro yarasaların ekolokasyon davranışında, yarasalar avlarına geldiklerinde belirli bir frekans ayarlarlar. Frekansın ayarlanması sırasında frekans, ses yüksekliği ve darbe emisyon oranları gibi çeşitli faktörlerin değiştirilmesi devam etmektedir. Bu durumda yarasalar tarafından bir optimizasyon yapılır. Bu nedenle, rastgeleleştirme fikri, bir metasezgisel algoritmanın geliştirilmesinde kullanılabilir.

Yarasaların konumu, bir konum vektörü ile tanımlanır; i. tasarım değişkeni, j. Yarasa ve (t+1). Yineleme için denklem (12) olarak formüle edilmiştir.  $v_i^{j,t+1}$  i. tasarım değişkeni ve (t+1). yineleme için j. yarasanın hızıdır ve denklem 13 ile gösterilmiştir.

$$x_i^{j,t+1} = x_i^{j,t} + v_i^{j,t+1} \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, p; t=1, 2, \dots, t_{max} \quad (12)$$

$$v_i^{j,t+1} = v_i^{j,t} + (x_i^{j,t} - g^*)f_i \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, p; t=1, 2, \dots, t_{max} \quad (13)$$

Hız denkleminde, tasarım değişkeninin mevcut en iyi çözümü ( $g^*$ ) ve yarasaların değişen frekansının ( $f_i$ ) kullanılır. Frekans, Denklem

14'de gösterildiği gibi minimum ( $f_{min}$ ) ve maksimum ( $f_{max}$ ) frekans arasında rasgele dağıtılır.

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})(\text{rand}(1)) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (14)$$

Konum oluşturulduktan sonra mevcut çözüm yerine bu vektörlerin aday çözümleri kabul edilir veya edilmez. Bu karar için atım hızı ( $r_i^t$ ) ve ses yüksekliğine ( $A_i^t$ ) göre bir kriter testi uygulanır. Atım hızı, oluşturulan rastgele bir sayıdan küçükse, konum vektörünü yeniden oluşturmak için yerel arama kullanılır. Yerel aramada, denklem 15'de formüle edildiği gibi ses yüksekliği kullanılır.

$$x_i^{j,t+1} = x_i^{j,t} + \epsilon A_i^t \quad (15)$$

Yerel aramada rastgele bir yürüyüş fonksiyonu ( $\epsilon$ ) kullanılır ve  $\epsilon$ ; -1 ile 1 arasında rastgele bir sayıdır. Atım hızı ve ses yüksekliği yinelemelere göre değişir. Bu algoritma değişkenleri denklemler 16-17'de formüle edildiği gibi değişir. Denklemlerde,  $\alpha$  ve  $\gamma^t$  algoritma sabitleridir ve değerler yerel arama aralığını kontrol etmek için kullanılır.  $r_i^0$ , kullanıcı tanımlı ilk atım hızı değeridir. Tüm algoritmalar gibi, mevcut olanlardan daha iyi sonuçlar seçilir ve kaydedilir.

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t \quad (16)$$

$$r_i^{t+1} = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma^t)] \quad (17)$$

## Tavlama Benzeşimi Algoritması

Tavlama Benzeşimi (SA), metalürjideki tavlama işleminden esinlenmiştir. Tavlama işleminde, malzemenin kristallerinin boyutunu artırmak için bir malzemenin ısıtılması ve kontrollü soğutulması yapılır. Böylece malzeme kusurları azaltılır.

Kirkpatrick vd. (1983) tarafından önerilen SA, yerel optimum sonuçlara yakalanmayı önlemek için Markov zincirini kullanan bir arama yöntemidir. Markov zinciri, sadece iyileştirilmiş sonuçları değil, uygun koşullar altında yakınsama kabiliyetine sahiptir. Mevcut olanlardan daha iyi olmayan bazı sonuçlar da kabul edilmektedir.

SA'da ilk olarak, başlangıç sıcaklığı ( $T_0$ ) ve tasarım değişkenlerinin ilk tahmini yapılır. Yinelemeler sırasında, aday tasarım değişkenlerinin oluşturulması rasgele bir sayı (randn) kullanarak denklem 18 olarak verilmiştir.

$$x_i^{j,t+1} = x_i^{j,t} + \text{randn} \quad i=1, 2, \dots, n; t=1, 2, \dots, t_{max} \quad (18)$$

SA, popülasyona dayalı bir yöntem değildir. Yinelemelerden sonra tasarım değişkenlerinin yalnızca tek değerleri atanır ve kaydedilir.

Aday çözümlerin üretilmesi, sıcaklık (T) son sıcaklıktan düşüklü olana ve yineleme sayısı (t) maksimum yineleme sayısından (tmax) daha düşük olana kadar yapılır. Sıcaklık lineer (Denklem 19) veya geometrik (Denklem 20) fonksiyonları ile tanımlanabilir.

$$T(t) = T_0 - \beta t \quad (19)$$

$$T(t) = T_0 \alpha^t \quad (20)$$

Sıcaklık hesabında soğutma hızı ( $\beta$ ) ve soğutma faktörleri ( $\alpha$ ) kullanılır. Oluşturulan aday sonuçları aşağıdaki iki kritere göre kabul edilir. Bu faktörlerden birini sağlayan sonuçlar kabul edilir.



- Yeni aday değerler için amaç fonksiyonunun değeri, mevcut olanlardan daha iyi olmalıdır.
- Denklem 21 sağlanmalıdır. Denklem 22 ile verildiği gibi Df, formüle edilen son yinelemelerin amaç fonksiyonu değerlerinin farkıdır ve r rastgele tanımlanmış bir sayıdır.

$$\exp[-Df/T] \rightarrow r \quad (21)$$

$$Df = f(x^{t+1}) - f(x^t) \quad (22)$$

## Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon

Rao vd. (2011) tarafından geliştirilen öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon (TLBO) eğitimin iki aşamasını formüle etmiştir. Bu aşamalar, eğitimin en iyi bilgiye sahip bir üye tarafından yürütüldüğü öğretmen aşaması ve öğrenciler arasında bilgi aktarımı yoluyla sınıfın kendi kendine çalışmasının yapıldığı öğrenen aşamasıdır.

Aday çözümün geliştirilmesinde öğretmen aşamasının formülasyonu denklem (23) olarak verilmiştir.

$$x_i^{j,t+1} = x_i^{j,t} + \text{rand}(0,1)(g^* - TFx_i^{ave}) \quad i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,p; t=1,2,\dots,t_{\max} \quad (23)$$

Eğitim bir öğretmen tarafından yapıldığından ve bilgi sahibi en iyi kişi öğretmen olduğundan, öğretmen aşamasında var olan en iyi çözüm ( $g^*$ ) kullanılır. Amaç, sınıfın ortalamasının kapasitesini arttırmaktır ve mevcut çözümün ( $x_i^{ave}$ ) ortalaması kullanılır. Ortalamanın ağırlığını kontrol etmek için öğretme faktörü (TF) kullanılır, ancak TF kullanıcı tanımlı bir parametre değildir. Rastgele 1 veya 2 olarak seçilir. Bu durumda kullanıcı tanımlı parametrelere ihtiyaç duyulmadığı için TLBO kullanıcı dostu bir algoritmadır.

Öğretmen aşaması, küresel optimizasyon olarak kabul edilir. Çoğu meta-sezgisel algoritmadan farklı olarak TLBO, global ve yerel arama arasında seçim yapmak için hiçbir olasılık parametresine sahip değildir. Sonuç olarak her iki aşama veya faz bir yinelemede yapılır.

Öğrenen aşaması, TLBO'nun yerel optimizasyon kısmıdır. Öğrenen aşaması formülasyonu denklem (24) olarak gösterilmiştir.

$$x_i^{j,t+1} = \begin{cases} x_i^{j,t} + \text{rand}(1)(x_i^{a,t} - x_i^{b,t}) & \text{if } f(x_i^{a,t}) < f(x_i^{b,t}) \\ x_i^{j,t} + \text{rand}(1)(x_i^{b,t} - x_i^{a,t}) & \text{if } f(x_i^{a,t}) > f(x_i^{b,t}) \end{cases} \quad (24)$$

Öğrenci aşamasında, birkaç optimizasyon aşaması gibi, iki rastgele bireyin (a ve b) mevcut iki çözümü (j) kullanılır. Burada amaç fonksiyonu değerleri belirleyici olmaktadır. Bu durum öğretmen ile eğitim sonrası kendi kendilerine eğitimi temsil etmektedir. Tüm öğrenciler, başkalarına ifade edilebilecek iyi bilgilerin bir kısmına sahiptir. Her ardışık aşamadan sonra, yenileri daha iyi bir amaç işlevine sahipse, yeni sonuçlar mevcut olanlarla değiştirilir.

## Armoni Arama Algoritması

Armoni Arama (HS) algoritması müzikten ilham alan bir metasezgisel algoritmadır ve Geem vd. (2001) tarafından müzikal performansların gözlemlenmesi yoluyla geliştirilmiştir. Müzikal performanslarda müzisyen, dinleyicilerin dikkatini çekmek için ezgileri dinleyicilere göre ayarlamaya çalışır. Bu süreçte müzisyenlerin çabası şu şekildedir:

- Popüler notların çalmak
- Yeni nota çalmak

- Bilinen veya çalınan notalara benzer notaların çalınması.

Bu çabalarla, notalar her zaman dinleyicinin beğenisini kazandıracak şekilde güncellenir. Bu süreç, bir optimizasyon problemiyle aynı amaca sahiptir. HS'nin iki aşaması ve iki kullanıcı tanımlı parametresi vardır. Bu parametreler armoni belleği dikkate alma oranı (HMCR) ve alan ayarlama oranıdır (PAR). HMCR genellikle global ve yerel optimizasyon arasından seçim yapmak için kullanılır. PAR komşu değerleri ayarlamak için kullanılır. Bu fikirle, HS'nin formülasyonu farklı şekilde oluşturulabilir. Klasik HS'de, ayrık ve sürekli değişkenler için yerel aramada sırasıyla komşuluk indeksi ( $n_j$ ) ve bant genişliği ( $b_w$ ) kullanılır.

Klasik HS'nin adımları denklemler 25-28'de formüle edildiği gibidir.

$$x_i^{j,t+1} = x_{i,\min} + \text{rand}(1)(x_{i,\max} - x_{i,\min}) \quad \text{eğer } \text{HMCR} \rightarrow r_1 \quad (25)$$

$$x_i^{j,t+1} = x_i^{j,t} \quad \text{eğer } \text{HMCR} \nless r_1 \text{ ve } \text{PAR} \rightarrow r_2 \quad (26)$$

$$x_i^{j,t+1} = x_i^{j+n_j,t+1} \quad \text{eğer } \text{HMCR} \nless r_1 \text{ ve } \text{PAR} \nless r_2 \quad (\text{ayrık değişkenler için}) \quad (27)$$

$$x_i^{j,t+1} = x_i^{j,t} + b_w(r_3) \quad \text{eğer } \text{HMCR} \nless r_1 \text{ ve } \text{PAR} \nless r_2 \quad (\text{sürekli değişkenler için}) \quad (28)$$

Denklem 25 algoritmanın global optimizasyon kısmıdır ve minimum ( $x_{i,\min}$ ) ve maksimum ( $x_{i,\max}$ ) aralığında tamamen yeni bir çözümün üretilmesini temsil eder. Denklem 26 mevcut değer kabulü ve denklemler 27 ve 28 sırasıyla ayrık ve sürekli tasarım değişkenleri için yerel optimizasyon formülasyonlarıdır. Formülasyonlarda üç rastgele sayı ( $r_1$ ,  $r_2$  ve  $r_3$ ) kullanılır.  $r_1$  ve  $r_2$ ; 0 ile 1 arasında,  $r_3$  ise -1 ile 1 arasında atanır. Üretilen daha iyi sonuçlar her zaman mevcut çözümler elenerek kabul edilir.

## Jaya Algoritması

Jaya algoritması (JA), tek fazlı bir algoritmadır ve kullanıcı tanımlı parametresi yoktur. Bu durumda, kolay kullanıcı dostu bir algoritmadır. "Jaya" adı, "Zafer" anlamına gelen Sanskritçe kelimedenden gelir. Rao (2016) muhtemelen bir optimizasyon sürecinden sonra en iyi çözümü bulmak bilimin zaferi olduğu için bu ismi vermiştir. Tek fazın formülasyonu denklem 29 olarak gösterilmiştir.

$$x_i^{j,t+1} = x_i^{j,t} + r_1(x_i^{*t} - |x_i^{j,t}|) - r_2(x_i^{w,t} - |x_i^{j,t}|) \quad i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,p; t=1,2,\dots,t_{\max} \quad (29)$$

Denklem 29, mevcut en iyi ( $x_i^*$ ) ve en kötü ( $x_i^w$ ) çözümlerle 0 ile 1 ( $r_1$  ve  $r_2$ ) arasında yalnızca iki rastgele sayı kullanılır. Buradaki fikir, en kötü çözümden uzaklaşırken en iyi çözüme yaklaşmaktır. Bu nedenle, JA iyi bir yakınsama yeteneğine sahiptir. Yeni oluşturulan tüm çözümler mevcut olanlarla karşılaştırılır ve amaç fonksiyonu değerinde daha iyi olanlar saklanır.

**Çıkar Çatışması:** Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

**Hakem Değerlendirmesi:** Dış bağımsız.

**Peer-review:** Externally peer-reviewed.

**Declaration of Interests:** The authors declare that they have no competing interest.

## Kaynaklar

- Geem, Z. W., Kim, J. H., & Loganathan, G. V. (2001). A new heuristic optimization algorithm: Harmony search. *Simulation*, 76, 60–68. [\[Crossref\]](#)
- Goldberg, D. E., & Samtani, M. P. (1986). Engineering optimization via genetic algorithm. *Proceedings of Ninth Conference on Electronic Computation*. ASCE, New York, NY, pp. 471-482.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. C. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks No. IV*, November 27-December 1, pp. 1942–1948, Perth Australia. [\[Crossref\]](#)
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671–680. [\[Crossref\]](#)
- Parpinelli, R. S., & Lopes, H. S. (2011). New inspirations in swarm intelligence: A survey. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 3(1), 1-16. [\[Crossref\]](#)
- Rao, R. V., Savsani, V. J., & Vakharia, D. P. (2011). Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer-Aided Design*, 43(3), 303-315. [\[Crossref\]](#)
- Rao, R. (2016). Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7(1), 19-34. [\[Crossref\]](#)
- Storn, R., & Price, K. (1997). Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341-359. [\[Crossref\]](#)
- Yang, X. S. (2010). A new metaheuristic bat-inspired algorithm. In *Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2010)* (pp. 65-74). Springer, Berlin, Heidelberg. [\[Crossref\]](#)
- Yang, X. S. (2012). Flower pollination algorithm for global optimization. In *International conference on unconventional computing and natural computation* (pp. 240-249). Springer, Berlin, Heidelberg. [\[Crossref\]](#)

# **BÖLÜM 3**

## **BETONARME KİRİŞLERİN**

### **OPTİMUM TASARIMI**

# Betonarme Kirişlerin Optimum Tasarımı

## *Optimum Design of Reinforced Concrete Beams*

### BÖLÜM HAKKINDA

Bu bölümde eğilme momenti etkisi altında bulunan betonarme kirişlerin metasezgisel yöntemler ile optimizasyonu anlatılmıştır. Eurocode 2 yönetmeliğine göre bir T-kesitin optimizasyon tasarımı sunulmuştur. Ayrıca, ACI 318 yönetmeliğine göre detaylı donatı tasarımı yapılan bir optimizasyon örneği sunulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Betonarme, kiriş, eğilme

### ABOUT the CHAPTER

In this section, the optimization of reinforced concrete beams under the effect of bending moment with metaheuristic methods is explained. Optimization design of a T-section according to Eurocode 2 regulation is presented. In addition, an optimization example with detailed reinforcement design according to ACI 318 regulation is presented.

**Keywords:** Reinforced Concrete, Beam, Bending

## Giriş

Betonarme bir yapıda döşemelerdeki yükler kirişlere aktarılmaktadır. Kirişlerin yükleri ise kolonlara ve daha sonra yapının temeline iletilmiş olur. Döşeme, kiriş ve temellerin çeşitli bölümleri, çekme gerilmeleri altındaki bir elemana göre tasarlanır ve donatı çeşliğinin betonun kırılmadan önce akması sağlanarak sünek davranış sağlanır. Bu sünek davranış, kesitin bir kısmı genellikle çekme gerilmeleri altında olduğu için sağlanabilir. Oysa kolonlar genellikle basınç gerilmeleri altında olduğundan bu durum sağlanamamakta ve yapısal süneklik için başka kurallara ihtiyaç duyulmaktadır.

Kirişlerin süneklik durumunu sağlamak için donatı miktarının sınırlandırılması gerekir ve dolayısıyla moment kapasitesi de sınırlandırılır. Moment kapasitesini artırmak için betonarme kesitlerin basınç gerilmesi altındaki kısmında donatılar eklenerek çift donatılı tasarım yapılmalıdır.

Tasarım kodlarında verilen tasarım kısıtlamasının varlığı nedeniyle, betonarme elemanın optimizasyonu, özellikle betonarme kirişlerin sünek davranışı için oldukça doğrusal değildir. Bu durumda, betonarme kirişler için metasezgisel tabanlı birkaç optimizasyon yöntemi önerilmiştir (Akın & Saka, 2010; Bekdaş & Nigdeli, 2013; Collo vd., 1997; Fedghouche ve Tiliouine, 2012; Govindaraj & Ramasamy, 2005; Rafiq & Southcombe, 1998).

Bu bölümde, betonarme kirişlerin iki uygulaması verildi. İlk uygulamada, Eurocode 2 (2005) yönetmeliğine göre formüle edilmiş tasarım kısıtlamaları dikkate alınarak optimum T-kiriş tasarımı sunulmuştur. İkinci uygulamada ise, betonarme kirişlerin tasarımı ACI 318 (2005) yönetmeliğine göre açıklanmıştır.

## Betonarme Kirişlerin Eurocode 2 Yönetmeliğine Göre Optimum Tasarımı

Eurocode 2 aracılığıyla optimizasyon için T-kesitli bir kiriş (Şekil 1) ele alınmıştır. Bu problem ilk olarak Fedghouche ve Tiliouine (2012) tarafından sunulmuştur. Tasarım değişkeninin aralıkları ve denklemleri Tablo 1'de gösterilmiştir. Tasarım sabitleri ise Tablo 2'de verilmiştir.



CC BY 4.0: Telif hakkı yazarlardadır. Bu kitabın içeriği Creative Commons Atıf 4.0 Uluslararası lisans altında lisanslanmıştır.



