



AYRIK PSO ALGORİTMASI İLE KONSOL DÖŞEMELERİN GÜVENİLİRLİK TABANLI KESİT OPTİMİZASYONU

Mehmet Kevser DERDİMAN*

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Ayrık optimizasyon,
PSO algoritması,
Konsol döşeme,
Konsol döşeme sehimi.*

Öz

Günümüzün gelişen bilgisayar teknolojileri ile kullanımı ve araştırması en çok artan konuların başında optimizasyon gelmektedir. Parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritması ise uzun yıllardır üzerinde araştırmalar yapılmış ve geçerliliği kabul görmüş popülasyon tabanlı algoritmalar arasında yer almaktadır. Konsol döşemelerde döşemenin sehim sınırlarını aşmadan TS500 taşıma gücü kriterlerini sağlayacak çok sayıda farklı çözümü mevcuttur. Bu çözümler arasında en faydalı ve ekonomik olanın seçilmesi önemlidir. Eğer optimal tasarıma ilişkin bir kriter ortaya konulursa, bu tasarımcı için önemli bir yol gösterici olacaktır. Bu çalışmada sıklıkla sehim sorunları yaşanan konsol döşemelerin güvenilirlik tabanlı ayrık optimizasyonu yapılarak konsol boyuna, yüküne ve beton sınıfına bağlı optimal kesit yüksekliği belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla ayrık PSO algoritması tasarlanarak, TS500 sınır şartları ile TS500 taşıma gücü yöntemi ve deplasman kriterleri dikkate alınarak farklı beton dayanımları altında çözüm uzayı içinden optimal çözüm kümesi araştırılmıştır. Farklı konsol boyu ve beton sınıflarına göre elde edilen çok sayıda çözümlerden polinom tabanlı regresyon ile optimal kesit yüksekliğini hesaplayan bağıntılar geliştirilmiştir.

RELIABILITY-BASED CROSS-SECTION OPTIMIZATION OF CANTILEVER SLABS USING DISCRETE PSO ALGORITHM

Keywords

*Discrete optimization,
PSO algorithm,
Cantilever slab,
Cantilever slab deflection.*

Abstract

Optimization is one of the most increasing topics in today's developing computer technologies and its use and research. The particle swarm optimization (PSO) algorithm, on the other hand, is among the population-based algorithms that have been researched and accepted for many years. There are many alternative solutions that will meet the TS500 bearing capacity criteria without exceeding the deflection limits of the slabs in cantilever slabs. It is important to choose the most useful and economical among these alternative solutions. If a criterion for optimal design is put forward, this will be an important guide for the designer. In this study, it was attempted to determine the optimal cross-section height depending on the length, load and concrete class of the cantilever slabs, which often have deflection problems, by making discrete optimization based on reliability. For this purpose, the discrete PSO algorithm was designed and the optimal solution set was investigated within the solution space under different concrete strengths, taking into account the TS500's boundary conditions, ultimate limit state method and displacement criteria. From numerous analyses obtained according to different cantilever lengths and concrete classes, correlations have been developed that calculate the optimal cross-sectional height by polynomial-based regression.

Alıntı / Cite

Derdiman, M.K., (2022). Ayrık PSO Algoritması ile Konsol Döşemelerin Güvenilirlik Tabanlı Kesit Optimizasyonu, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(3), 987-999.

* İlgili yazar / Corresponding author: mehmetderdیمان@isparta.edu.tr, +90-246-214-6781

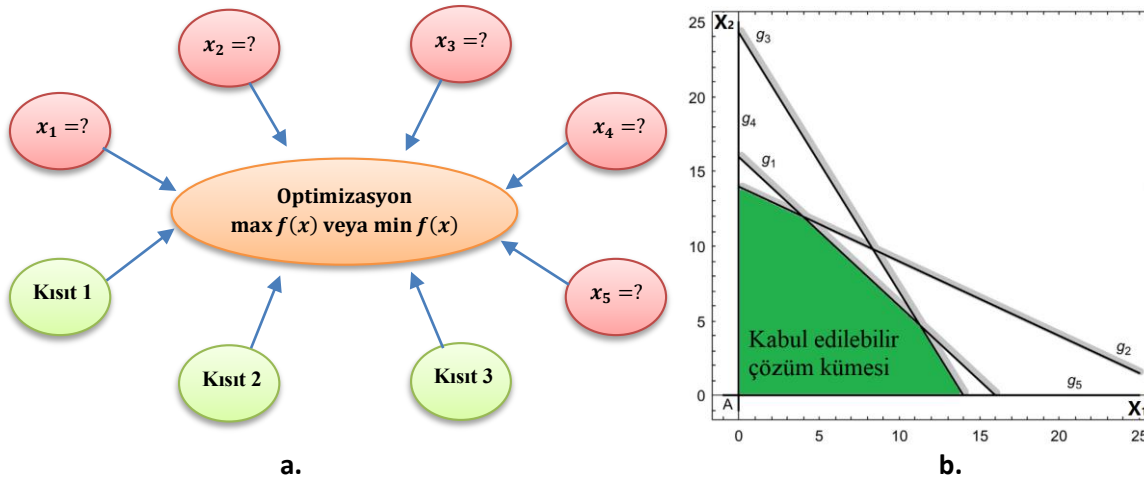
Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
M.K. Derdiman, 0000-0003-2359-3120	Başvuru Tarihi / Submission Date	15.06.2021
	Revizyon Tarihi / Revision Date	13.01.2022
	Kabul Tarihi / Accepted Date	07.04.2022
	Yayın Tarihi / Published Date	30.09.2022

1. Giriş (Introduction)

Optimizasyon, her türlü üretim, mühendislik tasarımı, bilgisayar bilimi, ekonomi, yönetim vb. gibi çeşitli alanlarda uygulanabilir. İnşaat mühendisliğindeki optimizasyon problemleri betonarme, ahşap ve çelik yapıların tasarımı, yol ve köprü tasarımı, su yapılarının tasarımı, istinat duvarlarının tasarımı vb. gibi bir çok konuyu kapsamaktadır.

Optimizasyonun amacı, kalite, kar ve verimliliği en üst düzeye çıkarmak ve/veya maliyeti, kullanılan kaynakları en aza indirmek olabilir. Tüm optimizasyon problemleri mümkün olan en iyi çıktıyı elde etmek için belirlenmesi gereken değişkenlere sahiptir. Doğada çözülmesi gereken sorunlar genellikle karmaşıktır ve optimizasyon probleminin değişkenleri birçok çelişkili gereksinim ve ilişkilere sahiptir (Vasuki, 2020). Bu çelişkili duruma deprem mühendisliğinde sıkça karşılaşılan artan rijitliğin daha fazla deprem kuvveti talebi ile karşılaşması veya betonarme yapıların yapısal çözümlemesinde artan kesit boyutlarının yapı ağırlığını artırarak daha fazla dayanım talebinin ortaya çıkması gibi örnekler verilebilir.

Optimizasyon problemi, en uygun çözümün elde edilmesi için sağlanması gereken kısıtlamalara sahip olabilir. Kısıtlamalar şunlar olabilir: a. İlgili değişkenin tamsayı olma zorunluluğu (örneğin optimum 13.75 cm döşeme kalınlığı pratikte uygulanamaz 14 cm olmalıdır, veya donatı aralığı cm cinsinden tamsayı olmalıdır vb. gibi), b. Başka bir değişken ile orantılı olma zorunluluğu (örneğin donatı kesit alanı ile döşeme kalınlığı arasındaki koşullar), c. Üretilen ürün standardının minimum maksimum gereklilikleri (alt ve üst sınırlar), d. Tüketilen güç sınırlaması, e. Maliyet sınırlaması, f. Ağırlık sınırlaması vs. gibi olabilir. Amaçları odaklayarak, birbiri ile çelişkili de olabilen bu kısıtlar altında optimizasyon tekniğinin tasarlanması gerekir.



