

BETONARME KISA KONSOLLARIN TS 500'E GÖRE OPTİMUM TASARIMINDA ABC, TLBO VE TLABC ALGORİTMALARININ BAŞARIMI

Hasan Tahsin ÖZTÜRK *

Alınma: 09.11.2019; düzeltme: 15.02.2020; kabul: 14.03.2020

Öz: Betonarme elemanların geleneksel yöntemlere göre tasarımına bir seçenek olan optimum tasarım süreçleri, yapay zekâ tekniklerinin gelişimine paralel olarak araştırmacıların daha çok ilgisini çekmektedir. Özellikle kaynakların giderek azalmasıyla mühendislik problemlerinde optimizasyon yapma gereksinimi hızla artmaktadır. Bu çalışmada betonarme kısa konsolların TS 500'e göre minimum maliyetle tasarımı Yapay Arı Koloni (ABC), Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) ve Öğretme-Öğrenme Tabanlı Dayalı Yapay Arı Koloni (TLABC) algoritmalarıyla gerçekleştirilmiştir. Algoritmaların başarımları çeşitli istatistiksel yöntemlerle karşılaştırılmış olup, TLABC algoritmasının başarımlarının diğer algoritmalara göre daha iyi olduğu belirlenmiştir. Gerçekleştirilen parametrik çalışmalarla konsol açıklığının, düşey ve yatay yük değişiminin maliyetleri nasıl etkilediği incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Optimizasyon, Kısa konsol, ABC, TLBO, TLABC

Performance of ABC, TLBO and TLABC Algorithms in Optimal Design of RC Corbel According to TS 500

Abstract: Optimal design processes, which are an alternative to the design of reinforced concrete elements compared to traditional methods, attract the attention of researchers in parallel with the development of artificial intelligence techniques. The need for optimization in engineering problems is increasing rapidly, especially as resources are becoming scarce. In this study, the design of reinforced concrete corbels with minimum cost according to TS 500 was realized with Artificial Bee Colony (ABC), Teaching-Learning Based Optimization (TLBO) and Teaching-Learning Based Artificial Bee Colony (TLABC) algorithms. The performance of the algorithms was compared with various statistical methods that the performance of the TLABC algorithm is better than other algorithms. The parametric studies carried out have examined how the cantilever span, vertical and horizontal load changes affect the costs.

Keywords: Optimization, Corbel, ABC, TLBO, TLABC

1. GİRİŞ

Yapay zekanın öneminin hızla artmasıyla, yapay zeka tekniklerinin bir uygulama alanı olan optimum tasarım süreçleri birçok disiplinde kullanıla gelmektedir. İnşaat mühendisliği bakımından önem arz eden yapısal optimizasyon, geleneksel tasarıma göre daha ekonomik, hafif, karbon salınımı ya da gömülü enerjisi daha düşük yapıların tasarlanmasına olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, birçok yapı türüne uygulanabilen, optimizasyon yöntemlerinden kullanım ve problemlere uygulama kolaylığı bakımından sezgisel algoritmalar daha çok tercih edilmektedir.

* Karadeniz Teknik Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61830 Of, TRABZON
Sorumlu Yazar: Hasan Tahsin Öztürk (htozturk@ktu.edu.tr)

Günümüzde sezgisel optimizasyon algoritmaları, yapısal problemlerin çözümünde oldukça fazla kullanılmaktadır. Bu çalışmaların büyük bir kısmının çelik kafes sistemlerin optimizasyonu ile ilgili olduğu görülmektedir. Betonarme eleman ve yapıların optimum tasarımıyla ilgili çalışmalarda da çok hızlı bir artış gözlemlenmektedir. Burada, betonarme yapı ve yapı elemanlarının optimum tasarımına ilişkin son yıllarda yapılan çalışmalar özetlenmektedir.

Teknik literatürdeki çalışmalarda; köprülerin (Bruno ve diğ., 2016, Cai ve Aref, 2015b, Cai ve Aref, 2015a, Fabbrocino ve diğ., 2017, García-Segura ve Yepes, 2016, García-Segura ve diğ., 2017, Ghodoosi ve diğ., 2018, Kaveh ve diğ., 2016, Martí ve diğ., 2016, Martí ve diğ., 2015, Martins Martí ve diğ., 2016b, Martins Martí ve diğ., 2016a, Mukhopadhyay ve diğ., 2015, Yepes ve diğ., 2015), betonarme çerçevelerin (Akin ve Saka 2015, Arroyo ve Gutiérrez 2017, Camp ve Huq 2013, Esfandiari ve diğ., 2018), betonarme kolonların (Öztürk ve Durmuş 2013, Sánchez-Olivares ve Tomás 2017, Yoon ve diğ., 2018), kirişlerin (Amir ve Shakour 2018, Quaranta ve diğ., 2014, Shaqfa ve Orbán 2019, van Loon ve diğ., 2019), istinat duvarlarının (Bekdaş ve Temür 2018, Gandomi ve Kashani 2018, Ghaleini ve diğ., 2019, Gordan ve diğ., 2019, Kalateh-Ahani ve Sarani 2019, Mergos ve Mantoglou 2019, Öztürk ve Türkeli, 2019, Uray ve diğ., 2019), ve yeraltı yapılarının (Caratelli ve diğ., 2017, Carbonell ve diğ., 2011, Öztürk ve diğ., 2016) optimum tasarımları gerçekleştirilmiştir.

Bu makalede, kısa konsolların minimum maliyetle optimum tasarımları TS500 standardına uygun olarak; Yapay Arı Koloni (ABC), Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) ve Öğretme-Öğrenme Tabanlı Yapay Arı Koloni (TLABC) Algoritmalarıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada çeşitli yükleme düzeyleri ve açıklıklar için parametrik çalışmalar yapılmış ve bunların minimum maliyet üzerindeki etkisi incelenmiştir. Parametrik çalışmalardan elde edilen bulgularla algoritmaların başarımları karşılaştırılmıştır.

2. YÖNTEM

2.1. Uygulanan Optimizasyon Algoritmaları

Genellikle doğadaki canlıların zeki davranışları ya da doğa olaylarının kusursuzluğu, araştırmacıların sezgisel optimizasyon algoritmalarını geliştirmelerinde ilham kaynağı olmaktadır. Bununla birlikte bazı algoritmalarda görülen eksiklikler, başka bir algoritmanın bu eksikliğe getirdiği stratejiyle giderilerek melez algoritmalar oluşturulmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi bu çalışmada ABC, TLBO ve bunların melezlenmesiyle elde edilmiş TLABC kullanılarak bu algoritmaların kısa konsol tasarımındaki başarımları incelenmektedir.

Tarihsel gelişim sürecinde dikkate alınan algoritmalarından en eskisi Yapay Arı Koloni Algoritmasıdır. Bu algoritma arıların gerçek nektar arama davranışlarından esinlenmektedir. Algoritmada problemin çözümleri, arıların ulaşmaya çalıştıkları nektar kaynaklarına, bu kaynaklardaki nektar miktarı ise söz konusu çözümün uygunluğuna benzetilmektedir. Görevli arılar nektar kaynaklarına gönderilmekte, nektar kaynağı tükenen arı ise kaşif arıya dönüştüğü düşünülerek arama uzayında yeni nektar kaynakları keşfetmeye çalışmaktadır. Algoritma bu temel prensibiyle nektar miktarı en fazla olan kaynağa erişmeye çalışarak, bir bakıma problemin amacı doğrultusunda minimum ya da maksimum fonksiyon değerini veren en uygun çözümünü bulmaya çalışmaktadır. Bu algoritmayla ilgili ayrıntılı bilgiye, aşağıdaki kaynaklardan ulaşılabilmektedir (Akay ve Karaboga 2012, Karaboga ve Akay 2009).