Tablo 1. Tasarım Değişkenleri ve Limitleri

Sembol	Tanım	Limitler
b	Gövde genişliği [mm]	$b_w \leq b \leq \min [0.2L + b_w, 8h_f]$
b <sub>w</sub>	Başlık genişliği [mm]	$0.20d \leq b_w \leq 0.40d$
h	Yükseklik [mm]	$L/16 \leq h \leq 2.0$
h <sub>f</sub>	Başlık yüksekliği [mm]	$0.15 \leq h_f \leq d$
d	Efektif derinlik [mm]	$d = 0.9h$
d <sub>s</sub>	Beton örtüsü [mm]	$d_s = 0.1h$
A <sub>s</sub>	Donatı Alanı [mm <sup>2</sup> ]	$0 \leq A_s \leq 0.1$

Bu örneğin sunumunda, tasarım kısıtlamaları Eurocode 2 ile formüle edilmiş ve beş eşitsizlik fonksiyonu (i=1, 2,..., 5 için g<sub>i</sub>) denklemler (1)-(5) olarak verilmiştir. Kısıtlar; denklemler (1) ve (2) kirişin sünek davranışı ile ilgilidir. Denklem (3), Eurocode 2 tasarımında izin verilen minimum ve maksimum donatı oranını temsil eder. Denklemler (4) ve (5) kirişin eğilme momentini ve kesme kuvveti kapasitesini temsil etmektedir. Optimum tasarımda sadece tek donatılı tasarıma izin verilmiştir.

$$g_1 = -\omega(1 - 0.5\omega) + 0.392 \geq 0 \quad (1)$$

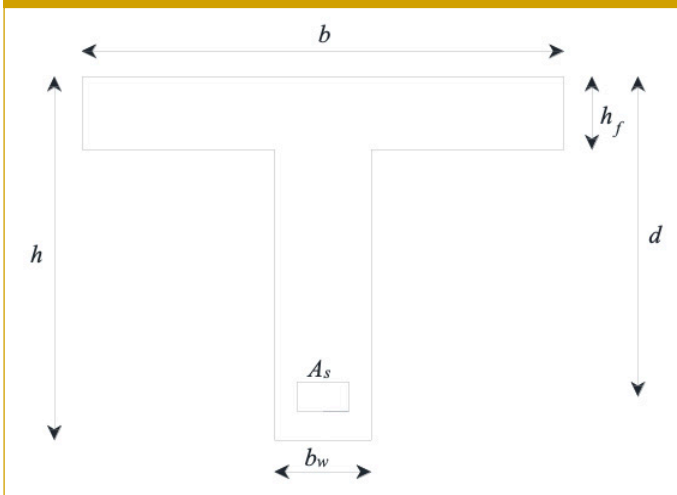
$$g_2 = \frac{0.0035(0.8-\omega)}{\omega} - f_{yd}/E_s \geq 0 \quad (2)$$

$$g_3 = \rho_{min} \leq \rho \leq \rho_{max} \quad (3)$$

$$g_4 = -M_{Ed} + M_{Ed1} \geq 0 \quad (4)$$

$$g_5 = -V_{Ed} + V_{Rd max} \geq 0 \quad (5)$$

Şekil 1. T-Kesitli Kiriş Enkesiti



Tasarım kısıtlarının hesabında gerekli olan ifadeler denklemler (6)-(9)'da verilmiştir.

$$\omega = (f_{yd}/f_{cd})(A_s/b_w d) - (b - b_w)h_f/(b_w d) \quad (6)$$

$$\rho = A_s/(b_w d) \quad (7)$$

$$M_{Ed1} = f_{cd}(b - b_w)h_f(d - 0.50h_f) + f_{cd}b_w d^2 \omega(1 - 0.5\omega) \quad (8)$$

$$V_{Rd max} = v_1 f_{cd} b_w z / (\tan(45) + \cot(45)) \quad (9)$$

Tablo 2. Tasarım Sabitleri

Sembol	Tanım	Değerler
f <sub>ck</sub>	Beton karakteristik basınç dayanımı	20 MPa
f <sub>cd</sub>	Beton tasarım basınç dayanımı	11.33 MPa
f <sub>yd</sub>	Çelik tasarım basınç dayanımı	348 MPa
ρ <sub>max</sub>	Maksimum donatı oranı	0.04
ρ <sub>min</sub>	Minimum donatı oranı	0.0013
L	Kiriş boyu	20 m
E <sub>s</sub>	Çeliğin elastisite modülü	200000 MPa
M <sub>Ed</sub>	Eğilme momenti kapasitesi	4.991 N.m
V <sub>Ed</sub>	Kesme kuvveti kapasitesi	1.039 N
C <sub>s</sub>	Donatı çeliğinin birim ton maliyeti	36C <sub>c</sub>
C <sub>c</sub>	Betonun birim m3 maliyeti	(Maliyet oran olarak alınmıştır.)

Denklem (9)'da bulunan, ve z değerleri denklemler (10) ve (11)'de verildiği gibi hesaplanır.

$$v_1 = 0.6(1 - f_{ck}/250) \quad (10)$$

$$z = 0.9d \quad (11)$$

Maliyet en küçüklemede kullanılan amaç fonksiyonu, denklem (12)'de verilmiştir.

$$C = b_w d + (b - b_w)h_f + (C_s/C_c)A_s \quad (12)$$

Sunulan optimizasyon problemi, Fedghouche ve Tiliouine (2012) tarafından Genetik Algoritma (GA) ve Kayabekir vd. (2020) tarafından Çiçek tozlaşma algoritması (FPA), öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon (TLBO), Armoni Arama (HS) ve Jaya algoritması (JA) kullanılarak optimum sonuçları sunulmuştur. Optimum tasarım değişkenleri, maliyet amaç fonksiyonu için bir oran kullanılarak Tablo 3'te verilmiştir. Ayrıca elle yapılan hesaplamalarla yapılan klasik bir çözüm sunulmuştur. Açıkça görüldüğü gibi, optimizasyon toplam malzeme maliyetinde %10,5'lik bir ekonomiyeye sahiptir. Ayrıca, dört algoritmanın 30 kez tekrar çalıştırması sonucunda elde edilen minimum (F<sub>min</sub>), ortalama (F<sub>mean</sub>), standart sapma ve optimum sonuca ulaşmada elde edilen ortalama iterasyon sayıları verilmiştir. Farklı algoritmaların farklı üstünlükleri sonuçlarda görülmüştür. Örneğin, TLBO için küçük bir standart sapma değeri elde edilmiş ve en az iterasyona ihtiyaç duyulan yöntem FPA olmuştur.

### Betonarme Kirişlerin Acı 318 Yönetmeliğine Göre Optimum Tasarımı

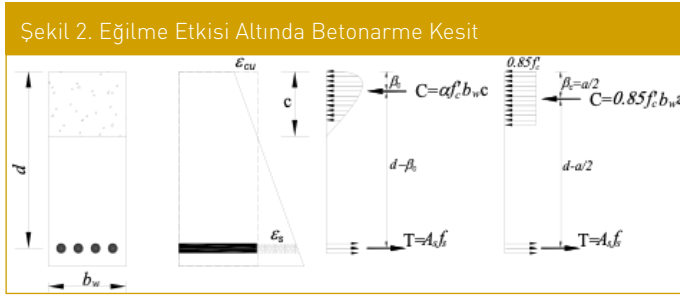
Eğilme etkileri altında, betonarme elemanlarının kesiti, alt ve üst noktada maksimum ve minimum olduğu ve yüksekliğine (h) göre değişen gerilmeler altındadır. Bilindiği gibi betonun çekme dayanımı düşüktür ve betonarme elemanların eğilme tasarımında bu dayanım ihmal edilmektedir.

Bu durumda, basma gerilmeleri sadece maksimum basma kısmından (basınç kuvvetleri negatif olarak atanırsa minimum gerilme noktası) başlayarak gerilmelerin olmadığı nötr eksene kadar olan alanda dikkate alınır. Şekil 2'de gösterildiği gibi, betonun basınç gerilmesi bloğu, betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi nedeniyle bir parabolüdür ve basitlik için, ACI-318'de α=0.85 alınarak

genellikle dikdörtgen gerilme bloğu olarak kabul edilir. Bu durumda, basınç bloğunun derinliği daha kısa olacaktır. Şekil 2’de betonun spesifik basınç dayanımı ve çeliğin servis yükleri altında çekme gerilmesi sırasıyla,  $f_c'$  ve  $f_s$  ile gösterilmiştir ve bu durumlarda oluşan şekil değiştirme oranları çelik ve betonda sırasıyla  $\epsilon_s$  ve  $\epsilon_{cu}$  ile verilmiştir. Eşdeğer dikdörtgen basınç bloğu derinliği  $a$  ile gösterilmiş olup, C değeri basınç gerilme bloğundaki toplam kuvveti ve T ise çekme donatısından dolayı oluşan toplam kuvveti göstermektedir.

Tablo 3. Optimum Değerler

Tasarım Sabitleri	Klasik çözüm	GA	FPA	TLBO	HS	JA
b (m)	1.2	1.2	1.13879373	1.137632212	1.144541099	1.137605021
$b_w$ (m)	0.4	0.30	0.30432074	0.304358948	0.304095428	0.304361011
h (m)	1.6	1.67	1.69067078	1.690883044	1.689419046	1.690894506
d (m)	1.46	1.50	1.5216037	1.52179474	1.520477141	1.521805056
$h_f$ (m)	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
$A_s$ (m <sup>2</sup> )	0.011702	0.01143	0.01141132	0.011413083	0.011405725	0.01141303
$\omega$	0.424	0.477	0.48660829	0.486991788	0.485020591	0.486991176
C/Cc	1.117272	0.999221	0.99903391	0.999033809	0.999043105	0.999033809
$F_{min}$	-	-	0.99903391	0.999033809	0.999043105	0.999033809
$F_{mean}$	-	-	1.00182853	0.999033816	1.000081551	1.000120713
Standard sapma	-	-	0.00546358	5.27E-09	0.005435734	0.005917898
Ortalama iterasyon	-	-	22869.9	41595.36667	53446.31333	83928.8



Basınç gerilmelerinin kuvvet dengesi, donatının gerinmesinden kaynaklanan çekme kuvvetleri tarafından sağlanır. Bileşik kuvvetlerin eşitlenmesiyle (C=T), üst noktanın nötr eksene olan mesafe Denklem (13) ile yazılır.

$$c = \frac{A_s f_y}{\alpha f_c' b_w} \quad (13)$$

Eşdeğer dikdörtgen gerilme bloğunun derinliği, olarak tanımlanır ve  $\beta_1$ , eşdeğer dikdörtgen gerilme bloğunun derinliğini nötr eksen derinliğine ilişkilendiren faktördür. Bu faktör süneklik ile ilgilidir ve betonun basınç dayanımının artması bu faktörü azaltır. ACI-318’de 17 ile 28 MPa arasındaki  $f_c'$  değerleri için 0.85 olarak alınır. 28 MPa’nın üzerindeki  $f_c'$  değerleri için, her 7 MPa mukavemet artışı için doğrusal olarak 0,05 azalır, ancak alınacak en küçük değer 0,65’tir.

Dikdörtgen gerilme bloğu için çekme ve basınç gerilmelerinin eşitliği yapılırsa; eşdeğer dikdörtgen gerilme bloğunun derinliği denklem (14) ile hesaplanır:

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_c' b_w} \quad (14)$$

Denklemler (15) ve (16), moment koluna göre C ve T momentlerini olarak (d-  $\beta_c$  veya d-a/2) moment kapasitesi (M) için yazılır.

$$M = A_s f_s \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (15)$$

$$M = 0.85 f_c' b_w a \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (16)$$

DeneySEL sonuçlara göre beton,  $\epsilon_{cu}$  0,003’e eşit olduktan sonra kırılır. Beton, çelik akmadan önce ezilirse, kırılma ani olur. Dengeli durumda çelik akması ve beton ezilmesi aynı anda olur. Bu durum da gevrek kırılmadır. Bu nedenle, dengeli duruma göre maksimum donatı oranı bir miktar azaltılmalıdır. ACI-318’de azaltma faktörü, denklem (17)’de görüldüğü gibi 0,75’tir.

$$\rho_{max} = (0.75)(0.85)\beta_1 \frac{f_c'}{f_y} \left( \frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (17)$$

Denklem (17)’de  $f_y$  donatının akma dayanımıdır. Hesaplanan maksimum donatı alanı nominal eğilme momentini ( $M_n$ ) sağlamıyorsa, basınç bölgesine donatılar eklenerek basınç kuvvetlerini artırmak için çift donatılı tasarım yapılır. ACI-318’de, eğilme momentini kapasitesini ( $M_u$ ) bulmak için nominal eğilme momentini ( $M_n$ ),  $\phi$  ile çarpılır. Kirişler gibi gerilim kontrollü kesitler için  $\phi$  0,9’dur. Donatı sınırlandırmasına ek olarak, minimum donatı alanı ( $A_{s,min}$ ) de Denklemler (18) ve (19)’a göre elverişsiz duruma dikkate alınarak hesaplanır:

$$A_{s,min} \geq \frac{\sqrt{f_c'}}{4f_y} b_w d \quad (18)$$

$$A_{s,min} \geq \frac{1.4}{f_y} b_w d \quad (19)$$

Denklem (20) olarak verilen kesme kuvveti kapasitesi ( $V_n$ ), denklem (21) ile verilmiş kesitin kapasitesi ( $V_c$ ) ve denklem (22) ile verilmiş kesme donatısı ( $V_s$ ) tarafından sağlanan nominal kesme mukavemeti Denklem 2’de görüldüğü gibi. (11) Faktörlere ayrılmış kesme kuvveti kapasitesi ( $V_u$ ), nominal kesme kuvvetinin bir indirgeme faktörü ile çarpılmasıyla sağlanır.

$$V_u = \phi V_n \quad (20)$$

$$V_c = \frac{\sqrt{f_c'}}{6} b_w d \quad (21)$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (22)$$

Sünek tasarım için izin verilen maksimum kesme kuvveti,  $0.6 \sqrt{f_c} b_w d$  ile hesaplanır. Hesaplarda betonun nominal kesme dayanımı ( $V_c$ ) yeterli olsa bile minimum kesme donatısı eklenmelidir.  $A_v$  s kadar aralık ile sağlanmış kesme donatı alanıdır ve izin verilen minimum  $A_v$  değeri denklem (23)'de verilmiştir.

$$(A_v)_{\min} = \frac{1}{3} \frac{b_w s}{f_y} \quad (23)$$

Ayrıca, kesme donatısı arasındaki maksimum boşluk ( $s_{\max}$ )  $d/2$ 'den az olmalıdır.  $V_s$  değeri  $0.3 \sqrt{f_c} b_w d$  değerinden büyükse,  $s_{\max}$   $d/4$  olarak alınmalıdır.

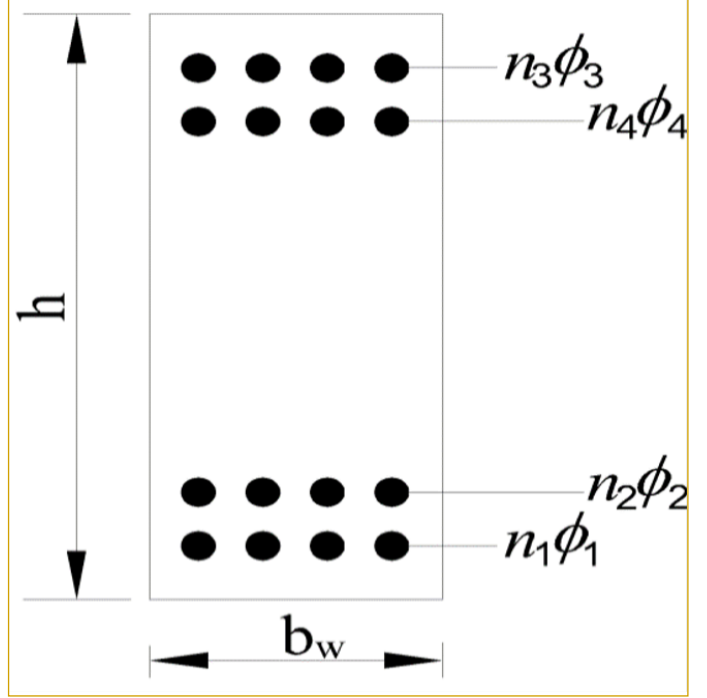
ACI318 kurallarına göre 50 kNm ile 500 kNm arasındaki tasarım momentleri için dikdörtgen betonarme kirişin optimum tasarımı araştırılmıştır. Bu optimizasyon probleminin amacı, Denklem (24)'de görüldüğü gibi birim metre başına kirişin malzeme maliyetinin amaç fonksiyonudur ( $f(X)$ ). Burada  $V_c$  ve  $W_s$  sırasıyla toplam beton hacmi ve betonarme çeliğin toplam ağırlığıdır. Araştırılan tasarım değişkenleri (Şekil 3), kesitin genişliği ( $b_w$ ), yüksekliği ( $h$ ), basınç ve çekme bölümlerinden oluşan iki sıradaki donatıların sayısı ( $n_1$ - $n_4$ ) ve boyutlarıdır ( $\phi_1$ - $\phi_4$ ).

$$\min f(X) = C_c V_c + C_s W_s \quad (24)$$

Optimum tasarımda öncelikle boyutlar aday tasarım değişkenleri ile atanır. Daha sonra maksimum donatı oranına göre maksimum tek donatılı moment kapasitesi hesaplanır. Maksimum moment kapasitesi, amaçlanan eğilme momenti değerinden düşük ise, çekme donatılarına ek olarak  $n_3$ ,  $n_4$ ,  $\phi_3$  ve  $\phi_4$  için aday çözümler atanarak çift donatılı tasarım yapılır. Donatıların yerleşimi kontrol edilir. Aderans için, çubuklar arasındaki net mesafe, maksimum çap boyutundan, 25 mm'den ve beton üretiminde kullanılan agrega boyutunun  $4/3$  katından fazla olmalıdır. Tüm kısıtlar ve hesaplamalar yapılarak değişkenler ve onlara karşılık gelen amaç fonksiyonları kaydedilir. Sonrasında algoritma kurallarına göre iterasyonlarda yeni değişkenler türetilir. Belirli iterasyon sonunda en uygun sonuca ulaşılır. Belirlenen tasarım değişkeni aralıkları ve tasarım sabitleri kullanılmış ve bu aralıklar Tablo 4'te verilmiştir.

Optimizasyonda bulunan değerlerin şantiyede pratik üretimi için ayrışık boyutlar kullanılmıştır. 50 mm farkla boyut değişkenleri alınmıştır. Ayrıca donatı ölçüleri 2 mm farkla belirlenmiştir, çünkü bu ölçüler piyasada bulunabilmektedir. Farklı eğilme momenti değerleri için optimum sonuçlar Tablo 5'te sunulmuştur. Eğilme momenti 250 kNm veya fazlası olduğunda, çift donatılı tasarım gereklidir. Sayısal durumlar için aynı optimizasyon durumları 20 kez tekrarlanarak sağlamlık değerlendirilmesi yapılır. Genel olarak, JA amaç fonksiyonunu mini-

Şekil 3. Optimize edilen Tasarım Değişkenleri ve Kesit Görünümü



mize etmede biraz daha iyidir. Farklı eğilme momentleri için, farklı algoritmalar en iyi performansı gösterebilir ve bu durum, ücretsiz ögle yemeği yok teoreminin kanıtıdır. Küçük standart sapma sonuçlarından görüldüğü gibi, algoritmalar genellikle sağlamdır. JA algoritması kullanılarak 400 kNm eğilme momentleri için maksimum standart sapma değeri 0.43'tür ve elde edilen en büyük değerdir. Bu durum JA'nın tek fazlı bir yöntem olmasından kaynaklanabilir.