Şekil 1. a. Genel optimizasyon problemi (Vasuki, 2020) **b.** İki boyutlu optimizasyon probleminde kısıtların sınırladığı, kabul edilebilir çözüm kümesi örneği (Arora, 2012) (a. General optimization problem b. An example of an acceptable set of solutions limited by constraints in a two-dimensional optimization problem)

Şekil 1’de beş boyutlu ve üç kısıta sahip genel optimizasyon problemini ve iki boyutlu örnek bir optimizasyon probleminde kısıtların sınırladığı kabul edilebilir çözüm uzayı gösterilmiştir. Optimizasyon problemlerinin çözümünde iki temel yöntem mevcuttur. Birisi genellikle gradyan (iki boyutlu problemlerde türev) ilişkilerine dayanan matematiksel optimizasyondur, bazı kaynaklarda deterministik optimizasyon olarak da adlandırılmaktadır. Diğeri ise sezgisel yöntemlere dayanan stokastik optimizasyon yöntemleridir. Bu yöntemler yaygın olarak metasezgisel yöntemler olarak adlandırılır.

Optimizasyon problemini çözerken matematiksel yöntemlerin kullanılması çeşitli zorluklarla birlikte gelir. Bu genellikle eldeki problemin doğasından kaynaklanır. Örneğin, çok sayıda yerel optimal çözüm içeren problemler, süreksiz problemler, doğrusal olmayan kısıtlamalara sahip problemler bu kapsam dahilindedir. Bu problemler genellikle büyük “dalgalı” bir arama alanına sahiptir. Bu nedenle, matematiksel optimizasyon teknikleri olası tüm aday çözümleri bulamayabilir (Okwu ve Tartibu, 2021).

Deneme yanılma, geçmişte çoğu problem çözme tekniğinde kullanılmıştır, bu genellikle sezgisel yöntem olarak kabul edilir. Metasezgisel yöntemler ise yeterince iyi bir çözüme ulaşabilen üst düzey bir sezgisel teknik olarak adlandırılır.

Evrimsel algoritmalar ve doğadan ilham alan metasezgisel algoritmalar hakkındaki literatür hızla genişlemektedir. Bu algoritmaların çoğu, biyolojik veya doğal sistemlerin evrimsel özelliklerinden ilham almıştır (Yang, 2019). Metasezgisel yöntemler bir takım doğa olaylarından esinlenerek geliştirilmiş olmasından dolayı "doğa esinli optimizasyon" teknikleri olarak da adlandırılır. Bu algoritmalar son derece etkilidir ve optimal tasarım için yüksek performansa sahiptirler. Bu yöntemler, herhangi bir problem çözüm uzayında global optimum çözümü bir hesap ile tespit edemez. Bunun nedeni, metasezgisel yöntemlerinin çoğunun stokastik çözüm üretmesidir, bu da elde edilen çözümün bir tür üretilen rastgele değişkenlere büyük ölçüde bağlı olduğu anlamına gelir. Bu yöntemler, kombinatoriyal optimizasyonda, çok az hesaplama yaparak veya hiç hesaplama yapmadan, geniş bir aralıktaki çözüm kümesindeki en iyileri bulabilirler (Okwu ve Tartibu, 2021). Örneğin tek bir değişken için çözümün virgülden sonra iki basamaklı hassasiyet ile arandığı bir durum da 8 cm ile 30 cm arasındaki döşeme kalınlığı için $(30-8)/0.01=2200$ çözüm mümkün iken, ayrık optimizasyonda cm olarak tam sayı ile çalışıldığında $30-8=22$ çözüm mevcuttur. Bu da yapılacak işlem hacmini azaltmaktadır.

1.1. Ayrık Optimizasyon (Discrete Optimization)

Optimizasyon algoritmaları, değişkenlerinin sürekli değerlerinde arama yapmak için tasarlanmışlardır. Bununla birlikte, süreksiz değişken değerleri ile çalışmak, problemi sürekli optimizasyon problemi olma durumundan çıkartır. Örneğin giriş içerisinde kullanılacak donatı çapının ancak belirli değerlerde olması durumu, donatının değişken olarak dahil olduğu problemi ayrık optimizasyon problemine dönüştürür. Kullanılacak beton sınıfının hesaplarda ele alınacak dayanım değerleri için de aynı durum söz konusudur. Ve mühendislik tasarımlarının çoğunda problemler karşımıza ayrık optimizasyon problemi olarak çıkar. Ayrık optimizasyon durumunda çoğunlukla kombinatorik çözüm kümesi karşımıza çıkacaktır, örneğin etriye çapı için $\phi 8, \phi 10, \dots$ gibi. Bu da problem çözümünde algoritma değişikliğini gerektirmektedir.

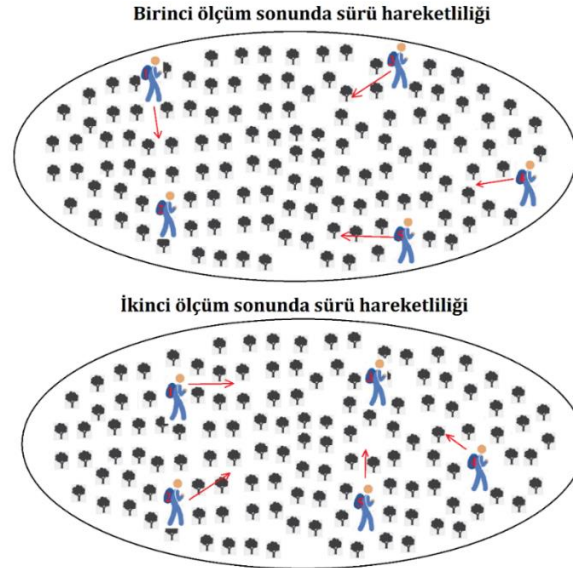
1.2. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Değişkenleri (Particle Swarm Optimization (PSO) and Variables)

PSO algoritmaları koloni sürüsü istihbarat paradigması üzerine kuruludur. Balık ve kuş sürülerinin sosyal davranışlarından esinlenerek James Kennedy ve Russell Aberhart tarafından 1995 yılında tanıtıldı (Eberhart ve Kennedy, 1995). James Kennedy ve Russell Aberhart hayvanların sosyal davranışlarını tanımlamak için bir model geliştirmek için çalışıyorlardı, ancak geliştirdikleri modelin optimizasyon testleri yapabildiğini fark ettiler ve yeni bir optimizasyon tekniğini önerdiler. PSO'daki sürünün operasyonel arama yapan akıllı bir optimizasyon sürüsü olduğu söylenebilir. PSO bilim ve mühendisliğin çeşitli alanlarında başarıyla uygulanarak çeşitli optimizasyon problemlerini çözmek için en kullanışlı ve en popüler algoritmalarından biri haline gelmiştir.

