

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**LİFLİ BETON KULLANILAN BETONARME YAPILARIN META SEZGİSEL
YÖNTEMLERLE MALİYET OPTİMİZASYONU**

Seda TURAN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

TEMMUZ 2024

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**LİFLİ BETON KULLANILAN BETONARME YAPILARIN META SEZGİSEL
YÖNTEMLERLE MALİYET OPTİMİZASYONU**

Seda TURAN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

TEMMUZ 2024

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LİFLİ BETON KULLANILAN BETONARME YAPILARIN META SEZGİSEL
YÖNTEMLERLE MALİYET OPTİMİZASYONU**

Seda TURAN
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

TEMMUZ 2024

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LİFLİ BETON KULLANILAN BETONARME YAPILARIN META SEZGİSEL
YÖNTEMLERLE MALİYET OPTİMİZASYONU**

Seda TURAN
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

Bu tez 16/07/2024 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. İbrahim AYDOĞDU
Prof. Dr. Erkan DOĞAN
Doç. Dr. Bekir AKGÖZ
Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN
Dr. Öğr. Üyesi Refik Burak TAYMUŞ

ÖZET

LİFLİ BETON KULLANILAN BETONARME YAPILARIN META SEZGİSEL YÖNTEMLERLE MALİYET OPTİMİZASYONU

Seda TURAN

Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İbrahim AYDOĞDU

Eş Danışman: Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Temmuz 2024; 85 sayfa

Lifli beton yapılar, taşıma kapasitesini artırarak donatı ihtiyacını azaltmaktadır. Ancak, liflerin betona eklenmesi ek bir maliyet oluşturur. Bu nedenle, literatürde lif kullanımının maliyet açısından avantajlı olup olmadığı konusunda net bir bilgi bulunmamaktadır. Bu çalışmada, lifli ve lifsiz betonarme yapıların optimum maliyet üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, lifli betonarme sistemlerin optimum boyutlandırılmasını sağlayan iki program geliştirilmiştir. İlk program, lifli betonarme kirişlerin optimum boyutlandırmasını MATLAB ortamında yapabilmektedir. İkinci program ise lifli ve lifsiz betonarme çerçevelerin optimum boyutlandırılmasını VB.net programlama dili ile OAPI platform yardımıyla ETABS sonlu elemanlar programı ile senkronize şekilde gerçekleştirmektedir. Lifli betonun tasarımında, Fib Model Kod (2010) tarafından önerilen hesap yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca, lifli betonun tasarımı için çatlak ağzı genişliği (CMOD) test verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu test, EN 14651 standardına uygun olarak yapılmış ve çatlak ağız açıklığı deformasyonuna karşılık gelen çekmede eğilme değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler, lifli beton tasarım esaslarında kullanılmıştır.

Bu çalışmada, lifli ve lifsiz betonun yapılarda maliyet performansını karşılaştırmak amacıyla geliştirilen programlarda çerçeve tasarımı kullanılmıştır. Çerçeve tasarımında, yalnızca kiriş elemanları lifli olarak tasarlanmıştır. Bu tasarımların optimize edilmesi, ekonomik yapıların inşa edilmesine olanak sağlamaktadır. Optimum tasarım analizleri için yazılan lifli betonarme kiriş ve lifli ile lifsiz betonarme çerçeve tasarımı programlarında meta-sezgisel yöntemler kullanılmıştır. Kullanılan yöntemler arasında Yapay Arı Kolonisi Optimizasyonu (YAKO), Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon (BTO), Ağaç Tohum Optimizasyonu (ATO) gibi performansı kanıtlanmış yöntemlerin yanı sıra Vahşi At Optimizasyonu (VAO) gibi yeni bir yöntem de bulunmaktadır. Hem VAO'nun performansı, çeşitli mühendislik problemlerinde diğer optimizasyon yöntemleriyle karşılaştırılmış hem de özellikleri iyileştirilerek İyileştirilmiş Vahşi At Optimizasyonu (İVAO) geliştirilmiştir. Optimizasyon yöntemlerinin performanslarının kıyaslanabilmesi için yazılan ilk programda, tek açıklıklı kirişlerin yayılı yük altındaki farklı açıklıklara sahip örnekleri kullanılmıştır. İkinci programda ise iki boyutlu altı elemanlı çerçeve örneği ile referans alınmış iki boyutlu ve üç boyutlu betonarme çerçeve örnekleri kullanılmıştır. Çerçeve örnekleri üzerinde yapılan analizler, lifli tasarımın donatı miktarını azaltarak lifsiz tasarıma kıyasla daha ekonomik bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Bu çalışma, özgün akademik yayınlara katkı sağlamasının

yanı sıra inşaat sektöründe maliyet etkinliğini artırma açısından da önemli bir yere sahiptir.

ANAHTAR KELİMELEER: Betonarme Yapı, Fib-Model Code 2010, Lifli Betonarme Kirişler, Meta-sezgisel Yöntemler, Optimum Tasarım

JÜRİ: Doç. Dr. İbrahim AYDOĞDU

Prof. Dr. Erkan DOĞAN

Doç. Dr. Bekir AKGÖZ

Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN

Dr. Öğr. Üyesi Refik Burak TAYMUŞ



ABSTRACT

COST OPTIMIZATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES USING FIBERS CONCRETE USING WITH META-HEURISTIC METHODS

Seda TURAN

PhD Thesis in Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İbrahim AYDOĞDU

Co-Supervisor: Prof. Dr. Niyazi Ugur KOCKAL

July 2024; 85 pages

Fiber-reinforced concrete structures increase load-bearing capacity and consequently reduce the need for reinforcement. However, adding fibers to concrete incurs additional costs. Therefore, there is no clear information in the literature on whether fiber usage is advantageous in terms of cost. This study investigates the impact of fiber-reinforced and non-fiber-reinforced concrete structures on optimal costs. For this purpose, two programs were developed to optimize the sizing of fiber-reinforced concrete systems. The first program can optimize the sizing of fiber-reinforced concrete beams in MATLAB. The second program optimizes the sizing of both fiber-reinforced and non-fiber-reinforced concrete frames using the VB.net programming language synchronized with the ETABS finite element software via the OAPI platform. In the design of fiber-reinforced concrete, the calculation method recommended by the Fib Model Code (2010) was used. Additionally, the design of fiber-reinforced concrete requires certain test data, provided by the Crack Mouth Opening Displacement (CMOD) test. This test is conducted according to the EN 14651 standard, yielding tensile bending values corresponding to crack mouth opening deformations. These values are used in the design principles of fiber-reinforced concrete.

In this study, frame design was used in the programs developed to compare the cost performance of fiber-reinforced and non-fiber-reinforced concrete in structures. In the frame design, only beam elements were designed with fibers. Optimizing these designs enables the construction of economical structures. Metaheuristic methods were employed in the programs developed for the optimal design analyses of fiber-reinforced concrete beams and fiber-reinforced and non-fiber-reinforced concrete frames. Among the methods used were Artificial Bee Colony Optimization (ABCO), Biogeography-Based Optimization (BBO), and Tree-Seed Optimization (TSO), which are proven methods, as well as a new method called Wild Horse Optimization (WHO). The performance of WHO was compared with other optimization methods in various engineering problems, and its features were enhanced to develop an Improved Wild Horse Optimization (IWHO). For comparing the performance of optimization methods, the first program used examples of single-span beams with different spans under distributed load. The second program used a two-dimensional six-member frame example and reference two-dimensional and three-dimensional reinforced concrete frame examples. Analyses performed on frame examples showed that fiber-reinforced design offers a more economical solution compared to non-fiber-reinforced design by reducing the amount of

reinforcement. This study not only contributes to original academic publications but also holds significant importance in enhancing cost efficiency in the construction industry.

KEYWORDS: Fiber Reinforced Concrete Beam, Fib-Model Code 2010, Meta-heuristic Methods, Optimum Design, Reinforced Concrete Structure

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. İbrahim AYDOĞDU

Prof. Dr. Erkan DOĞAN

Assoc. Prof. Dr. Bekir AKGOZ

Asist. Prof. Engin EMSEN

Asist. Prof. Refik Burak TAYMUS



ÖNSÖZ

Saygıdeğer Danışmanlarım Doç. Dr. İbrahim AYDOĞDU, Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Değerli Jüri Üyeleri,

Sevgili Ailem ve Sevdiklerim,

Bu tez çalışması, sizlerin desteği, yönlendirmesi ve ilhamıyla tamamlanmıştır. Danışmanım Doç. Dr. İbrahim AYDOĞDU değerli rehberliği ve yol göstericiliği, bu çalışmanın başarılı bir şekilde tamamlanmasında kritik bir rol oynamıştır. Kendisine içten teşekkürlerimi sunarım.

2. Danışmanım ve Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL ve Jüri üyeleri Prof. Dr. Erkan DOĞAN, Doç. Dr. Bekir AKGÖZ, Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN ve Dr. Öğr. Üyesi Refik Burak TAYMUŞ ise bu çalışmanın değerlendirilmesi için ayırdıkları zaman ve dikkatleri için minnettarım.

Ailem ve sevdiklerim, her zaman yanımda oldunuz ve desteğinizi esirgemediniz. Sizin sevgi dolu desteğiniz olmadan, bu tez çalışması hayata geçirilemezdi. Sizin varlığınız benim için en büyük motivasyon kaynağı oldu.

Bu tez çalışması sadece akademik bir başarı değil, aynı zamanda duygusal bir yolculuğun da ifadesidir. Bu yolda beni cesaretlendiren ve destekleyen herkese içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma, bilimsel bilgiye katkı sağlama amacı taşımaktadır ve gelecekteki araştırmacılara ışık tutması umulmaktadır.