Tablo 4. Tasarım Değişkenleri Sınırları ve Tasarım Sabitleri

Değişken veya Sabit	Değerler
Ana donatı çapları ( $\phi_1$ - $\phi_4$ )	10-30 mm
Genişlik ( $b_w$ )	250-350 mm
Yükseklik ( $h$ )	350-500 mm
Net beton örtüsü kalınlığı	35 mm
Maksimum agrega çapı	16 mm
Beton basınç mukavemeti	20 MPa
Çelik akma dayanımı	420 MPa
Etriye çapı	10 mm
Beton birim maliyeti	40 birim
Çelik birim maliyeti	400 birim

Tablo 5. Optimum Sonuçlar (Bekdaş &amp; Nigdeli, 2018)

	JA									
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Moment (kNm)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
h (mm)	350	400	500	500	500	500	500	500	500	500
$b_w$ (mm)	250	250	250	250	250	300	300	350	350	400
$\phi_1$ (mm)	14	16	16	28	26	22	26	26	28	26
$\phi_3$ (mm)	20	28	30	22	14	12	16	12	16	12

Tablo 5. Optimum Sonuçlar (Bekdaş &amp; Nigdeli, 2018) (devamı)

JA										
$n_1$	2	3	4	2	3	5	4	5	5	6
$n_3$	0	0	0	0	2	2	3	6	5	9
$\phi_2$ (mm)	12	10	12	10	12	14	12	10	10	12
$\phi_4$ (mm)	18	16	14	16	18	22	18	26	14	30
$n_2$	2	4	2	3	2	2	4	3	2	4
$n_4$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$M_u$ (kNm)	57.31	111.22	167.71	222.42	279.29	333.48	388.94	445.15	500.11	555.96
Maliyet (birim/m) (en iyi)	5.16	6.85	8.20	9.55	11.60	13.56	15.87	18.08	20.16	22.45
Analiz sayısı	225	100	75	100	125	200	1475	950	175	2100
Maliyet (birim/m) (ortalama)	5.17	6.86	8.25	9.59	11.65	13.70	16.05	18.62	20.58	22.93
Standart Sapma	0.01	0.02	0.07	0.07	0.06	0.12	0.19	0.43	0.28	0.21
TLBO										
Moment (kNm)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
h (mm)	350	400	500	500	500	500	500	500	500	500
$b_w$ (mm)	250	250	250	250	250	250	300	300	350	400
$\phi_1$ (mm)	14	16	16	28	26	28	26	28	28	26
$\phi_3$ (mm)	30	30	16	20	14	14	14	16	16	12
$n_1$	2	3	4	2	3	3	4	4	5	6
$n_3$	0	0	0	0	2	4	4	5	5	9
$\phi_2$ (mm)	12	10	12	10	12	12	14	12	12	12
$\phi_4$ (mm)	28	14	16	10	18	18	18	12	16	20
$n_2$	2	4	2	3	2	3	3	4	2	4
$n_4$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$M_u$ (kNm)	57.31	111.22	167.71	222.42	279.29	333.50	390.51	445.40	506.81	555.96
Maliyet (birim/m) (en iyi)	5.16	6.85	8.20	9.55	11.60	13.70	15.94	18.17	20.38	22.45
Analiz sayısı	925	50	475	625	1125	100	1125	925	350	900
Maliyet (birim/m) (ortalama)	5.16	6.85	8.23	9.56	11.71	13.87	16.15	18.43	20.68	22.97
Standart Sapma	0.01	0.01	0.04	0.01	0.06	0.10	0.12	0.19	0.26	0.22
FPA										
Moment (kNm)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
h (mm)	350	400	500	500	500	500	500	500	500	500
$b_w$ (mm)	250	250	250	250	250	300	300	450	400	450
$\phi_1$ (mm)	14	16	16	28	26	22	26	20	24	26
$\phi_3$ (mm)	24	18	28	16	14	10	20	22	14	14
$n_1$	2	3	4	2	3	5	4	8	6	6
$n_3$	0	0	0	0	2	3	2	0	5	5
$\phi_2$ (mm)	12	10	12	10	12	14	12	12	10	10
$\phi_4$ (mm)	20	18	26	18	14	30	24	28	22	24
$n_2$	2	4	2	3	2	2	4	4	7	6
$n_4$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$M_u$ (kNm)	57.31	111.22	167.71	222.42	279.29	334.02	389.55	445.09	500.11	557.23
Maliyet (birim/m) (en iyi)	5.16	6.85	8.20	9.55	11.60	13.59	15.95	18.21	20.52	22.74
Analiz sayısı	675	1225	1950	1450	450	1575	1400	1150	2025	2225
Maliyet (birim/m) (ortalama)	5.30	6.87	8.25	9.56	11.78	13.95	16.30	18.60	20.84	23.07
Standart Sapma	0.13	0.02	0.05	0.01	0.11	0.15	0.19	0.22	0.23	0.21



**Çıkar Çatışması:** Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

**Hakem Değerlendirmesi:** Dış bağımsız.

**Peer-review:** Externally peer-reviewed.

**Declaration of Interests:** The authors declare that they have no competing interest.

### Kaynaklar

ACI-318. (2005). *Building code requirements for structural concrete and commentary*, metric version, American Concrete Institute.

Akın, A., & Saka, M.P. (2010), Optimum Detailed Design of Reinforced Concrete Continuous Beams using the Harmony Search Algorithm, In *The Tenth International Conference on Computational Structures Technology*, Paper 131, Stirlingshire, UK.

Bekdaş, G., & Nigdeli, S. M. (2013). Optimization of T-shaped betonarme flexural members for different compressive strengths of concrete. *International Journal of Mechanics*, 7, 109-119.

Bekdaş, G., & Nigdeli, S. M. (2018). Robustness of Metaheuristic Algorithms in Optimum Design of Reinforced Concrete Beams (pp. 158-160).

*International Conference on Bioinspired Optimization Methods and their Applications (BIOMA 2018)*.

Coello, C. C., Hernández, F. S., & Farrera, F. A. (1997). Optimal design of reinforced concrete beams using genetic algorithms. *Expert systems with Applications*, 12(1), 101-108. [\[Crossref\]](#)

EN (Veranst.): *EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures*. Brussels: CEN, 2005.

Fedghouche, F., & Tiliouine, B. (2012). Minimum cost design of reinforced concrete T-beams at ultimate loads using Eurocode2. *Engineering Structures*, 42, 43-50. [\[Crossref\]](#)

Govindaraj, V., & Ramasamy, J. V. (2005). Optimum detailed design of reinforced concrete continuous beams using genetic algorithms. *Computers & Structures*, 84(1-2), 34-48. [\[Crossref\]](#)

Kayabekir, A. E., Bekdaş, G., & Nigdeli, S. M. (2020). Evaluation of Metaheuristic Algorithm on Optimum Design of T-Beams, 6th International Conference on Harmony Search, Soft Computing and Applications (ICHSA 2020), 16-17 July 2020, Istanbul, Turkey. [\[Crossref\]](#)

Rafiq, M. Y., & Southcombe, C. (1998). Genetic algorithms in optimal design and detailing of reinforced concrete biaxial columns supported by a declarative approach for capacity checking. *Computers & Structures*, 69(4), 443-457. [\[Crossref\]](#)

# **BÖLÜM 4**

## **BETONARME KOLONLARIN**

### **OPTİMUM TASARIMI**

# Betonarme Kolonların Optimum Tasarımı

## *Optimum Design of Reinforced Concrete Columns*

### BÖLÜM HAKKINDA

Bu bölümde eksenel yük, kesme kuvveti ve iki eksenli eğilme momenti etkisi altında bulunan betonarme kolonların optimum tasarımı sunulmuştur. Problemin tasarım değişkenleri olan kesit boyutları, boyuna donatı miktarı ve etriye çap ve aralığının belirtilen kısıtlar altında optimum tasarımı farklı değerlerdeki iki eksenli eğilme momentleri için verilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Betonarme, kolonlar, eksenel yük, iki eksenli eğilme momenti

### ABOUT the CHAPTER

In this section, optimum design of reinforced concrete columns under the effect of axial load, shear force and biaxial bending moment is presented. The optimum design of the cross-section dimensions, the amount of longitudinal reinforcement, and the diameter and spacing of the stirrups, which are the design variables of the problem, under the specified constraints are given for biaxial bending moments at different values.

**Keywords:** Reinforced concrete, columns, axial load, biaxial bending moment

## Giriş

Yapıların kolonları en önemli kısımdır ve kolonların tasarımında en fazla güvenlik sağlanmalıdır. Yapılarda tüm düşey yükler kolonlar tarafından taşınır. Düşey yüklerin büyük bir kısmı betonarme elemanların kendi ağırlığıdır ve kolonların üzerindeki katlardaki tüm yükler, döşemeler aracılığıyla kirişlere ve kirişlerden de kolonlara eksenel kuvvetler olarak yönlendirilir. Eksenel kuvvetler büyük olduğundan, eğilme momentleri genellikle kesitlerdeki gerilmelerin yönünü değiştirmede etkili değildir. Bu nedenle betonarme kolonlar basınç kontrollü elemanlardır ve betondan önce donatının akması sağlanamadığından ve kolonlar için betonun ezilmesi kabul edilmediğinden tasarımda bu elemanlara ilişkin kurallar dikkate alınır. Sünekliği sağlamak için tasarım kodlarındaki genel kurallar aşağıdaki gibidir:

- Eksenel kuvvet sınırlaması
- Kritik bölümlerde sıklaştırılmış spiral donatı veya etriye kullanın

Ayrıca eksenel kuvvetlerin büyük olması ve dinamik kuvvetler altında yatay sehim oluşması nedeniyle kolonlar için ikinci dereceden etkilerin dikkate alınması gerekmektedir.

Bu bölümde, geliştirilmiş armoni arama (HS) yaklaşımı kullanılarak, iki yönde eğilme momentleri ile çift eksenli yüklü kolonun optimum tasarımı sunulmaktadır. Son olarak, narinlik etkilerini dikkate alacak tasarım formülasyonları verilmiş ve farklı algoritmalar için optimum sonuçlar sunulmuştur.

## Çift Eğilmeli Betonarme Kolonların Optimum Tasarımı

Bu bölümde Nigdeli vd. (2015) tarafından geliştirilen HS algoritması kullanan optimum tasarım yöntemi sunulmaktadır. Bu yöntemde klasik HS (Geem vd., 2001) birkaç rastgele arama aşamasıyla birleştirilmiştir. Bu rastgele arama aşamaları aşağıdaki iki nedenden dolayı kullanılır:

- Bir tasarım değişkenleri kümesi bir tasarım kısıtlaması sağlamıyorsa, bir ihlalden sonra doğrudan ihmal edilir ve yeni bir küme oluşturulur. Bu işlem tüm kısıtlar sağlanana kadar devam eder.



- Optimum tasarımda birbiriyle ilişkili birkaç tasarım değişkeni vardır. Ayrıca, eğilme momenti, eksenel kuvvet ve kesme kuvveti gibi çeşitli yük türleri için gerekli güvenlik kriterlerine uyulur. Optimum tasarım, birden fazla yükleme türü için uygun olmalıdır.

Tam yinelemeli bir aşama yürütmek için değişken değerlendirmelerinin sayısı artabilir. Bu durumda, ek rasgele aşamalar aracılığıyla ihlal edilen kısıtlar için kısıtları sağlayacak yeni değerler türetilerek hesaplama süresinden tasarruf edilir. Aksi takdirde bu değerler için olan amaç fonksiyonu cezalandırılacağı için iterasyonlar optimum sonuca yaklaşımı olumsuz etkileyecektir.

Optimum tasarımda, Betonarme kolon, kesme kuvvetine kesme kuvvetine ( $V_x$ ), eksenel kuvvete ( $N_z$ ) ve eğilme momentlerine ( $M_x$  ve  $M_y$ ) maruzdur.

İlk olarak Tablo 1'de verilen tasarım sabitleri, tasarım değişken aralıkları ve armoni belleği boyutu (HMS), armoni belleği dikkate alma oranı (HMCR) ve alan ayarlama oranı (PAR) gibi algoritmaya özgü parametreler tanımlanır. HMS, armoni belleği (HM) matrisinde kullanılan aday tasarım değişkenlerinin sayısıdır. HMCR, seçilen aralıktaki tüm arama alanlarını kullanan global arama yerine yerel aramanın kullanım oranıdır. Yerel aramada, rastgele olarak seçilen mevcut değişken kümesi kullanılarak yeni bir tasarım değişkenleri oluşturulmasıdır ve yeni değişkenin değeri, rasgele seçilen değere komşu olan değerleri olacaktır.

Tasarım ACI 318 yönetmeliği ile yapılmıştır. Betonun elastisite modülünün ( $E_c$ ) formülasyonu denklem (1) ile verilmiştir:

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad (1)$$

Daha sonra, bir başlangıç HM matrisi oluşturulur ve aday tasarım değişkenleri (i. tasarım değişkeni için  $x_i$ ) denklem 2'ye göre seçilir. 0 ile 1 arasında rastgele bir sayı (rand(0,1)) ile ilgili tasarım değişkenlerinin minimum ( $x_{i,min}$ ) ve maksimum ( $x_{i,max}$ ) sınırlarını kullanılmıştır:

$$x_i = x_{i,min} + (x_{i,max} - x_{i,min}) \text{rand}(0,1) \quad (2)$$

Tablo 1. Tasarım Sabitleri

Tanım	Sembol
İki eksende eğilme moment	$M_{dx}$ ve $M_{dy}$
Kesme kuvveti	$V_d$
Eksenel kuvvet	$N_d$
Kolon boyu	$l$
Beton basınç ezilmesi deformasyon değeri	$\epsilon_c$
Maksimum agrega çapı	$D_{max}$
Çelik akma dayanımı	$f_y$
Beton basınç dayanımı	$f'_c$
Çelik elastisite modülü	$E_s$
Çelik özgül ağırlığı	$\gamma_s$
Beton özgül ağırlığı	$\gamma_c$
Beton birim maliyeti, m3	$C_c$
Çelik birim maliyeti, ton	$C_s$

Denklem (3), HM matrisi içindeki bir set tasarım değişkenlerini göstermektedir. İlk iki tasarım değişkeni, enine kesitin boyutuyla ilgilidir, n boyuna donatı sayısını ve  $x_3-x_{n+2}$  boyuna donatı boyutlarının aday değerlerini ifade eder. Kesme donatısı boyutu  $x_{n+3}$  ve aralığı  $x_{n+4}$  ile tanımlanmıştır:

$$X = \begin{bmatrix} x_1: \text{kolon kesit genişliği (b)} \\ x_2: \text{kolon kesit yüksekliği (h)} \\ x_3 - x_{n+2}: \text{boyuna donatı çapı} \\ x_{n+3}: \text{etirye çapı} \\ x_{n+4}: \text{etirye arası mesafe} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Aday çözümlerin üretilmesinde öncelikle boyut tasarım değişkenleri olan  $x_1$  ve  $x_2$  (b ve h) atanır. Daha sonra  $g_1(x)$  ve  $g_2(x)$  gibi iki tasarım kısıtı kontrol edilir çünkü bu iki kısıt donatı ile ilgili değildir. İlk iki kısıtlama sünek davranışla ilgilidir ve kesme kuvveti ve eksenel kuvvet kapasiteleri sınıridir. Tüm tasarım kısıtlamaları Tablo 2'de verilmiştir.

Boyut tasarım değişkenlerinin üretimi, ilk iki kısıtlama sağlanana kadar devam eder. Daha sonra boyuna donatı sayısı, 2 ile izin verilen maksimum donatı sayısı arasında rastgele bir sayı olarak tanımlanır. İzin verilen maksimum donatı sayısı üçüncü kısıtlamaya göre hesaplanır. Bu kısıtlama, boyuna donatılar arasındaki net mesafe ( $a_{\phi}$ ) sınırlamasını tanımlar. Yönü değişen dinamik yüklerin (titreşim, rüzgar, deprem vb.) mevcut olması ve hareketli yüklerin elverişsiz yüklenmesi nedeniyle genellikle simetrik bir donatı tasarımı önerilmektedir.

Seçilen donatı sayısına göre boyuna donatı aday değerleri atanır ve bu değerler piyasada bulunan sabit donatı boyutlarına yuvarlanır. Boyuna donatı seçiminden sonra, aderansın sağlanması için çubuklar arasındaki minimum net mesafe ile ilgili dördüncü kısıt kontrol edilir.  $g_4$ 'te  $\phi$ , aday donatıların maksimum boyutu olarak alınır ve  $D_{max}$ , betonda kullanılan maksimum agrega boyutudur. Boyuna donatı, iki sıra halinde de yerleştirilebilir.

Donatı atamasında ilk olarak çubukların maksimum eğilme momenti değerine sahip doğrultuda rasgele dağılımı yapılır. Daha sonra, kısıtlamanın rasgele sağlanması için ek donatılara ihtiyaç duyulur. Yerleştirme koşullarını sağlayan kısıtlara ek olarak, sırasıyla  $g_5$  ve  $g_6$  olarak verilen minimum ( $A_{smin}$ ) ve maksimum ( $A_{smax}$ ) donatı alanları da kontrol edilmelidir. Boyuna donatıların atanması, kısıtlamalar ( $g_3-g_6$ ) sağlanana kadar yinelemeli olarak gerçekleştirilir.

Daha sonra eğilme momenti kapasitesi hesaplanır ve  $g_7$  kısıtına göre gerekli eğilme momenti ile karşılaştırılır. Analizlerde kolonun efektif derinliği (d), rasgele atanan boyuna donatıların maksimum boyutu ve  $g_8$  olarak tanımlanan beton örtüsü ( $c_c$ ) dikkate alınarak alınır. Analiz aşamasında, eksenel kuvvetler ve iki yönde eğilme momenti için tarafsız eksen mesafesini (c) bulmak için yinelemeli bir analiz yapılır. c bilindikten sonra, tam eksenel kuvvet ve eğilme momenti kapasiteleri bulunur ve tasarım yükleri ile karşılaştırılır (kısıtlar;  $g_7$  ve  $g_9$ ). Moment ve eğilme momenti koşulları sağlanmazsa, tasarımın optimum maliyeti  $10^6$  para birimi gibi cezalı bir değerle belirlenir. Eğer bunlar sağlanmışsa, kesme donatıları rastgele seçilir ve kesme kuvveti kapasitesi ( $g_{10}$ ), minimum kesme donatı alanı ( $g_{11}$ ) ve minimum kesme donatı aralığı ( $g_{12}$ ) kontrol edilir.  $V_s$ , kısıt denklemlerinde kesme donatısının sağladığı kesme kuvveti kapasitesidir.

Tablo 2. Tasarım Kısıtları

Tanımlama	Kısıt
Maksimum kesme kuvveti ( $V_{nmax}$ )	$g_1: V_d \leq V_{nmax} = \text{minimum}\{5.5bh; \}$
Maksimum eksenel kuvvet ( $N_{max}$ )	$g_2: N_d \leq N_{max} =$
Maksimum donatı aralığı, $a_{\phi max}$	$g_3: a_{\phi} \leq a_{\phi max} = 150 \text{ mm}$
Minimum donatı aralığı, $a_{\phi min}$	$g_4: a_{\phi} \geq a_{\phi min} = \text{maksimum}\{1.5\phi; 40 \text{ mm}; (4/3)D_{max}\}$
Minimum donatı alanı, $A_{smin}$	$g_5: A_s \geq A_{smin} = 0.01bh$
Maksimum donatı alanı, $A_{smax}$	$g_6: A_s \leq A_{smax} = 0.06bh$
Kesit eğilme kapasitesi, $M_{dx}$ and $M_{dy}$	$g_7: M_{dx} \geq M_{ux}$ and $M_{dy} \geq M_{uy}$
Net beton örtüsü, $c_c$	$g_8: c_c \geq 30 \text{ mm}$
Eksenel kuvvet kapasitesi, $N_d$	$g_9: N_d \geq N_u$
Kesme kuvveti kapasitesi, $V_d$	$g_{10}: V_d \geq V_u$
Minimum etriye donatısı alanı, $A_{vmin}$	$g_{11}: A_v \geq A_{vmin} = (bs/3fy)$
Maksimum etriye donatısı aralığı, $s_{max}$	$g_{12}: s \geq s_{max} = d/2 \text{ veya } d/4 \text{ eğer}$

Tüm tasarım değişkenlerine ACI-318'e göre tanımlanan tüm kısıtları sağlayan değerler atandıktan sonra, amaç fonksiyonu  $f(X)$  hesaplanır. Denklem (4) ile hesaplanan bu değer kolonun toplam malzeme maliyetidir ve  $u_{st}$ , kesme donatısının uzunluğunu göstermektedir.

$$f(X) = (bh - \sum A_s)IC_c + (\sum A_s + \frac{A_v}{s}u_{st})\gamma_s C_s \quad (4)$$

İlk armoni bellek matrisi oluşturulduktan sonra bu matris HS algoritmasının kurallarına göre değiştirilir. Yinelemeli durumlar için aynı metodoloji kullanılır. Global optimizasyonda, tasarım değişkenlerinin oluşturulması denklem (2)ye benzer şekilde yapılır. Optimizasyon başlangıcında 0 ile 1 arasında seçilen armoni belleği dikkate alma oranı (HMCR) olarak tanımlanan olasılık, 0 ile 1 arasında rastgele bir sayıdan küçükse, HM matrisinin modifikasyonu yerel arama kurallarına göre yapılır.

Betonarme elemanlarının optimum tasarımında, boyutlar sabit boyutlarla sağlanabileceğinden ayrık tasarım değişkenlerinin seçimi önerilmektedir. Boyutlar için önerilen değer 50 mm farktır ve sabit pazar büyüklükleri sağlamak için takviyelerin boyutları 2 mm farklarla rasgele seçilmiştir. Ayrıca, rastgele olarak atamalar mevcut bir vektör etrafında yapılırsa tasarım kısıtlamaları sağlanmayabilir. Algoritmadaki değişiklik olarak tasarım değişkenlerinin aralıkları en iyi tasarıma göre güncellenmekte ve klasik PAR değeri kullanılmamaktadır. En iyi değer, aralığın minimum veya maksimum sınırı olarak atanır. Her iki seçeneğin de %50 olasılığı olabilir ve bu olasılık PAR olarak kabul edilebilir. Tüm metasezgisel algoritmalarda olduğu gibi, yeni oluşturulan armoni vektörünün maliyeti mevcut olandan daha düşüğe, en kötüsü yeni oluşturulan vektör ile değiştirilir. Yeni bir vektör oluşturma yinelemesi, maksimum yineleme sayısı için devam eder.