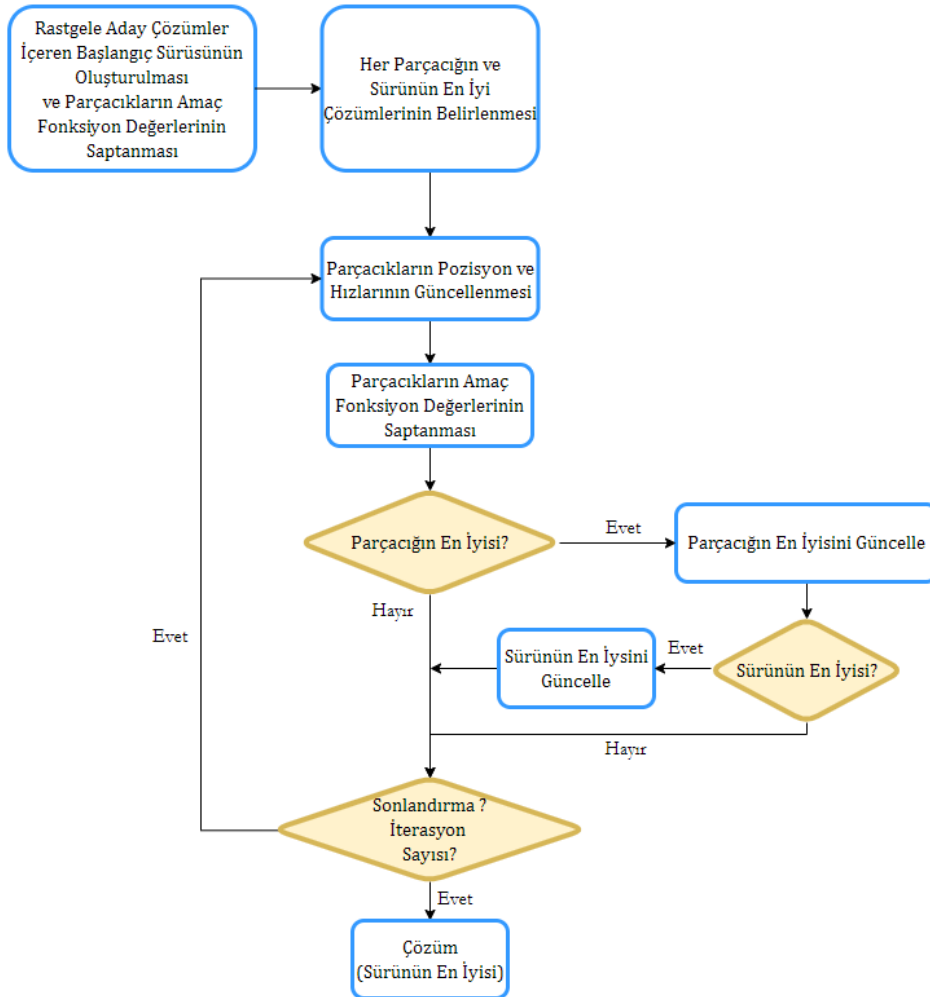
Parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO), sürekli ve ayrık optimizasyon problemlerini çözmek için popülasyona dayalı stokastik bir yaklaşımdır. Parçacık sürüsü optimizasyonunda, parçacıklar olarak adlandırılan ve yazılımda vektör ile gösterilen aday çözüm değerleri, bir optimizasyon probleminin arama alanı içinde değişir. Her parçacık, kuş akısının davranışsal modellerinden esinlenen kurallara göre hızını değiştirerek arama alanında daha iyi pozisyonlar arar (Dorigo vd., 2008).

PSO çok basit ancak güçlü bir algoritmadır. PSO'da çözümü bulmak adına arama yapan her bir bireye parçacık, parçacıkların bulunduğu popülasyona ise sürü adı verilir. Bireylerin çözümleri amaç fonksiyonu ile belirlenir. Amaç (uygunluk) fonksiyon değeri en uygun olan sürünün en iyisi olarak adlandırılır. Parçacıkların her konum için amaç fonksiyonu hesaplanırken en uygun değeri de parçacık bilgisi içinde saklanır ve bu da parçacığın en iyisi olarak adlandırılır. Parçacıklar yeni yön ve hızlarını bu bilgileri kullanarak belirler.

Şekil 2'de sürü ve parçacık hareketliliğini gösteren örnek, Şekil 3'de de PSO algoritmasının akış şeması verilmiştir. Parçacık hareketliliği bir orman analogisi ile anlatılabilir. Bu örnekte bir orman bölgesine yayılmış araştırmacılar tarafından orman içindeki en yaşlı ağaç saptanmaya çalışılıyor olsun. Eğer orman yüzeyinde bir nokta orijin kabul edilerek üç boyutlu kartezyen koordinat sistemi (x ve y doğrultusu pozisyonu, z doğrultusu ağaç yaşını ifade ediyor) tanımlanırsa, ormandaki her bir ağaç çözüm kümesini, aranan en yaşlı ağaç ise maksimumun olduğu noktayı ifade edecektir. Orman yüzeyinde bu araştırmayı yapan rastgele dağılmış birey_1, birey_2, birey_3, birey_4 ve birey_5 adlı araştırmacıların (parçacıkların), devamlı ölçüm kaydı aldıklarını varsayalım. Birinci ölçüm sonunda en iyi değeri birey_2 tarafından alınmış ise diğer parçacıklar yön ve hızlarını birey_2'ye yönlendirecek ve en iyi değerden uzaklığı oranında iyiye yaklaşma hızına sahip olacaktır.



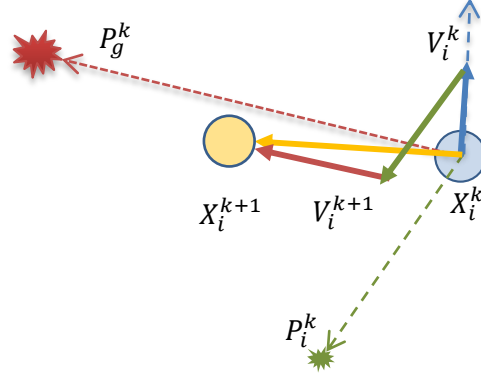
Şekil 2. Sürü-Parçacık hareketliliğine örnek (Example of swarm-particle mobility)



Şekil 3. Parçacık sürü optimizasyonu algoritması akış şeması (Flowchart of particle swarm optimization algorithm)

Bu hareketlilik sonrası yeni pozisyondaki parçacıklar yeni ölçümler ile kendi en iyi değerini ve sürünün en iyi değerini değerlendirerek yeni yön ve hızlara sahip olacaklardır. Bu dögüsel olarak devam ettiğinde ve yeter sayıda parçacık mevcut ise çözüm uzayını temsil eden tüm orman yüzeyi araştırılmış olacaktır. Burada araştırmacı sayısı algortmada popülasyon sayısını (nüfusu), her bir araştırmacı parçacığı, her ölçüm ve değerlendirme iterasyon içi işlemleri, ormandaki ağaçlar çözüm uzayını ve en yaşlı ağaç ise aranan çözümü ifade etmektedir.

Parçacıklar arama alanı boyunca hareket eder ve konumları, her yinelemede tek tek parçacıkların en iyi konumlarına göre güncellenir. Şekil 4’de gösterilen konum ve hız güncellemesinin hesabı Denklem (1),(2)’de verilmiştir (Li ve Liu, 2011). Belirli bir sayıda (100-1000) döngü sonrası artık en iyi parçacık vektörünün (çözüm kümesi) değişmemesi döngünün durdurulmasını gerektirir. Prathabrao vd. (2017) yaptıkları araştırmada bu döngü sayısının 100-1000 arasında olduğunu belirtmişlerdir. Sheikhalishahi vd. (2013) de yaptıkları araştırmada değişen parçacık sayısının, döngü (iterasyon) sayısını etkilediğini vurgulamaktadırlar.



Şekil 4. Parçacığın k ve k+1’nci döngüdeki pozisyon ve hızının vektörel olarak hesaplanması ve güncellenmesi (Calculation and update of the position and velocity of the particle in the k and k+1st cycle)

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

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (2)$$

Burada X_i^k ve V_i^k parçacığın geçerli pozisyon ve hızını, X_i^{k+1} ve V_i^{k+1} parçacığın güncellenmiş pozisyon ve hızını, ω atalet katsayısını, c_1 ve c_2 parçacığın kendi en iyisine sürünün en iyisine doğru ivme değerini, r_1 ve r_2 birden küçük sıfırdan büyük rastgele sayı değerini, P_i^k ve P_g^k ise parçacık ve sürüye ait en iyi pozisyon değerlerini ifade etmektedir. Algoritma döngüsü içinde atalet katsayısı ω , bir sönüm katsayısı ω_{damp} ile azaltılmaktadır.