Sezgisel bir algoritma olan TLBO, öğretmenin sınıfta bulunan öğrenciler üzerindeki etkisinden ilham alınarak geliştirilmiştir. Bu algoritmada problemin çözümleri öğretmen ve öğrenciler olarak temsil edilmekte, en iyi çözüm ise öğretmen olarak dikkate alınmaktadır. Algoritmada öğretmen ve öğrenci adıyla anılan iki aşama bulunmaktadır. İlk aşama olan öğretmen aşamasında öğretmenin öğrencileri eğitmesi, diğer bir deyişle öğretmenin, kendi bilgi düzeyine öğrencileri ulaştırmaya çalışması temel alınmaktadır. İkinci aşama olan öğrenci aşamasında ise öğrencilerin kendi aralarındaki etkileşimi dikkate alınmaktadır. Bu aşamada bilgi düzeyi yüksek olan bir öğrenci, bilgi düzeyi düşük olan öğrenciyi etkilemek suretiyle onun bilgi düzeyini

yükseltebilmektedir. Bu algoritmayla ilgili ayrıntılı bilgiye verilen kaynaklardan ulaşılabilmektedir (R. V. Rao ve Patel, 2013, R. V. Rao ve diğ., 2012)

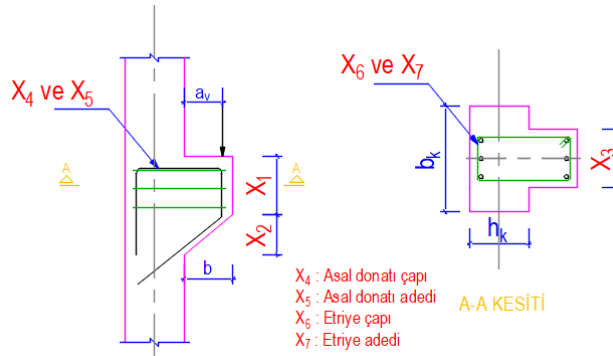
Daha önce de ifade edildiği gibi TLBO, çözümü aramada öğrenme ve öğretme adlarıyla anılan iki üretim operatörü kullanmaktadır. ABC ise işçi, gözcü ve kaşif arı aşamaları adlarıyla bilinen üç arama stratejisi kullanmaktadır. Bu bağlamda, ABC'nin keşif konusunda daha iyi ancak, komşuluk araması bakımından daha zayıf olduğu ifade edilmektedir (Chen ve diğ. 2018). Arama sürecinde bu eksikliği gidererek keşif ve komşuluk araması stratejisini dengelemek üzere bu iki algoritmanın melezlenmesi bir çözüm olabilmektedir. TLABC algoritması, ABC'nin komşuluk araması stratejisindeki eksiklikleri gidermek için, söz konusu algoritmanın TLBO ile melezlenmesiyle ortaya çıkmıştır (Chen ve diğ. 2018). Bu algorithmada; öğretmeye dayalı işçi arı aşaması, öğrenmeye dayalı gözcü arı aşaması ve genelleştirilmiş karşıt kaşif arı aşaması olmak üzere üç melez aşama bulunmaktadır. Algorithmayla ilgili ayrıntılı bilgiye Chen ve diğ. (2018) kaynağından ulaşılabilmektedir.

2.2. Amaç Fonksiyonu ve Tasarım Değişkenleri

Teknik literatürde yapısal optimizasyon problemlerinde amaç fonksiyonu olarak genellikle yapı ağırlığı, yapı maliyeti, yapının üretimiyle oluşan karbon salınımı dikkate alınmaktadır. Betonarme yapı ve elemanlarında, yapı ağırlığının minimize edilmesi özel durumlar dışında pek kullanılmamaktadır. Bu çalışmada amaç fonksiyonu olarak üretilecek kısa konsolun maliyeti dikkate alınmakta ve minimum maliyete sahip elemanın boyut ve donatıları aranmaktadır. Bu durumda amaç fonksiyonu;

$$f(x) = V_c C_c + W_s C_s \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada V_c kısa konsolun geometrisiyle belirlenen beton hacmini, W_s kısa konsolda kullanılan toplam asal donatı ve yatay etriye ağırlığını, C_c ve C_s sırasıyla beton ve donatı maliyetini göstermektedir. Hesaplanan beton hacminde kısa konsolun bağlandığı kolon hariç tutulmuştur. Problemden tanımlanan tasarım değişkenleri aşağıdaki Şekil 1 üzerinde X ile gösterilmektedir.



Şekil 1:
Tasarım Değişkenleri

Optimizasyon sürecinde en uygun çözüm, önceden belirlenen tasarım değişkenleri değer aralığında aranmaktadır. Bu çalışmada tasarım değişkenleri için belirlenen değer aralıkları Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Tasarım değişkenlerinin alt ve üst sınırları, artım değerleri ile alabileceği değer sayısı

Tasarım Değişkeni	Alt Sınır	Üst Sınır	Artım	Alabileceği Değer Sayısı
X ₁	200 mm	700 mm	10 mm	51
X ₂	200 mm	700 mm	10 mm	51
X ₃	250 mm	700 mm	10 mm	46
X ₄	{12 14 16 18 20 22 24 25 26 28 30 32} mm			12
X ₅	2 adet	20 adet	1 adet	19
X ₆	{8 10 12 14 16 18} mm			6
X ₇	2 adet	20 adet	1 adet	19

2.3. Sınırlayıcılar

Bir konsolun kısa konsol olarak tanımlanabilmesi için yükleme noktasından mesnet yüzüne olan uzaklığın (a_v), mesnetteki faydalı yüksekliğe oranının 1'e eşit yada küçük olması gerekmektedir. Faydalı yükseklik, tasarım değişkenlerine bağlı olarak, c_{net} net beton örtüsünü göstermek üzere:

$$d = X_1 + X_2 - c_{net} - \frac{X_4}{2} \quad (1)$$

ifadesiyle belirlenmektedir. Buna göre söz konusu koşul:

$$g_1(x) = \frac{a_v}{d} - 1 \leq 0 \quad (2)$$

sınırlayıcısıyla denetlenebilmektedir. Konsolun kesme dayanımı için, TS500'de verilen;

$$V_d \leq 0,22 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \quad (3)$$

koşulun denetlenmesi amacıyla,

$$g_2(x) = \frac{V_d}{0,22 \cdot f_{cd} \cdot X_3 \cdot d} - 1 \leq 0 \quad (4)$$

ile ifade edilen sınırlayıcının sağlanması gerekmektedir. Bu tür elemanlarda meydana gelen sürtünme kesmesinde tasarım kesme kuvvetinin $0,2 \cdot f_{cd} \cdot A_c$ sınırını geçmesine izin verilmemekte ve bu sınır hesaplanırken beton tasarım basınç dayanımı f_{cd} , 25 MPa dan büyük alınmamaktadır. Bu durumda diğer bir sınırlayıcı da,

$$g_3(x) = \frac{V_d}{0,2 \cdot f_{cd} \cdot X_3 \cdot (X_1 + X_2)} - 1 \leq 0 \quad (5)$$

ile ifade edilmektedir. Toplam çekme donatısı (A_{st}), en az eğilme ve eksenel kuvvet (H_d) için hesaplanan donatıların toplamı olmalıdır. Eğilme için gerekli donatı alanı,

$$A_s = \frac{V_d \cdot a_v + H_d \cdot ((X_1 + X_2) - d)}{0,80 \cdot f_{yd} \cdot d} \quad (6)$$

eksenel kuvvet için gerekli donatı alanı,

$$A_n = \frac{H_d}{f_{yd}} \quad (7)$$

kesitte bulunan çekme donatısı ise,

$$A_{st} = X_5 \cdot \frac{X_4^2 \pi}{4} \quad (8)$$

olmak üzere,

$$g_4(x) = \frac{A_s + A_n}{A_{st}} - 1 \leq 0 \quad (9)$$

sınırlayıcılarıyla sağlanmaktadır. Sürtünme kesmesi için gerekli donatı alanı:

$$A_{wf} = \frac{V_d}{f_{yd} \cdot \mu} \quad (10)$$

olmak üzere,

$$A_{st} \geq \begin{cases} \left(\frac{2}{3} A_{wf} + A_n \right) \\ 0,05 \frac{f_{cd}}{f_{yd}} b_w \cdot d \end{cases} \quad (11)$$

koşulları da sağlanmalıdır. Burada μ ile gösterilen kesme sürtünme katsayısının değeri kısa konsolun bir döküm olduğu düşünülerek 1,4 olarak alınmıştır. Bu koşullar;