Optimizasyon durumları Tablo 3'te verilmiştir. Tüm durumlarda üç farklı eksenel kuvvet incelenmiştir ve değerler 1000 kN, 1500 kN ve 2000 kN'dur. Her durumda kesme kuvveti değeri 100 kN olarak alınmıştır. Tasarım sabitlerinin sayısal değerleri ve tasarım değişkenlerinin aralıkları Tablo 4'te verilmiştir. Malzemelerin maliyeti yapının bulunduğu bölgeye göre değişmektedir. Bu nedenle 1 ton çelik maliyeti birim  $m^3$  betonun 10 katı olarak alınmıştır. Farklı eksenel kuvvetler için optimum sonuçlar Tablo 5-7'de sunulmaktadır.

1000 kN eksenel kuvvet için Durum 1'de ek gövde donatılarına gerek yoktur. Eğilme momenti değerleri arttığında gövde donatılarına ihtiyaç duyulur ve gövde donatıları genellikle 2-10 numaralı durumlar için minimum çap boyutlarıyla atanmıştır. 11-12 durumları için, her iki yöndeki eğilme momenti büyüktür ve minimum gövde donatısı yeterli değildir.

Tablo 3. Çift Eksenli Eğilme Momenti Yük Durumları (Nigdeli vd., 2015)

Durum	My (kNm)	Mx (kNm)
1	100	100
2	200	100
3	300	100
4	400	100
5	500	100
6	600	100
7	700	100
8	800	100
9	900	100
10	1000	100
11	500	500
12	800	800

1500 kN eksenel kuvvet için verilen optimum sonuçlar için, optimum kesit boyutlarında önemli bir artış açıkça görülmektedir. Beton çeliğe göre ucuz bir malzeme olduğundan, eksenel kuvvetlerden kaynaklanan ek basınç gerilmeleri beton kesitler tarafından desteklenir. Buna ek olarak eksenel kuvvetin ve basma gerilmelerinin artması çekme gerilmelerinin azalmasında çok az bir avantaja sahiptir ve optimum maliyetler 2, 7 ve 12 durumları için 1000 kN eksenel kuvvet durumlarının maliyetine yakındır. 2000 kN eksenel için kuvvet durumlarında, 1500 kN eksenel kuvvete sahip durumlara kıyasla 4-12 numaralı durumlar için de optimum toplam maliyet değerlerinde önemli bir azalma görülmektedir.

Tablo 4. Tasarım Sabitleri ve Tasarım Değişkenleri Limitleri (Nigdeli vd., 2015)

Sembol	Birim	Değer
b	mm	300-600
h	mm	300-600
l	mm	3000
$\epsilon_c$	-	0.003
$\phi$	mm	16-30
$\phi_v$	mm	8-14
$D_{max}$	mm	16
$f_y$	MPa	420
	MPa	25
$E_s$	MPa	200000
$\gamma_s$	t/m <sup>3</sup>	7.86
$\gamma_c$	t/m <sup>3</sup>	2.5
$C_c$	unit/t	40
$C_s$	unit/ m <sup>3</sup>	400

Tablo 5. 1000 kN Eksenel Kuvvet Altında Çift Eksenli Eğilmeli Kolon Optimum Sonuçları (Nigdeli vd., 2015)

Durum No	b (mm)	h (mm)	Her yüzdeki donatı (kritik eksen)	Her yüzdeki gövde donatısı (diğer doğrultu)	Etriye çap/ aralık (mm)	Toplam maliyet
1	350	350	1Φ18+1Φ16+1Φ20	-	Φ8/150	32.57
2	300	500	1Φ22+1Φ18	2Φ16	Φ8/220	40.85
3	300	600	1Φ18+1Φ16+1Φ22	1Φ16	Φ8/270	44.32
4	300	600	2Φ24+ 1Φ16+1Φ20	1Φ16	Φ8/270	55.20
5	400	600	1Φ16+ 2Φ18+1Φ22+1Φ20	1Φ18+1Φ16	Φ8/270	67.23
6	350	600	5Φ18+2Φ20+1Φ30	1Φ16	Φ8/270	81.11
7	500	600	3Φ20+1Φ16+1Φ18+3Φ22	1Φ16	Φ8/240	91.54
8	550	550	4Φ22+1Φ26+1Φ28+1Φ16+1Φ18	1Φ16+1Φ18	Φ8/210	107.81
9	500	600	5Φ22+1Φ24+2Φ18+1Φ20+3Φ16	1Φ16+1Φ18	Φ8/240	119.39
10	500	600	1Φ20+3Φ24+1Φ22+2Φ28+1Φ18+1Φ30	3Φ18+1Φ16	Φ8/240	137.53
11	550	600	1Φ20+1Φ30+1Φ18+1Φ26	1Φ22+1Φ18	Φ8/210	90.15
12	600	600	1Φ30+ 1Φ18+1Φ16+4Φ26+1Φ20	3Φ22+1Φ30	Φ8/200	150.34

Tablo 6. 1500 kN Eksenel Kuvvet Altında Çift Eksenli Eğilmeli Kolon Optimum Sonuçları (Nigdeli vd., 2015)

Durum No	b (mm)	h (mm)	Her yüzdeki donatı (kritik eksen)	Her yüzdeki gövde donatısı (diğer doğrultu)	Etriye çap/ aralık (mm)	Toplam maliyet
1	450	300	3Φ18+1Φ16	-	Φ8/120	38.43
2	350	450	3Φ18+1Φ16	-	Φ8/190	40.66
3	400	500	3Φ18+ 1Φ16	1Φ16	Φ8/220	49.69
4	300	600	1Φ24+ 2Φ22	4Φ16	Φ8/270	62.58
5	500	550	1Φ22+ 1Φ24+1Φ30+1Φ20	1Φ18	Φ8/240	76.57
6	500	600	2Φ24+1Φ22+2Φ18	3Φ16	Φ8/240	85.16
7	550	600	2Φ16+3Φ22+1Φ20	2Φ16+1Φ18	Φ8/210	91.50
8	500	600	2Φ26+2Φ28+1Φ22+1Φ16+1Φ18	3Φ16	Φ8/240	110.03
9	550	600	10Φ18+6Φ16	2Φ16	Φ8/210	122.04
10	550	600	3Φ22+2Φ16+2Φ20+2Φ18+2Φ24+1Φ26+1Φ30	2Φ16	Φ8/210	141.99
11	600	600	1Φ20+ 1Φ22+1Φ26	1Φ24+1Φ28	Φ8/200	91.60
12	600	600	3Φ22+ 2Φ20+3Φ26+1Φ24+1Φ18	2Φ20+1Φ24+1Φ16	Φ8/200	148.53

Tablo 7. 2000 kN Eksenel Kuvvet Altında Çift Eksenli Eğilmeli Kolon Optimum Sonuçları (Nigdeli vd., 2015)

Durum No	b (mm)	h (mm)	Her yüzdeki donatı (kritik eksen)	Her yüzdeki gövde donatısı (diğer doğrultu)	Etriye çap/ aralık (mm)	Toplam maliyet
1	400	400	2Φ20	1Φ18	Φ8/170	39.69
2	350	500	1Φ22+1Φ16	2Φ16	Φ8/220	43.07
3	400	500	3Φ18+ 1Φ16	1Φ16	Φ8/220	49.69
4	350	600	1Φ22+ 1Φ28+1Φ16	1Φ16	Φ8/270	54.84
5	450	600	3Φ18+ 1Φ22+1Φ16	2Φ18	Φ8/260	70.90
6	350	600	3Φ20+2Φ24+1Φ22+ 1Φ18	1Φ18+1Φ16	Φ8/270	83.51
7	500	600	1Φ28+3Φ20+1Φ26+ 1Φ16	2Φ18	Φ8/240	92.65
8	500	600	8Φ18+1Φ16+1Φ20	1Φ16	Φ8/240	103.48
9	450	600	1Φ30+4Φ20+1Φ22+ 2Φ26+1Φ24	2Φ16	Φ8/260	119.47
10	550	600	2Φ26+1Φ28+1Φ24+ 2Φ22+1Φ20+2Φ18	3Φ16+1Φ18	Φ8/210	129.82
11	550	600	1Φ28+ 1Φ18+1Φ30+1Φ26	1Φ20	Φ8/210	89.80
12	600	600	1Φ20+ 5Φ18+2Φ28+2Φ24	2Φ28+ 1Φ26+1Φ18	Φ8/200	162.86

Bu durumların sonuçlarından görüldüğü gibi, donatı çubukları arasında maksimum net mesafeyi sağlamak için gerekli donatılar sadece kritik yönde atanır ve diğer yön için küçük çaplı donatılar yerleştirilir. İlk durumlarda çift eksenli eğilmenin etkisi net olarak görülmediği için yükün daha yüksek olduğu son iki durum sunulmuştur. Bu durumlarda, eğilme momenti iki yön için eşittir ve donatılar her iki yönde birbirine yakındır. Yöntem, betonarme elemanların davranışına uyacak şekilde otomatik olarak en düşük maliyetli sonuçları sunmaktadır ve bu gereksinimleri (gövde donatısı, kesit boyutu arttırm, vb.) hangi yükler altında gerekli olup olmadığını kodlanmış algoritma ile bize ulaştırmaktadır. Bu du-

rum, betonarme kolonlarının optimizasyonunun önemini kanıtlamaktadır.

### Kaynaklar

ACI-318. (2005). *Building code requirements for structural concrete and commentary*, metric version, American Concrete Institute.

Geem, Z. W., Kim, J. H., & Loganathan, G. V. (2001). A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *Simulation*, 76, 60-68. [\[Crossref\]](#)

Nigdeli, S. M., Bekdaş, G., Kim, S., & Geem, Z. W. (2015). A novel harmony search based optimization of reinforced concrete biaxial loaded columns. *Structural Engineering and Mechanics*, 54(6), 1097-1109. [\[Crossref\]](#)

**BÖLÜM 5**  
**BETONARME ÇERÇEVELERİN**  
**OPTİMİZASYONU**



# Betonarme Çerçevelerin Optimizasyonu

## Optimization of Reinforced Concrete Frames

### BÖLÜM HAKKINDA

Kolon ve kirişlerinin birleşiminden oluşan betonarme çerçevelerin optimum tasarımı hem kiriş hem de kolon optimizasyonu içermektedir. Bu bölümde dinamik analizi de içinde bulunduran bir optimizasyon yöntemi açıklanmıştır. Zaman tanım alanı analizleri detaylı bir şekilde yapıp, optimum tasarımda dikkate alınmaktadır. Ayrıca kolonlarda narinlik etkisinin de dikkate alındığı yöntem açıklanmış ve iki örnek ile sonuçlar sunulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Betonarme, çerçeve yapılar, zaman tanım alanında analiz

### ABOUT the CHAPTER

Optimum design of reinforced concrete frames consisting of a combination of columns and beams includes both beam and column optimization. In this section, an optimization method including dynamic analysis is explained. Time history analysis is done in detail and taken into account in optimum design. In addition, the method in which the slenderness effect is taken into account in the columns is explained and the results are presented with two examples.

**Keywords:** Reinforced concrete, frame structures, analysis in time history

## Giriş

Çerçeve sistemler kolon ve kiriş elemanların birleşimi sonucunda oluşan sistemlerdir ve çerçeveleri oluşturan betonarme elemanların optimum tasarımları önceki bölümlerde sunulmuştur. Metodolojileri birleştirerek, tam bir yapıyı optimize etmek mümkündür, ancak farklı kesit boyutlarının seçilmesiyle, statik olarak belirsiz yapıların rijitlik değişiklikleri iç kuvvetlerin değerlerini etkiler. Bu nedenle iç kuvvetlerin belirlenmesinden önce boyut tasarım değişkenleri seçilmelidir.

Bu bölümde, değiştirilmiş bir armoni arama algoritması (Geem vd., 2001) kullanılarak betonarme çerçeveler için optimum bir tasarım metodolojisi (Bekdaş & Nigdeli, 2017; Nigdeli & Bekdaş, 2016) sunulmaktadır. Metodoloji, deprem etkisi altında zaman tanım alanı analizini dikkate alınmıştır.

## Yöntem

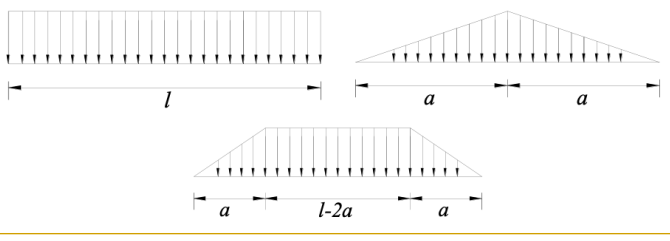
Metot, çerçeve yapılarının optimizasyonu çeşitli sayıda kiriş ve kolonun optimizasyonunu içerdiğinden, ek rastgele arama kullanan değiştirilmiş bir armoni arama (HS) algoritmasını kullanır. Sunulan metodolojinin üstünlüğü olarak, depremlerden kaynaklanan dinamik kuvvetler, seçilen üç deprem kaydının zaman tanım alanı analizleri yoluyla ele alınmaktadır. Optimizasyon metodolojisinin tüm yinelemelerinde, tüm zaman geçmiş analizleri, seçilen aday kesit boyutlarına göre yeniden yapılır. Zaman geçmişi analizlerinden sonra deprem etkileri tüm noktalara dağıtılır. Ayrıca, deprem uyarıları altında çerçevelerin düşüm noktalarının açılmal yer değiştirmesi de dikkate alınmıştır.

Çerçevelerin mükemmel bir optimum tasarımı için bir diğer önemli faktör, yük kombinasyonlarının tüm olumsuz koşullarını ve açıklıklardaki hareketli yüklerin varlığını dikkate almaktır. Böylece en kritik durum için optimum bir çözüm bulunabilir.

Bazı metodolojilerde kiriş ve kolon elemanları gruplandırılmaz ve donatı kombinasyonları ve kesitleri için şablonlar verilir. Sunulan metodolojide, donatı tasarım özellikleri de ayrı tasarım değişkenleri olarak optimize edilmiştir.



Şekil 1. Eşdeğer, Üçgen ve Trapez Yayılı Yük Durumları



Yapısal durum sınırları ile ilgili tüm hesaplamalar, kurallar ve teori tasarım kısıtlamaları olarak formüle edilerek ACI-318 gereksinimlerine göre kontrol edilir. Metodoloji, Matlab [2018] kullanılarak kodlanmıştır. Matlab Simulink'te çerçevenin hareket denklemleri modellenerek zaman tanım alanı analizleri yapılır.

Öncelikle yapısal modelin tüm özellikleri, malzeme özellikleri, yükler, deprem verileri, tasarım değişken aralıkları ve algoritma parametreleri (armoni belleği boyutu, armoni belleği dikkate alma oranı ve alan ayarlama oranı) gibi tasarım sabitleri tanımlanır. Bu özellikler, açıklık sayısı, kat sayısı, düğüm noktası sayısı, düğüm noktası sınır koşulları, eleman koordinatları ve düğüm noktası yerlerini içerir. Enine kesit boyutları (genişlik;  $b_w$  ve yükseklik;  $h$ ) ve donatı boyutları belirlenir. Yükleme koşulları, kirişlerin öz ağırlıkları hariç hareketli (L) ve sabit (D) yayılı yükler olarak tanımlanır. Bu yükler, döşemelerden yüklerin aktarılmasında kullanılan varsayıma göre Şekil 1'de görüldüğü gibi eşit yayılı, üçgen yayılı veya yamuk yayılı olarak girilebilir. Diğer tasarım sabitleri arasında beton örtüsü ( $c_c$ ), maksimum agrega çapı ( $D_{max}$ ), betonun basınç dayanımı ( $f_c$ ), çeliğin akma dayanımı ( $f_y$ ), çeliğin elastisite modülü ( $E_s$ ) ve çeliğin özgül ağırlığı ( $\gamma_s$ ), betonun özgül ağırlığı ( $\gamma_c$ ),  $m^3$  başına beton maliyeti ( $C_c$ ), ton başına çeliğin maliyeti ( $C_s$ ) tanımlanır.

Betonun elastisite modülü ( $E_c$ ) betonun basınç dayanımına bağlı olarak denklem (1) ile tanımlanır:

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c} \quad (1)$$

Sabit parametrelerin tanımlanmasından sonra, aday çözüm kümelerini içeren bir başlangıç armoni matrisi tanımlanır. Başlangıç değerleri için, tasarım değişkenlerinin değerleri aralık içinde rastgele seçilir. Bir dizi aday çözüm bir armoni vektörü üretir ve bu vektörlerin sayısı armoni belleği boyutuna eşittir. Tasarım değişkenleri, özellikle birkaç rastgeleleştirme yinelenmesi tamamlandıktan sonra atanır. Bu yinelenmelerde, çeşitli tasarım kısıtlamaları kontrol edilir ve metodolojinin kısıtları sağlayan sonuçları kaydedilir. Bu aşamalar başlıca; tasarım kodu gerekliliklerini ve gerekli alana en yakın alana sahip donatı tasarımını destekleyen kesit boyutlarının rastgele olarak atanmasıdır.

İlk olarak, kirişlerin kesit boyutları denklemler (2) ve (3) kontrol edilerek rasgele atanır. İşlem, bu kısıtlamalar sağlanana kadar tekrarlanır.

$$d < \frac{l}{4} \quad (2)$$

$$b_w \geq 0.3h \quad (3)$$

Denklem (2), kirişin derinliği ( $d$ ), kirişin ( $l$ ) net uzunluğunun  $1/4$ 'ü ile sınırlandırılmasıdır. Donatıların boyutları bilinmediğinden, kiriş derinliği kiriş yüksekliğinden 50 mm daha az alınmıştır. Daha

sonraki hesaplamalarda, kapasite kontrolleri için atanan donatı boyutlarına göre  $d$ 'nin tam değeri hesaplanır ve bu koşul da tekrar kontrol edilir.

