



Geopolimer Beton ve Geleneksel Beton Üretim Süreçlerinden Kaynaklı CO₂ Salınımının Metasezgisel Yöntemlerle Belirlenmesi

Alper ÇAKMAK¹, Mücteba UYSAL^{2*}

¹ İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

² Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Alper ÇAKMAK ORCID No: 0000-0001-6642-0807

Mücteba UYSAL ORCID No: 0000-0002-6827-9904

*Sorumlu yazar: mucteba@yildiz.edu.tr

(Alınış: 15.06.2020, Kabul: 22.03.2021, Online Yayınlanma: 25.06.2021)

Anahtar Kelimeler

CO₂ emisyonu, geopolimer beton, Geleneksel beton, Öğretme-öğrenme tabanlı algoritma, Çiçek tozlaşma algoritması

Öz: Bu çalışmada, metasezgisel algoritmalarla öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon (TLBO) ve çiçek tozlaşma algoritması (FPA) kullanılarak; geopolimer beton ve geleneksel beton üretim süreçlerinden kaynaklı CO₂ salınımı karşılaştırması; betonarme kolon, kiriş ve tekil temel tasarımı üzerinden yapılmıştır. Optimizasyonun amacı; tasarım şartlarına uygun bir şekilde, betonarme malzemeleri üretim süreçlerinden kaynaklı minimum CO₂ emisyonu verecek boyutlandırmayı bulmaktır. Optimum tasarımlar, geleneksel beton kullanılması ve geopolimer beton kullanılması durumlarına göre ayrı ayrı irdelenmiştir. Çalışma sonucunda, betonarme eleman üretimi sırasında, geleneksel beton yerine geopolimer betonun kullanımının CO₂ emisyon miktarının %40-%58 arasında düşürdüğü tespit edilmiştir.

6

Determination of CO₂ Emissions Depending Geopolymer Concrete and Conventional Concrete Production Provided Metaheuristic Algorithms

Keywords

CO₂ emission, geopolymer concrete, Conventional concrete, Teaching learning based algorithm, Flower pollination algorithm

Abstract: In this study, using teaching-learning based optimization (TLBO) algorithm and flower pollination algorithm (FPA) which are the metaheuristic algorithms, reinforced concrete column, beam and column footing are designed by comparing to determine CO₂ emissions occurred due to geopolymer concrete and conventional concrete production processes. The aim of the optimization is to find the dimensioning that will give minimum CO₂ emissions from the production processes of reinforced concrete materials in accordance with the design requirements. Optimum designs have been found separately according to the use of conventional concrete and geopolymer concrete. At the end of the study, it was found that using geopolymer concrete instead of conventional concrete during the production of reinforced concrete elements reduced CO₂ emission amount between 40% and 58%.

1. GİRİŞ

Önceki zamanlarda medeni ihtiyaç olarak mağaralar, çalılık, ağaçlar kullanılırken bu süreç çadır ile devam etmiş ve günümüzde ise yerini ağırlıklı olarak betonarme ve çelik yapılara bırakmıştır. Uygarlığın gelişmesi, getirdiği kolaylıkların yanında, evrenin düzenine etki edecek bazı oluşumlara da sebep olmuştur. Sera gazı ise bu düzene etkiyecek önemli sebeplerden biri olarak kabul edilmektedir. Karbon dioksit (CO₂), metan (CH₄),

nitrik oksit (N₂O), hidroflorür karbonlar (HFCs) gibi sera gazları, atmosferdeki kızıl ötesi ışınlarını tutarak küresel ısınmaya neden olur. Küresel ısınmaya neden olan sera gazı kaynaklarının sektörlerimize göre dağılımı incelendiğinde ise yapı sektörü etkisinin %8 olduğu belirlenmiştir [1].

Yapı sektörü incelediğinde ise dayanıklılığı, imalat kolaylığı ve ekonomikliği nedeniyle özellikle gelişmekte olan ülkeler tarafından betonarme yapıların daha çok tercih edildiği görülmektedir. Yaygın olarak tercih edilen

bu yapı türünü oluşturan malzemelerin küresel ısınmaya etkisi birçok araştırmaya konu olmuştur. Yapılan araştırmalara göre tek başına çimento sektörünün, dünyadaki toplam CO₂ salınımına etkisinin yaklaşık olarak %5-7 iken demir çelik sektörünün toplam salınımına etkisinin %4 ve %7 arasında olduğu tespit edilmiştir [2,3].

Daha çok uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer beton, geleneksel betona göre çevreci olduğu için dikkat çekmektedir. Bu beton türünü üretmek için hem atık malzemelerin kullanılması hem de bağlayıcıları üretim aşamasındaki yakıt karşılaştırıldığında geleneksel betona göre 6 kat daha az CO₂ salınımına neden olmasıyla sera gazı etkisi açısından önemlidir [4]. Geleneksel Portland çimentosu üretilirken, 1 ton kalkerin yakılması sonucunda; direkt kalker kaynaklı 0,55 ton, fırınlama işleminde kullanılan yakıt kaynaklı ise 0,40 ton CO₂ ortaya çıkmaktadır [5]. Başka bir ifadeyle yaklaşık olarak 1 ton geleneksel Portland çimentosu üretimi için atmosfere 1 ton CO₂ salınmaktadır. Geopolimer üretiminde ise; direkt olarak reaksiyon kaynaklı CO₂ salınımı meydana gelmemektedir [5]. Geopolimer betonlar geleneksel betonlar kadar henüz popüler olmamakla birlikte yol kaplamalarında, dayanma duvarlarında, su tanklarında, prefabrik köprü tabliyelerinde kullanılmaktadır [6]. Dünyanın ilk geopolimer betondan üretilmiş yapısı ise The University of Queensland's Global Change Institute (GCI) binasıdır [7].

Mühendisliğin temel işlevlerinden birisi optimizasyondur; çözümlenmeleri yapılırken optimum sonucu bulma amacıyla yöntemler geliştirilmektedir. Optimum çözümü bulmaya yönelik yapılan çalışmalardan biri sezgisel algoritmalarıdır. Sezgisel algoritmalar, genellikle matematiksel olarak net bir sonucu bulunamayan problemlere kesin sonuca yakın bir çözüm bulma amacıyla kullanılır. Bu yapılırken, doğada gerçekleşen bir takım olaylardan ilham alınır. Metasezgisel algoritmalarda ise oluşturulan yöntem, sezgisel algoritmadaki gibi probleme özgü olmayıp farklı problemlere uyarlanabilir. Bu yöntemde izlenecek metod daha belirgin ve kontrollüdür.

Gerçekleştirilen çalışmada; geopolimer beton üzerine yapılmış literatür çalışmaları gündeme getirilmiş olup, kullanım alanları ve avantajları belirtilmiştir. Sonrasında metasezgisel algoritmalar detaylandırılarak öğretme-öğrenme tabanlı ve çiçek tozlaşma algoritmaları aktarılmıştır. Bu algoritmalar kullanılarak, önceden belirlenen tasarım şartları altında, dörtgen kesitli betonarme kolon, dörtgen kesitli betonarme kiriş ve kare tabanlı betonarme tekil temel tasarımı yapılmıştır. Algoritma amacı olarak betonarme elemanların üretim aşaması sırasında ortaya çıkacak minimum CO₂ emisyonunu veren tasarım seçilmiştir. Geopolimer beton ve geleneksel beton kullanım durumlarına göre iki farklı tasarım yapılmış olup, elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

1970-1973 yılları arasında, Fransa'da daha çok organik plastik kaynaklı ortaya çıkan devasa yangınlar nedeniyle Prof. Dr. Joseph Davidovits yanmayan plastikler üzerine

araştırmalara odaklanmıştır. Jeokimya alanında, zeolitlerin sentezinin ve moleküler eleklerin; mineral bağlayıcı ile mineral polimer üretimleri için araştırılmadığını farketmiştir. Yarı kristalize üç boyutlu siliko-alüminat amorf malzemeleri geliştirerek geopolimerleri geliştirmiştir [8].