$$g_5(x) = \frac{\left(\frac{2}{3} A_{wf} + A_n \right)}{A_{st}} - 1 \leq 0 \quad (12)$$

$$g_6(x) = \frac{0,05 \frac{f_{cd}}{f_{yd}} X_3 \cdot d}{A_{st}} - 1 \leq 0 \quad (13)$$

sınırlayıcılarıyla ifade edilmektedir. Kesite yerleştirilen yatay etriyelerin toplam kesit alanı,

$$A_{sv} = X_7 \frac{X_6^2 \cdot \pi}{4} \cdot 2 \quad (14)$$

olmak üzere, bu alanın:

$$A_{sv} \geq 0,50 \cdot (A_{st} - A_n) \quad (15)$$

koşulunu sağlaması gerekmektedir. Bu koşul

$$g_7(x) = \frac{0,50 \cdot (A_{st} - A_n)}{A_{sv}} - 1 \leq 0 \quad (16)$$

sınırlayıcısıyla denetlenmektedir. Ayrıca yatay etriye toplam kesit alanının, sürtünme kesmesi için gerekli donatı alanından büyük olması gerekmektedir. Bu durum,

$$g_8(x) = \frac{A_{wf}}{A_{sv}} - 1 \leq 0 \quad (17)$$

sınırlayıcısıyla denetlenmektedir. Geometrik olarak X_1 ile gösterilen konsol yüksekliğinin $d/2$ ile hesaplanan değerden büyük yada eşit olması gerekmektedir. Bu denetim de:

$$g_9(x) = \frac{d}{2 \cdot X_1} - 1 \leq 0 \quad (18)$$

sınırlayıcısıyla gerçekleştirilmektedir. Kiriş genişliğinin, konsolun bağlandığı kolon genişliğinden küçük olup olmadığının, geometrik tutarlılık bakımından, denetlenmesi gerekmektedir. Bu koşul

$$g_{10}(x) = \frac{X_3}{b_k} - 1 \leq 0 \quad (19)$$

ifadesiyle denetlenmektedir.

Diğer taraftan minimum donatı aralıklarının denetimi de gerekmektedir. Minimum donatı aralığı değeri yönetmeliğimize uygun olarak; en büyük agrega çapının dörtte üçü, 25 mm ve donatı çapından büyük olanı olarak kullanılmıştır. Bu durumda asal donatı aralığının denetimi için, s asal donatı aralığını, s_{min} minimum asal donatı aralığını göstermek üzere;

$$g_{11}(x) = \frac{s_{min}}{s} - 1 \leq 0 \quad (20)$$

yatay etriye aralıklarının denetimi için ise;

$$g_{12}(x) = \frac{s_{wmin}}{s_w} - 1 \leq 0 \quad (21)$$

sınırlayıcısı kullanılmaktadır. Son olarak yerleştirilen çekme donatısının maksimum ve minimum donatı oranı denetimlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla; maksimum donatı oranı;

$$\rho_{maks} \leq \begin{cases} 0,02 \\ 0,85\rho_b \end{cases} \quad (22)$$

olmak üzere,

$$g_{13}(x) = \frac{\rho_{st}}{\rho_{maks}} - 1 \leq 0 \quad (23)$$

ifadesiyle denetlenmektedir. Burada ρ_{st} çekme donatısı oranı, ρ_b ise dengeli donatı oranıdır. Minimum donatı oranı,

$$\rho_{min} = 0,8 \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} \quad (24)$$

olmak üzere, minimum çekme donatısı oranı denetimi ise,

$$g_{14}(x) = \frac{\rho_{min}}{\rho_{st}} - 1 \leq 0 \quad (25)$$

ifadesiyle belirlenmektedir.

3. SAYISAL UYGULAMALAR

Çalışmaya konu olan algoritmaların başarımlarının değerlendirilmesi ve kısa konsola gelen yüklem durumlarına göre optimum tasarımın nasıl değiştiğini izlemek üzere 3 grup parametrik çalışma planlanmıştır (Bkz. Tablo 3). Çalışmalardaki durumların her biri ABC, TLBO ve TLABC algoritmalarıyla 51 kez bağımsız olarak çalıştırılmıştır. Elde edilen bulgular aşağıda tablolar ve grafikler halinde verilmek suretiyle irdelenmiştir. Tasarım değişkeni sayısının 10000 katı kadar amaç fonksiyonu değerlendirme sayısına ulaşıldığında algoritmanın sonlandırılması sağlanmıştır. Sınırlayıcı ihlallerinin algoritmaya işlenmesi için TLBO ve TLABC algoritmalarında ceza katsayısı, ABC algoritmasında ise bu algoritmaya özgü seçim yöntemi kullanılmıştır. Ceza katsayısı 10^6 olarak alınmıştır. Herbir algoritmada popülasyon boyutu 36 olarak alınmıştır. ABC algoritması kontrol parametrelerinin probleme özgü en uygun değerleri MR, SPP ve limit sırasıyla 0,6, 28 ve 28 olarak, TLABC algoritması için ise limit parametresi 200 olarak yapılan ön çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. TLBO algoritmasında ayarlanması gereken bir kontrol parametresi bulunmamaktadır. Optimizasyon sürecinde sabit tutulan tasarım parametreleri Tablo 2'de verilmektedir.

Çalışmada planlanan 3 grup parametrik çalışma ve bu çalışmalarda incelenen durumlar için dikkate alınan tasarım parametreleri ise Tablo 3'de verilmektedir. Gerçekleştirilen üç grup çalışmanın ilkinde yüklerin şiddeti sabit tutularak, konsol açıklığı, dolayısıyla da yükün uygulanma yeri değiştirilmiştir. İkinci grup çalışmada ise konsol açıklığı ve yatay yükün düşey yüke oranı sabit tutularak, düşey yükün düzeyi artırılmıştır. Üçüncü ve son grup çalışmada da konsol açıklığı, düşey yükün düzeyi sabit tutularak yatay yük düzeyi, dolayısıyla da yatay yükün düşey yüke oranı artırılmıştır.

Tablo 2. Tasarım Parametreleri

Kolonun konsola paralel genişliği (h_k)	700 mm
Konsola dik kolon genişliği (b_k)	700 mm
Betonun birim hacim maliyeti (C_c)	192,15 ₺/m ³
Donatı maliyeti (C_s)	3504,78 ₺/ton
Donatı birim ağırlığı (γ_s)	7850 kg/m ³
Net beton örtüsü (c)	25 mm
Betonun tasarım basınç dayanımı (f_{cd})	20 MPa
Betonun tasarım çekme dayanımı (f_{ctd})	1,28 MPa
Betonun eşdeğer basınç bloğu katsayısı	0,82
Donatının tasarım akma dayanımı (B420C) (f_{yd})	365 MPa
Kesme sürtünme katsayısı (μ)	1,4
En büyük agrega boyutu (D_{maks})	16 mm

Tablo 3. Çalışmada incelenen durumlar

	Durum Kodu	Sabit Parametre	Değiştirilen Parametre	
			a_v (mm)	$b = a_v + 100$ mm
GRUP 1	(G1-D1)	$V_d = 400$ kN $H_d = 240$ kN	200	300
	(G1-D2)		300	400
	(G1-D3)		400	500
	(G1-D4)		500	600
	(G1-D5)		600	700
	(G1-D6)		700	800
			V_d (kN)	$H_d = 0,2 V_d$ (kN)
GRUP 2	(G2-D1)	$a_v = 400$ mm $b = 500$ mm	200	40
	(G2-D2)		300	60
	(G2-D3)		400	80
	(G2-D4)		500	100
	(G2-D5)		600	120
	(G2-D6)		700	140
			H_d (kN)	
GRUP 3	(G3-D1)	$a_v = 400$ mm $b = 500$ mm $V_d = 400$ kN	80	
	(G3-D2)		160	
	(G3-D3)		240	
	(G3-D4)		320	
	(G3-D5)		400	
	(G3-D6)		480	

Algoritmaların 51 kez bağımsız olarak çalıştırılmasıyla elde edilen bulguların istatistiği ve bağımsız testlerde en iyi maliyet değerine ulaşabilme oranlarını ifade eden başarımlar oranları, birinci çalışma grubu için Tablo 4’de, ikinci çalışma grubu için Tablo 5’de ve üçüncü çalışma grubu için ise Tablo 6’da verilmektedir.