Daha sonra kolonların kesit boyutları için denklem (4) sağlanır. Denklem (4) içindeki  $b$  değeri, bu kısıtlama için kontrol edilen bir kirişin destek kolonunun genişliğidir ve kullanılacak  $d$  ve  $b_w$  boyutları da o kiriş içindir.

$$b_w \leq b + \frac{3}{2}d \quad (4)$$

Kiriş ve kolonların tüm boyutları tanımlandıktan sonra iç kuvvetlerin sağlanması için statik ve dinamik analizler yapılabilir. Statik olarak belirsiz çerçevenin statik analizi rijitlik yöntemi kullanılarak, depremler için dinamik analiz ise zaman tanım alanı analizleri ile yapılır. Bu analizler için sistemin kütle ve rijitlik matrislerinin oluşturulması gerekmektedir. Kütle ( $M$ ) ve rijitlik ( $K$ ) matrisleri, eleman kütle ve rijitlik matrislerini birleştirerek ve sıfır olan serbestlikleri ortadan kaldırarak oluşturulur. Bir yapısal elemanın kütle ( $M_e$ ) ve rijitlik ( $K_e$ ) matrisleri sırasıyla denklemler (5) ve (6)'de verilmiştir. Bu matrislerde  $g$ ,  $E$ ,  $I$ ,  $A$  ve  $n$  sırasıyla yerçekimi, elastisite modülü ( $E_c$  olarak alınır), uzunluk, atalet momenti, elemanın kesit alanı ve hareketli yük katılım faktörüdür.

$$K_e = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & 0 & -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} & 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} & 0 & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} & 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -M\{1\}\ddot{x}_g(t) \quad (6)$$

Yer ivmesine ( $\ddot{x}_g(t)$ ) maruz kalan yapıların hareket denklemleri (Denklem (7)) dinamik analizlerde kullanılmaktadır:

$$\phi_i^T M \Phi \ddot{Y}(t) + \phi_i^T C \Phi \dot{Y}(t) + \phi_i^T K \Phi Y(t) = -\phi_i^T M \{1\} \ddot{x}_g(t) \quad (7)$$

$x(t)$ , yer değiştirmeleri ve dönmeleri içeren serbestlik vektörüdür.  $C$ , sönümlenme matrisidir ve tüm modlar için doğal bir sönüm oranı (betonarme yapıları için %5) varsayılarak hesaplanır.  $\{1\}$  birlerden oluşan birim vektördür ve bu vektörün boyutu yapının serbestlik derecesi sayısına eşittir.  $x(t)$ 'nin zamana göre birinci ve ikinci türevleri sırasıyla  $\dot{x}(t)$  ve  $\ddot{x}(t)$  ile gösterilir. Hareket denklemi, zaman alanı analizlerini gerçekleştirmek için Matlab Simulink ile modellenmiştir. Birleşik hareket denklemleri titreşim modlarına ayrılarak tüm modlar için sonuçlar elde edilir ve ardından tüm titreşim modlarının sonuçları birleştirilir. Mod-şekli matrisi ( $\Phi$ ) genelleştirilmiş koordinatları ( $Y(t)$ ) geometrik koordinatlara ( $x(t)$ ) dönüştürmek için kullanılabilir. Bu fikri kullanarak ve  $i$ . mod şeklindeki vektörün devriğini önceden çarparak;  $\phi_i^T$  hareket denklemi denklem (8) olarak verilen formu alır.

$$M_i = \phi_i^T M \phi_i \quad (8)$$

Eğer ortogonalite koşulları olarak adlandırılan mod şekillerinin özellikleri (denklemler (9)-(14)) dikkate alınırsa denklem (8), denklem (15) gibi yazılabilir.

$$\phi_n^T M \phi_m = 0 \quad n \neq m \quad (9)$$

$$K_i = \phi_i^T K \phi_i \quad (10)$$

$$\phi_n^T K \phi_m = 0 \quad n \neq m \quad (11)$$

$$C_i = \phi_i^T C \phi_i \quad (12)$$

$$\phi_n^T C \phi_m = 0 \quad n \neq m \quad (13)$$

$$M_i \ddot{Y}(t) + C_i \dot{Y}(t) + K_i Y(t) = -\phi_i^T M \{1\} \ddot{x}_g(t) \quad (14)$$

$$w_i^2 = \frac{K_i}{M_i} \quad (15)$$

$M_i$ ,  $C_i$ ,  $K_i$  ve  $Y_i(t)$  sırasıyla  $i$ . modun genelleştirilmiş kütlelerini, sönümünü, rijitliğini ve yer değiştirmesini temsil eder. Bir titreşim modunun hareket denkleminin daha fazla modifikasyonu için,  $w_i$  ve  $\xi_i$  (denklem (16) ve (17)) ile temsil edilen modun doğal frekansı ve sönüm oranı kullanılır. Denklem (9)'ü  $M_i$ 'ye bölerek ve denklemler (16) ve (17) yerine konulduğunda; denklem (18) elde edilir.

$$2\xi_i w_i = \frac{C_i}{M_i} \quad (16)$$

$$\ddot{Y}_i(t) + 2\xi_i w_i \dot{Y}_i(t) + w_i^2 Y_i(t) = -\phi_i^T M/M_i \{1\} \ddot{x}_g(t) \quad (17)$$

$$U = 1.4D + 1.7L \quad (18)$$

Şekil 2'de verilen blok diyagramda gösterildiği gibi denklem (18), MATLAB Simulink'te [Mathworks (2018)] modellenilebilir. Tüm modlar için analizler yapılır ve sonuçlar geometrik koordinatlara dönüştürülür. Serbestliklerin çözümleri bulunduktan sonra, bina davranış katsayısı [R] değerine bölünmüş serbestlikler, rijitlik matrisi çarpılarak iç kuvvetler hesaplanır. Denklemler olarak verilen yük kombinasyonları (Denklemler (19)-(21)), tüm elemanlar için kullanılır. Bu işlem, en kritik durumu bulmak için tüm hareketli yük dağılımları ve zaman tanım alanı analizinin tüm zaman değerleri kombinasyonları için hesaplanır. U ve E sırasıyla toplam yükü ve deprem yükünü temsil etmektedir.

$$U = 0.75(1.4D + 1.7L) \pm E \quad (19)$$

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad (20)$$

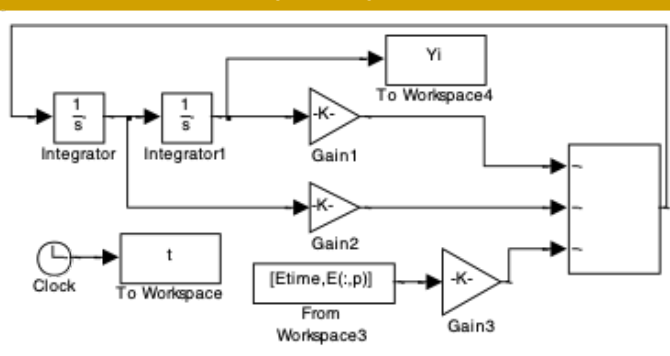
$$V_{nmax} = \min \left\{ \begin{array}{l} 5.5A \\ 0.2f'_c A \end{array} \right\} \quad (21)$$

İç kuvvetlerin hesaplanmasından sonra, sünek bir tasarım sağlamak için tüm kolonlar için maksimum eksenel kuvvet ( $N_{max}$ ) ve maksimum kesme kuvveti ( $V_{nmax}$ ) kontrol edilir.  $V_{nmax}$  ve  $N_{max}$  denklemleri sırasıyla denklemler (22) ve (23) olarak verilmiştir.

$$N_{max} = 0.5f'_c A \quad (22)$$

$$V_{max} = 0.1f'_c A \quad (23)$$

Şekil 2. Simulink Blok Diagramı (Nigdeli & Bektaş, 2016)



Tüm kirişlerin maksimum eksenel kuvvet kapasiteleri denklem (24)'e göre kontrol edilir.

$$\rho_{max} = (0.75)(0.85)\beta_1 \frac{f'_c}{f_y} \left( \frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (24)$$

Bahsedilen sünek davranış koşulları sağlanmazsa, kesit boyutları yeniden atanır ve önceki tüm hesaplamalar tekrarlanır. Daha önce sunulan tüm tasarım kısıtlamalarını sağlayan aday enkesitler bulunduktan sonra, kirişlerin çekme bölümleri için boyuna donatılar rastgele seçilir. Bu durumda kirişin efektif derinliğinin tam değeri hesaplanabilir. Denklem (25)'de verilen maksimum donatı oranı ( $\rho_{max}$ ) aşılsa, boyuna donatılar basınç bölümünde de rastgele dağıtılır. Donatı oranını 0.025'ten az olmalıdır.

$$A_{s,min} \geq \frac{\sqrt{f'_c}}{4f_y} b_w d \quad (25)$$

Denklemlere göre hesaplanan minimum boyuna donatı alanları ( $A_{s, min}$ ). (26) ve (27) de tasarım kısıtlamaları olarak düşünülmelidir. Bu minimum donatı koşulları, kirişin destekler ve açıklıklarındaki hem çekme hem de basınç bölümleri için kontrol edilmelidir. Ayrıca, dinamik iç kuvvetler sismik yükler nedeniyle yön değiştirebileceğinden, desteklerdeki basınç bölümündeki minimum donatılar, çekme bölümlerindeki donatı alanının yarısı kadar olmalıdır.

$$A_{s,min} \geq \frac{1.4}{f_y} b_w d \quad (26)$$

$$a_\phi > \begin{cases} \phi_{average} \\ 25 \text{ mm} \\ \frac{4}{3} D_{max} \end{cases} \quad (27)$$

Donatı çubuklarının konumlandırılması, donatılar arasındaki maksimum net mesafeye ( $a_\phi$ ) göre de kontrol edilir ve koşullar, denklem (28) olarak verilmiştir.  $D_{max}$  ve  $\phi$  betonda kullanılan maksimum agrega çapını ve boyuna donatıların ortalama çapını temsil eder. Tek sıra halinde donatılar uygun değilse, donatıların iki sraya yerleştirilmesi de mümkündür. Konumlandırma, maksimum ve minimum donatı kısıtlamaları karşılanmazsa, donatılar rastgele türetilmeye devam edilir.

$$A_{s-gerekli} \leq A_{s-random} < (1 + r)A_{s-gerekli} \quad (28)$$

Rastgele seçilen donatılar, seçilen kesit için optimum olmayabilir. Birkaç yinleme yaparak en iyi kombinasyon bulunabilir. Birkaç yapısal elemandan oluşan bir çerçeve için, atanmış bir enkesit boyutunun en iyi kombinasyonunu bulmak çok uzun olabilir ve bunu tüm elemanlar için bulma şansı zordur. Bu nedenle rastgele seçilen donatı ölçülerine göre ( $A_{s-random}$ ) bulunan donatı alanı, gerekli donatı alanı ( $A_{s-gerekli}$ ) ile karşılaştırılarak kontrol edilebilir. Bu kısıtlama denklem (29) olarak formüle edilmiştir. Böylece statik ve dinamik yüklerin belirlenmesi dahil tüm hesaplamaların yeniden yapılmasına gerek kalmaz.

$$V_c = \frac{\sqrt{f'_c}}{6} b_w d \quad (29)$$

$r$ , kullanıcı tanımlı bir değerdir. Küçük bir  $r$  değeri girilirse, rastgele alan sabit donatı boyutları ile sağlandığından, süreç fiziksel bir çözümün bulunamayacağı bir aralığa düşebilir. Bu durumda, bu rasgeleleştirme aşamasının birkaç yinlemesinden sonra  $r$ 'nin değeri artırılabilir. Ayrıca, izin verilen maksimum iterasyondan sonra çözüm bulunamazsa, betonarme çerçevesinin maliyeti ola-

rak tanımlanan amaç fonksiyonu çok büyük bir maliyet atanarak cezalandırılır.

Kirişin boyuna donatılarının tasarımı tamamlandıktan sonra etriyeler optimize edilir. Betonun nominal kesme kapasitesi ( $V_c$ ) ve donatılar nominal kesme kapasitesi ( $V_s$ ), denklemler (30) ve (31) olarak sırasıyla sunulmuştur. Süneklik için,  $V_s$  değeri denklem (32)'de tanımlana değeri geçmemelidir. Etriyeler için optimize edilmiş değerler, boyut ve çubuklar arasındaki mesafedir. Tasarım kısıtları olarak, denklem (33) olarak verilen minimum kesme donatı alanı ( $(A_v)_{\min}$ ) ve denklemler (34) ve (35) olarak verilen kesme donatıları arasındaki maksimum boşluk ( $s_{\max}$ ) sağlanmalıdır.

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (30)$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (31)$$

$$V_s \leq 0.66 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (32)$$

$$(A_v)_{\min} = \frac{1}{3} \frac{b_w s}{f_y} \quad (33)$$

$$s_{\max} \leq \frac{d}{2} \quad (34)$$

$$s_{\max} \leq \frac{d}{4} \quad \text{if } V_s \geq 0.33 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (35)$$

Kirişlerin tüm tasarım değişkenlerine tüm tasarım kısıtlarını sağlayan değerler verildikten sonra kirişlerin toplam maliyeti hesaplanır. Daha sonra kolon donatılarının optimum tasarımı ile optimizasyon süreci devam eder.

ACI 318'de sunulan yaklaşık tasarım prosedürü kullanılarak narin kolonlar için narinlik etkisi dikkate alınır. İkinci mertbe analizde sehimlerin nihai yükten hemen önceki durumu temsil etmesi gerektiğinden, elemanların atalet momentleri kiriş ve kolonlar için sırasıyla %65 ve %30 oranında azaltılır. Moment büyütme faktörünün hesaplanmasında ilk faktör burkulmada etkin uzunluk faktörlerinin ( $k$ ) bulunmasıdır.  $k$ 'yi elde etmek için öncelikle kolonların her iki ucunda ( $\Psi_A$  üstte ve  $\Psi_B$  alt ucta) denklem (36) olarak sunulan  $\Psi$  değeri hesaplanır. Daha sonra denklemler (37) - (39) olarak verilen ifadeler yanal yer değiştirmesi engellenmemiş çerçeveler için kullanılır.

$$\Psi_{A,B} = \frac{\sum (\frac{EI}{L})_{kolon}}{\sum (\frac{EI}{L})_{kiriş}} \quad (36)$$

$$\Psi_m = 0.5(\Psi_A + \Psi_B) \quad (37)$$

$$k = \frac{20 - \Psi_m}{20} \sqrt{1 + \Psi_m} \quad \text{eğer } \Psi_m < 2 \quad (38)$$

$$k = 0.9 \sqrt{1 + \Psi_m} \quad \text{eğer } \Psi_m \geq 2 \quad (39)$$

Gerçek moment diyagramının eşdeğer bir moment diyagramına düzeltilmesi için kullanılan düzeltme faktörü ( $C_m$ ) denklem (40) ile hesaplanır. Bu faktör 0,4'ten büyük olmalıdır. Ayrıca mesnetler arasında enine yüklerin olduğu eleman için de 1.0 olarak alınmalıdır.

$$C_m = 0.6 + 0.4 \frac{M_1}{M_2} \quad (40)$$

Kritik burkulma yükü, denklem (41) ile kolonun rijitliği %75 azaltılarak hesaplanır ve daha sonra tasarım eğilme momentinin çarpılmasında kullanılan moment büyütme faktörü ( $\delta_s$ ), denklem

(42)'ye göre hesaplanır.  $P_u$ , güvenlik katsayılarla arttırılmış ekselel kuvvettir.

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{(kl)^2} \quad (41)$$

$$\delta_s = \frac{C_m}{1 - \frac{P_u}{0.75 P_c}} \quad (42)$$

Denklem (43) olarak formüle edilen minimum momentten ( $M_{\min}$ ) daha küçük eğilme moment değerine sahip tüm kolonlar için minimum dış merkezliliğe göre hesaplanan minimum değer kullanılır.

$$M_{\min} = P_u (15 + 0.03h) \quad (h \text{ mm olmalıdır}) \quad (43)$$

Donatıların konumu da kolonlar için kontrol edilir. Her iki (üst ve alt) uç kısım için boyuna donatıların rastgele atanmasıyla simetrik bir donatı tasarımı yapılır. Donatı yerleşim koşulları, denklem (44)'te görüldüğü gibi kirişlerden biraz farklıdır.

$$a_\phi > \begin{cases} 1.5\phi_{\text{average}} \\ 40 \text{ mm} \\ \frac{4}{3} D_{\max} \end{cases} \quad (44)$$

Üst ve alt donatılar arasındaki açık mesafe 150 mm'den fazlaysa, ek gövde donatıları rastgele atanır. Donatıların rasgele hale getirilmesi işlemi, minimum ( $\rho_{\min}=0,01$ ) ve maksimum ( $\rho_{\max}=0,06$ ) donatı oranları sağlanana kadar devam eder. Değişirse, kolonların donatılarının atanma süreci iteratif olarak tekrarlanır.

Bölüm 4'te sunulduğu gibi, ekselel kuvvet ve eğilme momenti kapasitelerinin hesaplanmasında tarafsız eksen mesafesi ( $c$ ) olan yinelemeli olarak taranır. Gerekli ekselel kuvvet değerini sağlayan en düşük ekselel kuvvet için  $c$  değeri saklanır. Bu kapasite için eğilme momenti kapasitesi ( $M_k$ ) tanımlanır. Kirişlerin gerekli donatı alanında yapıldığı gibi, denklem (45) sağlanana kadar kolonların donatılarının rastgele tanımlanması tekrarlanır. Gerekli olan, statik ve dinamik analiz için kuvvetler kombinasyonuna göre hesaplanan gerekli minimum kapasitedir.

$$M_{\text{gerekli}} \leq M_k < (1 + r) M_{\text{gerekli}} \quad (45)$$

Kolonların kesme donatıları da kirişlere benzer şekilde tasarlanmıştır. Daha sonra kolonların maliyetleri hesaplanır. Nihai hesaplama olarak, problemin amaç fonksiyonu ( $F$ ) olarak tanımlanan yapının toplam maliyeti hesaplanır. Bir elemanın maliyeti ( $C_e$ ), denklem (46)'ya göre hesaplanır. Hesaplamalarda,  $A_g$ ; enine kesit alanını,  $A_{st}$ ; öngerilmemiş boyuna donatı alanını,  $A_v$ ; aralığı  $s$  olan kesme donatısı alanını,  $u_{st}$ ; kesme donatısı uzunluğunu ve  $l_e$ ; eleman uzunluğunu temsil eder.  $F$ , denklem (47)'de verilen tüm eleman maliyetlerinin toplamıdır.

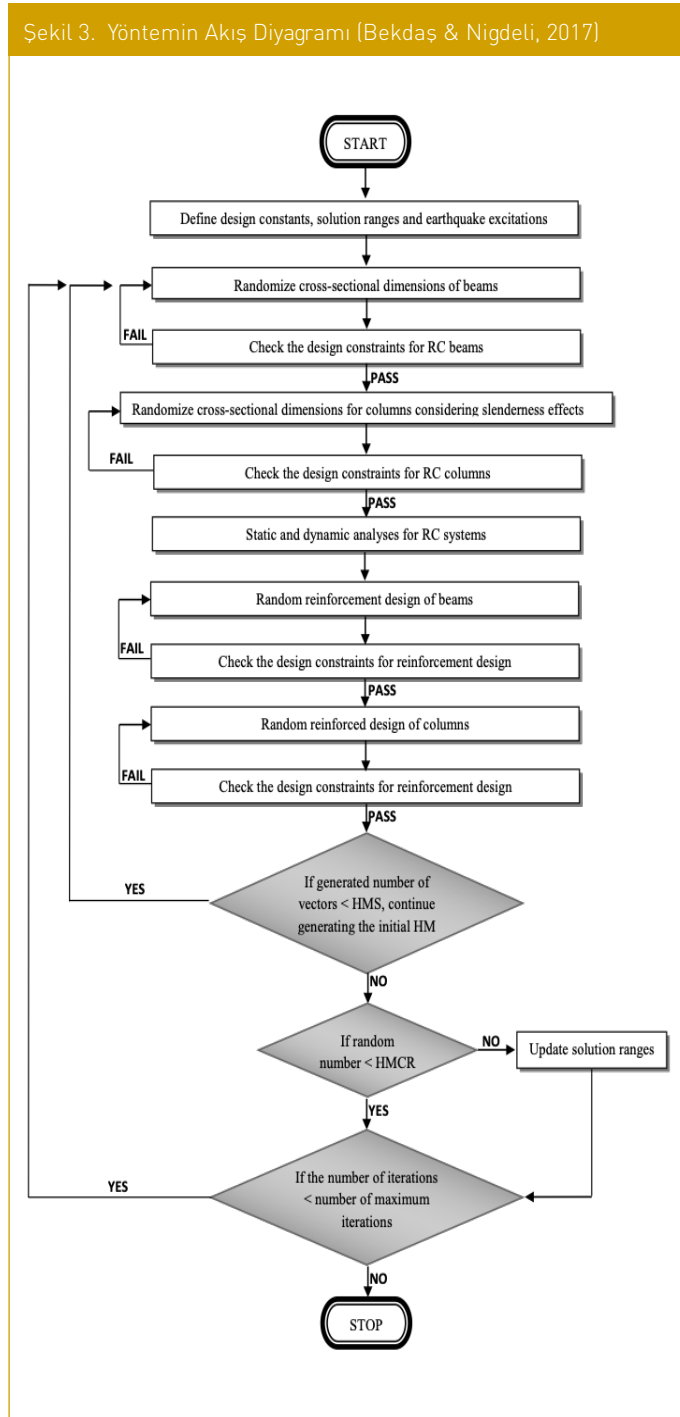
$$C_e = (A_g - A_{st}) l_e C_c + (A_{st} + \frac{A_v}{s} u_{st}) l_e \gamma_s C_s \quad (46)$$

$$F = \sum_{i=1}^n (C_e)_i \quad n: \text{eleman sayısı} \quad (47)$$

Sunulan yöntemde ek rastgele arama yinelemeleri kullanıldığından, HM matrisinde depolanan tasarım değişkenleri, genellikle tasarım kısıtlamaları sağlayan çözümlerdir. Bu nedenle, ilave rastgele arama iterasyonları ile değiştirilmiş HS yönteminde, ilk armoni bellek matrisi oluşturulduktan sonra aynı prosedür kullanılarak yeni bir armoni vektörü oluşturulur.