1973-1976 yıllarında, yapı malzemesi olarak kullanılan, reçine ile yapıştırılmış odun talaşlarının yüzeylerine siliko-alüminat mineralinin yerleştirilmesiyle yanmaya dirençli geopolimer suntalar elde edilmiştir. 1983 yılında Joseph Davidovits ve James Sawyer erken yüksek dayanımlı geopolimer bağlayıcılar ve çimentolar üzerine çalışmalar yapmıştır. Yüksek fırın cürufu kullanarak; priz süresini hızlandıran, basınç ve eğilme dayanımını arttıran geopolimer elde edilmiştir. Tehlikeli ve zehirli atıkların uzun süre saklanabilmesi için ise aside karşı dirençli, zeolit özellikli geopolimer bağlayıcılar geliştirilmiştir [8]. Kömür kullanılan endüstriden kaynaklı uçucu kül, sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile birleştirilerek çevre dostu geopolimer malzeme elde edilmektedir. Geleneksel Portland çimentosunun yaklaşık %40'ı oranında yüksek hacimli uçucu kül kullanılarak yüksek dayanıma sahip betonlar elde edilmektedir. Bu alanda yapılan araştırmalar, yüksek uçucu kül ile üretilen betonların geleneksel Portland çimentosuyla üretilmiş betonlardan daha dayanıklı olduğunu göstermektedir [9]. Geopolimer betonlar kısa sürede yüksek dayanıma sahip olabilmektedir. Köprüler, hava yolları, dayanma duvarları, atık tankları, karayolu, restorasyon gibi birçok alanda kullanılmaktadır. 2014 yılında Avustralya'da açılan Brisbane West Wellcamp Havalimanı, Dünya'nın en geniş geopolimer beton projesidir. 40.000 m³ geopolimer beton; uçak dönüş alanlarında, apronlarda, taksi yollarında kullanılmıştır [10]. Havalimanı yol kaplaması için 435 mm kalınlığında geopolimer beton, kayan kaplama makinesiyle yerinde dökülmüştür [11]. Geleneksel Portland çimentosu ile üretilen betonun uygulanabilirlik, işlenebilirlik, ekonomiklik gibi birçok avantajı olmasına karşın; üretimi aşamasında sebep olduğu CO₂ salınımı nedeniyle çevreyi olumsuz yönden etkilemektedir. Çin'de yapılan bir araştırmaya göre; 1 ton klinker üretimi sırasında 0,822 ton, 1 ton çimento üretimi sırasında ise 0,657 ton CO₂ salınımı gerçekleşmektedir [12]. Türk çimento firmasının raporuna göre 2017 yılında 1 ton çimento üretimi sırasında 0,776 ton CO₂ salınımı olmaktadır [13]. Geopolimer üretimi aşamasında, geleneksel Portland çimentosundaki gibi yüksek sıcaklıklarda fırınlama aşaması olmadığı için, üretimi sırasındaki CO₂ salınımı açısından avantaj sağlamaktadır. Üretim aşamasındaki CO₂ emisyon miktarları incelendiğinde, geopolimerin geleneksel Portland çimentosuna göre yaklaşık %64 daha az emisyonu sebep olduğu belirlenmiştir [14].

Çalışmada yapılan hesaplarda sadece fabrikada beton ve çelik donatının üretimi aşamasında ortaya çıkan CO₂ emisyon miktarları göz önüne alınmıştır. İmalat yerine ulaştırma, yerleştirme, kütleme gibi nedenlerden dolayı ortaya çıkacak emisyon miktarları dikkate alınmamıştır. Ayrıca etriye, çiroz gibi beton metrajını düşürüp; donatı miktarını arttıran etkenler hesaba katılmamıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Metasezgisel Yöntemler

Sezgisel yöntemler, bir problemi çözmeye veya keşfetmeye yaklaşmak amacıyla kullanılan metotlardır. Ancak optimum sonucu, mükemmel veya gerçekçi sonucu vereceğini garanti etmez. Yine de kısa zamanda bir veriye ulaşabilmek için kullanılmaktadır. Sezgisel yöntemler, optimum sonucun imkansız ya da uygulanamaz olduğu problemlerde, hızlı bir şekilde tatmin edici çözümler bulabilmek için uygulanır [15].

Sezgisel yöntemler, belli bir problem üzerine sonuçlar bulurken; bu yöntemlerin parametrelere bağlanarak ve varsayımlar kullanılarak çeşitli problemler üzerinde optimuma yakın çözümü verecek şekilde geliştirilmesiyle metasezgisel (sezgi üstü) yöntemler elde edilmiştir. Metasezgisel yöntemler oluşturulurken, arama uzayında kullanılan değerler ve sonuçlar hafızada tutulur ve bir sonraki iterasyonla karşılaştırılarak iyileştirme yapılır. Metasezgisel yöntemler oluşturulurken doğada gerçekleşen bir takım olaylardan yararlanır. Doğada gözlemlenen olaylar, matematiksel formüllere dökülerek metotlar oluşturulmuştur. Metasezgisel yöntemler; esinlendikleri kaynaklara, aramada kullandıkları çözüm sayısına, amaç fonksiyonu özelliğine, komşuluk yapısına, hafıza kullanımına göre sınıflandırılır [16].

2.1.1. Öğretme-Öğrenme Tabanlı Algoritma

Öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon algoritması, öğretmenin öğrenciler üzerindeki etkisinden yararlanarak, çözüm popülasyonunu kullanarak çözüme ulaşmayı hedeflemektedir.

Algoritmada, öğretmenin tecrübesinden yararlanılarak öğrencilerin bilgi birikiminin artması, böylelikle optimum sonuca ulaşılması amaçlanmaktadır. Öğretmenin ve öğrencilerin kalitesi ne kadar yüksekse öğrenme miktarı yükselir, sınıf kalitesi artar ve algoritma daha iyi sonuçlar verir. Öğretme-öğrenme tabanlı algoritma, “öğretmen aşaması” ve “öğrenci aşaması” olmak üzere iki kısımdan oluşur. “Öğretmen aşaması”, öğretmenden öğrenmeyi, “öğrenci aşaması” ise öğrencilerin birbirleri ile etkileşiminden kaynaklı öğrenmeyi ifade eder [17].

Öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon; mekanik tasarım, kümeleme, yapısal makas tasarımı, biyoinformatik, ağ dağılımı, enerji yönetimi, maliyet ve emisyon minimizasyonu, çelik çerçeve tasarımı, hidrotermal planlama, veri madenciliğinde sinir ağı sınıflandırma, sabit mesnetli yapı tasarımı gibi birçok alanda kullanılmaktadır [18].

TLBO algoritması yardımıyla literatürdeki çeşitli yapılar tekrar tasarlanmış ve etkili sonuçlar elde edilmiştir [19]. Bir başka çalışmada ise betonarme konsol dayanma duvarının tasarımı için de önerilmiş uygulanabilir değerlere ulaşılmıştır [20]. Çelik yapılar alanında,

konstrüksiyon ağırlığını en az tutan optimum tasarımın elde edilmesi amacıyla da çeşitli çalışmalar yapılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir [21, 22, 23, 24]. TLBO algoritmasının, başka metasezgisel algoritmalarla birlikte hibrit olarak kullanılabilirliği ile başka algoritmalarla kıyaslanması da yapılan araştırmalar arasındadır [25, 26].

2.1.2. Çiçek Tozlaşma Algoritması

Çiçek tozlaşma algoritması, çiçekli bitkilerin tozlaşmasından yararlanılarak oluşturulmuştur. Çiçekli bitki tozlaşması ağırlıklı olarak kuş, arı, kelebek, sinek gibi hayvanların polenleri başka çiçeklere taşımasıyla oluşur. Bazı tozlaşmalar ise; yağmur, rüzgar gibi hayvansal olmayan etkenler sayesinde sağlanır. Canlılar tarafından gerçekleşen tozlaşmalara “biyotik”, canlılar tarafından gerçekleşmeyen tozlaşmalara ise “abiyotik” denilmektedir.

Tozlaşma şekli; çapraz tozlaşma ve kendi kendine tozlaşma (öz tozlaşma) olarak da ayrılabilir. Çapraz tozlaşma, farklı bitkilere ait çiçekler arasında; kendi kendine tozlaşma ise aynı bitkinin farklı çiçekleri arasında gerçekleşir. Çapraz tozlaşmada polenler uzun mesafeler kat ettiği için “küresel tozlaşma”, kendi kendine tozlaşmada ise polenler yakın çevrede hareket ettiği için “yerel tozlaşma” olarak adlandırılmaktadır. Küresel tozlaşma genellikle biyotik etkenler sayesinde, yerel tozlaşma ise abiyotik etkenler yardımıyla gerçekleşir. “Levy uçuşu” ise; doğadaki hayvanların, genellikle yiyecek bulma amacıyla, uzun mesafe seyahatleri sırasında izlediği rotayı ifade etmektedir. Yukarıdaki bilgiler esas alınarak çiçek tozlaşma algoritması dört kurala göre oluşturulmuştur [27]:

- i. Biyotik ve çapraz tozlaşma, Levy uçuşu yapan canlılar tarafından yapılan küresel tozlaşma olarak kabul edilmiştir.
- ii. Abiyotik ve kendi kendine tozlaşma, yerel tozlaşma olarak kabul edilmiştir.
- iii. Polenin tek bir çiçek türüne gitme sadakatı, iki çiçeğin benzerlik oranı olarak dikkate alınabilir.
- iv. Yerel ve küresel tozlaşma, [0,1] aralığında bir değişken yardımı ile kontrol edilir.