Saygılarımla,

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	v
AKADEMİK BEYAN	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	3
2.1. Betonarme Yapıların Optimizasyonu ile İlgili Yapılan Çalışmalar	3
2.2. Lifli Betonarme Yapı Elemanların Modellenmesi ile İlgili Yapılan Çalışmalar ..	5
2.3. Kullanılan Optimizasyon Yöntemleri ile İlgili Yapılan Çalışmalar	6
3. MATERYAL VE METOT	10
3.1. Lifli Kirişlerin Tasarım İlkeleri	10
3.2. Lifli Kirişlerin Optimum Boyutlandırılması Problemi.....	16
3.2.1. Tasarım değişkenleri.....	16
3.2.2. Sınırlayıcılar	16
3.2.3. Amaç fonksiyonu.....	16
3.3. Çerçeve Optimizasyonu	17
3.3.1. Betonarme kiriş tasarımı.....	17
3.3.2. Betonarme kolon tasarımı.....	18
3.4. Meta-Sezgisel Yöntemler	19
3.4.1. Yapay arı kolonisi optimizasyonu	19
3.4.2. Biyocoğrafya tabanlı optimizasyon	21
3.4.3. Ağaç tohum optimizasyonu	23
3.4.4. Vahşi at optimizasyonu.....	26
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	30
4.1. Lifli Betonarme Kirişin Optimum Analizi ve Tasarımı	30
4.1.1. Test sonuçlarına bağlı gerçekleştirilen lifli betonarme kirişin optimum analizi ve tasarımı	30

4.1.2 Farklı test sonuçlarına bağlı gerçekleştirilen lifli betonarme kirişin optimum analizi ve tasarımı	34
4.2. Lifli ve Lifsiz Betonarme Çerçevenin Optimum Analizi ve Tasarımı	36
4.2.1. İki boyutlu altı elemanlı çerçevenin lifli ve lifsiz çerçevenin optimum tasarımı	38
4.2.2. İki boyutlu 21 elemanlı çerçevenin lifli ve lifsiz betonarme çerçevenin optimum tasarımı	43
4.2.3. Üç boyutlu 42 elemanlı lifli ve lifsiz betonarme çerçevenin optimum tasarımı	47
5. SONUÇLAR	52
5.1. Lifli Betonarme Kirişin Optimum Tasarım Sonuçları	52
5.2. Lifli ve Lifsiz Betonarme Çerçeve Sistemin Optimum Tasarım Sonuçları	53
6. KAYNAKLAR	56
7. EKLER	60
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Lifli Beton Kullanılan Betonarme Yapıların Meta Sezgisel Yöntemlerle Maliyet Optimizasyonu” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

16/07/2024

Seda TURAN

İmzası

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

β	: Kirişin Üst Kısmından Beton Basınç Bölgesinin Merkezine Kadar Olan Mesafe
γ_c	: Kısmi Güvenlik Faktörünü
ε_{cu}	: Betonun Nihai Gerinimi
ε_{Fu}	: Lifli Betonun Nihai Gerinimi
η	: Etkin Dayanımı Tanımlayan Faktör
λ	: Basınç Bölgesi Yüksekliğini Tanımlayan Faktör
ρ_1	: Boyuna Donatı Oranı
ρ_w	: Kesme Donatı Oranı
σ_{cp}	: Kesite Etkiyen Ortalama Gerilime
A_s	: Donatı Alanı
A_{sl}	: Boyuna Donatı
A_{sw}	: Kesme Donatı Alanı
b	: Kiriş genişliği
B_B	: Betonun Birim Maliyeti
B_L	: Lifin Birim Maliyeti
ÇÇ	: Çeliğin Birim Maliyeti
d	: Faydalı Derinlik
D_L	: Lifin Dozajı
E_{cm}	: Betonun Elastisite Modülü
f_{ck}	: Lifli Betonun Silindirik Basınç Dayanımı
f_{cm}	: Beton Çekme Gerilmesi
f_{ctm}	: Betonun Ortalama Çekme Dayanımı
f_{Ft}	: Lif Katkısından Kaynaklanan Çekme Gerilimi
f_{Fts}	: Kullanılabilirlik Nihai Dayanımı

f_{Ftu} : Nihai Dayanım

f_L : Orantılılık Sınırı

f_{R_1} : CMOD testinde $CMOD_1$ değerine karşılık gelen yük değeri

f_{R_2} : CMOD testinde $CMOD_2$ değerine karşılık gelen yük değeri

f_{R_3} : CMOD testinde $CMOD_3$ değerine karşılık gelen yük değeri

f_{R_4} : CMOD testinde $CMOD_4$ değerine karşılık gelen yük değeri

f_{sy} : Donatının Akma Dayanımı

h : Kiriş Yüksekliği

k : Boyut Etkisini Hesaba Katan Bir Faktör

l_{cs} : Yapısal Karakteristik Uzunluk

M_{cr} : Çatlama Momenti

M_{rdu} : Nihai Moment

s_{rm} : Ortalama Çatlak Aralığı

W_1 : Kesit Modülünü

$W_{\check{C}}$: Çeliğin Ağırlığı

W_{dim} : Çatlak açıklığı Sınır Değeri

w_u : Nihai Çatlak Açıklığı

V_B : Betonun Hacmi

V_d : Maksimum Kesme Kuvveti

V_{Rd} : Kesme Kuvveti

$V_{Rd,Fmin}$: Minimum Kesme Kuvveti

V_{rdF} : Boyuna Donatıdan Gelen Kesme Kuvveti

x : Kirişin Tepesinden Tarafsız Eksene Olan Mesafe

x_{tot} : Lif Geriliminin Çekme Bölgesi İçin Ağırlık Merkezi

y : Lif Geriliminin Çekme Bölgesi İçin Ağırlık Merkezi

Kısaltmalar

ABE	: Amerikan Beton Enstitüsü
ATO	: Ağaç Tohum Optimizasyon
BTO	: Biyo-coğrafya Tabanlı Optimizasyon
CMOD	: Çatlak Ağız Açıklığı Deplasmanı
ÇLB	: Çelik lifli beton
FIB	: Uluslararası Yapısal Beton Federasyonu
GSO	: Geometrik Sınırlayıcı Oranı
HVSD	: Hizmet verilebilirlik Sınır Durumu
İVAO	: İyileştirilmiş At Sürüşü Optimizasyonu
KSD	: Kullanılabilir Sınır Durum
LB	: Lifli beton
MEÜKÖ	: Maksimum En Üst Kat Ötelemesi
MKA	: Maksimum Katlararası Öteleme
NSD	: Nihai Sınır Durumu
OAPI	: Açık Uygulamalı Program Arayüzü
UYBF	: Uluslararası Yapısal Beton Federasyonu
VAO	: Vahşi At Optimizasyonu
YAKO	: Yapay Arı Kolonisi Optimizasyonu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. CMOD testi yük ve deplasman eğrisi (Fib model kod 2010).....	11
Şekil 3.2. Gerilme dağılımı idealleştirmesi (Fib model kod 2010)	12
Şekil 3.3. Doğrusal modelde gerilme dağılımı idealleştirilmesi (Fib model kod 2010)	13
Şekil 3.4. Basitleştirilmiş lifli beton kesitin basitleştirilmiş gerilim/gerinim ilişkisi (Fib Model Kod 2010)	13
Şekil 3.5. Arıların yiyecek arama davranışları (Akay, 2009)	20
Şekil 3.6. Ağaç tohum optimizasyonu (Kiran, 2015)	25
Şekil 3.7. Ağaç tohum optimizasyonu akış şeması.....	25
Şekil 3.8. İlk popülasyona uygun at gruplarının oluşturulması (Naruei ve Keynia, 2021)	26
Şekil 3.9. Vahşi at optimizasyonu akış şeması	29
Şekil 4.1. Tek açıklıklı basit giriş örneği	32
Şekil 4.2. Maliyet analizi sonuçları (USD).....	32
Şekil 4.3. Optimizasyon yöntemlerin eğilme kapasite oranları	32
Şekil 4.4. Optimizasyon yöntemlerin kesme kapasite oranları.....	33
Şekil 4.5. Optimizasyon yöntemlerinin çatlak kapasite kontrolü	35
Şekil 4.6. Maliyet değerleri (USD) 1. çözüm	36
Şekil 4.7 Maliyet değerleri (USD) 2. çözüm	37
Şekil 4.8. Maliyet değerleri (USD) 3. çözüm	37
Şekil 4.9. Çerçeve tasarımı yazılan programın ana sayfası	38
Şekil 4.10. Çerçeve tasarımı yazılan programın yapı özellikleri	39
Şekil 4.11. Çerçeve tasarımı yazılan programın optimizasyon parametreleri	39
Şekil 4.12. Çerçeve tasarımı yazılan programın optimizasyon yöntemleri	40
Şekil 4.13. İki boyutlu altı elemanlı çerçeve sistem	41
Şekil 4.14. İki boyutlu altı elemanlı liffsiz betonarme çerçeve modelinin arama geçmişi	42
Şekil 4.15. İki boyutlu altı elemanlı lifli betonarme çerçeve modelinin arama geçmişi	42
Şekil 4.16. İki boyutlu 21 elemanlı çerçeve sistem	45
Şekil 4.17. İki boyutlu 21 elemanlı lifli betonarme çerçeve modelinin arama geçmişi	46
Şekil 4.18. İki boyutlu 21 elemanlı liffsiz betonarme çerçeve modelinin arama geçmişi	47
Şekil 4.19. Üç boyutlu 42 elemanlı çerçeve sistem (Tapo vd. 2017)	50
Şekil 4.20. Üç boyutlu 42 elemanlı çerçeve sistem düzlem merkezi çerçeve gösterimi (Tapo vd. 2017).....	50
Şekil 4.21. Üç boyutlu 42 elemanlı liffsiz betonarme çerçeve modelinin arama geçmişi	51
Şekil 4.22. Üç boyutlu 42 elemanlı lifli betonarme çerçeve modelinin arama geçmişi	52

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. YAKO ve BTO yöntemlerinin parametreleri	31
Çizelge 4.2. ATO, VAO ve İVAO yöntemlerinin parametreleri	33
Çizelge 4.3. Tasarım değişkenleri.....	32
Çizelge 4.4. Tasarım değişkenleri.....	33
Çizelge 4.5. İki boyutlu altı elemanlı lifli betonarme çerçeve tasarım değişkenleri ve yük kombinasyonları	41
Çizelge 4.6. İki boyutlu altı elemanlı lifsiz betonarme çerçeve modelin maliyet analizi	43
Çizelge 4.7. İki boyutlu altı elemanlı lifli betonarme çerçeve modelinin maliyet analizi	44
Çizelge 4.8. İki boyutlu altı elemanlı lifsiz betonarme çerçeve modelin toplam maliyeti	33
Çizelge 4.9. İki boyutlu altı elemanlı lifli betonarme çerçeve modelin toplam maliyeti.....	45
Çizelge 4.10. İki boyutlu 21 elemanlı lifli betonarme çerçeve tasarım değişkenleri.....	46
Çizelge 4.11. İki boyutlu 21 elemanlı betonarme lifsiz çerçeve modelin maliyet analizi	47
Çizelge 4.12. İki boyutlu 21 elemanlı lifli betonarme çerçeve modelin maliyet analizi	48
Çizelge 4.13. İki boyutlu 21 elemanlı lifsiz betonarme çerçeve modelin toplam maliyeti.....	48
Çizelge 4.14. İki boyutlu 21 elemanlı lifli betonarme çerçeve modelin toplam maliyeti.....	49
Çizelge 4.15. İki boyutlu 21 elemanlı lifli betonarme çerçeve tasarım değişkenleri.....	50
Çizelge 4.16. Yük değerleri ve kombinasyonları.....	51
Çizelge 4.17. Üç boyutlu 42 elemanlı lifsiz betonarme çerçeve modelin maliyet analizi	52
Çizelge 4.18. Üç boyutlu 42 elemanlı lifli betonarme çerçeve modelin maliyet analizi	53
Çizelge 4.19. Üç boyutlu 42 elemanlı lifsiz betonarme çerçeve modelin toplam maliyeti.....	54
Çizelge 4.20. Üç boyutlu 42 elemanlı lifli betonarme çerçeve modelin toplam maliyeti	54

1. GİRİŞ

Son yıllarda yapı sektöründe lifli betonun kullanımı, yapıların mukavemetini artırmak ve dayanıklılığını sağlamak için önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Lifli beton kullanımı günümüzde tünel kaplamaları, saha betonları, baraj ve su yapıları, yapı elemanlarının inşası ve güçlendirmesi gibi birçok alanda kullanılmaktadır (M. Kozak, 2013). Lifler yapıların yük taşıma kapasitesini artırması, yüzey direncini artırması ve çatlak kontrolünü iyileştirmesi nedeniyle, lifler kısmen veya tamamen donatının yerini alabilmektedirler (Taerwe ve Matthys, 2013). Bambu, cam elyaf, karbon, propilen vb. gibi birçok lif çeşidi beton içerisinde kullanılmaktadır. Ancak bunların arasında yapıda en çok çelik lif tercih edilmektedir (Gülşan, 2019). Çelik lifli beton, geleneksel betona göre çekme etkilerine maruz bırakılan betonda dayanımın yükselmesine ve davranışın daha sünek olmasını sağlayan avantajlar sunar. Bu özelliklerle çatlakların oluşumunu geciktirme ve çatlak genişliklerini azaltarak yapıların ömrünü uzatır ve dayanıklılığını artırır. Çelik lifler sayesinde çarpma aşınma yorulma etkilerine karşı iyileştirme ve donatının miktarının azaltılmasına katkı sağlar.