Tablo 4. Çalışma grubu 1 için elde edilen bulguların istatistiği

	GRUP 1 DURUMLARI	G1-D1	G1-D2	G1-D3	G1-D4	G1-D5	G1-D6
ABC	En iyi maliyet (₺)	114,73	142,23	171,97	200,19	229,98	258,85
	Ortalama maliyet (₺)	114,96	142,41	172,28	202,14	231,23	261,37
	Ortanca maliyet (₺)	114,73	142,23	171,98	202,12	231,16	260,30
	En yüksek maliyet (₺)	115,86	143,29	174,30	208,63	234,70	281,84
	Standart sapma (₺)	0,27	0,27	0,47	1,19	1,10	3,88
	Başarımlar oranı (%)	52,94	52,94	41,18	5,88	13,73	7,84
TLBO	En iyi maliyet (₺)	114,73	142,23	171,97	200,19	229,98	258,85
	Ortalama maliyet (₺)	115,00	142,82	172,82	201,22	231,06	262,89
	Ortanca maliyet (₺)	114,73	142,23	172,59	200,19	230,04	260,30
	En yüksek maliyet (₺)	116,52	150,14	175,37	206,54	240,63	277,21
	Standart sapma (₺)	0,42	1,40	0,88	1,41	2,28	4,92
	Başarımlar oranı (%)	58,82	72,55	21,57	52,94	41,18	37,25
TLABC	En iyi maliyet (₺)	114,73	142,23	171,97	200,19	229,98	258,85
	Ortalama maliyet (₺)	114,97	142,38	172,31	200,87	230,07	258,96
	Ortanca maliyet (₺)	114,73	142,23	171,97	200,43	229,98	258,85
	En yüksek maliyet (₺)	115,86	145,53	175,37	202,12	231,30	262,11
	Standart sapma (₺)	0,27	0,66	0,66	0,80	0,27	0,45
	Başarımlar oranı (%)	50,98	94,12	64,71	49,02	72,55	60,78

Tablo 5. Çalışma grubu 2 için elde edilen bulguların istatistiği

	GRUP 2 DURUMLARI	G2-D1	G2-D2	G2-D3	G2-D4	G2-D5	G2-D6
ABC	En iyi maliyet (₺)	75,84	98,91	120,46	146,82	169,37	193,21
	Ortalama maliyet (₺)	76,12	98,93	122,06	147,24	171,16	195,40
	Ortanca maliyet (₺)	76,18	98,91	120,89	147,00	170,86	195,22
	En yüksek maliyet (₺)	76,86	99,26	128,18	149,54	176,10	202,44
	Standart sapma (₺)	0,27	0,05	2,38	0,56	1,27	2,63
	Başarım oranı (%)	39,22	92,16	5,88	17,65	9,80	0,00
TLBO	En iyi maliyet (₺)	75,84	98,91	120,46	146,82	169,37	199,00
	Ortalama maliyet (₺)	76,04	98,92	123,79	147,63	171,56	201,71
	Ortanca maliyet (₺)	75,84	98,91	125,60	146,83	170,82	200,56
	En yüksek maliyet (₺)	77,43	99,26	125,60	156,82	177,52	220,86
	Standart sapma (₺)	0,35	0,05	2,38	2,19	1,51	3,55
	Başarım oranı (%)	72,55	98,04	21,57	47,06	7,84	0,00
TLABC	En iyi maliyet (₺)	75,84	98,91	120,46	146,82	169,37	192,81
	Ortalama maliyet (₺)	76,22	99,01	120,93	146,98	170,91	193,52
	Ortanca maliyet (₺)	76,51	98,91	120,46	146,82	170,82	192,93
	En yüksek maliyet (₺)	76,51	100,12	128,18	151,25	173,09	195,75
	Standart sapma (₺)	0,33	0,26	1,60	0,67	0,51	1,05
	Başarım oranı (%)	43,14	86,27	56,86	82,35	3,92	5,88

Birinci grup çalışmaların istatistiği incelendiğinde tüm algoritmaların aynı minimum maliyet değerine ulaşabildiği görülmektedir. Gerçekleştirilen 51 bağımsız koşumun ortalaması incelendiğinde ele alınan durumların büyük bir çoğunluğunda, TLABC algoritmasının en düşük ortalamayı elde ettiği görülmektedir. Standart sapmalara bakıldığında ise ABC algoritmasının ve TLABC algoritmasının en düşük standart sapmalara sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bağımsız koşumlarda optimum sonuca ulaşılabilme oranını gösteren başarımları incelendiğinde ise, ele alınan durumların 4'ünde TLABC algoritmasının, diğer iki durumda ise TLBO algoritmasının en iyi başarımları elde edildiği görülmektedir.

İkinci grup çalışmaların istatistiği incelendiğinde dikkate alınan durumların birinde TLABC'nin en düşük maliyete ulaştığı, diğer durumlarda ise tüm algoritmaların aynı minimum maliyet değerine ulaşabildiği görülmektedir. Gerçekleştirilen 51 bağımsız koşumun ortalaması incelendiğinde ele alınan durumların çoğunluğunda, TLABC algoritmasının en düşük ortalamayı elde ettiği görülmektedir. Standart sapmalara bakıldığında farklı algoritmaların farklı durumlarda en düşük standart sapmalara sahip olduğu anlaşılmaktadır. Başarımları incelendiğinde ise, ele alınan durumların 3'ünde TLABC algoritmasının, ikisinde TLBO algoritmasının ve birinde ise ABC algoritmasının en iyi başarımları elde edildiği görülmektedir.

Üçüncü grup çalışmaların istatistiği incelendiğinde tüm algoritmaların aynı minimum maliyet değerine ulaşabildiği görülmektedir. Gerçekleştirilen 51 bağımsız koşumun ortalaması incelendiğinde ele alınan durumların hepsinde TLABC algoritmasının en düşük ortalamayı elde ettiği görülmektedir. Standart sapmalara bakıldığında da yine her durumda TLABC algoritmasının en düşük standart sapmalara sahip olduğu anlaşılmaktadır. Başarımları incelendiğinde ise, ele alınan durumların 4'ünde TLABC algoritmasının, diğer iki durumda ise TLBO algoritmasının en iyi başarımları elde edildiği görülmektedir.

Tablo 6. Çalışma grubu 3 için elde edilen bulguların istatistiği

	GRUP 2 DURUMLARI	G3-D1	G3-D2	G3-D3	G3-D4	G3-D5	G3-D6
ABC	En iyi maliyet (₺)	120,46	146,47	171,97	197,49	219,80	245,33
	Ortalama maliyet (₺)	122,06	147,50	172,57	198,01	220,13	245,74
	Ortanca maliyet (₺)	120,89	147,20	172,01	197,62	219,80	245,79
	En yüksek maliyet (₺)	128,18	152,27	175,37	200,23	222,16	246,66
	Standart sapma (₺)	2,38	1,27	0,92	0,64	0,51	0,34
	Başarım oranı (%)	5,88	9,80	45,10	37,25	45,10	31,37
TLBO	En iyi maliyet (₺)	120,46	146,47	171,97	197,49	219,80	245,33
	Ortalama maliyet (₺)	123,79	148,29	172,96	198,11	220,88	245,91
	Ortanca maliyet (₺)	125,60	146,97	172,59	197,49	219,80	245,49
	En yüksek maliyet (₺)	125,60	152,46	179,26	204,67	230,73	251,30
	Standart sapma (₺)	2,38	2,04	1,23	1,25	2,55	1,20
	Başarım oranı (%)	21,57	39,22	17,65	60,78	68,63	47,06
TLABC	En iyi maliyet (₺)	120,46	146,47	171,97	197,49	219,80	245,33
	Ortalama maliyet (₺)	120,93	147,13	172,34	197,89	219,81	245,45
	Ortanca maliyet (₺)	120,46	146,97	171,97	197,98	219,80	245,33
	En yüksek maliyet (₺)	128,18	149,55	174,59	199,33	220,24	245,94
	Standart sapma (₺)	1,60	0,92	0,70	0,43	0,09	0,22
	Başarım oranı (%)	56,86	29,41	72,55	43,14	96,08	78,43

Çalışmada ele alınan durumlar için yapılan bağımsız koşulların sonuçları dikkate alınarak nonparametrik istatistiksel bir test olan Friedman testi gerçekleştirilmiştir. Bu test için elde edilen skorlar Tablo 7'de verilmektedir.