Çiçek tozlaşma algoritması meteorolojik tahminde, boyutlandırma ve yerleştirme problemlerinde, ekonomik tahminlerde, enerji sistemleri tasarımında, çizelgeleme problemlerinde, yapı tasarımında kullanılmaktadır [28].

Yapı tasarım alanında; optimum betonarme dayanma duvarı ve temel tasarımı üzerine çalışmalar bulunmaktadır [29, 30].

2.2. Dörtgen Betonarme Kolon Tasarımı

Dörtgen kesite sahip betonarme kolona ait malzeme özellikleri ve maruz kalan yükler Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1. Betonarme kolon özellikleri ve etkiyen yükler

Beton Sınıfı	Donatı Sınıfı	Paspayı	Tasarım Momentleri	Tasarım Normal Kuvveti
C25/30	B420C	4 cm	M _{xd} =150 kNm M _{yd} =600 kNm	N _d =1000 kN

Kodlama sürecinde anlamlı olmayan kolon boyutları ataması yapılmaması amacıyla maksimum kolon boyutları 70 cm olarak belirlenmiştir. “for” döngüsü içerisinde, rastgele sayı atamaya yarayan “rand” komutu kullanılarak, belirlenen popülasyon sayısı kadar rastgele kolon boyutu atamaları yapılmıştır. Bu atama yapılırken TBDY-2018 yönetmeliği gereğince, atanacak boyutların en az 30 cm olması göz önüne alınmıştır. Rastgele kolon boyutları ataması yapıldıktan sonra; Aydın/Akgün/Topçu tabloları yardımıyla, gerekli donatı alanları bulunmuştur. “rand” komutu tam sayı vermediği için “ceil” kodu yardımıyla bulunan sayılar, tam sayıya yuvarlanmıştır. Kolon donatısı dağılımında, her kenara eşit olarak dağıtılmış donatı tasarımı seçilmiştir.

Kodlamadaki amaca göre; birim miktar beton üretim aşamasından ve çelik üretim aşamasından kaynaklı CO₂ emisyon miktarını, tasarım çözümleri kümesindeki beton ve çelik metrajlarıyla çarpıp, yapı elemanı imalatı nedeniyle ortaya çıkan toplam emisyonunun bulunması gerekmektedir. Toplam emisyon miktarının minimum olduğu donatı alanı ve beton metreküpü amaç değerleridir.

Geleneksel Portland çimentolu betondan ve geopolimer betondan kaynaklı emisyon miktarları kodlamada sabit değerler Tablo 2’de verilmektedir. Geleneksel beton üretim aşamasından kaynaklı CO₂ emisyon miktarı 316 kg/m³, geopolimer beton üretim aşamasından kaynaklı CO₂ emisyon miktarı ise 115 kg/m³ olarak tanımlanmıştır. Betonarme çelik donatısı üretim aşamasından kaynaklı CO₂ emisyon miktarı ise 0,76 kg/m³ olarak kabul edilmiştir [31].

Tablo 2. Geleneksel Portland çimentolu ve geopolimer betonların CO₂ emisyonları [14]

Bileşen Ağırlıkları (kg/m ³)		
Bileşen	Geleneksel Portland Çimentolu Beton	Geopolimer Beton
Çimento	340	
Cüruf		230
Uçucu Kül		57
Reaktif Atık		83
Sodyum Silikat (%37)		33
NaOH (%50)		24
İyonsuz Su	170	99
Çakıl	1878	1878
Hammadde Kaynaklı CO ₂ Emisyonu	316	115

h=3 m. yüksekliğinde bir kolon tasarımı yapıldığı varsayılmıştır. TS500:2000 ve TBDY-2018

yönetmeliklerine göre, yönetmelik şartları kodlanmıştır. Uygulanan yönetmelik şartları Tablo 3’te verilmektedir.

Tablo 3. Kolon için TS500:2000 ve TBDY-2018’e göre tasarım şartları

Kolon için TS500:2000 ve TBDY-2018 Yönetmelik Şartları	
1.	$N_d \leq 0,9 \times f_{cd} \times A_c$
2.	$N_d \leq 0,4 \times f_{ck} \times A_c$
3.	$M_{xd} \geq (15+0.03h) \times N_d$
4.	$M_{yd} \geq (15+0.03b) \times N_d$
5.	$b \geq 300$ mm
6.	$h \geq 300$ mm
7.	$\rho = A_{st} / (b \times h)$ ve $0,01 < \rho < 0,04$

N_d, tasarım normal kuvvetini; f_{cd}, beton tasarım basınç dayanımını; A_c, beton en kesit alanını; f_{ck}, beton karakteristik basınç dayanımını; M_{xd}, x eksenindeki tasarım moment değerini; M_{yd}, y eksenindeki tasarım moment değerini; b ve h, kolon kesit ebatlarını; ρ, enkesitteki donatı oranını; A_{st}, enkesitteki donatı alanını ifade etmektedir.

2.3. Dörtgen Betonarme Kiriş Tasarımı

Dörtgen şekilli betonarme kirişe ait malzeme özellikleri ve etkiyen yükler Tablo 4’te verilmektedir.

Tablo 4. Betonarme kiriş özellikleri ve etkiyen yükler

Beton Sınıfı	Donatı Çeliği Sınıfı	Paspayı	Kiriş Uzunluğu	Tasarım Moment Değeri
C30/37	B420C	4 cm	300 cm	500 kNm

C30/37 sınıfı beton ve B420C sınıfı donatı çeliğine ait dayanım değerleri Tablo 5’te sunulmaktadır.

Tablo 5. C30/37 beton ve B420C donatı çeliği mukavemet özellikleri

Beton tasarım basınç dayanımı	$f_{cd}=30$ MPa
Çelik tasarım akma dayanımı	$f_{yd}=365,22$ MPa
Beton karakteristik eksenel çekme dayanımı	$f_{ctk}=1,9$ MPa
Beton tasarım eksenel çekme dayanımı	$f_{ctd}=1,28$ MPa
Ortalama basınç gerilmesi ve maksimum gerilme arasındaki oran	$k_1=0,82$
Maksimum beton basınç gerilmesi ile betonun silindirik mukavemeti arasındaki oran	$k_3=0,85$
Donatı çeliği elastisite modülü	$E_s=2 \times 10^5$ MPa

TS500:2000 ve TBDY 2018 yönetmeliklerine göre; betonarme kiriş tasarımı için istenen şartlar, MATLAB

kodları içerisine yazılmıştır. Tablo 6’da betonarme kiriş için tasarım şartları belirtilmiştir.

Tablo 6. Betonarme kiriş için TS500:2000 ve TBDY-2018’e göre tasarım şartları

Kiriş İçin TS500:2000 ve TBDY-2018 Şartları	
1.	$\rho_{min} = 0,8 \times \left(\frac{f_{ctd}}{f_{yd}} \right)$
2.	$\rho_{maks} = 0,02$
3.	$\rho'_{maks} = 0,02$
4.	$(\rho - \rho')_{maks} = 0,85 \times \rho_b$
5.	$b_{wmin} = 25$ cm
6.	$h_{min} = 30$ cm
7.	$\rho'_{min} = \min. \text{montaj donatısı alanı} / (b_w \times h)$

ρ , kirişin alt tarafındaki çekme donatısı oranını; ρ' , kirişin üst taraftaki basınç donatısı oranını, b_w , kiriş genişliğini; h , kiriş yüksekliğini ifade etmektedir. Tablo 6’da belirtilen yönetmelik şartları haricinde maksimum b_w ve h kiriş enkesit boyutları 60 cm olarak seçilmiştir. Kiriş boyutları keyfi olarak atandıktan sonra, kirişin tek donatılı ya da çift donatılı olma durumu irdelenmiştir. Bu amaca yönelik olarak moment kontrolü yapılmıştır. Elde edilen moment, tasarım momentinden fazlaysa tek donatılı, az ise çift donatılı tasarım yapılmıştır.

$L=3$ m. uzunluğunda bir kiriş tasarımı yapıldığı varsayılmıştır. Yapılacak tasarımlarda beton kaynaklı ve donatı kaynaklı emisyon miktarları bulunmuştur. “GBE” harfleriyle kodlanan değere ilk olarak geleneksel beton

birim emisyon miktarı girilip program çalıştırılmış, daha sonra geopolimer beton birim emisyon miktarı girilip program tekrar çalıştırılmıştır. Sonuçlar “CM” isimli çözüm matrisi içerisine kaydedilmiştir. Tabloya ek olarak, taşıma gücü kontrolü de yapılmıştır. Kiriş tasarım değerleri yönetmelik şartlarına uymuyorsa, tasarımcının belirlediği maksimum kiriş boyutlarına uymuyorsa ve M_r taşıma gücü momenti M_d tasarım momentinden az ise; emisyon miktarına aşırı yüksek bir değer atanarak elenmesi sağlanmıştır.