PSO algoritması ω atalet katsayısı, ω_{damp} sönüm katsayısı, c_1 ve c_2 ivme değerleri, r_1 ve r_2 rastgele sayı değerleri, popülasyon sayısı ve iterasyon sayısı olmak üzere çok sayıda parametreye sahiptir.

Doğadan ilham alan algoritmaların başarısına ve popüleritesine rağmen, hala daha fazla araştırma gerektiren bazı sorunlar mevcuttur. Bu tür algoritmaları analiz etmek için titiz bir matematiksel çerçevenin bulunmamasına ek olarak, önemli bir araştırma alanı parametre ayarlama ve parametre kontrolüdür. Hemen hemen tüm algoritmalar algoritmaya bağlı parametrelere sahip olduğundan, ayarları söz konusu algoritmanın performansını büyük ölçüde etkileyecektir. Bununla birlikte, bir algoritmanın verimli bir şekilde nasıl ayarlanacağı ve parametrelerinin nasıl değiştirileceği/kontrol edileceği hala çözülmemiştir (Yang, 2018).

1.3. Güvenilirlik Tabanlı Optimizasyon (Reliability-Based Optimization)

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

Bir yapıda aranan en önemli özellik, yapının öngörülen yüklerin olası en elverişsiz etkiye durumunda geçmeden ayakta kalabilmesi ve servis yükleri altında yapı elemanlarında aşırı deformasyon, çatlama ve titreşim oluşmamasıdır (Ersoy vd., 2019). Bu temel güvenilirlik ilkesi olarak adlandırılabilir. Bu ilke çerçevesinde dayanımın en az yük etkisi eşit, sehim miktarının ve çatlak genişliğinin ise yapı kullanım amacı doğrultusunda belirlenecek kısıtlar içinde kalması şartının sağlanmasını gerektirir. Dayanım hesaplamasındaki en önemli değişkenler malzemelere ait mekanik özellikler olup özellikle betonarmede zamana bağlı değişkenliği veya üretim aşamasındaki belirsizlikler nedeni ile deterministik olarak kesin bir değer belirlemek mümkün değildir. Yük etkisinin belirlenmesinde kullanılacak olan yüklerin de, sabit tek bir değer alınmasının olanaksızdır. Dolayısıyla hem malzeme özelliklerine hem yük değerlerine ilişkin saptamalar ancak olasılıksal yaklaşımlarla sağlanabilir.

TS498 (TSE, 1997) geçmiş 50 yıllık veri birikimi ile istatistiksel değerlendirmeler yaparak yük değerler için sınır şartlarını ve TS500 (TSE, 2000) de dayanım ve malzeme şartları ve bunlara ait güvenlik katsayılarını vermiştir.

Denklem (3)’de TS500’deki “taşıma gücü sınır durumu” şartı verilmiştir. Yapı elemanlarının her birinin Denklem (4)’de belirtilen biçimde, azaltılmış malzeme dayanımları (tasarım dayanımları) kullanılarak hesaplanan taşıma

gücü değerlerinin, artırılmış tasarım yükü ile hesaplanan iç kuvvet değerlerinden hiçbir zaman küçük olmadığı kanıtlanacaktır.

$$R_d \geq Fd \quad (3)$$

Buradaki R_d : dayanım değerini ve Fd : yük etkisini göstermek üzere Denklem (4)'deki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned} R_d &= R_k/\gamma_m \\ F_d &= \gamma_Q F_Q + \gamma_G F_G \end{aligned} \quad (4)$$

Buradaki γ_m : malzeme katsayısını, γ_Q , γ_G : yük katsayılarını, R_k : karakteristik dayanımı ve F_Q , F_G : karakteristik yük etkisini ifade etmektedir.

Optimizasyonda bu şartlar bir belirleyici bir kısıt olarak tanımlanması durumunda güvenilirlik esaslı bir optimal tasarım gerçekleştirilmiş olacaktır. Güvenilirlik esaslı bir optimizasyon için bu Denklem (5)'deki şekilde matematiksel olarak ifade edilebilir.

$$\text{Güvenilirlik Kısıtları: } \begin{cases} (g_R)_i(x) \leq (g_F^*)_i \\ i = 1, 2, \dots, j \end{cases} \quad (5)$$

Kullanım yükü etkisindeki yapıda aşırı yer değiştirme veya sehim olmamalıdır. Kullanım yükü, servis yükü veya işletme yükü şeklinde adlandırılan yükler sabit ve hareketli yüklerdir. Deprem ve rüzgar yükleri kullanım yükü değildir.

Çünkü deprem ve rüzgar yükü yapının kullanım amacı dışındadır, deprem sırasında yapı zaten kullanılamaz. Aşırı sehim taşıyıcı olmayan elemanlarda hasara neden olur ve eğer varsa, hassas makinelerin işlevini bozar.

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

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

Konsol döşemeler genellikle bir doğrultuda çalışan döşemeler türündedir. Bunlar statik bakımdan belirli olduklarından mesnet kesitlerinde yapılacak bir yanlışlık hemen büyük çatlaklar veya göçme olarak ortaya çıkar (Celep, 2020).

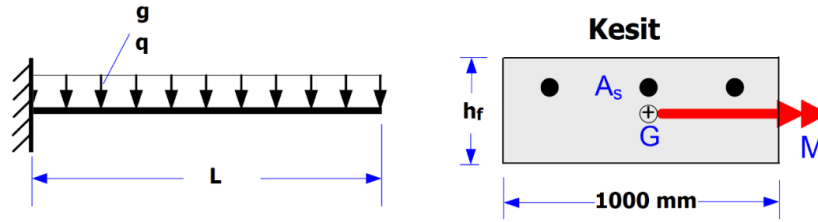
Bu çalışmada sıklıkla sehim sorunları yaşanan konsol döşemelerin güvenilirlik tabanlı ayırık optimizasyonu yapılarak konsol açıklığına, yüküne ve beton sınıfına bağlı optimal kesit yüksekliği belirlenmeye çalışılmıştır.

Metasezgisel algoritmaların bir çoğu konsol döşemelerin optimizasyonu problemine uygulanabilir. Fakat PSO'nun yaygınlığı (Li vd., 2019; Yang ve Karamanoglu, 2020), geleneksel arama algoritmalarından daha iyi olduğu ve birçok problem türü için genetik algoritmalarından daha verimli (Yang, 2014) olması nedeniyle bu çalışmada da, PSO algoritması modifiye edilerek ayırık parçacık sürü optimizasyon algoritması tasarlanmış, TS500 sınır şartları ile TS500 taşıma gücü yöntemi ve deplasman kriterleri dikkate alınarak farklı beton dayanımları altında kombinatorik çözüm uzayı içinden optimal çözüm kümesi (kesit değerleri) araştırılmıştır. Farklı beton sınıfları için konsol boylarına bağlı olarak çok sayıdan çözümlenmeden elde edilen polinom tabanlı regresyon ile optimum kesit yüksekliğini hesaplayan bağıntılar geliştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

Şekil 5'de optimizasyonu çalışılan konsol döşeme sisteminin yükleme durumu ve kesiti gösterilmiştir.

Optimizasyona ait PSO dahil edilerek hazırlanan tüm algoritmik kodlamalar (PSO'ya ilave olarak döşemeye ait moment ve kesme kuvveti tasarım yükü etkisi, eğilme ve kesme taşıma gücü betonarme hesabı, sehim hesabı, donatı oranı hesabı ve yönetmelikteki tüm kısıtların ceza (penaltı) fonksiyonuna dönüştürme işlemleri ve amaç fonksiyonunun kodlanması) Python 3.8 programlama dili (Python Software Foundation, 2021) ve NumPy ve Pandas modülleri (NumFOCUS, 2021) kullanılarak yazılmıştır.