Çelik lifli beton yapı elemanlarının tasarımı için farklı yönetmelik ve standartlar bulunmaktadır (Casanova vd. 1997; Vandewalle vd. 2003). Bu şartnamelerin çıkması sayesinde artık lifli betonlar yapı elemanlarında rahatlıkla kullanılabilir. Ancak, lifli beton kullanımı her ne kadar donatı gereksinimi azalsa da bazı durumlarda lifli beton kullanımı standart betonarme tasarıma göre daha fazla maliyet oluşturmaktadır. Bu nedenle, lifli betonun hangi durumlarda maliyet avantajı ortaya çıkaracağı tam olarak bilinmemektedir. Bu durumu tespit etmenin en doğru yolu lifli ve lifsiz betonarme yapıların en ideal (optimum) tasarımlarını karşılaştırmaktır. Ancak, betonarme yapılarının optimizasyonu oldukça zor ve karmaşık bir problem olduğu için deneme yanılma gibi geleneksel ve türev tabanlı tekniklerle bu problemlerin çözümü neredeyse imkansızdır. Doğadan ilham alarak geliştirilen Meta-sezgisel teknikler betonarme yapılar gibi yapısal optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan iyi bir araçtır. Literatürde lifli ve lifsiz betonun kullanımı ekonomik olarak nasıl bir avantajı olduğuna dair bilgi bulunmamaktadır.

Çalışmanın amacı doğrultusunda, lifli betonarme sistemlerin optimum boyutlandırılmasını sağlayan programlar geliştirilmiştir. İlk olarak, betonarme kirişlerin optimum boyutlandırılmasını sağlayan MATLAB programlama dilinde bir optimizasyon programı oluşturulmuştur. Bu program, kirişlerin malzeme özellikleri, yükler ve dayanıklılık kriterleri gibi faktörleri dikkate alarak, en uygun betonarme kesit boyutlarını, donatı (gerekliyse) ve lif miktarlarını belirlemektedir. İkinci olarak ise, betonarme çerçevelerin optimum boyutlandırılmasını sağlayan VB.net dilinde program geliştirilmiştir. Bu program, OAPI (Open Application Programming Interface: Açık uygulamalı program arayüzü) platformu kullanılarak ETABS (Extended Three-Dimensional Analysis of Building Systems: Genişletilmiş üç boyutlu bina sistemlerin analizi) sonlu elemanlar paket programı ile entegre bir şekilde çalışmakta ve çerçevelerin lifli beton kullanılarak tasarımını gerçekleştirmektedir.

Lifli beton tasarımı için Fib Model Kod (2010), Rilem TC 162-TDF (2003) Rilem TC 162-TDF (2003), Spanish EHE-08 gibi farklı standartlar bulunmaktadır. Abid ve Franzén (2011)'nin referans alınan çalışmada da belirtildiği üzere gerçek davranışa en yakın sonuçlar Fib Model Kod (2010) yöntemiyle elde edildiği için çalışmada bu yöntem

tercih edilmiştir. Fib Model Kod (2010) göre lifli kirişlerin mekanik özelliklerini belirlemek ve tasarım sürecini yönlendirmek için TS EN 14651 standardına bağlı olarak yapılan CMOD (Crack Mouth Opening Displacement: Çatlak Ağız Açıklığının Yer Değiştirmesi) test verilerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu yönetmelik ve standarttan yararlanılarak yapılan çeşitli deneysel çalışmalar bulunmaktadır (Bencardino vd., 2013; Boulekbatche vd., 2016.; Gu vd., 2024; Ren vd., 2023). Ancak, bu çalışmalarda farklı lif oranları, türü ve içeriklerine bağlı olarak sonuçları değişkenlik göstermektedir. Bu sebeple lifli betonarme yapı elemanı tasarımı için kapsamlı test sonuçlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Lifli kirişlerin tasarımında test verilerine dayalı değişkenlik gözlemlendiğinden, kiriş için lineer analiz yaparken sadece firmadan alınan test verileri değil, aynı zamanda literatürde yer alan CMOD test verileri de dikkate alınmış ve bu verilere bağlı olarak analiz edilmiştir (Chen vd. 2021; Venkateshwaran vd. 2018). Bu sayede farklı test verilerine bağlı olarak aynı örnek için kiriş tasarımda ne gibi farklılıklar olduğu ortaya konulmaktadır.

Lifli betonarme kirişlerin optimum boyutlandırılmasını sağlayan programı test etmek için farklı açıklıklara sahip yayılı yük taşıyan basit bir kirişin tasarımı oluşturulmuştur. Bu sayede farklı açıklıklarda lifli kiriş avantajı veya dezavantajı daha net ortaya konulmuştur. Lifli çerçevelerin optimum boyutlandırma programının testi için çerçeve farklı boyutlarda ve karmaşıklıkta çerçeveler yer almaktadır. Örnekler literatürden alınmış ve çözümlenmiştir, bu sayede lifli betonarme yapıların referans çözümler ile uygunluğu değerlendirilmiştir. Çerçeve tasarımında sadece kiriş elemanları lifli olarak tasarlanmıştır. Kolonlar liffsiz olarak modellenmiştir.

Meta-sezgisel yöntemlerin stokastik tabanlı olması ve probleme bağlı olarak değişkenlik göstermesi sebebiyle çalışmada performansı kanıtlanmış 3 farklı meta-sezgisel yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemler, YAKO (Yapay Arı Kolonisi Optimizasyonu), BTO (Biyo-coğrafya Tabanlı Optimizasyon) ve ATO (Ağaç Tohum Optimizasyonu) yöntemleridir. Ayrıca, yeni bir optimizasyon yöntemi olan VAO (Vahşi At Optimizasyonu) da çalışmada kullanılmış ve yeni yöntemin performansı kanıtlanmış yöntemler ile kıyası ilk defa bu çalışmada gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasını bölümleri şu şekilde özetlenmiştir: 1.bölümde konu hakkında genel bilgi verilirken, 2. Bölümde daha önceden yapılmış geçmiş çalışmalar hakkında literatür taramasını ortaya koymaktadır. 2. Bölüm 3 aşamadan oluşmaktadır. İlki betonarme yapıların optimum tasarımı hakkında, ikincisi lifli betonarme yapı elemanların modellenmesi hakkında, üçüncüsü ise kullanılan meta-sezgisel yöntemler hakkında yapılan araştırmaları ortaya koymaktadır. 3. Bölüm 4 aşamadan oluşmaktadır. İlki lifli beton kirişin analizi ve tasarımı hakkında detaylı olarak bilgi verilmektedir. İkinci aşamada lifli beton kirişin optimizasyon problemi hakkında, üçüncü aşamada çerçeve optimizasyonu hakkında ve dördüncü aşamada ise kullanılan meta-sezgisel yöntemler hakkında bilgi verilmektedir. 4. Bölümde ise yapılan örneklerin bulgular ve tartışmaları hakkında ve 5. bölümde bulguların sonuçları hakkında, 6. bölümde kaynaklar hakkında bilgileri içermektedir.

2. KAYNAK TARAMASI

Betonarme yapıların optimizasyonu, yapı sektöründe çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik etkinlik sağlama hedefleri doğrultusunda önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmalar, yapıların dayanıklılığını ve güvenliğini artırmayı, aynı zamanda malzeme ve enerji kullanımını optimize etmeyi amaçlamaktadır. Betonarme yapıların optimizasyonu, yapısal mühendislik ve malzeme bilimi gibi disiplinler arası bir yaklaşım gerektirir. Bu çalışmalar, geleneksel yapı tasarım ve inşaat süreçlerini iyileştirerek kaynak kullanımını azaltabilir, çevresel etkileri minimize edebilir ve maliyetleri düşürebilir. Böylece inşaat endüstrisinde sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli bir adım atılabilir.

Bu çalışmada, betonarme yapıların optimizasyonu, lifli betonarme elemanlar ve meta-sezgisel yöntemler gibi farklı disiplinleri kapsayan literatür incelenmiştir. Bölümde, öncelikle betonarme yapıların optimizasyonu ile ilgili yapılan çalışmalar ele alınmakta, ardından lifli betonarme yapı elemanlarının modellenmesi ve meta-sezgisel yöntemlerle ilgili çalışmalar değerlendirilmektedir.

2.1. Betonarme Yapıların Optimizasyonu ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Betonun uzun zamandır yapıda kullanılmakta olup betonarme yapılar günümüzde sıkça tercih edilmektedir. Bu yapıları en uygun düzeyde irdeleyebilmek için optimizasyon önemli bir araç olarak kullanılmaktadır. Betonarme yapı ve/veya yapı elemanların optimizasyonu alanında yapılan başlıca çalışmalar aşağıda belirtilmiştir.