2.4. Betonarme Kare Tekil Temel Tasarımı

Betonarme kare tekil temele ait malzeme özellikleri ve etkiyen yükler Tablo 7’de verilmektedir.

Tablo 7. Betonarme kare tekil temel özellikleri ve etkiyen yükler

Beton Sınıfı	Donatı Çeliği Sınıfı	Zemin Emniyet Gerilmesi	Kolon Boyutları	Kolon Tasarım Yükü	Paspayı
C25/30	B420C	360 kN/m ²	70x70 cm	4500 kN	5 cm

Kolon boyutu 70 x 70 cm olduğu için, tekil temelin boyutları da minimum 70 x 70 cm olmalıdır. Minimum temel kalınlığı ise 25 cm olmalıdır. Algoritma iterasyonları sırasında atanacak maksimum temel uzunluğu ve kalınlığı ise 5’er metre olarak belirlenmiştir. Paspayı 5 cm, eğilme etkisi katsayısı $\gamma=1$, C25/30 beton sınıfı için tasarım çekme dayanımı $f_{ctd}=1,15$ MPa, B420C çeliğin tasarım çekme dayanımı $f_{yd}=365$ MPa olarak kodlanmıştır.

Bulunan zemin gerilmesi; zımbalama alanı, çevresi ve kuvvetleri; zemin dayanımı; kolon yüzünde kesme kuvveti; temel boyutları ve donatı alanları dikkate

Tablo 8. Betonarme kare tekil temel tasarım şartları

Maksimum zemin gerilmesi kontrolü	$\sigma_{zmaxs} \leq f_{zu}$
Zımbalama denetimi	$V_{pd} \leq V_{pr}$
Net zemin dayanımı denetimi	$\sigma_{zmaxs} \leq f_{zn}$
Kolon yüzünde kesme kuvveti denetimi	$v_d \leq v_{cr}$
Minimum donatı kontrolü	$A_{s_x} \geq \min A_{s_x}$
Boyut kontrolü	$b_x \geq 0,70$ m ; $b_x \times b_y \geq 1$ m ² ; $h \geq 0,25$ m ; $b_x \leq 5$ m ; $h \leq 5$ m

alınarak, Tablo 8’deki tasarım şartlarının kontrolü yapılmıştır. Minimum donatı kontrolü aşaması hariç, tasarım şartlarına uymayan değere sahip çözümlerin toplam emisyon miktarları aşırı yüksek yapılmıştır. Sadece minimum donatı alanını sağlamayan değerler atandığında, toplam emisyon değeri aşırı yüksek olarak atanmayıp, donatı alanı minimum donatı alanına eşitlenerek tekrardan emisyon hesabı yapılmıştır. Tasarım şartları kontrolleri sonrasında, TLBO algoritmasından önceki “for” döngüsü “end” komutuyla kapatılmıştır.

2.5. TLBO Algoritmasının Oluşturulması

TLBO algoritmasının oluşturulması aşamasında tekrar bir “for” döngüsü başlatılmış ve belirlenen iterasyon sayısı kadar tekrarlanmıştır. Önceki aşamadaki kodlarla üretilen ilk popülasyon arasından minimum emisyon miktarını veren boyutlar ve donatı alanı “öğretmen” olarak seçilmiştir. Öğretmen değerlerinden yararlanılarak, sınıf popülasyonunun bilgi birikimi güncellenmiştir. Güncellenen sınıftaki öğrenci değerleri, tekrardan yönetmelik kontrolünden geçirilmiştir.

Öğrenci fazında sınıftaki öğrencilerden rastgele iki tanesi seçilerek ve birbirlerinden yararlanarak yeni çözüm kümesi oluşturulmuştur. Rastgele seçimde aynı öğrencinin tekrar denk gelmemesine dikkat edilmiştir. Öğrenci fazıyla oluşturulan yeni sınıf, yönetmelik şartlarıyla kontrol edilmiştir. Yine öğretmen fazındaki gibi, yeni ve eski çözümlerden iyi olan “CM” isimli çözüm matrisine atanmıştır.

Tasarım için anlatılan yukarıdaki aşamalar, iterasyon sayısı kadar tekrar edilmiş ve iterasyon sonunda optimum sonuca ulaşılmıştır.

2.6. FPA Oluşturulması

Bu aşamada TLBO algoritması kodları silinerek, çiçek tozlaşma algoritması kodları yazılmıştır. FPA kodları, iterasyon döngüsü içerisinde yazılmıştır. Tozlaşma türünün küresel ya da yerel olup olmadığına karar vermek için [0,1] aralığında rastgele sayılar üreten MATLAB komutu kullanılmıştır. Oluşturulan rastgele sayı 0,5 değerinden küçük ise küresel tozlaşma, aksi halde yerel tozlaşma olarak kabul edilmiştir. Küresel tozlaşma seçilirken Levy uçuşu formülü kullanılmıştır. Levy uçuşundaki adım büyüklüğü, en iyi çözüm ve mevcut çözüm değerleri kullanılarak yeni kolon eni, boyu ve donatısı belirlenmiştir. Küresel tozlaşma aşamasından sonra oluşturulan değerler yönetmelik şartlarında geçirilmiştir. Yönetmelik şartından geçirilen çözüm, mevcut en iyi çözümden iyiyse hafızaya kaydedilmiştir.

“rand” komutu ile oluşturulan sayının 0,5 değerine eşit ya da büyük olması durumunda lokal tozlaşma kodları çalışacaktır. Lokal tozlaşma kodları, öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon algoritmasının öğrenci aşamasına benzer şekildedir. Popülasyon içerisinde seçilen rastgele iki polenin arasındaki fark kullanılarak lokal tozlaşma sonucu oluşacak çözüm değerleri oluşturulmuştur. Oluşturulan çözüm değerleri TLBO algoritmasındaki gibi yönetmelik şartlarından geçirilmiş ve iyi olan çözüm hafızada tutulmuştur.

3. BULGULAR

Bu kısımda belirtilen tasarım kriterleri esas alınarak, MATLAB kodları betonarme kolon, betonarme kiriş ve betonarme kare tekil temel için çalıştırılmıştır. İlk olarak, yapı elemanlarının geleneksel beton kullanılarak tasarlandığı varsayılmıştır ve bu durumda minimum emisyonu veren tasarım değerleri bulunmuştur. Daha sonra geopolimer beton kullanılması durumunda minimum emisyonu veren tasarım değerleri bulunmuştur. Emisyon miktarları hesaplanırken, betonarme donatısı kaynaklı emisyon miktarı da hesaba katılmıştır. Betonarme elemanda yer alan donatı üretiminden kaynaklı emisyon miktarı ile toplam kesit alanından donatı alanı çıkarılarak geriye kalan beton miktarından kaynaklı emisyon miktarı toplanarak, tablolarda “TE” toplam emisyon satırında gösterilmiştir. Donatı kaynaklı emisyon hesaplanırken; donatı bindirme payı, betonarme etriyesi ve çirozu hesaba katılmamıştır.

3.1. Betonarme Kolon Optimizasyonu

Tablo 9’da ve Tablo 10’da geleneksel beton ile tasarlanmış kolonun 10, 50, 100, 500, 1000, 5000, 10000 iterasyon sonucunda minimum CO₂ emisyonunu veren tasarım değerleri ile emisyon miktarları verilmiştir. Kolon boyutları tam sayı olacak şekilde, donatı alanı virgülden sonra iki hane hassaslığına sahiptir. Kolon boyutları ve donatı alanı dışındaki değerler ise virgülden sonra iki haneye yuvarlanmıştır.

Geleneksel beton ve geopolimer beton kullanılarak yapılan kolon tasarımında TLBO algoritma değişkenleri; kolon genişliği (b), kolon yüksekliği (h), donatı alanıdır (A_{st}). Beton kaynaklı emisyon (BK), donatı kaynaklı emisyon (DK) ve toplam emisyon (TE) miktarları, algoritma değişkenlerine göre Eşitlik 1-3. yardımıyla hesaplanmıştır.

$$BK = (b \times h - A_{st}) \times h_k \times GBE \quad (1)$$

$$DK = (A_{st}) \times h_k \times doa \times DE \quad (2)$$

$$TE = BK + DK \quad (3)$$

h_k , kolon yüksekliğini; GBE , geleneksel ya da geopolimer betonun birim miktarından kaynaklanan emisyon miktarını; doa , betonarme donatısı özgül ağırlığını; DE , donatı birim miktarından kaynaklanan emisyon miktarını göstermektedir.