Modifiye edilmiş armoni arama yönteminde, enine kesit boyutlarının çözüm aralığının sınır limitleri, mevcut en iyi armoni vektörüne göre güncellenir. Yerel optimumda lokal bir noktaya takılmayı önlemek için, %50 (armoni hafızası dikkate alma oranı gibi benzer faktör) olasılığı olan bir yapı elemanı için başlangıç sınır koşulları kullanılır. Aralığın alt veya üst limiti, en iyi armoni vektörünün değerleri ile eşit olasılıkla (alan ayarlama hızına benzer faktör) güncellenir. Yeni oluşturulan vektör, mevcut en kötü vektörden daha küçük bir amaç fonksiyonuna sahipse, onunla değiştirilir. Yapılan iterasyon sayısı maksimum iterasyon sayısına ulaşana kadar işlemler devam eder. Yöntem özet olarak, Şekil 3'te verilen akış şemasında gösterilmektedir.

Şekil 3. Yöntemin Akış Diyagramı (Bekdaş &amp; Nigdeli, 2017)



### Sayısal Örnekler

Sunulan yöntemin, iki açıklıklı iki katlı simetrik betonarme çerçeve ve üç açıklıklı üç katlı betonarme çerçeve için sonuçları verilmiştir. Üç farklı deprem kaydı kullanılmış ve kayıtlara ilişkin bilgiler Tablo 1'de verilmiştir. Tasarım sabitlerinin değeri ve her iki örnek için kullanılan tasarım değişkeni aralıkları Tablo 2'de verilmiştir. Boyutlar ve donatı boyutları için ayrı değişkenler kullanılmıştır. Boyutlar 50 mm'nin katları olarak atanır ve donatı boyutları 2 mm'nin katları olarak alınır. Her açıklığa 15 kN/m sabit yük (D) ve 5 kN/m hareketli yük (L) yüklenmiştir. Yayılı yüklerin yamuk şekli olarak a ve l oranı ¼ olarak alınmıştır.

Tablo 1. Deprem Kayıtları

Deprem	Tarihi	İstasyon	Bileşen
Imperial Valley	1940	117 El Centro	I-ELC180
Northridge	1994	24514 Sylmar	SYL360
Loma Prieta	1989	16 LGPC	LGP000

Not: Deprem kayıtları PEER NGA DATABASE (<http://peer.berkeley.edu/nga/>) sitesinden alınmıştır.

Tablo 2. Tasarım Sabitleri ve Tasarım Değişkenleri Limitleri

Tanım	Sembol	Birim	Değer
Kesit genişliği limitleri	bw	mm	250-400
Kesit yüksekliği limitleri	h	mm	300-600
Beton örtüsü kalınlığı	cc	mm	30
Donatı çapı limitleri	$\phi$	mm	16-30
Etriye çapı limitleri	$\phi_v$	mm	8-14
Maksimum agrega çapı	Dmax	mm	16
Çelik akma dayanımı	$f_y$	MPa	420
Beton basınç dayanımı	$f_c$	MPa	25
Çelik elastisite modülü	$E_s$	MPa	200000
Çelik birim hacim ağırlığı	$\gamma_s$	t/m <sup>3</sup>	7.86
Beton birim hacim ağırlığı	$\gamma_c$	t/m <sup>3</sup>	2.5
Yapı davranış katsayısı	R	-	8.5
Beton birim maliyeti m <sup>3</sup>	Cc	birim	40
Çelik birim maliyeti ton	Cs	birim	400

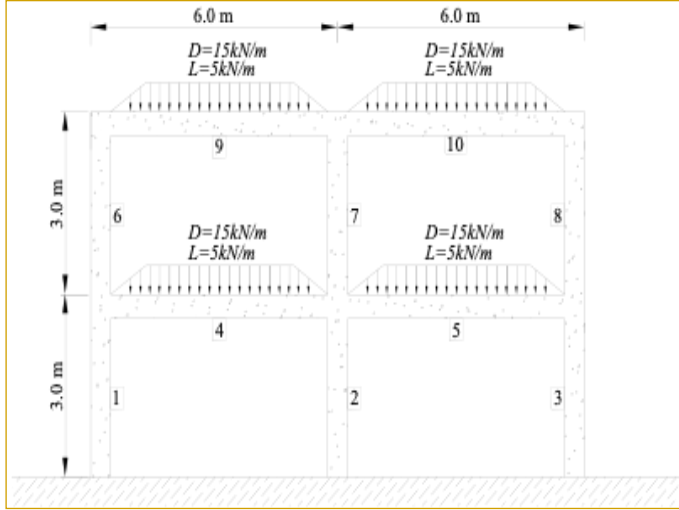
### Örnek 1: İki açıklıklı-iki katlı simetrik betonarme çerçeve

Şekil 4'te görülen iki açıklıklı iki katlı betonarme çerçeve, sırasıyla kolonlar ve kiriş elemanları için Tablo 3 ve 4'te verilen optimum sonuçlara sahiptir. Kirişlerin optimum sonuçları için LJ ve RJ, elemanın sol ve sağ birleşimini temsil eder. Betonarme çerçevenin toplam maliyeti 304,78 birim para olarak bulunmuştur (Nigdeli & Bekdaş, 2016).

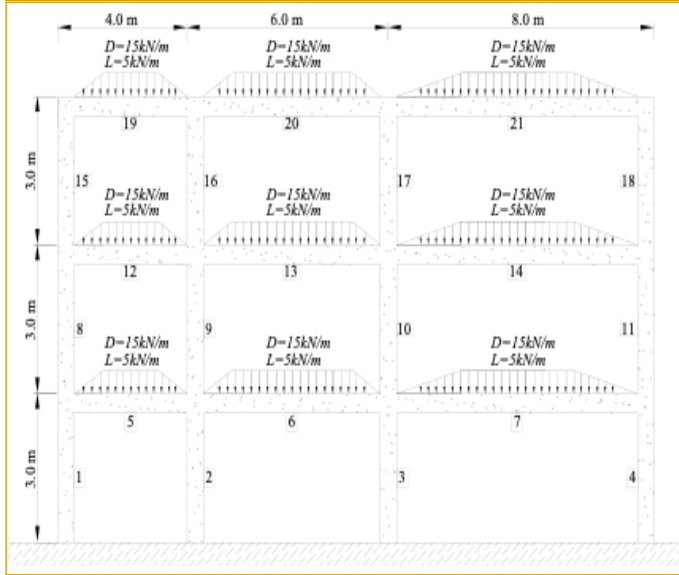
### Örnek 2: Üç açıklıklı-üç katlı betonarme çerçeve

Şekil 5'te verilen üç açıklıklı üç katlı bir yapı için optimum sonuçlar sunulmaktadır. Kolon ve kiriş elemanları için optimum sonuçlar sırasıyla Tablo 5 ve 6'da gösterilmiştir. Optimum tasarımın toplam maliyeti 724,54 birim paradır. İlk beş deneme için optimum değer (1148 birim para), optimum maliyetten yaklaşık %58 daha yüksektir. Bu, bir mühendisin tasarımı da olabilecek rastgele bir tasarımın optimize edilmiş sonuçlara göre çok büyük olabileceği anlamına gelir. Bu durum optimizasyonun önemini göstermektedir (Bekdaş & Nigdeli, 2017).

Şekil 4. Birinci Nümerik Örneğe Ait Yapı Modeli (Nigdeli & Bekdaş, 2016)



Şekil 5. İkinci Nümerik Örneğe Ait Yapı Modeli (Bekdaş & Nigdeli, 2017)



Tablo 3. Kolon Optimum Sonuçları (Örnek 1) (Nigdeli & Bekdaş, 2016)

Eleman Numarası	bw (mm)	h (mm)	Kolon her yüzünde donatı	Etriye Çap / Aralık (mm)
1	250	300	2Φ10+ 2Φ12	Φ8/120
2	250	300	2Φ10+ 2Φ12	Φ8/120
3	250	300	2Φ10+ 2Φ12	Φ8/120
6	250	300	2Φ10+ 2Φ12	Φ8/120
7	250	300	2Φ10+ 2Φ12	Φ8/120
8	250	300	2Φ10+ 2Φ12	Φ8/120

Tablo 4. Kiriş Optimum Tasarımı (Örnek 1) (Nigdeli & Bekdaş, 2016)

Eleman numarası	bw (mm)	h (mm)	Basınç bölgesi donatısı	Çekme bölgesi donatısı	Etriye Çap / Aralık (mm)
LJ4			1Φ18+1Φ14 +1Φ16	1Φ20+1Φ30+ 1Φ14	
4	250	300	2Φ12	1Φ20+1Φ16	Φ8/120
RJ4-LJ5			2Φ16+1Φ12 +1Φ14	1Φ24+1Φ18+ 1Φ28	
5	250	300	2Φ12	1Φ20+1Φ16	Φ8/120
RJ5			1Φ18+1Φ14 +1Φ16	1Φ20+1Φ30+ 1Φ14	
LJ9			1Φ18+ 1Φ16	1Φ12+2Φ14+ 1Φ24	
9	250	300	2Φ12	1Φ14+1Φ26	Φ8/120
RJ9-LJ10			1Φ16+1Φ14 +1Φ20	1Φ22+1Φ24+1Φ 16+1Φ18	
10	250	300	2Φ12	1Φ14+1Φ26	Φ8/120
LJ10			1Φ18+ 1Φ16	1Φ12+2Φ14+ 1Φ24	

Tablo 5. Kolon Optimum Tasarımı (Örnek 2) (Bekdaş & Nigdeli, 2017)

Eleman Numarası	bw (mm)	h (mm)	Kolon her yüzünde donatı	Etriye Çap / Aralık (mm)
1	250	300	2Φ10+ 2Φ12	Φ8/120
2	250	350	3Φ10+ 1Φ12	Φ8/150
3	250	350	1Φ12+ 1Φ18+1Φ10	Φ8/150
4	250	300	2Φ10+ 2Φ12	Φ8/120
8	250	300	2Φ10+ 2Φ12	Φ8/120
9	250	300	2Φ10+ 2Φ12	Φ8/120
10	250	300	4Φ10+ 1Φ12	Φ8/120
11	250	300	2Φ10+ 2Φ12	Φ8/120
15	250	300	2Φ10+ 2Φ12	Φ8/120
16	250	300	2Φ10+ 2Φ12	Φ8/120
17	250	300	1Φ14+ 2Φ12	Φ8/120
18	250	300	3Φ18	Φ8/120

Tablo 6. Kiriş Optimum Tasarımı (Örnek 2) (Bekdaş & Nigdeli, 2017)

Eleman numarası	bw (mm)	h (mm)	Basınç bölgesi donatısı	Çekme bölgesi donatısı	Etriye Çap / Aralık (mm)
LJ5			1Φ10+2Φ14 +1Φ16	1Φ24+1Φ28	
5	250	350	2Φ10+ 1Φ12	1Φ14+1Φ16+ 1Φ12	Φ8/150
RJ5-LJ6			1Φ10+1Φ26	1Φ16+ 2Φ14+ 1Φ28	

Tablo 6. Kiriş Optimum Tasarımı (Örnek 2) (Bekdaş &amp; Nigdeli, 2017) (devamı)

Eleman numarası	bw (mm)	h (mm)	Basınç bölgesi donatısı	Çekme bölgesi donatısı	Etriye Çap / Aralık (mm)
6	250	350	2Φ10+ 1Φ12	1Φ20+ 1Φ14	Φ8/150
RJ6-LJ7			1Φ22+1Φ14 +1Φ18	1Φ20+1Φ18+ 1Φ26+1Φ22	
7	250	450	1Φ10+1Φ12 +1Φ14	1Φ24+ 1Φ20	Φ8/200
RJ7			1Φ20+ 1Φ22	1Φ14+1Φ16+ 1Φ28+1Φ20	
LJ12			1Φ20+ 1Φ12	1Φ30+ 1Φ12	
12	250	450	1Φ16+ 1Φ14	1Φ12+ 1Φ22	Φ8/200
RJ12-LJ13			4Φ12	1Φ28+ 1Φ18	
13	250	400	4Φ10	1Φ14+ 1Φ12+ 1Φ16	Φ8/170
RJ13-LJ14			1Φ28+ 1Φ14	2Φ28+ 1Φ18	
14	250	400	1Φ16+ 1Φ12	1Φ10+ 2Φ12+ 1Φ26	Φ8/170
RJ14			1Φ16+1Φ22 +1Φ12	1Φ10+1Φ22+ 1Φ28+1Φ16	
LJ19			1Φ16+ 1Φ12	1Φ10+ 1Φ18+ 1Φ14	
19	250	400	2Φ14	2Φ14	Φ8/170
RJ19-LJ20			1Φ12+ 1Φ22	1Φ10+ 2Φ22+ 1Φ12	
20	250	300	2Φ12	1Φ10+1Φ16+ 1Φ12+1Φ14	Φ8/120
RJ20-LJ21			1Φ24+1Φ18	1Φ18+1Φ26+ 1Φ24+1Φ12	
21	250	400	1Φ12+ 1Φ16	1Φ24+ 1Φ26	Φ8/170
LJ21			1Φ20+ 1Φ12	1Φ26+ 1Φ20	

**Çıkar Çatışması:** Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

**Hakem Değerlendirmesi:** Dış bağımsız

**Peer-review:** Externally peer-reviewed.

**Declaration of Interests:** The authors declare that they have no competing interest.

## Kaynaklar

ACI-318. (2005). *Building code requirements for structural concrete and commentary*, metric version, American Concrete Institute.

Bekdaş, G., & Nigdeli, S. M. (2017). Modified Harmony Search for Optimization of Reinforced Concrete Frames. In *International Conference on Harmony Search Algorithm* (pp. 213-221). Springer, Singapore. [\[Crossref\]](#)

Geem, Z. W., Kim, J. H., & Loganathan, G. V. (2001), A new heuristic optimization algorithm: Harmony search. *Simulation*, 76, 60-68. [\[Crossref\]](#)  
Mathworks (2018) MATLAB R2018a. The MathWorks Inc., Natick, MA, USA.

Nigdeli, S. M., & Bekdaş, G. (2016). Detailed Optimum Design of Reinforced Concrete Frame Structures. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*, 11, 220-228.

PEER. (2005). Pacific earthquake engineering resource center: NGA database. University of California, Berkeley. <http://peer.berkeley.edu/nga>. Accessed November 2011.



# **BÖLÜM 6**

## **BETONARME TEMELLERİN**

### **OPTİMUM TASARIMI**



# Betonarme Temellerin Optimum Tasarımı

## *Optimum Design of Reinforced Concrete Foundations*

### BÖLÜM HAKKINDA

Bu bölümde kolon altı betonarme tekil temellerin optimum tasarımı açıklanmıştır. Hem yapısal hem de zemin ile ilgili geoteknik kısıtlar altında yürütülen bir optimizasyon yöntemine gereksinim vardır. Optimizasyon yöntemi çok sayıda klasik ve yeni nesil metasezgisel algoritmaların karşılaştırmalı sonuçları için sunulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Betonarme, tekil temeller, yapısal sınır koşullar, geoteknik sınır koşullar

### ABOUT the CHAPTER

In this section, optimum design of sub-column reinforced concrete single footings is explained. There is a need for an optimization method that is carried out under both structural and geotechnical limits. The optimization method is presented for the comparative results of many classical and new generation metaheuristic algorithms.

**Keywords:** Reinforced concrete, single footings, structural limit states, geotechnical limit states

## Giriş

Betonarme kolonlar gibi, temeller de yapıların önemli bir bileşenidir, çünkü bunların göçmesi yapının tamamen çökmesini sağlar. Tekil temeller en basit temel tipidir ve bu temeller bodrum kolonlarının altına monte edilir, ancak betonarme temellerin tasarımında, zımbalama etkisi ve zeminin kapasitesi ve özelliklerine ilişkin geoteknik sınır durumları da diğer elemanlarda incelenen yapısal tasarım sınırları ile dikkate alınmalıdır. Zemin taşıma kapasitesine göre temellerin stabilitesi sağlanmadığında, her türlü gerilmeye karşı tüm dayanımı sağlayan güvenli bir tasarım yeterli değildir. Diğer optimizasyon durumları ile karşılaştırıldığında, betonarme elemanların mevcut doğrusal olmayan davranışına ek olarak, tasarım değişkenleri hem geoteknik hem de yapısal durum limitleri üzerinde etkili olduğundan, temel tasarımı diğer elemanlardan daha karmaşıktır.

Nigdeli vd. (2018) çeşitli metodolojiler kullanarak tekil temelleri optimize etmiştir. Dikdörtgen olarak alınan en temel formundan farklı olarak, monte edilen kolonun çift eksenli eğilme momentleri kullanılarak beton hacminden tasarruf sağlayacak yamuk bir şekil sunulmaktadır. Ek tasarım değişkenleri olarak, kolonun yerleşimi (temel orta noktasına göre dışmerkezlilik), iç kuvvetleri azalttığı ve tasarım maliyeti olarak alınan amaç fonksiyonunun minimizasyonunu sağladığı için incelenmiştir. Boyut tasarımı değişkenlerinden farklı olarak, tüm kritik bölümlerdeki donatı miktarı tasarım değişkenleri olarak alınmıştır. Tüm tasarım kısıtlamaları ACI 318'e (2011) göre tanımlanmıştır. Yöntem olarak, Geem vd. (2001) tarafından geliştirilen Armoni Arama (HS) algoritması, Rao vd. (2011) tarafından geliştirilen Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO), Yang (2012) tarafından geliştirilen Çiçek Tozlaşma Algoritması (FPA), Kennedy ve Eberhart (1995) tarafından geliştirilen Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Storn ve Price (1997) tarafından geliştirilen Diferansiyel Evrim (DE) kullanılmıştır. Bu yöntem bu bulunda açıklanmıştır.

## Çift Eksenli Eğilme Tekisi Altında Betonarme Tekil Temellerin Optimum Tasarımı

Betonarme temellerin tasarımı, optimizasyon sürecinde tasarım kısıtlamaları olarak formüle edilen iki farklı sınır durumunu içerir. Bu sınır durumları, geoteknik ve yapısal sınır durumlarıdır. Bu durumlar, hesaplama çabasından tasarruf etmek için ayrı ayrı dik-



kate alınır. Fiziksel mekanik formülasyonlar ve deneysel sonuçlar, bu sınır durumlarını temsil etmek için tasarım kodlarında formüle edilmiştir.

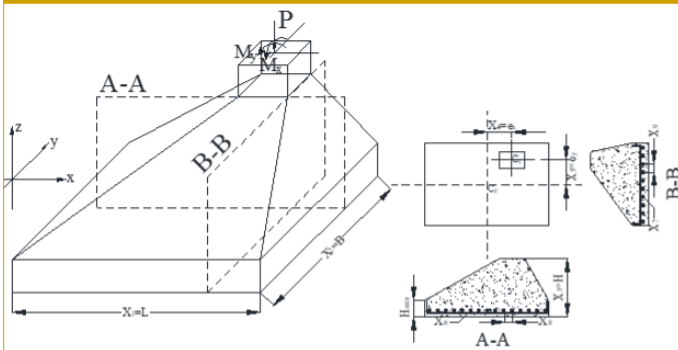
Sunulan metodolojide, seçilen temel boyutları geoteknik sınır durumlarını sağlamaya uygun olmadığında, hesaplama süresinden tasarruf etmek için optimum donatı tasarımı için aday çözümlerin atanmasına ilişkin optimizasyon işlemi yapılmamaktadır.

Önceki bölümlerde açıklandığı gibi, optimizasyonun iki aşamasında, yani global ve yerel optimizasyonlar yapılır. Bu iki aşamada, global bir arama süreci ile yerel bir optimuma yakalanması engellenir. Buna ek olarak, yerel bir arama işlemi ile yakınsama yeteneği sağlanmaktadır.