Şekil 5. Konsol döşeme ve bir metre genişlik için kesiti (Cantilever slab and cross section for one meter width)

Optimizasyon 3 boyutlu olarak tasarlanmıştır. Dolayısıyla değişken sayısı $n = 3$ 'tür ve bu değişkenler, döşeme kalınlığı x_1 , mesnetteki donatı çapı x_2 ve mesnetteki donatı aralığı x_3 şeklinde alınmıştır. Ayrıca tüm döşemelerde dağıtma donatısı $\phi 8/300$ bulunduğu ve optimizasyonu etkilemediği için değişken olarak tanımlanmamıştır.

Algoritma, parçacıkların her biri, döşeme kalınlığı x_1 , mesnetteki donatı çapı x_2 ve mesnetteki donatı aralığı x_3 değişken bilgilerini rastgele değerler olarak başlamakta, devamında döngü içerisinde her parçacık için moment ve kesme tasarım kuvvetleri, moment ve kesme taşıma gücü, konsol deplasmanı ve sınır deplasman değeri, kısıtların karşılaştırması ve buna bağlı ceza fonksiyonunun belirlenmesi sonucunda amaç fonksiyon hesaplanmaktadır. Devamında parçacıkların ve yürütülen tüm döngülerin en iyi değerleri belirlenmekte ve tüm sürünün bu değerlere yaklaşacak şekilde içerikleri değiştirilmektedir. Sürü her döngüde hareket ettikçe parçacıkların değerleri Şekil 3'de verilen algoritma akış şeması ve Denklem (1) ve (2) ye göre değişecek ve döngüler tamamlandığında optimal değerlere ulaşılacaktır.

Çeşitli çalışmalarda popülasyondaki parçacık sayısının 20 ile 60 arasında olması optimal çözüm için uygun olduğu gösterilmiştir (Karaboğa, 2014; Shi ve Eberhart, 1998) fakat Piotrowski vd. (2020) araştırmalarında gerçek dünya problemlerinde elde edilen sonuçlar için sürünün 300-1000 parçacıktan oluştuğunda en iyi sonuçların elde edildiğini araştırmalarında vurgulamaktadırlar. Bu çalışmada ise, çok sayıda deneme çözümü sonucunda düşük (<100) popülasyon boyutu seçilmesi durumunda bazen yerel çözümlere takıldığı görülmüş dolayısıyla popülasyon boyutu 200 alınmıştır.

Döngü (iterasyon) sayısı 400 seçilmiş ve döngüyü durdurma kriteri eklenmemiştir. Atalet katsayısının ve sönüm katsayısı için Karaboğa (2014), çalışmasında 0.9 dan 0.4 e doğru doğrusal azalmanın algoritma performansını iyileştirdiğini belirtmektedir (Karaboğa, 2014; Shi ve Eberhart, 1998) dolayısıyla ω atalet katsayısı 0.9, ω_{damp} sönüm katsayısı 0.998 seçilmiştir. Böylece atalet katsayısı her döngüde azalarak döngü sonunda 0.4 civarlarına gelmektedir. Aynı çalışmada c_1 ve c_2 ivme değerlerinin 1.494 alınmasının uygun olduğundan da bahsedilmektedir (Karaboğa, 2014), dolayısıyla bu çalışmada c_1 ve c_2 ivme değerleri 1.494 alınmıştır, r_1 ve r_2 rastgele sayı değerleri ise 0-1 arası üniform dağılımla seçilmiştir.

Program bir konsol açıklığı ve bir beton sınıfı için $400 \times 200 + 200$ (başlangıç pop) = 80200 kez, farklı konsol boyu ve beton sınıfı dahil $26 \times 6 \times 80200 = 12\,511\,200$ kez döşemeye ait moment ve kesme kuvveti tasarım yükü etkisi, eğilme ve kesme taşıma gücü betonarme hesabı, sehim hesabı, donatı oranı hesabı, yönetmelikteki tüm kısıtların ceza (penaltı) fonksiyonuna dönüştürme işlemleri ve amaç fonksiyonunun hesabı yapılmaktadır.

Modelde beton sınıfı C25/30 'dan C50/60 'a kadar olanlar alınmıştır. Betonarme çeliği ise hesaplarda sabit $f_{yk} = 420 \text{ N/mm}^2$ ve betonarme çeliği için malzeme katsayısı $\gamma_{ms} = 1.15$ alınmıştır. Betonun denetimli olduğu varsayımı ile malzeme katsayısı $\gamma_{mc} = 1.5$ ile hesap yapılmıştır. Paspayı tüm modellerde $c_o = (15 + \phi/2)$ mm alınmıştır.

Hareketli yük değeri 5 kN/m^2 (TSE, 1997) ve ölü yük değeri döşeme plağı, 5 cm tesviye, 2 cm seramik kaplama ve 2 cm sıva yükünden oluşmaktadır. Tasarım yükü P_d , yük birleşimleri dikkate alınarak $1.4g + 1.6q$ şeklinde, sehim hesabındaki servis yükü P ise, $1.0g + 1.0q$ şeklinde hesaplanmıştır.

Konsol boyu L ise 0.5 m den başlayıp 0.1 m artım ile 3 m'ye kadar değişen değerler ile ve altı farklı beton sınıfı için toplam 156 modelin analizi gerçekleştirilmiştir.

Optimizasyona ait değişkenlerin alt ve üst sınırları Tablo 1 'de verilmiştir.

Tablo 1. Optimizasyona ait değişkenlerin alt ve üst sınırları (Lower and upper limits of optimization variables)

Değişkenler	Alt Sınır	Üst Sınır	Değişim Aralığı
Döşeme Kalınlığı (h_f) : x_1 (mm)	80	400	10
Mesnetteki donatı aralığı: x_2 (mm)	50	200	10
Mesnetteki donatı çapı: x_3 (mm)	8	16	2

Parçacıkların elde ettiği kesit tasarım bilgilerinden sehim, moment ve kesme taşıma gücü hesabı TS500 'ün (TSE, 2000) taşıma gücü yöntem ve varsayımları ile yapılmıştır. Bu varsayımlar şunlardır:

- Donatı beton ile tam kenetlenmiştir,
- Betonun çekme dayanımı sıfır alınmaktadır.
- Birim şekil değiştirme dağılımı doğrusaldır.
- Betonarme çeliğinin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi elasto-plastiktir ve Hooke kanununun geçerli olduğu bölgede elastisite modülü $E_s=200$ GPa'dır.
- Taşıma gücüne erişildiğinde basınç bölgesinin en çok zorlanan beton lifindeki maksimum birim kısalma 0.003 dür.
- Beton basınç bloğundaki gerilme dağılımı TS500:2000 Madde 7.1 de tanımlanan eşdeğer dikdörtgen basınç bloğu modelindeki gibidir.

İlgili kısıtlar ve deplasmanlar da yine TS500'de verilen koşullar çerçevesinde tanımlanmıştır. Örneğin konsol döşemede mesnet donatısı aralığı 200 mm'yi geçemez (Adem Doğanün, 2018; Celep, 2020; TSE, 2000) kuralındaki 200 mm burada üst sınır olarak uygulanmıştır.

$$Optimizasyon: \begin{cases} \min_{x_i \in [x_i^l, x_i^u]} f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{Güvenlilik Kısıtları: } \begin{cases} (g_R)_m(x) \leq (g_F^*)_m \\ m = 1, 2, \dots, l \end{cases} \\ \text{Diğer Kısıtlar: } \begin{cases} g_j(x) \leq g_j^* \\ j = 1, 2, \dots, k \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

Optimizasyon probleminin genel matematiksel ifadesi Denklem (6)'da verilmiştir.