Tablo 7. İncelenen durumlar için algoritmaların Friedman testi skor değerleri

	Friedman Testi Skorları		
	ABC	TLBO	TLABC
G1-D1	2,029	1,961	2,010
G1-D2	2,235	2,078	1,686
G1-D3	1,951	2,402	1,647
G1-D4	2,716	1,804	1,480
G1-D5	2,588	2,010	1,402
G1-D6	2,353	2,294	1,353
G2-D1	2,020	1,755	2,226
G2-D2	2,000	1,912	2,088
G2-D3	2,304	2,343	1,353
G2-D4	2,480	2,069	1,451
G2-D5	2,098	2,137	1,765
G2-D6	1,922	2,961	1,118
G3-D2	2,196	2,108	1,696
G3-D3	1,892	2,441	1,667
G3-D4	2,069	1,971	1,961
G3-D5	2,294	2,088	1,618
G3-D6	2,206	2,137	1,657
Ortalama Skor	2,197	2,145	1,657
En iyi Skor Sayısı	0	3	14

Tablo 7’de verilen skorlara göre TLABC algoritması 14 defa en iyi skoru elde ederek en başarılı algoritma olmuştur. Bu algoritmayı 3 defa en iyi skoru elde eden TLBO algoritması takip etmektedir. Bu teste göre ABC algoritması hiçbir durumda en iyi skora sahip sonuç elde edememiştir. Çalışmada incelenen durumlar için belirlenen optimum tasarım değişkenleri Tablo 8’de ve maliyet değerleri ise Tablo 9-11’de verilmektedir.

Tablo 8. İncelenen durumlar için değişkenlerin elde edilen optimum değerleri

Durumlar	X ₁ (mm)	X ₂ (mm)	X ₃ (mm)	X ₄ (mm)	X ₅ (adet)	X ₆ (mm)	X ₇ (adet)
G1-D1	380	200	250	28	2	8	3
G1-D2	540	230	250	20	4	8	3
G1-D3	590	410	250	20	4	8	3
G1-D4	480	510	250	30	2	8	4
G1-D5	540	560	250	26	3	10	3
G1-D6	540	560	250	26	3	10	3
G2-D1	310	340	250	12	5	8	3
G2-D2	360	380	250	22	2	8	3
G2-D3	530	540	250	22	2	8	3
G2-D4	610	470	250	20	3	8	4
G2-D5	700	490	250	26	2	8	4
G2-D6	700	630	250	22	3	8	4
G3-D1	530	540	250	22	2	8	3
G3-D2	500	460	250	26	2	10	2
G3-D3	590	410	250	20	4	8	3
G3-D4	490	370	250	32	2	8	4
G3-D5	360	370	250	25	4	12	2
G3-D6	440	370	250	30	3	12	2

Tablo 9. Birinci grup çalışma için elde edilen maliyet değerleri

	G1-D1	G1-D2	G1-D3	G1-D4	G1-D5	G1-D6
Asal Donatı Enkesit Alanı (mm ²)	1231,50	1256,64	1256,64	1413,72	1592,79	1592,79
Yatay etriye Enkesit Alanı (mm ²)	150,80	150,80	150,80	201,06	235,62	235,62
Asal Donatı Ağırlığı (kg)	27,78	33,77	40,21	46,29	56,84	58,62
Yatay etriye Ağırlığı (kg)	2,99	3,22	3,41	4,79	5,92	6,25
Toplam Donatı Ağırlığı (kg)	30,76	36,99	43,62	51,08	62,75	64,87
Beton Hacmi (m ³)	0,036	0,066	0,099	0,110	0,143	0,164
Toplam Beton Maliyeti (₺)	6,92	12,59	19,10	21,19	27,57	31,51
Toplam Donatı Maliyeti (₺)	107,81	129,64	152,88	179,01	219,92	227,34
Toplam Maliyet (₺)	114,73	142,23	171,97	200,20	247,50	258,85

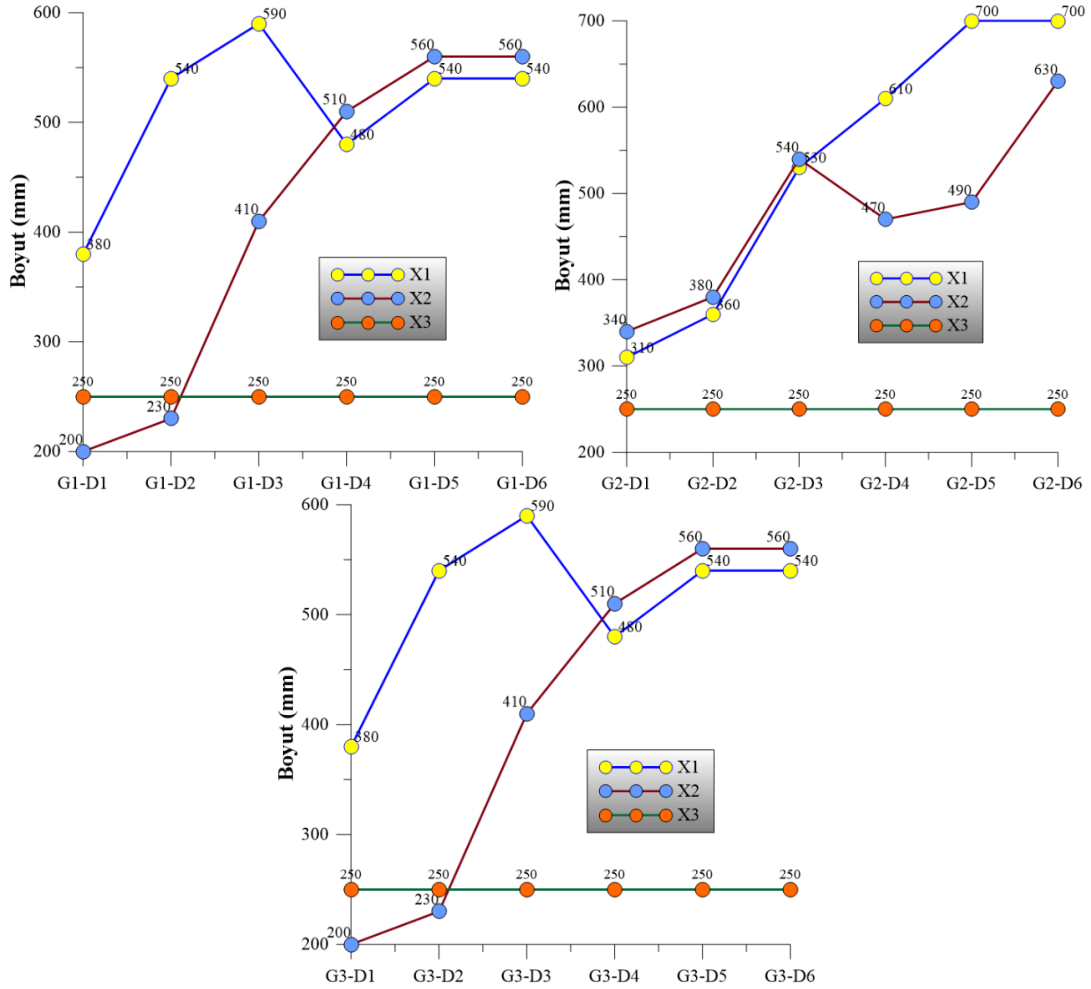
Tablo 10. İkinci grup çalışma için elde edilen maliyet değerleri