Tekil temelin tasarım değişkenleri, temel boyutları ( $x_1$  ve  $x_2$ ), temelin yüksekliği ( $x_3$ ) ve temelin orta noktasına göre bir eksantriklik olarak tanımlanan kolonun yerleşim konumu ( $x_4$  ve  $x_5$ ) ve detaylı donatı tasarımı ile ilgili ( $x_6$ ,  $x_7$ ,  $x_8$  ve  $x_9$ ) boyutlardır. Tüm tasarım değişkenleri Şekil 1’de gösterilmiştir. Çizimlerde  $C_f$  ve  $C_c$  sırasıyla temel ve kolon merkezlerini temsil etmektedir. Taban boyutları ( $x_1$ ,  $x_2$ ) ayrıca sırasıyla x ve y yönlerinde L ve B olarak gösterilmiştir. Kolon noktasında alınan temelin yüksekliği (H) üçüncü boyut tasarım değişkenidir ( $x_3$ ). Temelin uç kenarları olarak alınan minimum yükseklik, sabit bir minimum değer olan  $H_{min}$  ile temsil edilir. Eksenel kuvvete (P) ek olarak x ( $M_x$ ) ve y ( $M_y$ ) etrafındaki çift eksenli eğilme momentleridir. Eksenel kuvvetten kaynaklanan temel altında optimum gerilme dengesini bulmak için, kolonun orta noktaya göre eksantrikliği ile ilgili boyutlar olan  $e_x$  ve  $e_y$  sırasıyla dördüncü ( $x_4$ ) ve beşinci ( $x_5$ ) tasarım değişkenleri olarak alınmıştır. A-A ve B-B olarak tanımlanan iki bölümde donatıların mm cinsinden çapları;  $x_6$  ve  $x_7$ ’dir. Son olarak, donatılar arasındaki mesafeler  $x_8$  ve  $x_9$  olarak gösterilmiştir. Tüm tasarım değişkenlerinin, şantiyede kolay yapılması için ayrıntı değişkenler alınması önerilmektedir.

Optimizasyonda ilk olarak tasarım sabitleri ve tasarım değişkeninin aralıkları tanımlanır. Daha sonra aday değerleri içeren bir başlangıç matrisi oluşturulur. Tasarım değişkenlerinin ilk atanmasında, aralık içinde rastgele bir çözüm seçilebilir. Ardından tasarım değişkenleri, bir olasılık parametresi aracılığıyla global veya yerel bir optimizasyon aşaması seçilerek her yinelemede 2. bölümde sunulan algoritmaların formülasyonuna göre güncellenir. TLBO’nun olasılık parametresi yoktur ve sonuç olarak her iki aşama da uygulanır.

Şekil 1. Betonarme Tekil Temel (Nigdeli vd., 2018)



Daha önce yazıldığı gibi, hesaplama zamanından tasarruf etmek için tasarım değişkenlerinin rasgele üretim sürecinde çok adımlı bir prosedür önerilmiştir. Öncelikle boyutlar ( $x_1$ - $x_3$ ) ile ilgili değişkenler tanımlanır. Daha sonra zemin gerilmesi ve oturma ( $\delta$ ) ile ilgili geoteknik sınır durumları kontrol edilir ve ilgili tasarım kısıtlarının ihlal edilmesi durumunda amaç fonksiyonu ( $f_{cost}$ ) cezalandırılır.

Temel altındaki gerilmelerin değeri ( $q_{1,2,3,4}$ ) temelin dört köşe noktasında hesaplanır ve bunların doğrusal olarak değiştiği kabul edilir. Hesapları, denklem (1) ile formüle edilmiştir.  $W_p$  temelin üstündeki toprak da dahil olmak üzere temelin toplam ağırlığıdır.

$$q_{1,2,3,4} = \frac{P + W_f}{BL} \pm \frac{6(M_y - P e_x)}{BL^2} \pm \frac{6(M_x - P e_y)}{B^2 L} \quad (1)$$

Zemin gerilmesi için iki durumda limit kontrolü yapılır. Zemin çekme kuvvetlerini taşıyamayacağı için tüm gerilmeler 0’ın üzerinde olmalıdır (denklem (2)). İkinci olarak, denklem (3)’de verilen maksimum gerilme için bir güvenlik faktörü (FS) tanımlanır.

$$q_{1,2,3,4} \geq 0 \quad (2)$$

$$FS < \frac{q_{ult}}{\max(q_{1,2,3,4})} \quad (3)$$

Kohezyonsuz bir zemin için, zemin eğimi olmayan zeminin nihai taşıma kapasitesi ( $q_{ult}$ ) denklem (4) olarak hesaplanır.

$$q_{ult} = \gamma DN_q F_{qs} F_{qd} + 0.5 \gamma BN_\gamma F_{ys} F_{yqd} \quad (4)$$

Taşıma gücü denkleminde  $\gamma$ , zeminin birim ağırlığıdır. Denklem (4), taşıma kapasitesi faktörleri ( $N_q$  ve  $N_\gamma$ ) ve şekil derinliği faktörleri ( $F_{qs}$ ,  $F_{ys}$ ,  $F_{qd}$ ,  $F_{yqd}$ ) gibi çeşitli faktörleri içerir. Bu faktörler Denklem (5)-(10) olarak formüle edilmiştir. İç sürtünme açısı  $\phi$  ile gösterilir.

$$N_q = e^{\pi \tan \phi'} \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (5)$$

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi' \quad (6)$$

$$F_{qs} = 1 + \frac{B}{L} \tan \phi' \quad (7)$$

$$F_{ys} = 1 - 0.4 \frac{B}{L} \quad (8)$$

$$F_{qd} = \begin{cases} 1 + 2 \tan \phi' (1 - \sin \phi')^2 \left[ \arctan \left( \frac{D}{B} \right) \right] & \text{if } D > B \\ 1 + 2 \tan \phi' (1 - \sin \phi')^2 \left( \frac{D}{B} \right) & \text{if } D < B \end{cases} \quad (9)$$

$$F_{yqd} = 1.0 \quad (10)$$

Poulos ve Davis’in (1974) elastik çözümüne göre temelin oturma-  
sını ( $\delta$ ) denklem 11’de gösterildiği gibi sunmuştur. Bu değer, bir geoteknik sınır durumu olarak izin verilen maksimum oturmaya ( $\delta_{max}$ ) eşit veya daha düşük olmalıdır. Denklem (11), elastisite modülü ve zeminin Poisson oranı sırasıyla E ve  $\nu$  olarak tanımlanır. Ayrıca  $\beta_z$  ile gösterilen şekil faktörü Whitman ve Richart’a (1967) göre denklem (12) olarak verilmiştir:

$$\delta = \frac{P + W_f (1 - \nu^2)}{\beta_z E \sqrt{BL}} \leq \delta_{max} \quad (11)$$

$$\beta_z = -0.0017 \left( \frac{L}{B} \right)^2 + 0.0597 \left( \frac{L}{B} \right) + 0.9843 \quad (12)$$

Denklem (2), (3) ve (11) olarak verilen geoteknik durum limitlerinden biri sağlanmazsa, amaç fonksiyonu olarak alınan toplam maliyet cezalandırılır ve bir iterasyondaki sonraki işlemler uygulanmaz. Cezalandırılan toplam maliyet için  $10^6$  para birimi gibi büyük bir değer atanır.

Geoteknik sınır durumlarının sağlanmasından sonra, donatılarla ilgili tasarım değişkenleri üretilerek süreç devam eder. Ardından, yapısal durum limitleri kontrol edilmeye başlar. Bu süreç genellikle betonarme kirişlerin kısıtlamaları gibidir. Çekme kontrol esaslı tasarım ile (betonun basınçta kırılmadan önce çekmede akmasına izin veren süneklik koşulu) eğilmedeki maksimum donatı alanı için düşünülür ve betonun basınç bloğunu elde etmek için eşdeğer bir dikdörtgen gerilme bloğu kullanılabilir. Kritik kesitlerde eğilme momenti ve kesme kuvveti hesaplandıktan sonra bu iç kuvvetlere göre temelin kapasitesi kontrol edilir. Kritik bölümler, kolonun monte edildiği temellerin noktalarıdır [Eğilme için kolon kenarları ve kesme için ortalama efektif derinliğe kadar bir mesafe;  $d_{ave}$ ].

İki yönün eğilme momenti kapasitesinden ve kesme kuvveti kapasitesinden farklı olarak, kolonun yayılmış temel üzerinde zımbalama eğilimi gösterdiğinden, temelin zımbalama kapasitesi kontrol edilmelidir. Kritik zımbalama çevresi ( $b_{perim}$ ) kolon yüzeyinden  $d_{ave}/2$  kadar uzakta alınır. Denklem (13) olarak formüle edilmiştir.  $b$ , karşılık gelen yön için kolonun genişliğidir.

$$b_{perim} = 4(b + d_{ave}) \quad (13)$$

Kesme ( $V_n$ ) için betonarme temelin kapasitesi Denklem (14) olarak verilmiştir. Klasik tekil temel tasarımında ek etriyeler kullanılmaz. Bu durumda, kapasite kritik kesme kuvvetini sağlamalıdır. Temel genişliği  $w$  olarak gösterilir ve sırasıyla  $x$  ve  $y$  yönlerine göre  $B$  veya  $L$  olarak alınır.

$$V_n = 0.75(0.17wd_{ave}\sqrt{f'_c}) \quad (14)$$

Zımbalama ( $V_{n,z}$ ) denklem (15)'e göre hesaplanır. (15).  $\beta$ , kolonun uzun kenarının kısa kenarına oranını temsil eder. Betonun basınç dayanımı ise  $f'_c$  ile gösterilmiştir.

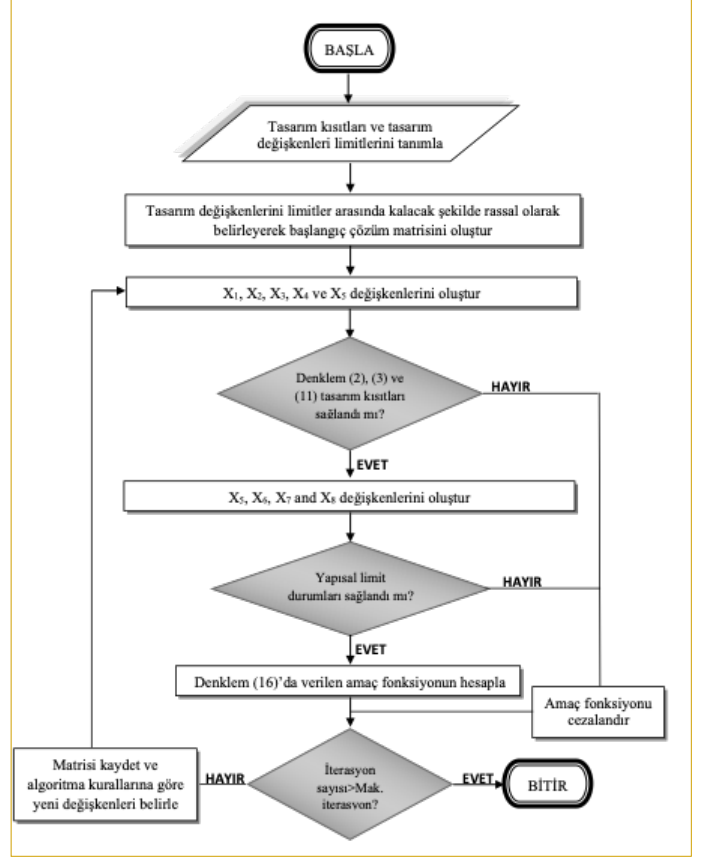
$$V_{n,z} = 0.75 * \text{minimum} \begin{cases} 0.17(1 + \frac{2}{\beta})\sqrt{f'_c}b_{perim}d_{ave} \\ 0.083(\frac{4d_{ave}}{b_{perim}} + 2)\sqrt{f'_c}b_{perim}d_{ave} \\ 0.33\sqrt{f'_c}b_{perim}d_{ave} \end{cases} \quad (15)$$

Yapısal sınır durumlarından biri (eğilme momenti, kesme ve zımbalama) sağlanmazsa amaç fonksiyonu cezalandırılır. Tüm geoteknik ve yapısal sınır durumları sağlanırsa, temelin toplam maliyeti olarak tanımlanan amaç fonksiyonu ( $f$ ) denklem (16) ile hesaplanır. Burada beton hacmi ( $V_{beton}$ ), birim hacim için beton maliyeti ( $C_{beton}$ ), donatı ağırlığı ( $W_{çelik}$ ) ve birim ağırlık için donatı maliyeti ( $C_{çelik}$ ) kullanılmıştır. Betonun hacmi ve çeliğin ağırlığı, tasarım değişkenlerinin değerlerine göre hesaplanır. Optimizasyon yönteminin genel bir akış şeması Şekil 2'de verilmiştir.

$$f = V_{beton}C_{beton} + W_{çelik}C_{çelik} \quad (16)$$

Tasarım sabitleri ve tasarım değişken aralıkları Tablo 1'de verilmiştir. Sabit ve hareketli yükler Tablo 2'de verilmiştir. Eksenel kuvvet ve eğilme momentleri sabit ve hareketli yükler için sırasıyla 1.2 ve 1.6 olarak alınan  $\phi$  değeri ile çarpılmıştır. Ölü ve hareketli

Şekil 2. Optimizasyon Yönteminin Akış Diyagramı



yükler, sırasıyla  $G$  ve  $Q$  alt simgeleri eklenerek temsil edilmiştir. Şantiyede uygulanabilir üretim için 5cm fark ile ölçülerle ilgili ayrıntı tasarım değişkenleri alınmıştır.

Bir milyon analiz için optimizasyon yapılmıştır, ancak HS, TLBO, FPA, PSO ve DE gibi tüm algoritmalar, Tablo 3'te verilen Durum 1-4 için maksimum yineleme sayısından önce aynı optimum sonucu bulmakta etkilidir.

Durum 2 ve 3 benzer durumlardır ve sadece eğilme momentlerinin yönü değişmiştir. Tablo 3'te verilen optimum sonuçlarda görüldüğü gibi, durum 2 ve 3 için aynı sonuçlar elde edilmektedir. Bu durum yöntemin sağlamlığını doğrulamaktadır.

Tablo 1. Tasarım Sabitleri ve Tasarım Değişkenleri Limitleri (Nigdeli vd., 2018)

Tanım	Sembol	Birimi	Değeri
Çelik akma dayanımı	$f_y$	MPa	420
Betona basınç dayanımı	$f'_c$	MPa	25
Net beton örtüsü kalınlığı	$cc$	mm	100
Maksimum agrega çapı	$D_{max}$	mm	16
Çelik elastisite modülü	$E_s$	GPa	200
Çelik birim hacim ağırlığı	$\gamma_s$	t/m <sup>3</sup>	7.86
Beton birim hacim ağırlığı	$\gamma_c$	kN/m <sup>3</sup>	23.5
Beton birim maliyet m <sup>3</sup>	$C_c$	birim/m <sup>3</sup>	40
Çelik birim maliyeti ton	$C_s$	birim/t	400

**Tablo 1. Tasarım Sabitler ve Tasarım Değişkenleri Limitleri (Nigdeli vd., 2018) (devamı)**

Tanım	Sembol	Birimi	Değeri
Zemin içsel sürtünme açısı	$\phi'$	°	35
Zemin birim hacim ağırlığı	$\gamma_B$	kN/m <sup>3</sup>	18.5
Zeminin Poisson oranı	$\nu$	-	0.3
Zemin elastisite modülü	E	MPa	50
Maksimum oturma	$\delta_{max}$	mm	25
Güvenlik katsayısı	FS	-	3.0
Minimum temel kalınlığı	$h_{min}$	m	0.25
Kolon boyutları	b/h	mm/mm	500/500
Temel genişliği için limitler	B	m	2.0-5.0
Temel boyu için limitler	L	m	2.0-5.0
Temel yüksekliği için limitler	H	m	$h_{min}-1.0$
Çelik donatı çapı için limitler	$\phi$	mm	16-24
Etriye arası mesafe için limitler	s	mm	$5\phi-250$

Köşe noktalarda minimum ve maksimum basıncı ayarlamak için Durum 1 ve 4 için optimum olarak simetrik olmayan bir tasarım optimum olarak çıkmıştır. Optimum değerleri bulmak için yapılan analizlerin sayısı algoritmalara göre çok farklıdır ve DE ve FPA en hızlılarıdır.

**Tablo 2. Optimizasyon Problemine Ait Yük Durumları (Nigdeli vd., 2018)**

	P (kN)		Mx (kNm)		My (kNm)	
	PG	PQ	MxG	MxQ	MyG	MyQ
Durum 1	750	500	300	200	300	200
Durum 2	750	500	300	200	400	300
Durum 3	750	500	400	300	300	200
Durum 4	750	500	400	300	400	300
Durum 5	1000	750	600	400	600	400

Tüm yöntemler 50 bağımsız optimizasyon süreci yapılarak denenmiş ve istatistiksel değerler elde edilmiştir. Durum 5'in optimum sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Üç algoritma, yani; FPA, TLBO ve PSO, en iyi sonuçları bulmak için etkilidir, ancak PSO, çoklu çalıştırmalar için büyük bir standart sapma değerine sahiptir. Bu üç algoritma aynı sonuçlara sahiptir, ancak farklı şekilde değerler görülebilir. Durum 5'in yüklemesi simetrik olduğundan, FPA, TLBO ve PSO için x ve y yönlerde birbirleri ile değişmiş optimum çözümleri bulunur. Bu durum rassal olarak atanan değerlerin hangi yönde o değerlere yakın değerler ataması sonucunda olmuştur.