Polizzotto ve Rizzo (1987)'nin çalışması, değişken yükler altındaki betonarme yapıların optimum tasarımını incelemiştir. Yapı elemanlarının farklı yükleme koşulları altında performansları değerlendirilerek en uygun kesit boyutları ve donatı miktarları belirlenir. Bu çalışma, maliyet ve güvenlik kriterlerini göz önünde bulundurarak mühendislik optimizasyonuna önemli katkılar sağlar. Butenweg ve Thierauf'un (1998) çalışması, betonarme yapıların otomatik olarak en uygun şekilde tasarlanması için bir yöntem sunmaktadır. Bu yöntem, doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri kullanarak yapıların maliyet etkinliğini optimize eder. Avrupa tasarım kodlarına dayanarak geliştirilen bu yöntem, iki aşamalı bir optimizasyon süreci içerir ve yapıların hem global hem de yerel düzeyde optimize edilmesini sağlar. Guerra (2004) tarihli çalışması, betonarme yapıların tasarım optimizasyonu üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu çalışma, mühendislikte yaygın olarak kullanılan yöntemlerin ve araçların etkinliğini artırmayı hedeflemektedir. İçeriği, betonarme yapıların dayanıklılığını ve maliyet etkinliğini en üst düzeye çıkarmak için tasarım parametrelerini nasıl optimize edileceğini detaylandırmaktadır. Fragiadakis v.d (2008) yılında yayımlanan makalesi, betonarme yapıların sismik performansına dayalı optimum tasarımını ele almaktadır. Bu çalışma, deprem mühendisliği alanında performansa dayalı tasarım yöntemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Makale, betonarme yapıların sismik dayanıklılığını artırmayı hedefleyen tasarım stratejilerini ve optimizasyon tekniklerini kapsamaktadır. Yücel vd. (2022) tarihli çalışması, çok amaçlı optimum tasarım yöntemleri kullanarak sürdürülebilir betonarme yapı modellerinin oluşturulmasını araştırmaktadır. Bu çalışma, betonarme yapıların hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilir olmasını sağlamayı amaçlamaktadır. Makale, sürdürülebilir tasarım ilkelerinin betonarme yapıların optimizasyonunda nasıl kullanılabileceğini ve bu yaklaşımların yapı performansına olan

etkilerini incelemektedir. Bunu yanında Afzal ve diğerleri (2020) çalışması, betonarme yapıların tasarım optimizasyonunun mevcut durumunu ele alarak eleştirel bir inceleme sunmaktadır. Çalışma, optimizasyon tekniklerinin güvenilirlik, maliyet etkinliği ve çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir. Betonarme yapıların tasarımında kullanılan yöntemlerin avantajları ve sınırlamaları ayrıntılı olarak tartışılmaktadır.

Betonarme çerçevelerin optimizasyonu ile ilgili çeşitli çalışmalar da bulunmaktadır. Govindaraj vd. (2007) tarafından, genetik algoritmalar kullanarak betonarme çerçevelerin optimum detaylı tasarımını incelenmiştir. Yazarlar, genetik Algoritmanın mühendislik tasarımında etkin bir çözüm sunduğu ve karmaşık tasarım problemlerini çözmede nasıl kullanıldığını örneklerle açıklamıştır. Kaveh vd. (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışma, büyük patlama-büyük çöküş algoritmasını kullanarak betonarme çerçevelerin optimal tasarımını ele almaktadır. Makale, algoritmanın tasarım sürecinde verimliliği artırdığı ve maliyetleri düşürdüğü vurgulayarak bu yeni yöntemin mühendislik uygulamalarındaki potansiyelini araştırmıştır. Nigdeli vd. (2016) betonarme çerçeve yapıların detaylı optimum tasarımını incelemiştir. Yazarlar, kullanılan metodolojinin tasarım sürecinde nasıl uygulandığını ve elde edilen sonuçların etkinliğini açıklayarak mühendislik alanında yeni tasarım yaklaşımlarının önemini vurgulamışlardır. Mergos (2018) tarafından, doğrusal olmayan yapısal analiz prosedürleri kullanarak betonarme çerçevelerin verimli optimum sismik tasarımını ele alan çalışma yapılmıştır. Yazar, mevcut yöntemlerin yetersizliklerini ve yeni yaklaşımın avantajlarını tartışıyor ve sismik dayanıklılığın artırılması için pratik çözümler sunuyor. Martins vd. (2020) tarafından düzenlenen bu çalışma, Eurocode 2'ye göre betonarme çerçevelerin duyarlılık analizi ve optimum tasarımını inceliyor ve tasarım parametrelerinin yapı performansına etkilerini detaylı bir şekilde analiz ediyor. Makale, Eurocode 2 standartlarına uygun olarak yapılan tasarımların nasıl optimize edilebileceğine dair önemli bulgular sunmaktadır.

Literatürde optimum yapı optimizasyonu hakkında çeşitli kaynaklar da bulunmaktadır. Saka ve Aydoğdu (2009)'nun çalışmasında, betonarme ve çelik yapıların deprem yükleri dikkate alınarak optimum boyutlandırılması incelenmiştir. Optimum tasarım süreçlerinde maliyet ve performans kriterleri göz önüne alınarak çeşitli optimizasyon teknikleri kullanılmıştır. Çalışma, mühendislik uygulamalarında yapıların daha ekonomik ve güvenli bir şekilde tasarlanmasına katkı sağlamaktadır. Atabay vd. (2010)'nin çalışmasında, perdeli yapı sistemlerinin maliyet optimizasyonu için genetik algoritmalar kullanılmıştır. Genetik algoritmaların etkinliği, perde duvarların maliyetinin minimize edilmesi sürecinde test edilmiştir. Çalışma, mühendislik yapılarının ekonomik ve verimli bir şekilde tasarlanmasına yönelik yeni yaklaşımlar sunmaktadır. Palancı (2014) tarafından yazılan bu çalışma, endüstriyel prefabrik yapıların optimum tasarımı için armoni arama algoritmasını kullanmaktadır. Algoritma, prefabrik yapıların maliyet ve performans kriterlerine göre en uygun tasarımını belirlemeyi hedeflemektedir. Çalışma, prefabrik yapıların daha verimli ve ekonomik bir şekilde tasarlanmasına katkı sağlamaktadır. Sadat ve Arslan (2022)'nin çalışması, betonarme yapılarda burulma düzensizliklerini önlemek için genetik algoritma yaklaşımını incelemektedir. Çalışma, burulma düzensizliklerini minimize etmek için genetik algoritmaların etkinliğini test etmektedir. Bu yöntem, yapıların deprem performansını artırmak ve güvenliğini sağlamak amacıyla önemli katkılar sunmaktadır. Melih vd. (2023) tarafından düzenlene bu çalışmada, betonarme yapı elemanlarının optimizasyonu için meta-sezgisel yöntemler

kullanılmıştır. Çeşitli meta-sezgisel algoritmaların performansı, yapı elemanlarının tasarımında en iyi sonuçları elde etmek için değerlendirilmiştir. Çalışma, betonarme yapıların daha ekonomik ve güvenli bir şekilde tasarlanmasına yönelik yeni yöntemler sunmaktadır.

Lifli beton için kullanılan standart Fib Model Kod (2010) yöntemiyle betonarme çerçevenin sismik optimizasyon çalışması bulunmaktadır. (Mergos, 2016), Eurocode 8 ve fib Model Code 2010'a göre betonarme çerçevelerin optimum sismik tasarımı incelenmiştir. Çalışma, sismik tasarım kriterlerine uygun olarak çerçevelerin en uygun boyutlandırmasını belirlemek için gelişmiş optimizasyon teknikleri kullanmıştır. Sonuçlar, betonarme çerçevelerin deprem yüklerine karşı daha güvenli ve ekonomik tasarlanmasını sağlamaktadır. Ancak, mevcut çalışmaların hiçbirinde lifli betonların yapı optimizasyonuna olan etkisi detaylı bir şekilde ele alınmamıştır. Bu çalışma, lifli betonun yapı performansı üzerindeki etkilerini ayrıntılı olarak analiz ederek literatüre önemli katkılar sağlamayı hedeflemektedir. Bu bağlamda, çerçeve sistemlerdeki kırışların lifli beton kullanılarak tasarlanması ve bu tasarımın yapısal performans parametreleri üzerindeki etkilerinin kapsamlı bir şekilde incelenmesi amaçlanmıştır.

2.2. Lifli Betonarme Yapı Elemanların Modellenmesi ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Lifli beton günümüzde özellikle tünel kaplamaları, saha betonları, baraj ve su yapıları, yapı elemanlarının inşası ve güçlendirmesi gibi birçok alanda kullanılmaktadır Kozak (2013) tarafından, çelik lifli betonların özelliklerini ve farklı kullanım alanlarını araştırmaktadır. Çelik liflerin betonun mukavemet ve dayanıklılık özelliklerine olan etkileri incelenmiştir. Çalışma, çelik lifli betonların çeşitli mühendislik uygulamalarında nasıl kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Çelik lifli betonun davranışı modellenmesi ve tasarımı hakkında literatürde kitap yazılmıştır. Singh (2017) çalışması, çelik liflerle güçlendirilmiş betonun (SFRC) temel özelliklerini ve avantajlarını kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Çelik liflerin betonun çekme dayanımı, çatlama direnci ve tokluk özelliklerini nasıl iyileştirdiği tartışılmaktadır. Kitap, SFRC'nin farklı inşaat uygulamalarındaki kullanımını detaylandırmaktadır.

Lifli betonun karışım optimizasyonu, betonun mekanik özelliklerini ve performansını iyileştirmek amacıyla çeşitli araştırmalara konu olmuştur. Dvorkin vd. (2011) tarafından, çelik lifli beton kompozisyonunun optimal tasarımı için bir yöntem önermektedir. Yazarlar, beton karışımının mekanik özelliklerini ve performansını optimize etmek için matematiksel modeller kullanmıştır. Çalışma, çelik lifli betonların daha etkin kullanılabilmesi için tasarım süreçlerine katkıda bulunmaktadır. Koksall vd. (2013) ait bu çalışmada, çelik lifli beton plakaların optimum karışım tasarımı ele alınmıştır. Yazarlar, farklı çelik lif oranları ve beton bileşenlerinin kombinasyonlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma, çelik lifli beton plakaların en yüksek performansı sağlamak için hangi karışım oranlarının kullanılacağını belirlemektedir.