	G2-D1	G2-D2	G2-D3	G2-D4	G2-D5	G2-D6
Asal Donatı Enkesit Alanı (mm ²)	565,49	760,27	760,27	942,48	1061,86	1140,40
Yatay etriye Enkesit Alanı (mm ²)	150,80	150,80	150,80	201,06	201,06	201,06
Asal Donatı Ağırlığı (kg)	15,01	21,11	25,55	31,56	37,29	43,55
Yatay etriye Ağırlığı (kg)	3,34	3,35	3,34	4,54	4,56	4,51
Toplam Donatı Ağırlığı (kg)	18,35	24,45	28,89	36,10	41,85	48,06
Beton Hacmi (m ³)	0,060	0,069	0,100	0,106	0,118	0,127
Toplam Beton Maliyeti (₺)	11,53	13,21	19,22	20,30	22,70	24,38
Toplam Donatı Maliyeti (₺)	64,31	85,70	101,25	126,52	146,67	168,43
Toplam Maliyet (₺)	75,84	98,92	120,46	146,82	169,37	192,81

Tablo 11. Üçüncü grup çalışma için elde edilen maliyet değerleri

	G3-D1	G3-D2	G3-D3	G3-D4	G3-D5	G3-D6
Asal Donatı Enkesit Alanı (mm ²)	760,27	1061,86	1256,64	1608,50	1963,50	2120,58
Yatay etriye Enkesit Alanı (mm ²)	150,80	157,08	150,80	201,06	226,20	226,20
Asal Donatı Ağırlığı (kg)	25,55	33,32	40,21	47,17	53,98	60,65
Yatay etriye Ağırlığı (kg)	3,34	3,47	3,41	4,55	5,00	5,07
Toplam Donatı Ağırlığı (kg)	28,89	36,79	43,62	51,72	58,98	65,72
Beton Hacmi (m ³)	0,100	0,091	0,099	0,084	0,068	0,078
Toplam Beton Maliyeti (₺)	19,22	17,53	19,10	16,21	13,09	15,01
Toplam Donatı Maliyeti (₺)	101,25	128,94	152,88	181,28	206,71	230,32
Toplam Maliyet (₺)	120,46	146,47	171,97	197,49	219,80	245,33

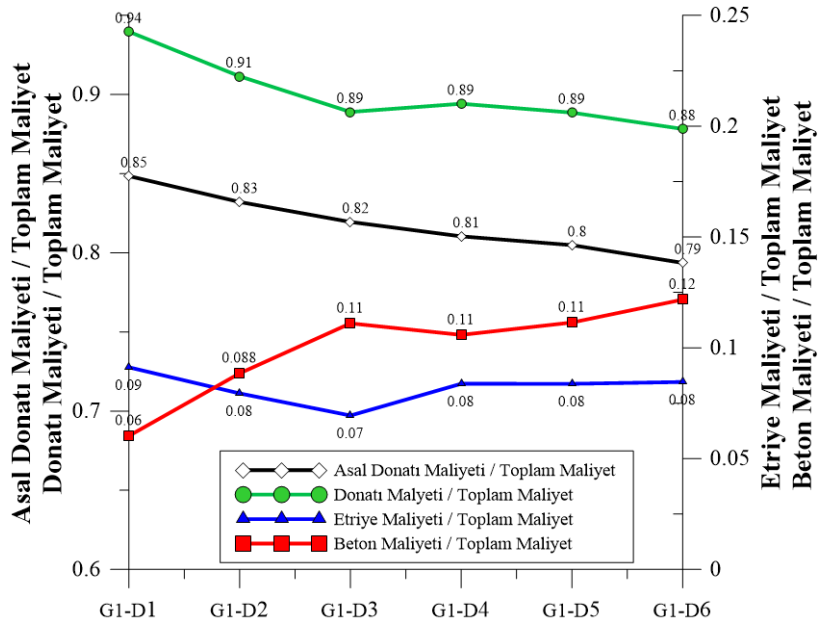
Çalışma gruplarındaki maliyet değişimleri incelendiğinde toplam maliyetlerin; kısa konsol açıklığı arttıkça (Grup 1), düşey yük düzeyi arttıkça (Grup 2) ve yatay yük oranı arttıkça (Grup3) artmakta olduğu görülmektedir. İncelenen durumlar için kısa konsolun X_1 ve X_2 değişkenleri ile ifade edilen yükseklik ve X_3 değişkeni ile ifade edilen genişlik değerinin değişimleri Şekil 2’de verilmektedir.



Şekil 2:
İncelenen durumlarda boyutsal tasarım değişkenlerinin değişimi

Şekil 2 incelendiğinde yükleme sabit iken konsol açıklığı arttıkça, elde edilen optimum sonuçlarda konsol yüksekliği toplamının (X_1+X_2) artış eğiliminde olduğu, genişliğin ise sabit kaldığı görülmektedir. Konsol açıklığının ve yatay/düşey yük oranının sabit olduğu, düşey yük düzeyinin arttığı durumda da birinci grup çalışmaya benzer olarak konsol yüksekliği toplamının artış eğiliminde olduğu anlaşılmaktadır. Konsol açıklığı ve düşey yükün sabit olduğu, yatay yük düzeyinin arttığı çalışma grubunda ise konsol yüksekliği toplamının 3. duruma kadar artış eğiliminde olduğu, daha yüksek yatay yük etkisinde sabitlenme eğilimine girdiği görülmektedir. Genişlik yine sabit kalmaktadır. Her bir çalışma durumunda konsol genişliğinin veri havuzundaki minimum değere gittiği görülmektedir. Bu durum konsol genişliğinin minimum tutularak minimum maliyete ulaşılabilirdiğini göstermektedir.

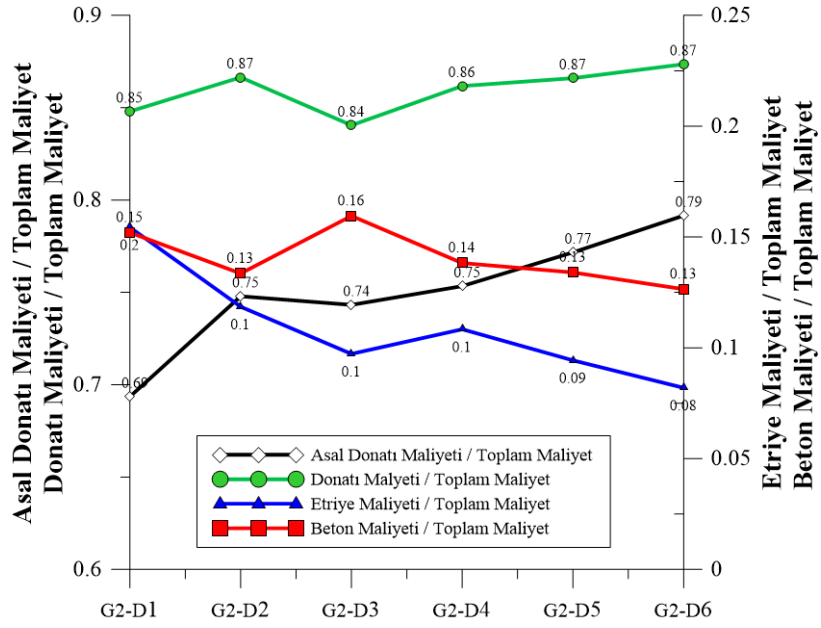
Birinci çalışma grubunda, beton ve donatı maliyetlerinin toplam maliyete oranının incelenen durumlardaki değişimi Şekil 3’de verilmektedir. Bu grafiğe göre, sabit yükleme etkisinde, konsol açıklığı arttıkça, toplam maliyet içinde betonun payı artarken, asal donatının payının azaldığı, yatay etriye payının ise yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmektedir.