Tablo 11 ve Tablo 12’de geopolimer beton ile tasarlanmış kolonun 10, 50, 100, 500, 1000, 5000, 10000 iterasyon sonucunda minimum CO₂ emisyonunu veren tasarım değerleri ile emisyon miktarları verilmiştir. Kolon boyutları tam sayı olacak şekilde, donatı alanı virgülden sonra iki hane olacak şekilde yukarıya yuvarlanmıştır. Kolon boyutları ve donatı alanı dışındaki değerler ise virgülden sonra iki haneye yuvarlanmıştır.

Tablo 9. TLBO algoritmasına göre geleneksel beton ile tasarlanmış kolon tasarım sonuçları

	İterasyon Sayısı						
	10	50	100	500	1000	5000	10000
Tasarım Değerleri							
kolon genişliği, b (cm)	34,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
kolon yüksekliği, h (cm)	63,00	66,00	66,00	66,00	66,00	66,00	66,00
donatı alanı, A_{st} (cm ²)	76,94	76,23	76,71	76,93	76,93	76,93	76,93
beton kaynaklı emisyon, BK (kg)	192,43	180,90	179,44	178,87	178,87	178,87	178,87
donatı kaynaklı emisyon, DK (kg)	137,71	136,42	137,29	137,68	137,68	137,68	137,68
toplam emisyon, TE (kg)	330,14	317,32	316,73	316,55	316,55	316,55	316,55

Tablo 10. FPA'ya göre geleneksel beton ile tasarlanmış kolon tasarım sonuçları

	İterasyon Sayısı						
	10	50	100	500	1000	5000	10000
Tasarım Değerleri							
kolon genişliği, b (cm)	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	30,00
kolon yüksekliği, h (cm)	68,00	66,00	68,00	68,00	66,00	66,00	66,00
donatı alanı, A_{st} (cm ²)	71,92	77,48	74,04	74,11	76,93	76,93	76,93
beton kaynaklı emisyon, BK (kg)	193,02	179,21	185,93	185,81	178,87	178,87	178,86
donatı kaynaklı emisyon, DK (kg)	128,71	138,67	132,51	132,64	137,68	137,68	137,68
toplam emisyon, TE (kg)	321,73	317,88	318,44	318,45	316,55	316,55	316,54

Tablo 11. TLBO algoritmasına göre geopolimer beton ile tasarlanmış kolon tasarım sonuçları

	İterasyon Sayısı						
	10	50	100	500	1000	5000	10000
Tasarım Değerleri							
kolon genişliği, b (cm)	37,00	41,00	42,00	43,00	43,00	43,00	43,00
kolon yüksekliği, h (cm)	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00
donatı alanı, A_{st} (cm ²)	59,45	53,66	50,68	48,60	48,54	48,51	48,51
beton kaynaklı emisyon, BK (kg)	86,19	95,26	98,17	101,68	101,76	101,81	101,81
donatı kaynaklı emisyon, DK (kg)	106,39	96,03	90,69	86,97	86,86	86,81	86,81
toplam emisyon, TE (kg)	192,58	191,29	188,86	188,65	188,62	188,62	188,62

Tablo 12. FPA'ya göre geopolimer beton ile tasarlanmış kolon tasarım sonuçları

	İterasyon Sayısı						
	10	50	100	500	1000	5000	10000
Tasarım Değerleri							
kolon genişliği, b (cm)	49,00	37,00	43,00	43,00	43,00	41,00	43,00
kolon yüksekliği, h (cm)	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00
donatı alanı, A_{st} (cm ²)	52,55	58,25	48,61	49,54	49,14	51,84	48,51
beton kaynaklı emisyon, BK (kg)	113,42	85,70	101,77	100,02	100,70	96,07	101,80
donatı kaynaklı emisyon, DK (kg)	94,05	104,24	86,99	88,66	87,95	92,78	86,82
toplam emisyon, TE (kg)	207,47	189,94	188,76	188,68	188,65	188,85	188,62

3.2. Betonarme Kiriş Optimizasyonu

Tablo 13 ve Tablo 14'te geleneksel beton ile tasarlanmış kirişin 10, 50, 100, 500, 1000, 5000, 10000 iterasyon sonucunda minimum CO₂ emisyonunu veren tasarım değerleri ile emisyon miktarları verilmiştir. Kiriş boyutları tam sayı olacak şekilde, donatı alanı virgülden sonra iki hane olacak şekilde yukarıya yuvarlanmıştır. Donatı oranları virgülden sonra dört haneye, kalan değerler ise virgülden sonra iki haneye yuvarlanmıştır. Geleneksel beton ve geopolimer beton kullanılarak yapılan kiriş tasarımında algoritma değişkenleri; kiriş L, kiriş uzunluğunu; GBE, geleneksel ya da geopolimer betonun birim miktarından kaynaklanan emisyon miktarını; doa, betonarme donatısı özgül ağırlığını; DE, donatı birim miktarından kaynaklanan emisyon miktarını göstermektedir.

Tablo 15 ve Tablo 16'da geopolimer beton ile tasarlanmış kirişin 10, 50, 100, 500, 1000, 5000, 10000

genişliği (b_w), kiriş yüksekliği (h), kiriş alt kısmındaki donatı oranı (ρ) ve kiriş üst kısmındaki donatı oranı (ρ'). Toplam donatı alanı (TDA), beton kaynaklı emisyon (BK), donatı kaynaklı emisyon (DK) ve toplam emisyon (TE), miktarları, algoritma değişkenlerine göre Eşitlik 4-7. yardımıyla hesaplanmıştır.

$$TDA = (\rho + \rho') \times b_w \times h \quad (4)$$

$$BK = (b_w \times h - A_{st}) \times L \times GBE \quad (5)$$

$$DK = TDA \times L \times doa \times DE \quad (6)$$

$$TE = BK + DK \quad (7)$$

iterasyon sonucunda minimum CO₂ emisyonunu veren tasarım değerleri ile emisyon miktarları verilmiştir. Kiriş boyutları tam sayı olacak şekilde, donatı alanı virgülden sonra iki hane olacak şekilde yukarıya yuvarlanmıştır. Donatı oranları virgülden sonra dört haneye, kalan değerler ise virgülden sonra iki haneye yuvarlanmıştır.

Tablo 13. TLBO algoritmasına göre geleneksel beton ile tasarlanmış kiriş tasarım sonuçları

	İterasyon Sayısı						
	10	50	100	500	1000	5000	10000
Tasarım Değerleri							
Kiriş genişliği, bw (cm)	27,00	26,00	26,00	26,00	26,00	25,00	25,00
Kiriş yüksekliği, h (cm)	59,00	59,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
Alt taraftaki donatı oranı, ρ	0,0190	0,0192	0,0196	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200
Üst taraftaki donatı oranı, ρ'	0,0061	0,0052	0,0035	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021
Toplam donatı alanı, TDA (cm ²)	37,28	36,52	34,56	33,13	33,10	33,10	33,10
Beton kaynaklı emisyon, BK (kg)	147,48	138,51	138,49	139,02	139,07	139,06	139,06
Donatı kaynaklı emisyon, DK (kg)	66,72	65,36	61,84	59,29	59,24	59,24	59,24
Toplam emisyon, TE (kg)	214,20	203,87	200,33	198,31	198,31	198,30	198,30

Tablo 14. FPA'ya göre geleneksel beton ile tasarlanmış kiriş tasarım sonuçları

	İterasyon Sayısı						
	10	50	100	500	1000	5000	10000
Tasarım Değerleri							
Kiriş genişliği, bw (cm)	38,00	26,00	28,00	25,00	25,00	26,00	25,00
Kiriş yüksekliği, h (cm)	51,00	57,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
Alt taraftaki donatı oranı, ρ	0,0185	0,0197	0,0181	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200
Üst taraftaki donatı oranı, ρ'	0,0056	0,0084	0,0020	0,0023	0,0021	0,002	0,002
Toplam donatı alanı, TDA (cm ²)	45,63	40,13	32,52	33,30	33,11	33,09	33,15
Beton kaynaklı emisyon, BK (kg)	175,60	131,44	150,95	138,83	139,04	139,14	138,99
Donatı kaynaklı emisyon, DK (kg)	81,66	71,83	58,20	59,59	59,26	59,22	59,32
Toplam emisyon, TE (kg)	257,26	203,27	209,15	198,42	198,30	198,36	198,31

Tablo 15. TLBO algoritmasına göre geopolimer beton ile tasarlanmış kiriş tasarım sonuçları