Literatürde, yapı elemanlarının modellenmesi, davranışı ve analizi üzerine birçok çalışma yer almaktadır. Lee vd. (2012) ait bu çalışma, çelik lifli beton elemanların doğrusal olmayan sonlu eleman analizi için doğrudan çekme kuvveti transfer modelini kullanmaktadır. Model, liflerin çekme dayanımına katkısını ve çatlama davranışını doğru bir şekilde tahmin edebilmektedir. Analizler, modelin beton elemanların çekme performansını artırmada etkili olduğunu ortaya koymuştur. Lee vd. (2013) ait makale ise,

çekme altında çelik lifli beton elemanlar için basitleştirilmiş bir gömülme modeli sunmaktadır. Model, çelik liflerin beton içindeki dağılımını ve katkısını hesaplamak için geliştirilmiştir. Sonuçlar, modelin pratik mühendislik uygulamaları için uygun olduğunu göstermektedir. Jr vd. (2019) 'in makalesi, çelik liflerin ayrık ve açık bir şekilde temsil edildiği çelik lifli betonun sayısal modellemesini incelemektedir. Bu modelleme tekniği, liflerin beton içindeki dağılımını ve etkileşimlerini daha doğru bir şekilde analiz etmeyi sağlar. Sonuçlar, modelin betonun mekanik özelliklerini tahmin etmede başarılı olduğunu göstermektedir. Moradi vd. (2019) çalışması, çelik lifli betonun çekme davranışının modellenmesini ele almaktadır. Çalışma, farklı lif oranlarının ve yönelimlerinin betonun çekme dayanımına olan etkilerini incelemektedir. Sonuçlar, fiber miktarının ve dağılımının çekme performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Zhan ve Meschke (2016) çalışması, çelik lifli beton yapıların başarısızlık analizini yapmak için çok seviyeli bir hesaplama modeli sunmaktadır. Model, liflerin mikroskopik düzeydeki davranışlarını ve makroskopik yapı performansını entegre eder. Çalışma, bu modelin yapıların dayanıklılık ve güvenlik analizinde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Lee, Cho ve Vecchio (2016)'in çalışmasında, kesme kuvvetlerine maruz kalan çelik lifli beton elemanların analizini yapmaktadır. Çalışma, liflerin kesme dayanımına katkısını ve çatlama davranışını incelemektedir. Sonuçlar, liflerin betonun kesme dayanımını artırmada önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

Literatürde çalışmaların çoğunluğunun lifli betonun yapı modellemesi, taşıma kapasitesi ve analizi üzerine odaklandığını göstermektedir. Ancak, çerçeve yapılar üzerindeki çözüm veya optimizasyon ile ilgili çalışmalara nadiren rastlanmaktadır. Bu tez çalışması, çelik lifli betonun çerçeve yapılar üzerindeki optimizasyonu ve taşıma kapasitesi üzerine odaklanarak bu eksikliği gidermeyi hedeflemektedir. Bu bağlamda, tez çalışması literatüre çerçeve yapılar üzerinde lifli beton kullanımıyla ilgili yeni bir bakış açısı sunmayı amaçlamaktadır. Bu yenilikçi yaklaşım, çelik lifli betonun yapısal performansını artırmak için tasarım süreçlerine katkıda bulunabilir ve endüstriyel uygulamalara değerli bir katkı sağlayabilir.

2.3. Kullanılan Optimizasyon Yöntemlerle İlgili Yapılan Çalışmalar

Betonarme yapılar genellikle karmaşık sistemler olduğu için bu tip karmaşık yapıların optimum boyutlandırmak tecrübe deneme yanılma gibi geleneksel yöntemler ile neredeyse imkansızdır. Betonarme tasarım ilkeleri oldukça detaylı ve doğrudan sürekli fonksiyon ile tanımlanamadığı için türev tabanlı deterministik optimizasyon teknikleri uygulanamaz. Meta-sezgisel yöntemler, betonarme yapıların optimum boyutlandırılması problemlerinde önemli bir rol oynar. Bu bölümde çalışmada kullanılan ve bilinen tekniklerden YAKO, ATO, BTO algoritmaların tez çalışma konusuna benzer problemlere uygulaması ile ilgili çalışmalardan bahsedilmiştir. Ayrıca yeni geliştirilen VAO yönteminin uygulandığı mühendislik problemleri belirtilmiştir.

Derya Karaboğa (2005) tarafından keşfedilen YAKO yöntemi, çeşitli kiriş tasarım çalışmalarında başarıyla uygulanmıştır. Abdelmgeed ve arkadaşları (2022), YAKO algoritmasını kullanarak optimum maliyetli betonarme kiriş tasarımını ele almışlardır. Çalışma, betonarme kirişlerin maliyetini minimize ederken gerekli yapı performansını sağlamayı amaçlamaktadır. Algoritma, mühendislik optimizasyon problemlerinde etkili ve verimli sonuçlar üretmiştir. Sonuçlar, YAKO algoritmasının betonarme yapı tasarımında başarılı bir şekilde uygulanabileceğini göstermektedir. Jahjouh ve Arafa

(2013), betonarme sürekli kirişlerin tasarım optimizasyonunda YAKO algoritmasını kullanmışlardır. Çalışma, kirişlerin toplam maliyetini minimize etmek için çeşitli kısıtlamalar altında optimizasyon yapmayı hedeflemiştir. YAKO algoritmasının, karmaşık yapı tasarımı problemlerinde etkili ve verimli olduğu bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, geleneksel yöntemlere kıyasla daha ekonomik ve güvenli tasarımlar sağlamaktadır. Öztürk ve Durmuş (2012), betonarme kirişlerin optimum tasarımı için YAKO algoritmasını incelemişlerdir. Araştırma, algoritmanın yapı mühendisliği alanındaki optimizasyon problemlerine uygulanabilirliğini değerlendirmektedir. YAKO algoritması, kiriş tasarımında maliyeti düşürürken gerekli yapı dayanımını sağlamada başarılı olmuştur. Bu sonuçlar, algoritmanın mühendislik problemlerinde güçlü bir araç olduğunu göstermektedir. Ulusoy ve arkadaşları (2020), betonarme kirişlerin optimum tasarımında meta-sezgisel algoritmaların kullanımını araştırmışlardır. Çalışma, betonun dayanımını inceleyerek optimum tasarımı belirlemeye odaklanmıştır. Meta-sezgisel algoritmalar, çeşitli mühendislik kısıtlamaları altında etkili çözümler sunmuştur. Elde edilen sonuçlar, bu algoritmaların betonarme yapı tasarımında başarılı bir şekilde uygulanabileceğini göstermektedir. Eser (2014), YAKO algoritması ve SAP2000 yazılımı kullanarak çelik yapıların optimum tasarımını incelemiştir. Araştırma, çelik yapıların minimum maliyetle ve optimum performansla tasarlanmasını hedeflemiştir. YAKO algoritmasının, karmaşık mühendislik problemlerinde etkili çözümler sunduğu ve SAP2000 ile entegre edilebilirliği gösterilmiştir. Çalışma, mühendislik projelerinde maliyet etkin ve güvenilir çözümler sağlamak için önemli bulgular ortaya koymaktadır. Tapao ve arkadaşları (2017) betonarme çerçevelerin minimum maliyetli tasarımı için YAKO algoritmasının optimal parametrelerini ve performansını araştırmıştır. Çalışma, algoritmanın farklı parametre kombinasyonları altında performansını değerlendirerek maliyet etkin çözümler sunmayı amaçlamaktadır. Sonuçlar, YAKO algoritmasının betonarme çerçeve tasarımında etkili ve verimli bir araç olduğunu göstermektedir. Algoritma, mühendislik tasarımında maliyeti düşürmek ve performansı artırmak için başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Bu çalışma betonarme çerçeve tasarımında YAKO yönteminin değişkenleri referans olarak alınmıştır (Tapao vd., 2017).

BTO yöntemi kullanılarak yapılan yapısal optimizasyon çalışmaları da literatürde bulunmaktadır. Aydogdu ve Carbas (2017), Levy Uçuş etkisinin çelik iskelet yapıların ayırık optimum tasarımında meta-sezgisel kullanılarak incelenmesini ele almıştır. Çalışma, Levy Uçuş mekanizmasının meta-sezgisel algoritmaların performansını nasıl etkilediğini araştırmaktadır. Sonuçlar, Levy Uçuş'ın, çelik yapıların tasarımında daha etkili ve verimli çözümler ürettiğini göstermektedir. Bu yaklaşım, mühendislik tasarım süreçlerinde önemli avantajlar sunmaktadır. Bu çalışma bulunan optimizasyon parametreleri çalışmamızda BTO yönteminde referans olarak alınmıştır. Çarbaş (2017), BTO kullanarak uzaysal çelik çerçevelerin optimum yapısal tasarımını incelemektedir. Çalışma, BTO algoritmasının uzaysal çelik çerçevelerin maliyet ve performansını optimize etmedeki etkinliğini araştırmaktadır. Elde edilen sonuçlar, BTO algoritmasının çelik yapı tasarımında başarılı ve verimli bir araç olduğunu göstermektedir. Bu araştırma, mühendislik optimizasyon problemlerinde yenilikçi tekniklerin önemini ortaya koymaktadır. Farrokh Ghatte (2021), çelik çerçevelerin optimum tasarımı için Ateşböceği ve BTO algoritmalarının bir hibritini önermektedir. Araştırma, iki algoritmanın güçlü yönlerini birleştirerek daha etkili ve verimli çözümler üretmeyi amaçlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, hibrit algoritmanın çelik çerçeve tasarımında maliyet etkin ve güvenilir bir yöntem olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, mühendislik

problemlerinde yenilikçi optimizasyon tekniklerinin önemini vurgulamaktadır. Saka ve arkadaşları (2023), Adaptif Uyum Arama (AHS) algoritması, Levy Uçuşu ile BTO (LFBTO) ve Balina Optimizasyonu (WO) yöntemleri kullanarak kompozit döşemeli çelik çerçevelerin optimum tasarımını incelemişlerdir. Çalışma, yöntemlerin çelik çerçevelerin performansını ve maliyetini optimize etmekteki etkinliğini araştırmaktadır. Sonuçlar, bu algoritmanın kompleks yapı tasarımı problemlerinde başarılı olduğunu göstermektedir. Araştırma, mühendislik tasarımında yenilikçi ve güçlü optimizasyon tekniklerinin kullanımını desteklemektedir. Yang ve arkadaşları (2024), iletim tipi çerçeve yapıların iyileştirilmesi için BTO algoritmasına dayalı entegre bir tasarım yaklaşımını sunmaktadır. Çalışma, BTO algoritmasının çerçeve yapıların performansını ve maliyetini optimize etmedeki etkinliğini değerlendirmektedir. Sonuçlar, bu entegre yaklaşımın mühendislik tasarımında önemli avantajlar sağladığını göstermektedir. Araştırma, yapı tasarımında optimizasyon algoritmalarının kullanımının önemini vurgulamaktadır. Negrin ve Roose (2021), statik zemin-yapı etkileşimini içeren betonarme yapıların BTO'yu araştırmaktadır. Çalışma, BTO algoritmasının betonarme yapıların performansını ve maliyetini optimize etmedeki etkinliğini incelemektedir. Sonuçlar, zemin-yapı etkileşimini dikkate alarak yapılan optimizasyonun daha güvenilir ve etkili çözümler sunduğunu göstermektedir. Bu çalışma, yapı tasarımında bütünsel yaklaşımların önemini vurgulamaktadır.