Şekil 3:

Birinci çalışma grubunda, beton ve donatı maliyetlerinin toplam maliyete oranının incelenen durumlardaki değişimi

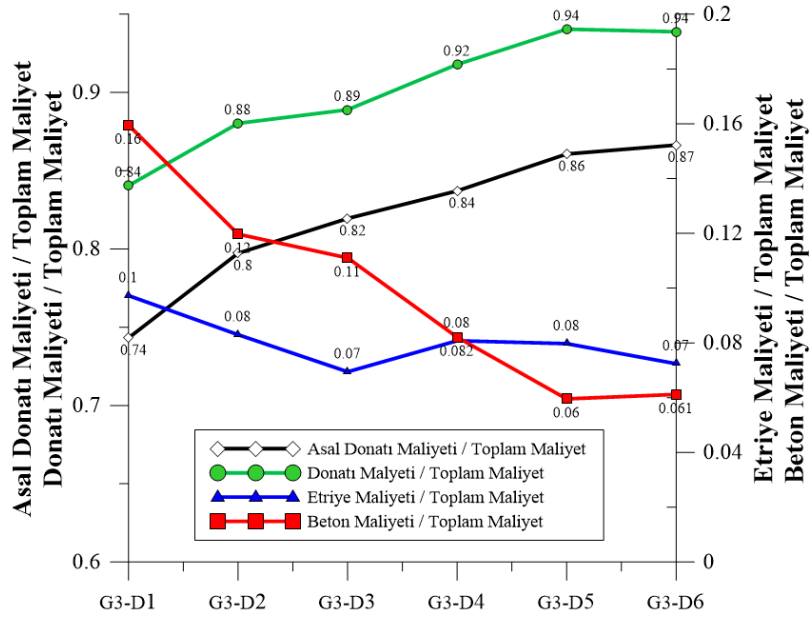
İkinci çalışma grubunda, beton ve donatı maliyetlerinin toplam maliyete oranının incelenen durumlardaki değişimi Şekil 4’de verilmektedir. Bu grafiğe göre konsol açıklığının ve yatay/düşey yük oranının sabit olduğu durumda, düşey yük düzeyi arttıkça, toplam maliyet içinde betonun ve donatının payının birbirine göre dengeli bir seyir izlediği ve kayda değer bir değişimin olmadığı görülmektedir. Donatı maliyetinin toplam maliyete göre değişiminin önemli düzeyde olmaması, düşey yük düzeyi arttıkça asal donatı maliyet oranının düşmesi, buna karşılık yatay etriye maliyeti oranının artmasıyla açıklanabilmektedir.



Şekil 4:

İkinci çalışma grubunda, beton ve donatı maliyetlerinin toplam maliyete oranının incelenen durumlardaki değişimi

Üçüncü çalışma grubunda, beton ve donatı maliyetlerinin toplam maliyete oranının, incelenen durumlardaki değişimi Şekil 5’de verilmektedir. Bu grafiğe göre konsol açıklığının ve düşey yükün sabit olduğu durumda, yatay yük düzeyi arttıkça, toplam maliyet içinde betonun payı hızla azalırken, donatının payının arttığı görülmektedir. Donatı maliyetindeki artışın en önemli sebebinin ise, yatay etriye maliyetindeki artış değil, asal donatı maliyetindeki artış olduğu görülmektedir. Bu durum yatay yük düzeyindeki artışın kullanılması gereken asal donatı maliyetinde önemli bir artışa neden olduğunu göstermektedir.



Şekil 5:

Üçüncü çalışma grubunda, beton ve donatı maliyetlerinin toplam maliyete oranının incelenen durumlardaki değişimi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada betonarme kısa konsolların Türk Standartlarına göre minimum maliyetle tasarımı Yapay Arı Koloni (ABC), Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) ve Öğretme-Öğrenme Tabanlı Yapay Arı Koloni (TLABC) algoritmalarıyla gerçekleştirilmiştir. Algoritmaların başarımları çeşitli istatistiksel yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Özetle, başarımlarına göre yapılan değerlendirmede toplam 18 durumdan 11'inde TLABC, 6'sında TLBO ve 1'inde ise ABC algoritması en yüksek başarımla sahip olmuştur. Gerçekleştirilen Friedman testine göre de TLABC algoritması 14 defa en iyi skoru elde ederek en başarılı algoritma olmuştur. Bu algoritmayı 3 defa en iyi skoru elde eden TLBO algoritması takip etmektedir. Bu teste göre ABC algoritması hiçbir durumda en iyi skora sahip sonuç elde edememiştir.

Gerçekleştirilen üç grup çalışmanın ilkinde yüklerin şiddeti sabit tutularak, konsol açıklığı, dolayısıyla da yükün uygulanma yeri değiştirilmiştir. İkinci grup çalışmada konsol açıklığı ve yatay yükün düşey yüke oranı sabit tutularak, düşey yükün düzeyi artırılmıştır. Üçüncü ve son grup çalışmada ise konsol açıklığı, düşey yükün düzeyi sabit tutularak yatay yük düzeyi, dolayısıyla da yatay yükün düşey yüke oranı artırılmıştır. Çalışma gruplarındaki maliyet değişimleri incelendiğinde toplam maliyetlerin; kısa konsol açıklığı arttıkça (Grup 1), düşey yük düzeyi arttıkça (Grup 2) ve yatay yük oranı arttıkça (Grup3) artmakta olduğu görülmektedir.

Birinci çalışma grubunda sabit yükleme etkisinde, konsol açıklığı arttıkça, toplam maliyet içinde betonun payı artarken, asal donatının payının azaldığı, yatay etriye payının ise yaklaşık olarak sabit kaldığı belirlenmiştir. İkinci çalışma grubunda, konsol açıklığının ve yatay/düşey yük oranının sabit olduğu durumda, düşey yük düzeyi arttıkça, toplam maliyet içinde betonun ve donatının payının birbirine göre dengeli bir seyir izlediği ve kayda değer bir değişimin olmadığı görülmüştür. Bu durumlarda, donatı maliyetinin toplam maliyete göre değişiminin önemli düzeyde olmaması, düşey yük düzeyi arttıkça asal donatı maliyet oranının düşmesi, buna karşılık yatay etriye maliyeti oranının artmasıyla açıklanabilmektedir. Üçüncü çalışma grubunda, konsol açıklığının ve düşey yükün sabit olduğu durumda, yatay yük düzeyi arttıkça, toplam maliyet içinde betonun payı hızla azalırken, donatının payının arttığı görülmüştür. Donatı maliyetindeki artışın en önemli sebebinin ise, yatay etriye maliyetindeki artış değil, asal donatı maliyetindeki artış olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumda yatay yük düzeyindeki artışın kullanılması gereken asal donatı maliyetinde önemli bir artışa neden olduğu kanısına varılmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Akay, B. ve Karaboga, D. (2012) A modified Artificial Bee Colony algorithm for real-parameter optimization, *Information Sciences*, 192, 120–142. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2010.07.015>
2. Akin, A. ve Saka, M. P. (2015) Harmony search algorithm based optimum detailed design of reinforced concrete plane frames subject to ACI 318-05 provisions, *Computers and Structures*, 147, 79–95. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.10.003>
3. Amir, O. ve Shakour, E. (2018) Simultaneous shape and topology optimization of prestressed concrete beams, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 57(5), 1831–1843. <https://doi.org/10.1007/s00158-017-1855-5>
4. Arroyo, O. ve Gutiérrez, S. (2017) A seismic optimization procedure for reinforced concrete framed buildings based on eigenfrequency optimization, *Engineering Optimization*, 49(7), 1166–1182. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2016.1241779>
5. Bekdaş, G. ve Temür, R. (2018) Grey wolf optimizer for optimum design of reinforced concrete cantilever retaining walls, *AIP Conference Proceedings*, 1978(July): <https://doi.org/10.1063/1.5043893>