	İterasyon Sayısı						
	10	50	100	500	1000	5000	10000
Tasarım Değerleri							
Kiriş genişliği, b (cm)	34,00	27,00	26,00	26,00	26,00	25,00	25,00
Kiriş yüksekliği, h (cm)	59,00	59,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
Alt taraftaki donatı oranı, ρ	0,0153	0,0191	0,0194	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200
Üst taraftaki donatı oranı, ρ'	0,0024	0,0044	0,0025	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021
Toplam donatı alanı, TDA (cm ²)	33,02	36,70	33,59	33,11	33,10	33,10	33,10
Beton kaynaklı emisyon, BK (kg)	68,07	52,62	51,91	50,61	50,62	50,61	50,61
Donatı kaynaklı emisyon, DK (kg)	59,10	65,67	60,11	59,35	59,24	59,24	59,24
Toplam emisyon, TE (kg)	127,17	118,29	112,02	109,96	109,86	109,85	109,85

Tablo 16. FPA'ya göre geopolimer beton ile tasarlanmış kiriş tasarım sonuçları

	İterasyon Sayısı						
	10	50	100	500	1000	5000	10000
Tasarım Değerleri							
Kiriş genişliği, b (cm)	28,00	26,00	25,00	26,00	25,00	25,00	26,00
Kiriş yüksekliği, h (cm)	56,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
Alt taraftaki donatı oranı, ρ	0,02	0,0182	0,0187	0,0200	0,0198	0,0200	0,0200
Üst taraftaki donatı oranı, ρ'	0,0085	0,0058	0,0052	0,0016	0,0023	0,0021	0,002
Toplam donatı alanı, TDA (cm ²)	42,62	35,87	35,53	33,13	33,21	33,10	32,97
Beton kaynaklı emisyon, BK (kg)	50,2	50,32	50,12	51,68	50,60	50,61	50,89
Donatı kaynaklı emisyon, DK (kg)	76,27	64,2	63,58	59,28	59,44	59,24	58,99
Toplam emisyon, TE (kg)	126,47	114,52	113,7	110,96	110,04	109,85	109,88

3.3. Betonarme Kare Tekil Temel Optimizasyonu

Tablo 17 ve Tablo 18'de geleneksel beton ile tasarlanmış temel için 10, 50, 100, 500, 1000, 5000, 10000 iterasyon sonucunda minimum CO₂ emisyonunu veren tasarım değerleri ile emisyon miktarları verilmiştir. Temel boyutları ve donatı alanı virgülden sonra iki hane olacak şekilde yukarıya yuvarlanmıştır. Kalan değerler ise virgülden sonra iki haneye yuvarlanmıştır.

Geleneksel beton ve geopolimer beton kullanılarak yapılan temel tasarımında TLBO algoritması değişkenleri; temel eni ve boyu (b_x, b_y), temel kalınlığı (h) ve temel eksenleri donatı alanlarıdır (As_x, As_y). Toplam donatı alanı (TDA), beton kaynaklı emisyon (BK), donatı kaynaklı emisyon (DK) ve toplam emisyon (TE) miktarları, algoritma değişkenlerine göre Eşitlik 8-11. yardımıyla hesaplanmıştır.

$$TDA = As_x + As_y \quad (8)$$

$$BK = b_x \times b_y \times h - TDA \times (b_x + 2 \times (h - 2 \times pp)) \times GBE \quad (9)$$

$$DK = (TDA \times (b_x + 2 \times (h - pp))) \times doa \times DE \quad (10)$$

$$TE = BK + DK \quad (11)$$

pp, paspayını; GBE, geleneksel ya da geopolimer betonun birim miktarından kaynaklanan emisyon miktarını; doa, betonarme donatısı özgül ağırlığını; DE, donatı birim miktarından kaynaklanan emisyon miktarını göstermektedir.

Tablo 19 ve Tablo 20'de geopolimer beton ile tasarlanmış temel için 10, 50, 100, 500, 1000, 5000, 10000 iterasyon sonucunda minimum CO₂ emisyonunu veren tasarım değerleri ile emisyon miktarları verilmiştir.

Temel boyutları ve donatı alanı virgülden sonra iki hane olacak şekilde yukarıya yuvarlanmıştır. Kalan değerler ise virgülden sonra iki hane yuvarlanmıştır.

Tablo 17. TLBO algoritmasına göre geleneksel beton ile tasarlanmış temel tasarım sonuçları

	İterasyon Sayısı						
	10	50	100	500	1000	5000	10000
Tasarım Değerleri							
temel eni, b_x (m)	3,22	3,04	3,04	3,03	3,03	3,03	3,03
temel boyu, b_y (m)	3,22	3,04	3,04	3,03	3,03	3,03	3,03
temel kalınlığı, h (m)	0,68	0,67	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
x eksenli boyunca donatı alanı, As_x (cm ²)	71,37	37,71	36,83	36,74	36,74	36,74	36,74
y eksenli boyunca donatı alanı, As_y (cm ²)	71,37	37,71	36,83	36,74	36,74	36,74	36,74
toplam donatı alanı, TDA (cm ²)	142,74	75,42	73,66	73,48	73,48	73,48	73,48
beton kaynaklı emisyon, BK (kg)	2193,79	1904,36	1889,68	1888,19	1888,19	1888,19	1888,19
donatı kaynaklı emisyon, DK (kg)	372,10	186,64	181,84	181,33	181,33	181,33	181,33
toplam emisyon, TE (kg)	2565,89	2091,00	2071,52	2069,52	2069,52	2069,52	2069,52

Tablo 18. FPA'ya göre geleneksel beton ile tasarlanmış temel tasarım sonuçları

	İterasyon Sayısı						
	10	50	100	500	1000	5000	10000
Tasarım Değerleri							
temel eni, b_x (m)	3,15	3,04	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03
temel boyu, b_y (m)	3,15	3,04	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03
temel kalınlığı, h (m)	0,76	0,67	0,67	0,66	0,66	0,66	0,66
x eksenli boyunca donatı alanı, As_x (cm ²)	55,52	36,77	36,75	36,74	36,74	36,74	36,74
y eksenli boyunca donatı alanı, As_y (cm ²)	55,52	36,77	36,75	36,74	36,74	36,74	36,74
toplam donatı alanı, TDA (cm ²)	111,04	73,54	73,50	73,48	73,48	73,48	73,48
beton kaynaklı emisyon, BK (kg)	2346,87	1891,33	1888,63	1888,19	1888,19	1888,19	1888,19
donatı kaynaklı emisyon, DK (kg)	295,24	181,61	181,41	181,33	181,33	181,33	181,33
toplam emisyon, TE (kg)	2642,11	2072,95	2070,04	2069,52	2069,52	2069,52	2069,52

Tablo 19. TLBO algoritmasına göre geopolimer beton ile tasarlanmış temel tasarım sonuçları

	İterasyon Sayısı						
	10	50	100	500	1000	5000	10000
Tasarım Değerleri							
temel eni, b_x (m)	3,23	3,04	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03
temel boyu, b_y (m)	3,23	3,04	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03
temel kalınlığı, h (m)	0,70	0,67	0,67	0,66	0,66	0,66	0,66
x eksenli boyunca donatı alanı, As_x (cm ²)	41,90	40,72	36,76	36,74	36,74	36,74	36,74
y eksenli boyunca donatı alanı, As_y (cm ²)	41,90	40,72	36,76	36,74	36,74	36,74	36,74
toplam donatı alanı, TDA (cm ²)	83,80	81,44	73,52	73,48	73,48	73,48	73,48
beton kaynaklı emisyon, BK (kg)	832,30	697,59	687,61	687,16	687,16	687,16	687,16
donatı kaynaklı emisyon, DK (kg)	221,13	202,08	181,48	181,33	181,33	181,33	181,33
toplam emisyon, TE (kg)	1053,43	899,67	869,09	868,49	868,49	868,49	868,49

Tablo 20. FPA'ya göre geopolimer beton ile tasarlanmış temel tasarım sonuçları

	İterasyon Sayısı						
	10	50	100	500	1000	5000	10000
Tasarım Değerleri							
temel eni, b_x (m)	3,32	3,04	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03
temel boyu, b_y (m)	3,32	3,04	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03
temel kalınlığı, h (m)	0,75	0,67	0,67	0,66	0,66	0,66	0,66
x eksenli boyunca donatı alanı, As_x (cm ²)	52,64	37,32	36,96	36,74	36,74	36,74	36,74
y eksenli boyunca donatı alanı, As_y (cm ²)	52,64	37,32	36,96	36,74	36,74	36,74	36,74
toplam donatı alanı, TDA (cm ²)	105,28	74,64	73,92	73,48	73,48	73,48	73,48
beton kaynaklı emisyon, BK (kg)	933,20	697,96	687,29	687,16	687,16	687,16	687,16
donatı kaynaklı emisyon, DK (kg)	288,97	185,16	182,45	181,33	181,33	181,33	181,33
toplam emisyon, TE (kg)	1222,17	883,12	869,74	868,49	868,49	868,49	868,49

3.4. Algoritmaların Çevrimli Çalıştırılması

Önceki bölümlerde oluşturulan algoritmaların birbirinden bağımsız şekilde 30 kez çalıştırılmasıyla elde edilen aritmetik ortalama, standart sapma, minimum emisyonu veren iterasyon sayısı gibi değerler Tablo 21-23'te verilmiştir.