M. S. Kiran, (2015) tarafından Ağaç Tohum Optimizasyon (ATO) yöntemi bulunmuştur. Bu optimizasyon yöntemi yapı ve yapı elemanları optimizasyonunda kullanılmıştır. Aslan vd., (2018) tarafından düzenlenen bu çalışmada, optimizasyon problemlerine yönelik geliştirilmiş bir ağaç tohumu algoritması (ATO) sunulmuştur. Algoritmanın etkinliği, çeşitli optimizasyon problemlerinde test edilmiş ve geleneksel yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, geliştirilen ATO'nun daha hızlı ve daha doğru çözümler sunduğunu göstermektedir. Rasool ABED (2020), çelik yapıların optimum boyutlandırılması problemini çözmek için ATO'da dahil olmak üzere güncel meta-sezgisel optimizasyonların performanslarını değerlendirmektedir. Çeşitli optimizasyon yöntemlerin karşılaştırmalı analizi yapılarak, her birinin etkinlik düzeyi belirlenmiştir. Sonuçlar, belirli tasarım problemlerinde hangi algoritmaların daha etkili olduğunu göstermektedir. Çarbaş vd. (2021) tarafından, soğuk şekillendirilmiş çelik çerçevelerin optimum tasarımı, beş yeni doğa esinli meta-sezgisel algoritma kullanılarak sismik yükler altında incelenmiştir. Değerlendirilen algoritmalar arasında ATO, sincap arama, su hamam böceği, gri kurt ve beyin fırtınası optimizasyonu yer almaktadır. Çalışma, algoritmaların sismik dayanıklılık ve maliyet etkinliği açısından performanslarını karşılaştırmaktadır.

Çalışmada seçilen son meta-sezgisel yöntem olan ve Naruei ve Keynia, (2022) taraflarından çıkarılan VAO kullanılan diğer yöntemlere göre oldukça yeni bir optimizasyon yöntemidir. Bu yeni yöntem ile zorlu mühendislik problemlerinde ve yapı ve yapı elemanı gibi alanlarda henüz bir çalışma gerçekleştirilmemiştir.

Bu çalışma, lifli beton yapıların optimize edilmesi ve yapı boyutlandırmasının maliyet üzerindeki etkisinin incelenmesini amaçlamaktadır. Bu hedeflere ulaşmak için Yapay Arı Kolonisi (YAKO), Ateşböceği Tabanlı Optimizasyon (ATO) ve Ağaç Tohum Optimizasyonu (BTO) gibi çeşitli meta-sezgisel yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemlerin çeşitli yapısal optimizasyon problemlerinde başarılı performanslar sergilediği literatürde gözlemlenmiştir. Özellikle, bu yöntemlerin karmaşık yapı tasarım problemlerinde etkili

ve verimli çözümler üretebildiği bilinmektedir. Bu nedenle, bu çalışma için YAKO, ATO ve BTO gibi yöntemlerin uygun meta-sezgisel teknikler olduğu belirtilmektedir.

Bu çalışmanın literatüre önemli katkılar sunacağı düşünülmektedir. Lifli beton yapıların optimize edilmesi ve maliyet performansının belirlenmesi gibi konular, yapı mühendisliği alanında önemli araştırma alanlarıdır. Yapılan bu deneysel çalışma, lifli beton kullanımının gereksinimlerini ve potansiyel avantajlarını anlamak adına önemli bir adımdır. Ayrıca, bu çalışma vahşi at optimizasyon (VAO) yönteminin yapı tasarım optimizasyonundaki performansını test etmek için uygun bir meta-sezgisel teknik olarak belirlenmiştir. VAO, literatürde yeni bir yöntem olmasına rağmen, bazı optimizasyon problemlerinde başarılı sonuçlar elde etmiştir. Ancak, yapı tasarım optimizasyonunda performansının test edilmesi gerekmektedir. Bu çalışma, VAO 'nun yapı tasarım optimizasyonunda etkinliğini değerlendirmek için bir fırsat sunmaktadır. Bu nedenle, elde edilecek sonuçlar, yapı mühendisliği alanında yeni ve etkili optimizasyon tekniklerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölüm, dört alt bölüme ayrılmıştır. İlk olarak, lifli kirişlerin tasarım ilkeleri detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. İkinci bölüm, lifli kirişlerin optimizasyon problemini açıklayarak, sınırlayıcı koşulları belirtmektedir. Üçüncü bölüm, çerçevenin tasarım optimizasyonuna ilişkin bilgiler sunmaktadır. Son bölüm ise kullanılan meta-sezgisel yöntemler olan Yapay Arı Kolonisi (YAKO), Ağaç Tohum Optimizasyonu (ATO), Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon (BTO) ve Vahşi At Optimizasyonu (VOA) yöntemlerinin konusu ve metodolojisi hakkında bilgi içermektedir.

3.1. Lifli Kirişlerin Tasarım İlkeleri

Lifli betonun yapı tasarımı için farklı yönetmelikler kullanılmaktadır. Referans çalışma önerisine göre RILEM TC-162-TDF, Spanish-EHE-08 ve Fib Model Kod 2010 yöntemleri ile gerçeğe yakın sonuca Fib Model Kod 2010 yönetmeliği kullanılarak elde edilmiştir (Abid ve Franzén, 2011). Tezde lifli beton kiriş tasarımı için Fib Model Kod 2010 yönergesi kullanılmıştır.

Betonarme beton kesitlerin nihai sınır moment dayanımı belirlenirken bazı varsayımlar yapılır. Kesitler düzlem olarak kalır. Beton ile donatının tam aderansı söz konusudur. Betonun çekme dayanımı ihmal edilir.

Betondaki gerilmeler, kesit tasarımı için gerilme-gerinim ilişkilerinden elde edilmektedir. Donatıdaki gerilmeler, Fib model kodunda 7.2.3.2 ve 7.2.3.3 alt maddelerinde verilen tasarım eğrilerinden elde edilmektedir.

Fib model kodundan alınan aşağıdaki denklemlerdeki (3.1-3.4) tüm gerilmeler MPa cinsinden beton çekme gerilmelerini f_{cm} , ortalama çekme dayanımı f_{ctm} ve elastisite modülünü E_{cm} türetmek için kullanılmaktadır.

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad (3.1)$$

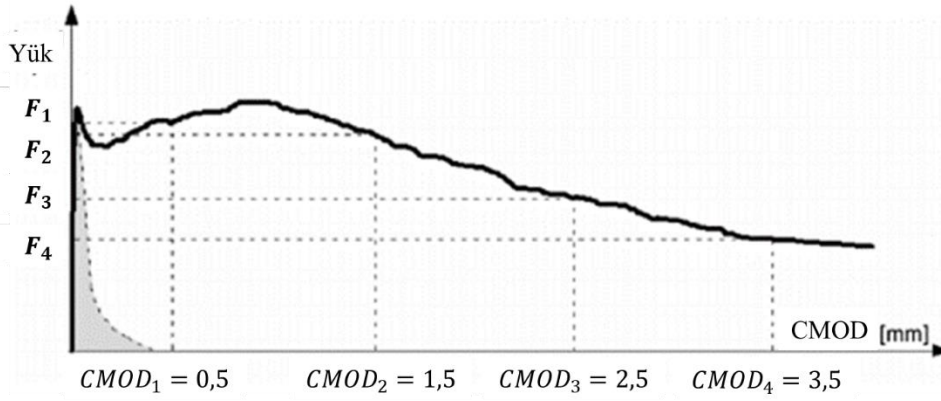
$$f_{ctm} = 0.3 (f_{ckcy})^{0.66} \quad (3.2)$$

$$E_{cm} = \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.3} \quad (3.3)$$

$$\varepsilon_{cu} = 3.5 \times 10^{-3} \quad (3.4)$$

Burada f_{ck} , silindirik sıkıştırıcı lif takviyeli beton dayanımı ve ε_{cu} lifli betonun nihai gerinim değerini ifade eder.

Fib Model Koduna göre, liflerin mukavemeti nihai eğilme gerilme dayanımı olarak ölçülür. Bu nedenle, CMOD (Crack Mouth Opening Displacement: Çatlak Ağız Açıklığı Yer Değiştirme) testi uygulanır. Bu test EN 14651 yönergesine bağlı olarak, çatlak açıklığının yatay bir sapma olarak ölçüldüğü, deformasyon kontrollü bir yükleme yapılarak testi gerçekleştirir. (Bakınız Şekil 3.1)



Şekil 3.1. CMOD testi yük ve deplasman eğrisi (Fib model kod 2010)

Şekil 3.1’de f_{R1} , f_{R2} , f_{R3} ve f_{R4} değerleri, sırasıyla $F_1 - CMOD_1$, $F_2 - CMOD_2$, $F_3 - CMOD_3$ ve $F_4 - CMOD_4$ değerlerine karşılık gelmektedir.

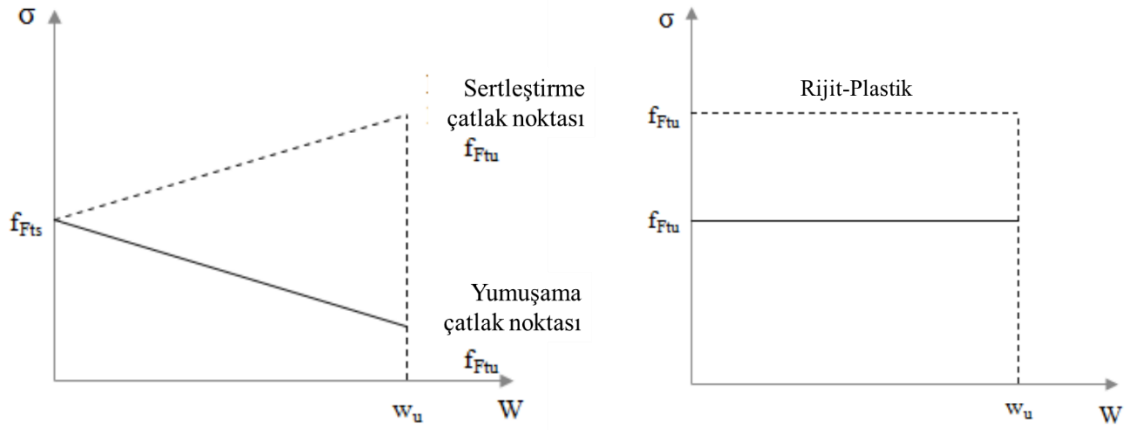
Çalışmada CMOD testinden elde edilen veriler iki şekilde elde edilmektedir. İlki piyasada bulunan firmadan alınan veriler yardımıyla, diğeri ise daha önceden CMOD testi yapan makale çalışmalarından yararlanılmaktadır. Fib Model Kod 2010 yönergesine bağlı olarak f_L , f_{R1} ve f_{R3} değerleri veri olarak kullanılmaktadır.