6. Bruno, D., Lonetti, P. ve Pascuzzo, A. (2016) An optimization model for the design of network arch bridges, *Computers and Structures*, 170, 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2016.03.011>
7. Cai, H., Aref, A. J. (2015a) A genetic algorithm-based multi-objective optimization for hybrid fiber reinforced polymeric deck and cable system of cable-stayed bridges, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 52(3), 583–594. <https://doi.org/10.1007/s00158-015-1266-4>
8. Cai, H. ve Aref, A. J. (2015b) On the design and optimization of hybrid carbon fiber reinforced polymer-steel cable system for cable-stayed bridges, *Composites Part B: Engineering*, 68, 146–152. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.08.031>
9. Camp, C. V. ve Huq, F. (2013) CO2 and cost optimization of reinforced concrete frames using a big bang-big crunch algorithm, *Engineering Structures*, 48, 363–372. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.09.004>
10. Caratelli, A., Meda, A., Rinaldi, Z., Spagnuolo, S. ve Maddaluno, G. (2017) Optimization of GFRP reinforcement in precast segments for metro tunnel lining, *Composite Structures*, 181, 336–346. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.08.083>
11. Carbonell, A., González-Vidoso, F. ve Yepes, V. (2011) Design of reinforced concrete road vaults by heuristic optimization, *Advances in Engineering Software*, 42(4), 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.01.002>
12. Esfandiari, M. J., Urgessa, G. S., Sheikholarefin, S. ve Dehghan Manshadi, S. H. (2018) Optimization of reinforced concrete frames subjected to historical time-history loadings using DMPSO algorithm, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 58(5), 2119–2134. <https://doi.org/10.1007/s00158-018-2027-y>
13. Fabbrocino, F., Modano, M., Farina, I., Carpentieri, G. ve Fraternali, F. (2017) Optimal prestress design of composite cable-stayed bridges, *Composite Structures*, 169, 167–172. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2016.09.008>
14. Gandomi, A. H. ve Kashani, A. R. 2018. Automating pseudo-static analysis of concrete cantilever retaining wall using evolutionary algorithms, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 115(July 2017), 104–124. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.10.032>
15. García-Segura, T. ve Yepes, V. (2016) Multiobjective optimization of post-tensioned concrete box-girder road bridges considering cost, CO2 emissions, and safety, *Engineering Structures*, 125, 325–336. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.07.012>
16. García-Segura, T., Yepes, V., Frangopol, D. M. ve Yang, D. Y. (2017) Lifetime reliability-based optimization of post-tensioned box-girder bridges, *Engineering Structures*, 145, 381–391. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.05.013>
17. Ghaleini, E. N., Koopialipoor, M., Momenzadeh, M., Sarafraz, M. E. ve Mohamad, E. T., Gordan, B. (2019), A combination of artificial bee colony and neural network for approximating the safety factor of retaining walls, *Engineering with Computers*, 35(2), 647–658. <https://doi.org/10.1007/s00366-018-0625-3>
18. Ghodoosi, F., Abu-Samra, S., Zeynalian, M. ve Zayed, T. (2018) Maintenance cost optimization for bridge structures using system reliability analysis and genetic algorithms, *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(2), 1–10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001435](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001435)
19. Gordan, B., Koopialipoor, M., Clementking, A., Tootoonchi, H. ve Tonnizam Mohamad, E. (2019) Estimating and optimizing safety factors of retaining wall through neural network and

- bee colony techniques, *Engineering with Computers*, 35(3), 945–954. <https://doi.org/10.1007/s00366-018-0642-2>
20. Kalateh-Ahani, M. ve Sarani, A. (2019) Performance-based Optimal Design of Cantilever Retaining Walls, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 63(2), 660–673. <https://doi.org/10.3311/ppci.13201>
 21. Karaboga, D. ve Akay, B. (2009) A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm. *Applied Mathematics and Computation*, 214(1), 108–132. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2009.03.090>
 22. Kaveh, A., Maniat, M. ve Arab Naeini, M. (2016) Cost optimum design of post-tensioned concrete bridges using a modified colliding bodies optimization algorithm, *Advances in Engineering Software*, 98, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.03.003>
 23. Martí, J. V., García-Segura, T. ve Yepes, V. (2016) Structural design of precast-prestressed concrete U-beam road bridges based on embodied energy, *Journal of Cleaner Production*, 120:, 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.024>
 24. Martí, J. V., Yepes, V. ve González-Vidosa, F. (2015) Memetic algorithm approach to designing precast-prestressed concrete road bridges with steel fiber reinforcement, *Journal of Structural Engineering*, 141(2), 1–9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001058](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001058)
 25. Martins, A. M. B., Simões, L. M. C. ve Negrão, J. H. J. O. (2016a) Optimum design of concrete cable-stayed bridges. *Engineering Optimization*, 48(5), 772–791. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2015.1057057>
 26. Martins, A. M. B., Simões, L. M. C. ve Negrão, J. H. J. O. (2016b) Optimum design of concrete cable-stayed bridges with prestressed decks. *International Journal of Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 17(5–6), 339–349. <https://doi.org/10.1080/15502287.2016.1231237>
 27. Mergos, P. E. ve Mantoglou, F. (2019) Optimum design of reinforced concrete retaining walls with the flower pollination algorithm, *Structural and Multidisciplinary Optimization*. <https://doi.org/10.1007/s00158-019-02380-x>
 28. Mukhopadhyay, T., Dey, T. K., Chowdhury, R., Chakrabarti, A. ve Adhikari, S. (2015) Optimum design of FRP bridge deck: an efficient RS-HDMR based approach. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 52(3), 459–477. <https://doi.org/10.1007/s00158-015-1251-y>
 29. Öztürk, H.T., Türkeli, E. ve Durmuş, A. (2016) Optimum design of RC shallow tunnels in earthquake zones using artificial bee colony and genetic algorithms. *Computers and Concrete*, 17(4), 435–453. <http://dx.doi.org/10.12989/cac.2016.17.4.435>
 30. Ozturk, H. T., ve Durmus, A. (2013). Optimum cost design of RC columns using artificial bee colony algorithm, *Structural Engineering and Mechanics*, 45(5), 643–654. : <http://dx.doi.org/10.12989/sem.2013.45.5.643>
 31. Öztürk, H. T. ve Türkeli, E. 2019. Optimum design of rc retaining walls with key section using jaya algorithm, *Journal of Polytechnic*, 22(2), 283–291. <https://doi.org/10.2339/politeknik.432031>
 32. Quaranta, G., Fiore, A. ve Marano, G. C. (2014) Optimum design of prestressed concrete beams using constrained differential evolution algorithm, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 49(3), 441–453. <https://doi.org/10.1007/s00158-013-0979-5>

33. Rao, R. V. ve Patel, V. (2013) An improved teaching-learning-based optimization algorithm for solving unconstrained optimization problems, *Scientia Iranica*, 20(3), 710–720. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.12.005>
34. Rao, R. V., Savsani, V. J. ve Balic, J. (2012) Teaching-learning-based optimization algorithm for unconstrained and constrained real-parameter optimization problems, *Engineering Optimization*, 44(12), 1447–1462. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2011.652103>
35. Sánchez-Olivares, G. ve Tomás, A. (2017) Improvements in meta-heuristic algorithms for minimum cost design of reinforced concrete rectangular sections under compression and biaxial bending, *Engineering Structures*, Elsevier Ltd: , 162–179. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.10.010>
36. Shaqfa, M. ve Orbán, Z. (2019) Modified parameter-setting-free harmony search (PSFHS) algorithm for optimizing the design of reinforced concrete beams, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 60(3), 999–1019. <https://doi.org/10.1007/s00158-019-02252-4>
37. Uray, E., Çarbaş, S., Erkan, İ. H. ve Tan, Ö. (2019) Parametric investigation for discrete optimal design of a cantilever retaining wall, *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 5(3), 108. <https://doi.org/10.20528/cjsmec.2019.03.004>
38. Van Loon, R. R. L., Pujadas-Gispert, E., Moonen, S. P. G. ve Blok, R. (2019) Environmental Optimization of Precast Concrete Beams Using Fibre Reinforced Polymers. *Sustainability*, 11(7):, 2174. <https://doi.org/10.3390/su11072174>
39. Yepes, V., Martí, J. V. ve García-Segura, T. (2015) Cost and CO2 emission optimization of precast-prestressed concrete U-beam road bridges by a hybrid glowworm swarm algorithm, *Automation in Construction*, 49, 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.10.013>
40. Yoon, Y. C., Kim, K. H., Lee, S. H. ve Yeo, D. (2018) Sustainable design for reinforced concrete columns through embodied energy and CO2 emission optimization, *Energy and Buildings*, 174:, 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.013>