4. Bölümün önceki başlıklarında algoritmalar, önceden belirlenen iterasyonlar tamamlanana kadar devam ederken; bu başlıkta, maksimum iterasyon sayıları kolon ve kiriş için 5000, temel için 500 olacak ve çevrimli çalıştırma sonucunda minimuma ulaşılan ilk iterasyon sayısını gösterecek şekilde ayarlanarak sonuçlar sunulmuştur.

Tablo 21. Kolon tasarımı için istatistiksel sonuçlar

	TLBO Geleneksel	FPA Geleneksel	TLBO Geopolimer	FPA Geopolimer
Kolon eni (cm)	30	30	43	43
Kolon boyu (cm)	66	66	70	70
Toplam donatı alanı (cm ²)	76,93	76,93	48,51	48,51
Minimum emisyon (kg)	316,55	316,55	188,62	188,62
Aritmetik ortalama (kg)	316,55	316,68	188,62	188,69
Standart sapma	0	0,48	2,24x10 ⁻⁸	0,14
İterasyon sayısı	1984	512	4447	755

Tablo 22. Kiriş tasarımı için istatistiksel sonuçlar

	TLBO Geleneksel	FPA Geleneksel	TLBO Geopolimer	FPA Geopolimer
Kiriş eni (cm)	25	25	25	25
Kiriş boyu (cm)	60	60	60	60
Toplam donatı alanı (cm ²)	33,10	33,10	33,10	33,10
Minimum emisyon (kg)	198,30	198,30	109,85	109,85
Aritmetik ortalama (kg)	198,30	198,41	109,85	110,07
Standart sapma	3,59x10 ⁻¹⁰	0,27	5,41x10 ⁻¹¹	0,92
İterasyon sayısı	4777	1029	4882	947

Tablo 23. Temel tasarımı için istatistiksel sonuçlar

	TLBO Geleneksel	FPA Geleneksel	TLBO Geopolimer	FPA Geopolimer
Temel eni (m)	3,03	3,03	3,03	3,03
Temel boyu (m)	3,03	3,03	3,03	3,03
Temel kalınlığı (m)	0,66	0,66	0,66	0,66
Toplam donatı alanı (cm ² , her iki eksendeki)	73,47	73,47	73,47	73,47
Minimum emisyon (kg)	2069,51	2069,51	868,48	868,48
Aritmetik ortalama (kg)	2069,51	2069,51	868,48	868,48
Standart sapma	8,67x10 ⁻⁶	2,29x10 ⁻⁶	8,13x10 ⁻⁷	2,07x10 ⁻⁶
İterasyon sayısı	483	305	480	313

4. SONUÇLAR

FPA ve TLBO algoritmaları sonucunda tasarım şartlarını sağlayan ve minimum emisyonu amaçlayan boyutlandırmalar elde edilmiştir.

Geleneksel betonlu kolon tasarlama algoritmaları incelendiğinde; tek seferli çalıştırmada TLBO'da 500 iterasyona, FPA'da 1000 iterasyona yaklaşınca optimuma yakınsayan tasarım değerleri elde edilmeye başlanmıştır. 30 kez çevrimli çalışma yapıp en küçük iterasyonlara bakıldığında TLBO 1984'üncü, FPA ise 512'inci iterasyonda minimum emisyon değerlerini vermiştir. Her iki algoritmanın standart sapmaları incelendiğinde TLBO algoritması FPA'ya göre daha iyi sonuç vermiştir. Önceden belirtilen yük ve tasarım şartları altında her iki algoritma da; optimum kolon boyutunu 30 x 66 cm ve optimum donatı alanını 76,93 cm² olarak vermiştir. Bu değerlere göre ise minimum CO₂ emisyonu olan 316,55 kg değeri elde edilmiştir.

Geleneksel betonun kullanıldığı kolon ile aynı tasarım şartlarına sahip, geopolimer betonlu kolon tasarım algoritmalarına göre; tek seferli çalıştırmada TLBO'da 1000 iterasyona, FPA'da ise 10000 iterasyona yaklaşınca optimuma yakınsayan tasarım değerleri elde edilmeye başlanmıştır. 30 kez çevrimli çalışma yapıp en küçük iterasyonlara bakıldığında TLBO 4447'inci, FPA ise 755'inci iterasyonda minimum emisyon değerlerini vermiştir. Her iki algoritmanın standart sapmalarını incelediğimizde; TLBO algoritması FPA'ya göre daha iyi sonuç vermiştir. Önceden belirtilen yük ve tasarım şartları altında her iki algoritma da; optimum kolon boyutunu 43 x 70 cm ve optimum donatı alanını 48,51 cm² olarak vermiştir. Bu değerlere göre ise fabrikada

beton ve çelik donatı üretimi kaynaklı toplam CO₂ salınımı 188,62 kg'dır.

Geleneksel betonlu kiriş tasarlama algoritmaları incelendiğinde; TLBO algoritmasında tek seferli çalıştırma sonucunda, 5000 iterasyona yaklaşınca optimuma yakın değerler elde edilmeye başlanmıştır. FPA ile tasarımda; TLBO ile elde edilene değerlere yakın sonuçlar elde edilmiştir fakat TLBO algoritması gibi 5000 iterasyondan itibaren kararlı sonuçlar vermemiştir. 30 kez çevrimli çalıştırma yapıldığında; en küçük iterasyon sayılarına bakıldığında TLBO 4777'inci, FPA ise 1029'uncu iterasyonda minimum emisyon değerlerini vermiştir. Her iki algoritmanın standart sapmalarını incelediğimizde TLBO algoritması, FPA'ya göre daha iyi sonuç vermiştir. Önceden belirtilen yük ve tasarım şartları altında her iki algoritma da; optimum kiriş boyutunu 25 x 60 cm ve optimum donatı alanını 33,10 cm² olarak vermiştir. Bu değerlere göre ise minimum CO₂ emisyonu olan 198,30 kg değeri elde edilmiştir.

Geleneksel betonlu kiriş ile aynı tasarım şartları altında, geopolimer betonlu kiriş tasarım algoritmaları incelendiğinde; tek seferli çalıştırılınca TLBO algoritması 5000 iterasyona yaklaşınca FPA'ya göre daha istikrarlı sonuçlar vermiştir. 30 defa çevrimli çalıştırma yapıldığında; en küçük iterasyon sayılarına bakıldığında TLBO 4882'inci, FPA ise 947'inci iterasyonda minimum emisyon değerlerini vermiştir. Her iki algoritmanın standart sapmalarını incelendiğinde TLBO algoritması FPA'ya göre daha iyi sonuç vermiştir. Önceden belirtilen yük ve tasarım şartları altında her iki algoritma da; optimum kiriş boyutunu 25 x 60 cm ve optimum donatı alanını 33,10 cm² olarak vermiştir. Bu tasarım değerlerine göre ise fabrikada geopolimer beton

ve çelik donatı üretimi kaynaklı minimum toplam emisyon 109,85 kg olarak bulunmuştur.

Geleneksel betonlu kiriş ile aynı tasarım şartlarına sahip, geopolimer betonun kullanıldığı kiriş tasarım algoritmalarının sonuçlarına bakıldığında da; tek seferli çalıştırma şartı altında, TLBO algoritması FPA'ya göre 5000 iterasyon civarlarında daha istikrarlı sonuçlar vermiştir. 30 kez çevrimli sonuçlar incelendiğinde ise TLBO algoritması 4882. iterasyonda, FPA ise 947. iterasyonda minimum sonuçları vermektedir. Standart sapmalar incelendiğinde ise TLBO'nun FPA'ya göre daha iyi olduğu görülmüştür. Her iki algoritma sonuçları incelendiğinde, optimum tasarımı 25 x 60 cm kiriş boyutlarına ve 33,10 cm² donatı alanına sahiptir. Fabrikada beton ve donatı malzemeleri üretimi kaynaklı toplam emisyon ise 109,85 kg'dır.