Denklem (3.5) ve (3.6) de belirtilen gerekli kontrollerin f_L , f_{R1} ve f_{R3} değerleri kullanılarak sağlanması gerekmektedir. Bu koşulların sağlanması durumunda lifin geleneksel donatının yerini alabileceği anlamına gelmektedir. Burada f_L , orantılılık sınırı ile kesişen karakteristik dayanımdır.

$$\frac{f_{R1}}{f_L} > 0.4 \quad (3.5)$$

$$\frac{f_{R3}}{f_{R1}} > 0.5 \quad (3.6)$$

Fib Model Kod 2010, gerilimdeki gerçek tepkiyi, iki gerilim-çatlak açılması kurucu yasasına, doğrusal bir çatlak sonrası yumuşama veya sertleşme davranışına Şekil (3.2-a) ve plastik-rijit davranışa idealize edilir (Şekil (3.2-b)).



a) Doğrusal model

b) Rijit davranış

Şekil 3.2. Gerilme dağılımı idealleştirmesi (Fib model kod 2010)

Denklem (3.7) ve (3.8)'de kullanılabilirlik artık mukavemetin f_{Fts} ve nihai artık mukavemetin f_{Ftu} referans değerleri tanıtılmıştır.

$$f_{Fts} = 0.45f_{R1} \quad (3.7)$$

$$f_{Ftu} = f_{fts} - \frac{w_u}{CMOD_3} (f_{fts} - 0.5f_{R3} + 0.2f_{R1}) \geq 0 \quad (3.8)$$

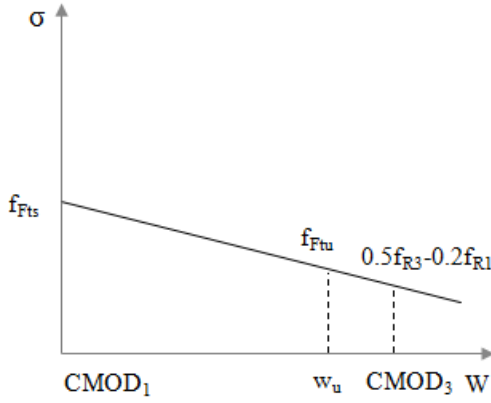
Burada w_u , denklem (3.9) ve (3.10) 'da yapısal tasarımda kabul edilen nihai çatlak açıklığıdır. $CMOD_1$ ve $CMOD_3$ çatlak ağzı açıklığı deplasmanıdır sırasıyla 0.5 mm ve 2.5 mm'ye eşittir.

Denklem (3.8), $w_u \neq CMOD_3$ olan f_{Ftu} değerleri için geçerlidir. Burada kullanılabilirlik sınır durumuna karşılık gelen $CMOD_1$ ile $CMOD_3$ arasında doğrusal bir kurucu yasa kullanılarak w_u 'ya kadar herhangi bir değer elde edilebilir Şekil (3.2). Çatlak genişliği, yapısal tasarımda kabul edilen maksimum çatlak açıklığıdır; burada değeri gerekli sünekliğe bağlıdır ve bu nedenle Fib Model Koduna göre 2,5 mm'yi geçmemelidir. w_u Denklem (3.9) ile hesaplanır.

$$w_u = \varepsilon_{Fu} l_{cs} \quad (3.9)$$

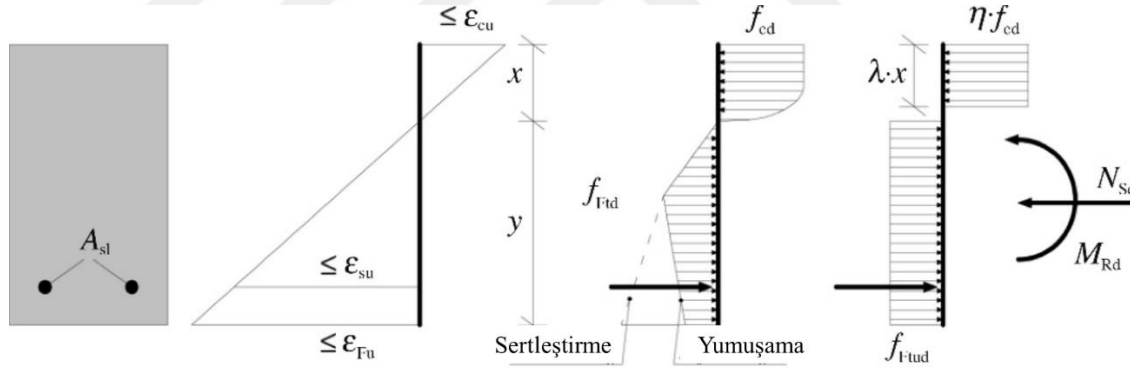
$$l_{cs} = \min \{s_{rm}, y\} \quad (3.10)$$

Burada hesaplanan yapısal karakteristik uzunluk l_{cs} , s_{rm} ortalama çatlak aralığı ve y tarafsız eksen ile kesitin çekme tarafı arasındaki mesafedir. ε_{Fu} 'nun kesitteki değişken gerinim dağılımı için %2'ye ve kesit boyunca yalnızca çekme gerinim dağılımı için %1'e eşit olduğu varsayılmaktadır. Kesitte donatısız kullanıldığı takdirde l_{cs} değeri $y = h/2$ değerine eşit olarak hesaplanacaktır.



Şekil 3.3. Doğrusal modelde gerilme dağılımı idealleştirilmesi. (Fib model kod 2010)

Lifli betonun nihai sınır durumundaki eğilme momenti ve eksenel kuvvet için Fib Model Kod (2010) basitleştirilmiş bir gerilim/gerinim ilişkisi Şekil 3.4'te gösterilmektedir. Basitleştirilmiş gerilim dağılımları, doğrusal çatlama sonrası gerilim dağılımının şeklin sol tarafında ve sert plastik gerilim dağılımının şeklin sağ tarafında gösterilmektedir. Fib Model Kod (2010) belirtildiği üzere; basınç dayanımı 50MPa'nın altında veya buna eşit olan beton için etkin dayanımı tanımlayan $\eta = 1$ faktörü ve basınç bölgesinin yüksekliğini tanımlayan $\lambda = 0,8$ faktörünün değerleri kullanılır.



Şekil 3.4. Basitleştirilmiş lifli beton kesitin basitleştirilmiş gerilim/gerinim ilişkisi. (Fib Model Kod 2010)

Çalışmada Fib model Kod (2010) kullanılarak tüm kiriş analizi için çatlama ve nihai aşamadaki momentler hesaplanmıştır. Tüm seriler için kritik eğilme momenti denklem (3.10)'a göre hesaplanır:

$$M_{cr} = W_1 f_{ctm} \quad (3.10)$$

$$W_1 = \frac{bh^2}{6} \quad (3.11)$$

Burada M_{cr} çatlama momentini, f_{ctm} beton karışımının ortalama çekme dayanımını ve W_1 denklem (3.11)'de hesaplanan kesit modülünü ifade eder. Kesit modülü hesabında kullanılan b kiriş genişliğini ve h kiriş yüksekliğini gösterir.

Nihai moment dayanımı Fib Model Kod (2010)'a uygun olarak Şekil 3.8'de gösterildiği gibi basitleştirilmiş doğrusal çatlama sonrası gerilim dağılımı kullanılarak denklem (3.12)'de gösterildiği şekilde hesaplandı.

$$M_{Rdu} = f_{sy}A_s(d - \beta x) + f_{Ft}(h - x)b[\beta x + x_{tot}y] \quad (3.12)$$

Burada f_{sy} donatının akma dayanımını, A_s donatı çubuğun toplam alanı, β kirişin üst kısmından beton basınç bölgesinin merkezine kadar olan mesafeyi, d kirişin faydalı derinliğini, f_{Ft} lif katkısından kaynaklanan çekme gerilimi bloğunun toplam gerilimi, h kiriş yüksekliği, x kirişin tepesinden tarafsız eksene olan mesafe, x_{tot} toplam yüksekliğin yüzdesi olarak verilen, lif geriliminin çekme bölgesi için ağırlık merkezi ve y çekme gerilimi bloğunun yüksekliği olarak tanımlanmaktadır.

Çalışmada Fib Model Kod (2010) kullanılarak tasarım yapıldığında elde edilen farklı kiriş uzunlukları için nihai moment değerleri ile kontroller sağlandı. Bulgular kısmında örnek ile ilgili detaylı açıklamalar bulunmaktadır.

Fib Model Kod (2010) kullanılarak hesaplanılan bir başka veri ise basit kirişin kesme kapasitesidir. Kesme kapasitesi toplam kayma direnci betonun ve donatıların katkılarının toplamını ifade eder. Kiriş tasarımında kesme hesaplarında, boyuna ve enine donatı kullanıma durumuna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Lifli betonun kiriş tasarımı için hem enine hem de boyuna donatı kullanılmama, sadece boyuna donatısı kullanma ve hem boyuna hem de enine donatı kullanılma durumu olmak üzere toplam 3 durumu ifade eder. Bu 3 farklı buruma bağlı olarak kesme kapasite hesapları değişkenlik gösterir. İlk durumda elemanın kesme kapasitesi yalnızca lifli betonun katkısı ile sağlanmaktadır. Denklem (3.12)'de Betonun karşılayabileceği asal çekme gerilmesini σ_1 hesaplanır:

$$\sigma_1 \leq \frac{f_{Ftuk}}{\gamma_F} \quad (3.12)$$

Burada γ_F lifli beton için güvenlik katsayısını ve f_{Ftuk} lifli betonun karakteristik çekme dayanımını ifade eder.

İkinci durumda ise kesitte boyuna donatının bulunup enine donatının bulunmaması durumudur. Lifli beton ile üretilmiş olan ve içerisinde boyuna donatının bulunduğu kirişin kesme kuvveti için Fib Model Kod (2010)'da verilen iki denklem önerilmektedir.

$$V_{Rd} = \left[\left(\frac{0.18}{\gamma_c} \right) k \left[100\rho_1 \left(1 + 7.5 \frac{f_{Ftuk}}{f_{ctm}} \right) f_{ck,cyl} \right]^{\frac{1}{3}} + 0.15 \sigma_{cp} \right] bd \quad (3.13)$$

Burada f_{Ftuk} lifin betonun karakteristik çekme dayanımını, $f_{ck,cyl}$ betonun eşdeğer silindirik basınç dayanımı, f_{ctm} ortalama beton çekme dayanımı, σ_{cp} kesite etkiyen ortalama gerilime, b kiriş genişliğini, d kiriş faydalı derinliği, γ_c lifsiz beton için kısmi güvenlik faktörünü, ρ_1 donatı için donatı oranını ve k boyut etkisini hesaba katan bir faktörü ifade eder.

k ve ρ_1 ifadeleri sırasıyla denklem (3.14) ve (3.15)'e göre hesaplanır:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2 \quad (3.14)$$

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b \cdot d} \quad (3.15)$$

Minimum kesme direnci ($V_{Rd,Fmin}$) denklem (3.16) ile belirlenir.

$$V_{Rd,Fmin} = (v_{min} + 0.15 \sigma_{cp})bd \quad (3.16)$$

Burada ;

$$v_{min} = 0.035k^{\frac{3}{2}}f_{ck,cyl}^{\frac{1}{2}} \quad (3.17)$$

V_{Rd} ve $V_{Rd,Fmin}$ değerlerinin maksimumu kesme direnci (V_d) olarak belirlenir (bakınız denklem 3.18).

$$V_d = \max(V_{Rd}, V_{Rd,Fmin}) \quad (3.18)$$

Üçüncü durum, kesitte hem enine hem de boyuna donatının bulunması durumudur. Bu durumda lifli betonun kesme kapasitesi denklem (3.19)'da hesaplanır:

$$V_{Rd} = V_{Rd,f} + V_{Rd,s} \quad (3.19)$$

Burada $V_{Rd,f}$ denklem (3.18)'e göre hesaplanır. Kesme donatısından gelen kesme kapasitesi denklem (3.20)'deki gibi hesaplanır:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s_w} z f_{ywd} \cot \theta \quad (3.20)$$

Burada A_{sw} kesme donatısı alanı, θ basınç gerilme alanı eğimi ve $z = (0,9d)$ etkili kayma yüksekliğidir.