Minimum olması istenen amaç fonksiyonunun ($f(x_1, x_2, \dots, x_n)$) doğru ifade edilmesi, uygunluk düzeyi yüksek çözümlerin verimli bir şekilde seçilmesini sağlayacaktır. Amaç fonksiyonunun doğru şekilde ifade edilmemesi, yanlış veya anlamsız çözümlere neden olabilir (Yang, 2014). Bu çalışmada amaç fonksiyonu ağırlığı değil, fiyatı minimize edecek şekilde tasarlanmıştır. Tablo 2'de beton ve betonarme çeliğinin 2021 yılına ait fabrika çıkış birim fiyatları verilmiştir. Beton ve betonarme çeliğinin ikisi de m^3 birim fiyatı dikkate alınarak, döşemenin birim genişlik için amaç fonksiyonu Denklem (7)'deki gibidir.

$$f(x_1, \dots, x_5) = \left(\text{Çel. Fiyat} * \left(\frac{1}{x_3} * \frac{x_2^2 \pi}{4} \right) * 10^{-3} \right) + \left(\text{Bet. Fiyatı} * \frac{x_1}{10^6} \right) + \text{pen_func}(x, g(x)) \quad (7)$$

Amaç fonksiyonun değişkenleri, kısıtlara uymaması durumunda ceza fonksiyonu (penalty fonksiyonu: $\text{pen_func}(x, g(x))$) uygulaması yapılmıştır. Ceza fonksiyonu içinde kısıtları aşan değerler, aştıkları farkın 10 katı (eğer oran veya sehim ise 1000 katı) alınarak ceza puanına dönüştürülmüş ve toplam ceza amaç fonksiyonuna eklenmiştir.

Tablo 2. 2021 yılına ait birim fiyatlar (Unit prices for the year 2021) (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, n.d.).

C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60	B420C	B420C
₺/m ³	₺/m ³	₺/m ³	₺/m ³	₺/m ³	₺/m ³	₺/kg	₺/m ³
205	213	228	241	246	253	4.79	37601.5

Toplam 9 kısıt tanımlanmıştır, bunlar sırasıyla minimum döşeme kalınlığı kısıtlaması, maksimum ve minimum donatı oranı kısıtlamaları, kesme kapasitesinin tasarım kesme kuvvetinden büyük eşit olma kısıtlaması, minimum dağıtma donatısı aralığı kısıtlaması, deplasman miktarı kısıtlaması ve taşıma gücünün yük etkisinden büyük eşit olma kısıtlamasıdır ve bunlar Denklem (8)-(13), **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**(20)'de verilmiştir.

$$g_1(x) = h_{fmin} - x_1 \leq 0 \quad (8)$$

$$g_2(x) = \frac{\left(\frac{1000}{x_3} * \frac{x_2^2 \pi}{4}\right)}{1000 (x_1 - c_o)} - 0.85 \rho_b (f_{ck}) \leq 0 \quad (9)$$

$$g_3(x) = \frac{\left(\frac{1000}{x_3} * \frac{x_2^2 \pi}{4}\right)}{1000 (x_1 - c_o)} - 0.02 \leq 0 \quad (10)$$

$$g_4(x) = \rho_{min} - \frac{\left(\frac{1000}{x_3} * \frac{x_2^2 \pi}{4}\right)}{1000 (x_1 - c_o)} \leq 0 \quad (11)$$

$$g_5(x) = P_d L - 0.65 f_{ctd} 1000 (x_1 - c_o) \leq 0 \quad (12)$$

$$g_6(x) = x_3 - 200 \leq 0 \quad (13)$$

Deplasman hesabında tüm kullanım yüklerinden ($g + q$) oluşan ani sehime değeri (δ_i), Denklem (14) kullanılarak hesaplanmıştır. Ani sehime bağlı olarak da zamana bağlı sehime ($\delta_{ig}\lambda$), hesaplanmıştır (TSE, 2000).

$$\delta_i = \frac{(g + q)L^4}{8E_c I_{ef}} \quad (14)$$

$$I_{ef} = \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}}\right)^3 I_c + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}}\right)^3\right] I_{cr} \quad (15)$$

$$M_{cr} = 2.5 f_{ctd} \frac{I_c}{y} \quad (16)$$

$$\delta_t = \delta_i + \delta_{ig}\lambda \quad (17)$$

$$\lambda = \frac{\gamma_t}{1 + 50\rho'} \quad (18)$$

$$\delta_{ig} = \delta_i \frac{\sum \text{KalıcıYükler}}{\sum \text{TümYükler}} \quad (19)$$

Denklem (14) de ani sehime değeri, Denklem (15)'de efektif atalet momenti ve Denklem (16)'da kesitin çatlama momenti verilmiştir. Betonarme yapılarda sünme ve büzülme etkisi ile oluşan zamana bağlı ek sehimlerin hesabı, genel olarak TS500-Madde 3.3.4 de verilen değişkenlere göre hesaplanmalıdır, zamana bağlı sehimleri de içeren toplam sehime ise Denklem (17)'ten hesaplanır (TSE, 2000). Denklem (17) ile λ değeri yine TS500-Çizelge 13.2'den alınan kalıcı yük süre katsayısı, $\gamma_t = 2$ alınarak hesaplanmıştır. Kısıtlamadaki sınır değer ise $L/240$, TS500-Çizelge 13.3 alınmıştır. Deplasman kısıtı Denklem (20)'de verilmiştir.

$$g_7(x) = \delta_{ig}(x) - L/240 \leq 0 \quad (20)$$

Taşıma gücü kısıtlaması Denklem (21),(22)'deki gibidir.

$$M_r(x_1, x_2, x_3, f_{ck}, f_{yk}) = 0.85 f_{cd} \left(\frac{1000}{x_3} * \frac{x_2^2 \pi}{4}\right) c(x) k_1 \left(x_1 - c_o - \frac{c(x) k_1}{2}\right) \quad (21)$$

$$g_8(x) = M_d - M_r(x_1, x_2, x_3, x_4, f_{ck}, f_{yk}) \leq 0 \quad (22)$$

3. Bulgular (Research Findings)

Optimizasyon modellerinin analizi sonucunda elde edilen bulgulardan konsol boyu 1000 mm'den başlayan ve 500 mm artış ile 3000 mm'ye kadar olanlar Tablo 3.'de verilmiştir. Toplam 156 modelin yalnızca 30 adedine ait değerlendirmeye esas bulgular verilmiştir. Tablonun son sütununda da tasarım kriteri niteliğinde konsol boyunun optimal dökme kalınlığına oranı verilmiştir.

Burada konsol boyu ile beton dayanımındaki ilişki açıkça görülmektedir. Örneğin 2500 mm konsol boyu için C25 ile tasarlanırsa deplasman kısıtlamasını da sağlayacak optimal dökme kalınlığı 250 mm iken C45 ile 220 mm bulunmuştur.

Konsol boyunun optimal dökme kalınlığına oranı (L/h_f), $L = 2500 \text{ mm}$ 'ye kadar tüm beton sınıfları için 10'dan büyük bulunmuştur.

Tablo 3. Çalışma kapsamında elde edilen optimizasyon sonuçları*. (Optimization results obtained in the study).