Geleneksel betonlu kare tekil temel tasarım algoritmaları incelendiğinde; tek seferli çalıştırmada tasarım değişkenleri 500 iterasyona yaklaşıncaya optimuma yakın değerler elde edilmeye başlanmıştır. 30 kez çevrimli çalıştırma yapıldığında; TLBO 483'üncü, FPA ise 305'inci iterasyonda minimum emisyon değerlerini vermiştir. Her iki algoritmanın standart sapmalarını incelendiğimizde FPA, TLBO algoritmasına göre daha iyi sonuç vermiştir. Önceden belirtilen yük ve tasarım şartları altında her iki algoritma da; optimum temel boyutlarını 3,03 x 3,03 x 0,66 m ve donatı alanını 73,47 cm² olarak vermiştir. Bu değerlere göre ise minimum CO₂ emisyonu olan 2069,51 kg değeri elde edilmiştir.

Geleneksel betonlu kare tekil temel ile aynı tasarım şartları altındaki geopolimer betonlu kare tekil temel tasarım algoritmaları incelendiğinde; tek seferli çalıştırmada tasarım değişkenleri 500 iterasyona yaklaşıncaya optimuma yakınsayan değerler elde edilmeye başlanmıştır. 30 kez çevrimli çalıştırma yapıldığında; en küçük iterasyon sayılarına bakıldığında TLBO 480'inci, FPA ise 313'üncü iterasyonda minimum emisyon değerlerini vermiştir. Her iki algoritmanın standart sapmalarını incelediğimizde TLBO algoritması, FPA'ya göre daha iyi sonuç vermiştir. Önceden belirtilen yük ve tasarım şartları altında her iki algoritma da; optimum temel boyutlarını 3,03 x 3,03 x 0,66 m ve optimum donatı alanını 73,47 cm² olarak vermiştir. Fabrikada üretilen geopolimer beton ve çelik donatı malzemeleri üretimi sırasında ortaya çıkan toplam CO₂ emisyonu ise 868.48 kg olarak elde edilmiştir.

Algoritmalar oluşturulurken, geleneksel beton üretimi sırasında ortaya çıkan CO₂ emisyon miktarı 316 kg/m³, geopolimer beton üretimi sırasında ortaya çıkan CO₂ emisyon miktarı ise 115 kg/m³ sabit değerler olarak kabul edilmiştir. Sadece betondan üretilen donatısız bir yapı düşünülürse, geopolimer kullanılmasıyla CO₂ emisyon miktarı %64 oranında azalmaktadır. Bu çalışmada kullanılan algoritmalar dikkate alındığında; çelik donatının da hesaba katıldığı geopolimer betonlu tasarım sonuçlarını incelediğimizde yaklaşık olarak; kolon imalatında %40, kiriş imalatında %45, temel imalatında ise %58 oranlarında CO₂ emisyon miktarı azalmaktadır.

Sonuç olarak minimum CO₂ emisyonunu verecek tasarımı amaçlayan algoritmalar incelendiğinde; kolon tasarımında geopolimer beton kullanılması, kolon boyutlarında artışa neden olurken, donatı miktarında azalmaya neden olmuştur. Kiriş ve temel tasarımlarını incelediğimizde ise, geopolimer beton kullanılması, boyutları ve donatı miktarında değişikliğe sebep olmamıştır. Dolayısıyla kiriş ve temel tasarımında minimum CO₂ emisyonunu veren dizayn, beton türüne göre değişmemiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Climate action and support trends; 2019. United Nations: Climate Change.
- [2] He Z, Zhu X, Wang J, Mu M, Wang Y. Comparison of CO₂ emissions from OPC and recycled cement production. Elsevier: Construction and Building Materials. 2019;211: 965-973.
- [3] Energy Efficiency and CO₂ Reduction in the Iron and Steel Industry; 2019. European Commission.
- [4] Davidovits J. Environmentally Driven Geopolymer Cement Applications, Geopolymer 2002 Conference. Melbourne: 2002. p.145-156.
- [5] Shayan A, Xu A, Phaedonos AF. Field performance of geopolymer concrete, used as a measure towards reducing carbon dioxide emission. Materials Science. 2013;3:245-52.
- [6] Mishra G. [Internet]; 2014 [cited 2019 December 3] Geopolymer Concrete – Properties, Composition and Applications. Available from: <https://theconstructor.org/concrete/geopolymer-concrete-ecofriendly-construction-material/9430/>
- [7] Greenroofs [Internet]; 2015 [cited 2019 December]. Available from: <https://www.greenroofs.com/projects/global-change-institute/>
- [8] Davidovits J. 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs, Geopolymer 2002 Conference. 2002. Melbourne: p.176-83.
- [9] Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DMJ, Rangan V. On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. ACI Materials Journal. 2004;101(52): 467-472.
- [10] Geopolymer. [Internet]; 2016 [cited 2019 December 3]. Available from: <https://www.geopolymer.org/applications/geopolymer-cement/>
- [11] Geopolymer. [Internet]; 2016 [cited 2019 December 3]. Available from: <https://www.geopolymer.org/library/technical-papers/technical-paper-on-geopolymer-aircraft-pavement/>
- [12] Li C, Gong X, Cui S, Wang Z, Zheng Y, Chi B. CO₂ Emissions due to Cement Manufacture, Material Science Forum. 2011;685: 181-187.
- [13] Akçansa. [Internet]; 2018 [cited 2019 November 27]. Sürdürülebilirlik raporu 2016-2017. Available from: <http://www.akcansa.com.tr/downloads/surdurebilirlik/AKC-surdurulebilirlikRapor-261118.pdf>

- [14] McLellan BC, Williams RP, Lay J, Riessen AV, Corder GD. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. *Journal of Cleaner Production*. 2011;19(9-10): 1080-1090.
- [15] Heuristic. [Internet]; 2015 [cited 2019 December 3]. Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Heuristic>
- [16] Blum C, Roli A. Metaheuristics in combinatorial optimization: overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*. 2001;35: 268-308.
- [17] Rao RV, Savsani VJ, Vakharia DP. Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer-aided Design*. 2011;43: 303-315.
- [18] Rao RV. Review of applications of TLBO algorithm and a tutorial for beginners to solve the unconstrained and constrained optimization problems. *Decision Science Letters*. 2016;5: 1-30.
- [19] Dede T. Optimum design of grillage structures to LRFD-AISC with teaching-learning based optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, – Springer. 2013; 48:955–964.
- [20] Temür R, Bekdaş G. Teaching learning-based optimization for design of cantilever retaining walls. *Structural Engineering and Mechanics*. 2016; 57(4): 763-783.
- [21] Dede T, Ayvaz Y. Structural optimization with teaching-learning-based optimization algorithm. *Structural Engineering and Mechanics - koreascience.or.kr*. 2013; 495-511.
- [22] Aydogdu I, Akin A. Teaching and learning-based optimization algorithm for optimum design of steel buildings. *International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, 2014. Reston, Virginia: ASCE; 2014. p. 2167-2175.
- [23] Toğan V. Design of planar steel frames using teaching-learning based optimization. *Engineering Structures - Elsevier*. 2012; 34: 225-232.
- [24] Degertekin SO, Hayalioglu MS. Sizing truss structures using teaching-learning-based optimization. *Computers & Structures - Elsevier*. 2013; 119: 177-188.
- [25] Akin A, Aydogdu I. Optimum design of steel space frames by hybrid teaching-learning based optimization and harmony search algorithms. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*. 2015; 9(7): 1318-1325.
- [26] Daloglu AT, Artar M, Ozgan K, Karakas AI. Optimum design of braced steel space frames including soil-structure interaction via teaching-learning-based optimization and harmony search algorithms. *Advances in Civil Engineering - Hindawi.com*. 2018.
- [27] Yang XS. Flower pollination algorithm for global optimization. *Unconventional Computation and Natural Computation*. 2012; 7445:240-249.
- [28] Nigdeli SM, Bekdaş G, Yang XS. Application of the flower pollination algorithm in structural engineering. *Metaheuristics and Optimization in Civil Engineering – Springer*. 2016; 25-42.
- [29] Mergos PE, Mantoglou F. Optimum design of reinforced concrete retaining walls with the flower pollination algorithm. *Structural and Multidisciplinary Optimization – Springer*. 2020; 61: 575-585.
- [30] Nigdeli SM, Bekdaş G, Yang XS. Metaheuristic optimization of reinforced concrete footings. *KSCE Journal of Civil Engineering – Springer*. 2018; 22: 4555-4563.
- [31] Roh S, Tae S, Suk SJ, Ford G, Shin S. Development of a building life cycle carbon emission assessment program (BEGAS2.0) for Korea's green building index certification system. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2016;53:954-965.