**Tablo 3. Optimum Sonuçlar ve Diğer Algoritmalar ile Karşılaştırma (Durum 1-4) (Nigdeli vd., 2018)**

		Durum No			
		1	2	3	4
Optimum tasarım değişkenleri	B (m)	2.75	2.60	3.20	3.05
	L (m)	2.65	3.20	2.60	3.05
	H (m)	1.00	1.00	1.00	1.00
	ex (m)	0.75	0.75	0.75	0.90
	ey (m)	0.55	0.75	0.75	0.80
	$\phi_x$ (mm)	16	16	20	16
	Sx (mm)	150	140	230	140
	$\phi_y$ (mm)	16	20	16	20
	Sy (mm)	160	230	140	210
	En iyi maliyet (birim)		217.3235	252.2302	252.2302
DE	Ortalama maliyet (birim)	218.5794	253.3985	253.3545	287.1336
	Standart sapma (birim)	0.3229	0.3268	0.4763	0.9942
	Optimum için analiz sayısı	223700	118500	110300	93200
PSO	Ortalama maliyet (birim)	220.8968	254.2458	254.4545	288.1056
	Standart sapma (birim)	1.9426	1.5769	1.5691	1.5778
	Optimum için analiz sayısı	358600	345750	152600	658400
HS	Ortalama maliyet (birim)	218.3516	253.2736	253.4752	287.3481
	Standart sapma (birim)	0.4723	0.4146	0.4812	1.0326
	Optimum için analiz sayısı	901100	301005	545795	602117
FPA	Ortalama maliyet (birim)	218.2720	253.1640	253.1547	286.5305
	Standart sapma (birim)	0.4852	0.6284	0.5691	1.1384
	Optimum için analiz sayısı	221800	116850	145150	98150
TLBO	Ortalama maliyet (birim)	219.1628	253.7319	253.4578	286.6425
	Standart sapma (birim)	1.4007	0.8896	0.9886	1.6982
	Optimum için analiz sayısı	242200	276400	381700	126100

Tablo 4. Optimum Sonuçlar ve Diğer Algoritmalar ile Karşılaştırma (Case 5) (Nigdeli vd., 2018)

Optimum tasarım değişkenleri	DE	PSO	HS	FPA	TLBO
B (m)	4.15	4.15	4.20	4.15	4.15
B (m)	4.15	4.15	4.15	4.15	4.15
H (m)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ex (m)	1.00	1.00	1.10	0.95	1.00
ey (m)	0.95	0.95	0.85	1.00	0.95
φx (mm)	16	22	18	18	22
Sx (mm)	110	210	140	150	210
φy (mm)	20	18	18	22	18
Sy (mm)	180	150	150	210	150
En iyi maliyet (birim)	549.7689	549.2428	554.2151	549.2428	549.2428
Ortalama maliyet (birim)	554.0413	602.9062	556.9158	553.6568	554.7540
Standart sapma (birim)	0.8603	69.08	2.33	2.5674	13.29
Optimum için analiz sayısı	474800	935900	846801	712050	394700

**Çıkar Çatışması:** Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

**Hakem Değerlendirmesi:** Dış bağımsız

**Peer-review:** Externally peer-reviewed.

**Declaration of Interests:** The authors declare that they have no competing interest.

## Kaynaklar

- ACI-318. (2011). *Building code requirements for structural concrete and commentary*, metric version, American Concrete Institute.
- Geem, Z. W., Kim, J. H. & Loganathan, G. V. (2001), A new heuristic optimization algorithm: Harmony search. *Simulation*, 76, 60–68. [\[Crossref\]](#)
- Kennedy, J., Eberhart, R. C., 1995. Particle swarm optimization. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks No. IV*, November 27–December 1, pp. 1942–1948, Perth Australia.
- Nigdeli, S. M., Bekdaş, G., & Yang, X. S. (2018). Metaheuristic optimization of reinforced concrete footings. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(11), 4555–4563. [\[Crossref\]](#)
- Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1974). *Elastic solutions for soil and rock mechanics* (No. B00K). John Wiley. [\[Crossref\]](#)
- Rao, R. V., Savsani, V. J., & Vakharia, D. P. (2011). Teaching–learning–based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer-Aided Design*, 43(3), 303–315. [\[Crossref\]](#)
- Storn, R., & Price, K. (1997). Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341–359. [\[Crossref\]](#)
- Whitman, R. V., & Richart, F. E. (1967). Design procedures for dynamically loaded foundations. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(6), 169–193. [\[Crossref\]](#)
- Yang, X. S. (2012). Flower pollination algorithm for global optimization. In *International conference on unconventional computing and natural computation* (pp. 240–249). Springer, Berlin, Heidelberg. [\[Crossref\]](#)

# **BÖLÜM 7**

## **BETONARME İSTİNAT DUVARLARININ OPTİMUM TASARIMI**



aktif toprak basıncı sonucunda oluşan yükler altında olan konsol istinat duvarı Şekil 1’de verilmiştir. Şekil 1’de  $W_i$  istinat duvarının ağırlığı,  $W_T$  topuktaki dolgu ağırlığı,  $q$ ; sürşarj yükü,  $q_{\min}$ ; temel altındaki minimum gerilme,  $q_{\max}$ ; temel altındaki maksimum gerilme,  $H$ ; duvarın yüksekliği,  $\gamma_R$ ; toprağın özgül ağırlığı,  $\phi_R$ ; iç sürtünme açısı ve  $c_R$ ; tutulan toprağının kohezyonu olarak gösterilmişlerdir.

Betonarme istinat duvarlarının optimizasyonu iki sınır durumu içerir. Betonarme elemanlarının tüm optimizasyon yaklaşımlarında dikkate alınan yapısal sınır durumlara ek olarak, geoteknik sınır durumları da tasarım kısıtları olarak alınmalıdır. Bu kısıtlamalar, devrilme, kayma ve taşıma kapasitesi kontrolü gibi istinat duvarlarının stabilite ölçülerinin sağlanması ile ilgilidir.

Devrilme için güvenlik faktörü (SF<sub>o</sub>) denklem (1)’e göre hesaplanır:

$$SF_o = \frac{\sum M_R}{\sum M_o} \quad (1)$$

$\sum M_R$ , devrilmeye direnen toplam momentlerin toplamını tanımlar ve  $\sum M_o$  ise devrilmeye fayda sağlayan momentlerin toplamıdır. Güvenlik açısından pasif toprak basıncı zamanla ortadan kalkabileceğinden dikkate alınmaz.

Aktif toprak basıncının elde edilmesinde kullanılan  $k_a$  katsayısı, Rankine (1857) teorisine göre tanımlanmış ve denklem (2) olarak formüle edilmiştir.  $\beta$  ve  $\theta$  sırasıyla dolgunun eğimini ve iç sürtünme açısını temsil eder.

$$k_a = \cos \beta \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \theta}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \theta}} \quad (2)$$

İkinci stabilite koşulu, denklem (3) olarak verilen kaymaya karşı direnç sağlayan kuvvetlerinin toplamının ( $\sum F_R$ ) ve denklem (4) olarak verilen kaymaya fayda sağlayan kuvvetlerinin toplamının ( $\sum F_D$ ) aralarında denklem (5)’te formüle edildiği gibi bir güvenlik faktörü (SF<sub>s</sub>) sağlanması ile ilgilidir.

$$\sum F_R = (\sum W_w) \tan\left(\frac{2\phi_{\text{base}}}{3}\right) + \frac{2Bc_{\text{base}}}{3} + P_p \quad (3)$$

$$\sum F_D = P_a \cos \beta \quad (4)$$

$$SF_s = \frac{\sum F_R}{\sum F_D} \quad (5)$$

Kuvvetlerin hesabında  $\phi_{\text{base}}$ ,  $B$  ve  $c_{\text{base}}$  sırasıyla zeminin iç sürtünme açısı, temel döşemenin uzunluğu ve temel zeminin adezyonudur. Pasif toprak basıncı,  $\gamma_{\text{base}}$  ve  $D_1$ ’in sırasıyla temel toprağın özgül ağırlığı ve derinliği olduğu denklem (6) olarak hesaplanır:

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma_{\text{base}} D_1^2 k_p + 2c_{\text{base}} D_1 \sqrt{k_p} \quad (6)$$

Son stabilite koşulu olarak, istinat duvarının taban gerilmesi için güvenlik faktörü (SF<sub>B</sub>) denklem (7) olarak verilir ve burada  $q_u$ , maksimum toprak basıncına ( $q_{\max}$ ) göre kontrol edilen zeminin taşıma kapasitesidir. Ekstrem zemin gerilmeleri, denklem (8)’e göre, denklem (9) ile tanımlanan momentlerin dışmerkezlik (e) değerine göre bulunur.  $\sum V$ , tüm dikey yüklerin toplamıdır. Beş tasarım değişkeni içeren ve şekil 2’de verilen istinat duvarı bu bölümde sunulmuştur.

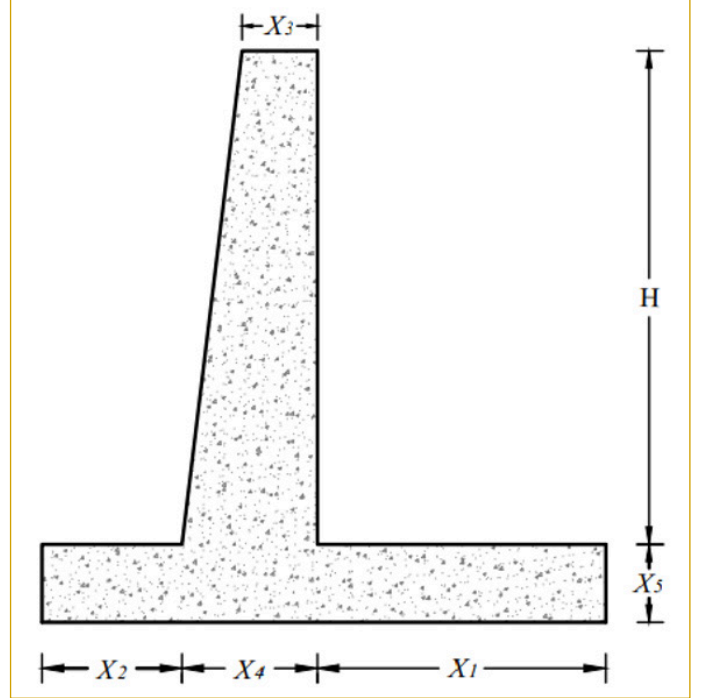
$$SF_B = \frac{q_u}{q_{\max}} \quad (7)$$

$$q_{\min, \max} = \frac{\sum V}{B} \left(1 \mp \frac{6e}{B}\right) \quad (8)$$

$$e = \frac{B}{2} \frac{\sum M_R - \sum M_o}{\sum V} \quad (9)$$

Tasarım kısıtlamaları Tablo 1’de sunulmuştur. İlk dört kısıtlama geoteknik durum limitleri ile ilgilidir ve diğerleri yapısal durum limitlerini kontrol etmek için tanımlanmıştır. Tabloda sunulan  $M_d$ ,  $V_d$  ve  $A_s$  değerleri sırasıyla kritik bölümlerde eğilme momentini, kesme kuvvetini ve donatı alanını tanımlamaktadır.

Şekil 2. İstinat Duvarı Geometrisi ve Tasarım Değişkenleri (Yücel vd., 2021)



Tablo 1. Tasarım Kısıtları

Tanım	Kısıt
Devrilme güvenliği	$g_1(X): SF_{o, \text{design}} \geq SF_o$
Kayma güvenliği	$g_2(X): SF_{s, \text{design}} \geq SF_s$
Taban basıncı kapasitesi	$g_3(X): SF_{B, \text{design}} \geq SF_B$
Minimum taban basıncı için güvenlik, $q_{\min}$	$g_4(X): q_{\min} \geq 0$
Kritik kesitlerde eğilme momenti kapasitesi, $M_d$	$g_{5-7}(X): M_d \geq M_u$
Kritik kesitlerde kesme kuvveti kapasitesi, $V_d$	$g_{8-10}(X): V_d \geq V_u$
Kritik kesitlerde minimum donatı alanı, $A_{s \min}$	$g_{11-13}(X): A_s \geq A_{s \min}$
Kritik kesitlerde maksimum donatı alanı, $A_{s \max}$	$g_{14-16}(X): A_s \leq A_{s \max}$

Amaç fonksiyonu (f(X)), betonarme istinat duvarının toplam malzeme maliyetinin en aza indirilmesidir. Denklem (10)’da verilen amaç fonksiyonunda,  $C_c$  m<sup>3</sup> başına beton maliyeti,  $C_s$  ise ton başına çeliğin maliyetidir.  $V_c$  betonun hacmini,  $W_s$  ise donatıların toplam ağırlığını gösterir.

$$\min f(X) = C_c V_c + C_s W_s \quad (10)$$



## Sayısal Örnek

Sayısal örnek ACI 318 (2011) kurallarına göre optimize edilmiş ve sadece statik yüklenme durumu incelenmiştir. Tasarım sabitleri ve tasarım değişkenlerinin aralıkları Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2. Tasarım Sabitleri ve Tasarım Değişkenleri Limitleri (Yücel vd., 2021)**

Tanım	Sembol	Birim	Değer
Konsol yüksekliği	H	m	6
Çelik akma dayanımı	$f_y$	MPa	420
Beton basınç dayanımı	$f'_c$	MPa	25
Çelik elastisite modülü	$E_s$	GPa	200
Beton elastisite modülü	$E_c$	GPa	31
Çelik birim hacim ağırlığı	$\gamma_s$	t/m <sup>3</sup>	7.85
Beton birim hacim ağırlığı	$\gamma_c$	kN/m <sup>3</sup>	25
Beton birim maliyeti, m <sup>3</sup>	$C_c$	\$/m <sup>3</sup>	50
Çelik birim maliyeti, ton	$C_s$	\$/ton	700
Sürsarj yükü	q	kN/m <sup>2</sup>	10
Arka zemin açısı	$\beta$	°	0
Arka zemin içsel sürtünme açısı	$\phi_R$	°	30
Taban zemini içsel sürtünme açısı	$\phi_B$	°	0
Arka zemin birim hacim ağırlığı	$\gamma_R$	kN/m <sup>3</sup>	18
Arka zemin kohezyonu	$c_R$	kPa	0

**Tablo 3. Optimum Sonuçlar (Yücel vd., 2021)**

Yöntem	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	Minimum Maliyet	Ortalama Maliyet	Standart Sapma
GA	4.1257	0.0003	0.2003	0.6212	0.4274	428.2421	449.3181	36.9566
DE	4.1323	0.0000	0.2000	0.6098	0.4267	428.1139	433.3653	11.4300
PSO	4.1322	0.0000	0.2000	0.6099	0.4267	428.1139	449.2315	40.6569
HS	4.1197	0.0000	0.2000	0.6222	0.4160	428.2851	429.2780	0.6148
FA	4.1292	0.0000	0.2000	0.6145	0.4266	428.1238	428.1696	0.0294
ABC	4.1315	0.0000	0.2000	0.6135	0.4299	428.1452	431.0378	3.5220
TLBO	4.1323	0.0000	0.2000	0.6099	0.4267	428.1139	428.1139	5.00e-07
FPA	4.1323	0.0000	0.2000	0.6099	0.4267	428.1139	429.2931	2.1345
GWO	4.0584	0.9320	0.2000	0.6012	0.3800	435.1009	448.5719	9.1413
JA	4.1323	0.0000	0.2000	0.6099	0.4267	428.1139	428.1139	1.20e-07

Optimum tasarımlar genelde 0 değerinde  $X_2$  değişkenine sahiptir. Tasarım sabitlerine göre optimum tasarımda ön ampatman gerekli değildir. Yalnızca GA ve GWO sonuçları  $X_2$  için sıfırdan farklı küçük bir değere sahiptir, ancak bu algoritmalar en iyi optimum sonucu bulmada etkili değildir. Minimum maliyet değeri olarak en iyi sonuç DE, PSO, FPA, TLBO ve JA ile sağlanabilir. Ancak en etkilileri birinci olarak JA ve ikinci olarak ise TLBO algoritmalarıdır. Her ikisi de küçük standart sapma değerine sahiptir. Optimizasyon sonuçlarının kararlılığı için bu iki yöntem en etkili ve kullanışlı yöntemler olabilir. Özellikle DE ve PSO’ya ait olan standart sapma değeri oldukça büyüktür ve her analizde optimum değerlerin değişmesine neden olabilir. Bu nedenle DE ve PSO tutarlı değildir ve bahsedilen iki yeni nesil algoritma bu yapı modeli için etkin ve kararlı kabul edilebilir.

**Tablo 2. Tasarım Sabitleri ve Tasarım Değişkenleri Limitleri (Yücel vd., 2021) (devamı)**

Tanım	Sembol	Birim	Değer
Taban zemin kohezyon	$c_B$	kPa	0
Zemin gerilme kapasitesi	$q_u$	kN/m <sup>3</sup>	300
Kayma güvenlik katsayısı	$SF_{S,design}$	-	1.5
Devrilme güvenlik katsayısı	$SF_{O,design}$	-	1.5
Zemin güvenlik katsayısı	$SF_{B,design}$	-	1.0
Topuk/ arka taban genişliği	$X_1$	m	0-10
Ayak/ ön taban genişliği	$X_2$	m	0-3
Gövde üst kalınlığı	$X_3$	m	0.2-3
Gövde alt kalınlığı	$X_4$	m	0.3-3
Taban kalınlığı	$X_5$	m	0.3-3

Tablo 3’te Yücel vd. tarafından (2021) hesaplanmış olan farklı algoritma sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlar 30 kez çalıştırılan optimizasyon süreci için tekrar edilmiş ve değerlendirilmiştir. Tabloda yer alan yöntemler genetik algoritma (GA) (Goldberg, 1989; Holland, 1975), diferansiyel evrim (DE) (Storn & Price, 1997), parçacık sürü optimizasyonu (PSO) (Kennedy & Eberhart, 1995), armoni arama (HS) (Geem vd., 2001), yapay arı kolonisi (ABC) (Karaboğa, 2005), ateş böceği algoritması (FA) (Yang, 2009), öğretme-öğrenme- tabanlı optimizasyon (Rao vd., 2011), çiçek tozlaşma algoritması (FPA) (Yang, 2012), bozkurt optimizasyonu (GWO) (Mirjalili vd., 2014) ve Jaya algoritmasıdır (JA) (Rao, 2016).

**Çıkar Çatışması:** Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

**Hakem Değerlendirmesi:** Dış bağımsız.

**Peer-review:** Externally peer-reviewed.

**Declaration of Interests:** The authors declare that they have no competing interest.

## Kaynaklar

- ACI-318. (2011). *Building code requirements for structural concrete and commentary*, metric version, American Concrete Institute.
- Alshawi, F. A. N., Mohammed, A. I., & Farid, B. J. (1988). Optimum design of tied-back retaining walls. *Structural Engineer*, 66(6), 97-105.

- Bekdaş, G., Nigdeli, S. M., Temur, R., & Kayabekir, A. E. (2016). Restricted optimum design of reinforced concrete retaining walls. *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 1, 326-332.
- Camp, C. V., & Akin, A. (2011). Design of retaining walls using big bang–big crunch optimization. *Journal of Structural Engineering*, 138(3), 438-448. [\[Crossref\]](#)
- Ceranic, B., Fryer, C., & Baines, R. W. (2001). An application of simulated annealing to the optimum design of reinforced concrete retaining structures. *Computers & Structures*, 79(17), 1569-1581. [\[Crossref\]](#)
- Chau, K. W., & Albermani, F. (2003). Knowledge-based system on optimum design of liquid retaining structures with genetic algorithms. *Journal of Structural Engineering*, 129(10), 1312-1321. [\[Crossref\]](#)
- Dembicki, E., & Chi, T. (1989). System analysis in calculation of cantilever retaining walls. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 13(6), 599-610. [\[Crossref\]](#)
- Geem, Z. W., Kim, J. H., & Loganathan, G. V. (2001). A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *Simulation*, 76(2), 60-68. [\[Crossref\]](#)
- Goldberg, D. E. (1989). Genetic algorithms in search. Optimization and machine learning. Addison Wesley.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press.
- Karaboğa, D. (2005). *An idea based on honeybee swarm for numerical optimization* (Vol. 200, pp. 1-10), Technical Report TR06, Department of Computer Engineering, Engineering Faculty, Erciyes University, Turkey.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. C. (1995). *Particle swarm optimization*. In: Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks No. IV, Perth Australia; November 27 - December 1. 1942-1948.
- Keskar, A. V., & Adidam, S. R. (1989). Minimum cost design of a cantilever retaining wall. *Indian Concrete Journal*, 63(8), 401-405.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S.M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61. [\[Crossref\]](#)
- Pochtman, Y. M., Zhmuro, O. V., & Landa, M. S. (1988). Design of an optimal retaining wall with anchorage. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 25(5), 508-510. [\[Crossref\]](#)
- Rao, R. (2016). Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7(1), 19-34. [\[Crossref\]](#)
- Rao, R. V., Savsani, V. J., & Vakharia, D. P. (2011). Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer-Aided Design*, 43(3), 303-315. [\[Crossref\]](#)
- Rankine, W. (1857) On the stability of loose earth, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 147. [\[Crossref\]](#)
- Rhomberg, E. J., & Street, W. M. (1981). Optimal design of retaining walls. *Journal of the Structural Division*, 107(5), 992-1002. [\[Crossref\]](#)
- Storn, R., & Price, K. (1997). Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341-359. [\[Crossref\]](#)
- Temur, R., & Bekdaş, G. (2016). Teaching learning-based optimization for design of cantilever retaining walls. *Structural Engineering and Mechanics*, 57(4), 763-783. [\[Crossref\]](#)
- Yang, X. S. (2009). *Firefly algorithms for multimodal optimization*. In Stochastic algorithms: foundations and applications. Springer Berlin Heidelberg. 169-178. [\[Crossref\]](#)
- Yang, X. S. (2012). *Flower pollination algorithm for global optimization*. International Conference on Unconventional Computing and Natural Computation, September Heidelberg-Berlin, Springer, 240-249. [\[Crossref\]](#)
- Yepes, V., Alcalá, J., Perea, C., & González-Vidosa, F. (2008). A parametric study of optimum earth-retaining walls by simulated annealing. *Engineering Structures*, 30(3), 821-830. [\[Crossref\]](#)
- Yücel, M., Kayabekir, A. E., Bekdaş, G., Nigdeli, S. M., Kim, S., & Geem, Z. W. (2021). Adaptive-hybrid harmony search algorithm for multi-constrained optimum eco-design of reinforced concrete retaining walls. *Sustainability*, 13(4), 1639. [\[Crossref\]](#)