Model No	Konsol Açık: L (mm)	f_{ck} (MPa)	Optimum h_f (mm)	Minimum h_f (mm)	Toplam Deplasman (mm)	Deplasman Sınırı: L/240 (mm)	Donatı Aralığı (mm)	Donatı Çapı	Donatı Oranı	L/ h_f
6	1000	25	90	83.3	2.41	4.17	170	8	0.0042	11.1
11	1500	25	140	125.0	4.38	6.25	180	10	0.0036	10.7
16	2000	25	190	166.7	7.80	8.33	130	10	0.0036	10.5
21	2500	25	250	208.3	10.19	10.42	100	10	0.0034	10.0
26	3000	25	320	250.0	11.58	12.50	80	10	0.0033	9.4
32	1000	30	100	83.3	1.11	4.17	200	8	0.0031	10.0
37	1500	30	130	125.0	5.50	6.25	110	8	0.0042	11.5
42	2000	30	190	166.7	5.86	8.33	130	10	0.0036	10.5
47	2500	30	240	208.3	9.96	10.42	100	10	0.0036	10.4
52	3000	30	320	250.0	8.61	12.50	120	12	0.0031	9.4
58	1000	35	90	83.3	1.42	4.17	170	8	0.0042	11.1
63	1500	35	130	125.0	4.32	6.25	170	10	0.0042	11.5
68	2000	35	180	166.7	6.60	8.33	120	10	0.0041	11.1
73	2500	35	230	208.3	10.28	10.42	140	12	0.0038	10.9
78	3000	35	310	250.0	8.18	12.50	160	14	0.0033	9.7
84	1000	40	90	83.3	1.36	4.17	180	8	0.0040	11.1
89	1500	40	130	125.0	3.48	6.25	110	8	0.0042	11.5
94	2000	40	170	166.7	7.86	8.33	120	10	0.0044	11.8
99	2500	40	230	208.3	8.27	10.42	140	12	0.0038	10.9
104	3000	40	290	250.0	10.10	12.50	200	16	0.0037	10.3
110	1000	45	90	83.3	1.31	4.17	180	8	0.0040	11.1
115	1500	45	130	125.0	2.86	6.25	170	10	0.0042	11.5
120	2000	45	170	166.7	6.49	8.33	80	8	0.0042	11.8
125	2500	45	220	208.3	9.17	10.42	180	14	0.0043	11.4
130	3000	45	280	250.0	10.44	12.50	150	14	0.0039	10.7
136	1000	50	90	83.3	1.27	4.17	180	8	0.0040	11.1
141	1500	50	130	125.0	2.42	6.25	170	10	0.0042	11.5
146	2000	50	170	166.7	5.45	8.33	80	8	0.0042	11.8
151	2500	50	220	208.3	7.69	10.42	130	12	0.0043	11.4
156	3000	50	280	250.0	8.73	12.50	150	14	0.0039	10.7

*156 modelden, konsol boyu 1000 mm den itibaren 500 ün katları tabloda verilmiştir.

Konsol boyunun optimal döşeme kalınlığına oranı (L/h_f), $L = 2500 - 3000$ mm'ye kadar olanlar ise C35 ve üzeri beton sınıfları için 10'dan büyük bulunmuştur.

Şekil 1'da "konsol boyu (L)" ile "optimum döşeme kalınlığı (h_f)" arasındaki ilişki eğrileri ve polinom tabanlı regresyon eğrileri beton sınıflarına göre ayrı ayrı verilmiştir.

$$C25/30: \quad y = 2x^2 \cdot 10^{-5} + 0.0262x + 50.016 \quad R^2 = 0.9963 \quad (23)$$

$$C30/37: \quad y = 2x^2 \cdot 10^{-5} + 0.0130x + 58.742 \quad R^2 = 0.9952 \quad (24)$$

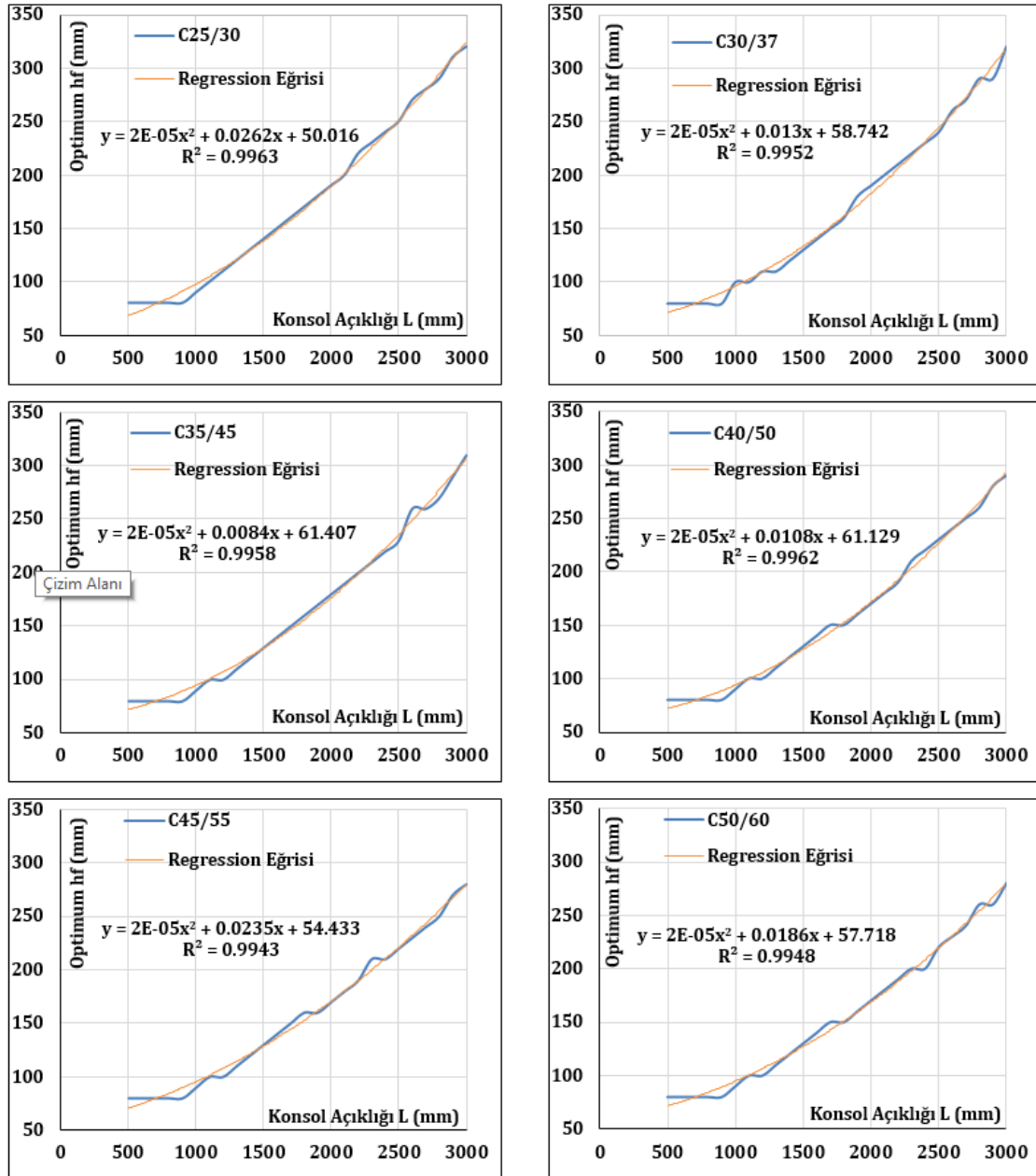
$$C35/45: \quad y = 2x^2 \cdot 10^{-5} + 0.0084x + 61.407 \quad R^2 = 0.9958 \quad (25)$$

$$C40/50: \quad y = 2x^2 \cdot 10^{-5} + 0.0108x + 61.129 \quad R^2 = 0.9962 \quad (26)$$

$$C45/55: \quad y = 2x^2 \cdot 10^{-5} + 0.0235x + 54.433 \quad R^2 = 0.9943 \quad (27)$$

$$C50/60: \quad y = 2x^2 \cdot 10^{-5} + 0.0186x + 57.718 \quad R^2 = 0.9948 \quad (28)$$

Denklem (23)-(28)'de beton sınıflarına göre polinom regresyon ile elde edilen ve optimum döşeme kalınlığını hesaplayan bağıntılar ($x = L$ ve $y = \text{optimum } h_f$) verilmiştir. Polinom regresyonu, bağımsız değişken x ile bağımlı değişken y arasındaki ilişkinin n. derece polinom olarak modellendiği bir regresyon analizidir. Tüm regresyon analizlerinde "belirleme katsayısı: R^2 " değeri tüm beton sınıflarında 0.99'dan büyük çıkmıştır.



Şekil 1. Beton sınıflarına göre “konsol boyu (L)” ile “optimum döşeme kalınlığı (hf)” arasındaki ilişki ve polinom tabanlı regresyon eğrileri (Relationship between “cantilever length (L)” and “optimum slab thickness (hf)” according to concrete classes and polynomial-based regression curves)

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada sıklıkla sehim sorunları yaşanan konsol döşemelerin güvenilirlik tabanlı ayırık optimizasyonu yapılarak konsol boyuna, yüküne ve beton sınıfına bağlı optimal kesit yüksekliği belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla PSO algoritması modifiye edilerek ayırık parçacık sürü optimizasyon algoritması tasarlanmış, TS500 sınır şartları ile TS500 taşıma gücü yöntemi ve deplasman kriterleri dikkate alınarak farklı beton dayanımları altında kombinatorik çözüm uzayı içinden optimal çözüm kümesi (kesit değerleri) araştırılmıştır.

Farklı konsol boyu ve beton sınıfları için polinom tabanlı regresyon ile optimal kesit yüksekliğini hesaplayan bağıntılar elde edilmiştir.

Günümüzde kolaylıkla elde edilebilen C50/60 betonu ve 2500 mm konsol boyu için deplasman ve güvenilirlik kısıtlarını sağlayacak optimal döşeme kalınlığının 220 mm olduğu tespit edilmiştir.

Önemli bir tasarım ipucu olabilecek konsol açıklığının döşeme kalınlığına oranı (L/h_f) beton sınıflarına göre şu şekilde elde edilmiştir.

- C30/37 beton sınıfı ve yaygın konsol boyu ($L \leq 2500 \text{ mm}$) için $L/10.4$,
- C35/45 ve C40/50 beton sınıfları ve yaygın konsol boyu ($L \leq 2500 \text{ mm}$) için $L/10.9$,
- C45/55 ve C50/60 beton sınıfları ve yaygın konsol boyu ($L \leq 2500 \text{ mm}$) için $L/11.4$ değerleri bulunmuştur.

Bu güvenilirlik ve deplasman kısıtlamalarını sağlayabilecek optimal döşeme kalınlığını veren bir orandır.

5. Semboller (Symbols)

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

$g(x)$: Kısıtlara ait fonksiyonlar

ρ, ρ_b : Çekme donatısı oranı ve dengeli donatı oranı

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

$x_1 = h$: Döşeme kalınlığı

x_2, x_3 : Konsol doğrultusundaki donatı çapı ve konsol doğrultusundaki donatı aralığı

x_4, x_5 : Konsol doğrultusuna dik doğrultudaki donatı çapı ve konsol doğrultusuna dik doğrultudaki donatı aralığı

L : Konsol açıklığı

q, g : Karakteristik hareketli ve ölü yük

P_d, P : Tasarım yükü ve servis yükü

M_d, M_r : Tasarım eğilme momenti ve taşıma gücü moment kapasitesi

BF, CF : Betonun birim metreküp fiyatı ($\text{₺}/\text{m}^3$) ve çeliğin birim metreküp fiyatı ($\text{₺}/\text{m}^3$)

h, d : Döşeme kalınlığı ve faydalı yükseklik

f_{yk} : Donatının karakteristik akma dayanımı

f_{yd} : Donatının tasarım akma dayanımı

E_s : Betonarme çeliğinin elastisite modülü

ε'_s : Basınç donatısındaki birim boy kısalması

σ' : Basınç donatısının akma öncesi gerilme dayanımı

f_{cd}, f_{ctd} : Beton tasarım basınç dayanımı ve tasarım çekme dayanımı

γ_{mc}, γ_{ms} : Beton ve çelik için malzeme katsayısı

k_1 : Dikdörtgen beton basınç blok derinliğinin tarafsız eksen derinliğine oranı

$c(x)$: Tarafsız eksen derinliği

c_o : Donatının ağırlık merkezinden beton yüzeyine mesafe (paspayı)

I_c, I_{cr}, I_{ef} : Donatılı kesitin normal, çatlamış ve efektif atalet momentleri

M_{cr}, M_{max} : Donatısız kesiti çatlatan moment ve kesite etkiyen maksimum moment

$\delta_i, \delta_{ig\lambda}, \delta_t$: Ani sehim, zamana bağlı sehim ve toplam sehim

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- Adem Doğangün, 2018. Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı. Lord Matbaacılık ve Kağıtçılık, İstanbul.
- Arora, J.S., 2012. Introduction to Optimum Design, 4th ed, Introduction to Optimum Design. Elsevier Inc., Oxford.
- Celep, Z., 2020. Betonarme Yapılar, 11th ed. Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2021. İnşaat Birim Fiyatlarına Esas İşçilik-Araç ve Gereç Rayiç Listeleri. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- Dorigo, M., Oca, M.A.M., Engelbrecht, A., 2008. Particle swarm optimization. Scholarpedia, 3, 1486.

- Eberhart, R., Kennedy, J., 1995. New optimizer using particle swarm theory. Proceedings of the International Symposium on Micro Machine and Human Science, 39–43.
- El Hami, A., Radi, B., 2013. Uncertainty and optimization in structural mechanics, Uncertainty and Optimization in Structural Mechanics. John Wiley & Sons, Inc., London.
- Ersoy, U., Özcebe, G., Canbay, E., 2019. Betonarme : Davranış ve Hesap İlkeleri, 9th ed. İstanbul.
- Karaboğa, D., 2014. Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları, 3rd ed. Nobel, Ankara.
- Li, L., Liu, F., 2011. Group Search Optimization for Applications in Structural Design. Springer International Publishing, Berlin.
- Li, X.-L., Serra, R., Olivier, J., 2019. Effects of Particle Swarm Optimization Algorithm Parameters for Structural Dynamic Monitoring of Cantilever Beam. Surveillance, Vishno and AVE conferences, 1–7.
- NumFOCUS, 2021. Numpy & Pandas [WWW Document]. URL <https://pandas.pydata.org> (accessed 5.1.21).
- Okwu, M.O., Tartibu, L.K., 2021. Metaheuristic Optimization : Nature-Inspired Algorithms Swarm and Computational Intelligence , Theory and Applications. Springe Na, Cham, Switzerland.
- Piotrowski, A.P., Napiorkowski, J.J., Piotrowska, A.E., 2020. Population size in Particle Swarm Optimization. Swarm and Evolutionary Computation, 58, 100718.
- Prathab Rao, M., Nawawi, A., Sidek, N.A., 2017. Swarm size and iteration number effects to the performance of PSO algorithm in RFID tag coverage optimization. AIP Conference Proceedings 1831, 020051-1–020051-6.
- Python Software Foundation, 2021. Python [WWW Document]. URL <http://www.python.org> (accessed 5.1.21).
- Sheikhalishahi, M., Ebrahimipour, V., Shiri, H., Zaman, H., Jeihoonian, M., 2013. A hybrid GA-PSO approach for reliability optimization in redundancy allocation problem. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 68, 317–338.
- Shi, Y., Eberhart, R.C., 1998. Parameter selection in particle swarm optimization. Evolutionary Programming VII, 591–600.
- Topçu, A., 2019. Betonarme II. Eskişehir.
- TSE, 2000. TS 500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TSE, 1997. TS 498 Yapi Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Vasuki, A., 2020. Nature-Inspired Optimization Algorithms. Taylor & Francis, Oxford.
- Yang, X.S., 2019. Introduction to Algorithms for Data Mining and Machine Learning. Elsevier Inc., Oxford.
- Yang, X.S., 2018. Mathematical Analysis of Nature-Inspired Algorithms, X.S. Yang (Edt.), Nature-Inspired Algorithms and Applied Optimization, içinde (s. 1–27). Springer, Switzerland.
- Yang, X.S., 2014. Nature-Inspired Optimization Algorithms, First. ed. Elsevier, London.
- Yang, X.S., Karamanoglu, M., 2020. Nature-inspired computation and swarm intelligence: a state-of-the-art overview, X.S. Yang, (Edt.), Nature-Inspired Swarm Intelligence Computation and Algorithms, Theory and Applications, içinde (s. 3–18). Elsevier Inc., Oxford .