Denklem (3.21)'de, f_{Ftuk} lifli betonarme tasarım için nihai çekme dayanımının karakteristik değeridir. Denklem koşulu, eğimli çatlağın gelişimini ve yayılmasını sınırlamaya olanak tanır ve sonuç olarak yeterli etriye sünekliğini sağlayabilir. Koşul sağlanmadığında (kesme donatısı) etriye eklenmelidir.

$$f_{Ftuk} \geq \frac{0.08\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \quad (3.21)$$

Minimum kesme donatısı oranı (ρ_w) hesabı denklem (3.22)'de gösterilmiştir.

$$\rho_w \geq 0.08 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \quad (3.22)$$

3.2. Lifli Kirişlerin Optimum Boyutlandırılması Problemi

Lifli betonların Optimum boyutlandırılması problemi kısaca kirişlerin maliyetini minimize edecek şekilde en uygun lif oranı, beton sınıfı, donatım miktarı ve kiriş kesitlerinin şartnamelerce belirlenen kriterleri sağlayacak şekilde tespit edilmesidir. Bu tanıma göre optimizasyon probleminin ana bileşenleri olan tasarım değişkenleri amaç fonksiyonu ve sınırlayıcılar aşağıda detaylandırılmıştır.

3.2.1. Tasarım değişkenleri

Tasarım değişkenleri çözüm boyunca değeri değişebilen amaç fonksiyonunu değerinin bağlı olduğu değişkenlerdir. Çalışmada tasarım değişkenleri; kiriş genişliği b , kiriş yüksekliği h , donatı çapı ϕ_D , donatı miktarı η_D , lif türü lif_t ve lif dozajı D_L olarak tanımlanır.

3.2.2. Sınırlayıcılar

Optimizasyon probleminde amaç fonksiyonların çözüm kümesi belirli şekilde sınırlandırılır. Sürekli kirişlerin optimum tasarımında verilen şartlar sınırlayıcı fonksiyonlarını oluştururlar. Bunlar sırasıyla;

Eğilme kontrolü sınırlayıcı fonksiyonu:

$$g_1(x) = \frac{M_{max}}{Mrdu} - 1 \leq 0 \quad (3.23)$$

Kesme kontrolü sınırlayıcı fonksiyonu;

$$g_2(x) = \frac{V_{max}}{Vrd} - 1 \leq 0 \quad (3.24)$$

Çatlak kontrolü sınırlayıcı fonksiyonu;

$$g_3(x) = \frac{Wd}{Wdlim} - 1 \leq 0 \quad (3.25)$$

olarak tanımlanırlar. Burada M_{max} kirişe gelen maksimum momenti, V_{max} kirişe gelen maksimum yükü, Wd kirişte oluşacak hesaplanan çatlak açıklığını, $Mrdu$ kirişte hesaplanan nihai momenti, $VrdF$ kirişte hesaplanan kesme kuvvetini ve $Wdlim$ izin verilen çatlak açıklığı sınırı olarak tanımlanır.

3.2.3. Amaç fonksiyonu

Amaç fonksiyonu optimizasyon probleminde tanımlanan amacın matematiksel fonksiyona dönüştürülmüş halidir. Çalışmada amaç kirişin maliyetini minimize etmektedir. Bu sebeple amaç fonksiyonu kirişin maliyet fonksiyonu olarak tanımlanır:

$$Min. f(x) = B_B \times V_B + \zeta_{\zeta} \times W_{\zeta} + B_L \times D_L \quad (3.26)$$

Burada, B_B betonun birim maliyeti V_B betonun hacmi ζ_C çeliğin birim maliyeti W_C çeliğin ağırlığı ve B_L lifin birim maliyeti D_L lifin dozajını olarak temsil edilmektedir.

3.3. Çerçeve Optimizasyonu

Çerçeve optimizasyon problemi, güvenli ve tasarım koduna uygun, ekonomik açıdan uygun bir yapı tasarlamaktır. Dolayısıyla bu çalışmanın amaç fonksiyonu diğer benzer çalışmalarda olduğu gibi çerçeve maliyet fonksiyonudur (Akin ve Saka, 2015; Kaveh vd. 2012; Tapao vd. 2017). Amaç fonksiyonu denklem (3.26)'da ifade edilir.

Betonarme çerçeve tasarımı için çalışmada ACI 318-14 tasarım standardı dikkate alınmaktadır. Çerçevenin tasarımı için kiriş ve kolon elemanları kullanılmıştır. Çerçeve optimizasyonunda lifli beton tasarımı için sadece kiriş elemanları lifli olarak tasarlanmıştır. Kolon elemanları ise lifli olarak modellenmemiştir. Lifli kiriş tasarımı için tasarım ilkeleri bölüm 3.1'de ve lifli kirişlerin optimum boyutlandırılması için tasarım değişkeni, sınırlayıcılar ve amaç fonksiyonuna bölüm 3.2'de değinilmiştir. Betonarme çerçeve elemanlarının amaç fonksiyonu lifli betonun amaç fonksiyonuna benzerdir. Ancak tek fark lif maliyeti ve lif dozajının dahil edilmemesidir.

3.3.1. Betonarme kiriş tasarımı

3.3.1.1. Tasarım değişkenleri

Betonarme kirişin tasarım değişkenleri; kiriş genişliği b , kiriş yüksekliği h , donatı çapı ϕ_D , donatı miktarı η_D olarak tanımlanır. Bu tasarım değişkenleri, gerekli sınırlayıcılar ve amaç fonksiyonuna bağlı olarak belirlenmektedir.

3.3.1.2. Sınırlayıcılar

Kirişlerin genişliği b , yükseklikten h küçüktür ve bu, g_4 kontrolü sınırlayıcı fonksiyonu, şeklinde aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$g_4 = \frac{b}{h} - 1 \text{ ve } \frac{h}{3b} - 1 \leq 0 \quad (3.32)$$

Eğilme momenti kontrolü sınırlayıcı fonksiyonu olarak tanımlanır:

$$g_5 = \frac{|M_u|}{\phi M_n} - 1 \leq 0 \quad (3.33)$$

Minimum donatı çubuğu sayısı kontrolü sınırlayıcı fonksiyonu denklem (3.34)'de tanımlanır:

$$g_6 = \frac{A_{s,min}}{A_s} - 1 \leq 0 \quad (3.34)$$

Maksimum donatı çubuklarının kontrolü sınırlayıcı fonksiyonu şu şekilde tanımlanır:

$$g_7 = \frac{A_s}{A_{s,max}} - 1 \leq 0 \quad (3.35)$$

3.3.2. Betonarme kolon tasarımı

3.3.2.1. Tasarım değişkenleri

Betonarme kolonun tasarım değişkenleri; kolon genişliği b , kolon yüksekliği h , donatı çapı ϕ_D , donatı miktarı η_D olarak tanımlanır. Bu tasarım değişkenleri, gerekli sınırlayıcılar ve amaç fonksiyonuna bağlı olarak belirlenmektedir.

3.3.2.2. Sınırlayıcılar

Eksenel kuvvet kapasitesinin kontrolü sınırlayıcı fonksiyonu denklem (3.36) ve eğilme moment kapasitesi denklem (3.37)'de tanımlanır:

$$g_8 = \frac{P_u}{\phi P_n} - 1 \quad (3.36)$$

$$g_9 = \frac{M_u}{\phi M_n} - 1 \quad (3.37)$$

Burada P_u uygulanan nihai eksenel kuvveti, ϕP_{max} maksimum eksenel kapasiteyi, ϕP_n izin verilen maksimum eksenel kapasiteyi, ϕP_b denge koşulundaki eksenel kapasiteyi, ϕM_b denge koşulundaki eğilme momenti kapasitesini, ϕM_0 , sıfır eksenel kuvvet kapasitesindeki eğilme momenti kapasitesini ve ϕ , yük kapasitesi azaltma faktörünü ifade eder.

ACI 318-14 (Bölüm 10.6.1) kodu, basınç elemanındaki donat çubuklarının A_s toplam alanının, brüt kesitin A_g %1'inden fazla ve %8'inden az olması gerektiğini belirtir. Minimum ve maksimum donatı çubuğu sayısı için ceza fonksiyonu şu şekilde tanımlanır:

$$g_{10} = \frac{0.01xA_g}{A_s} - 1 \leq 0 \quad (3.38)$$

$$g_{11} = \frac{A_s}{0.08xA_g} - 1 \leq 0 \quad (3.39)$$

Çerçeve yapılar için üst kat ve katlar arası ötelenme sınırlayıcı fonksiyonları şu şekilde tanımlanır:

$$g_{12} = \frac{(\Delta^{top})_j}{\Delta_{al}^{top}} - 1, 0 \leq 0 \quad (3.40)$$

$$g_{13} = \frac{(\Delta^{is})_{i,j}}{(\Delta_{al}^{is})_i} - 1, 0 \leq 0 \quad (3.41)$$

Çerçeve yapılar için üst kat ve katlar arası öteleme kısıtları, $(\Delta^{top})_j$ j'inci yük durumu altındaki maksimum üst kat ötelemesi, Δ_{al}^{top} yapının izin verilen sehim üst kat ötelemesi sınırı, $(\Delta^{is})_{i,j}$ j'inci yük durumu altında i'inci katın üst ve alt düğüm noktaları arasındaki maksimum katlar arası öteleme, $(\Delta_{al}^{is})_i$ i'inci katın izin verilen katlar arası kat öteleme sınırı ve n_{st} yapıdaki toplam kat sayısıdır.

Çerçeve yapılarının kolondan kolona ve kirişten kolona bağlantılarına yönelik geometrik sınırlayıcı fonksiyonları şu şekilde tanımlanır:

$$g_{14} = \sum_{i=1}^{n_{cc}} \left(\frac{D_i^a}{D_i^b} - 1, 0 \right) \leq 0 \quad (3.42)$$

$$g_{15} = \sum_{i=1}^{n_{cc}} \left(\frac{V_i^a}{V_i^b} - 1, 0 \right) \leq 0 \quad (3.43)$$

$$g_{16} = \sum_{i=1}^{n_{bc1}} \left(\frac{B_i^b}{D_i^c} - 1, 0 \right) \leq 0 \quad (3.44)$$

$$g_{17} = \sum_{i=1}^{n_{bc2}} \left(\frac{B_i^b}{B_i^c} - 1, 0 \right) \leq 0 \quad (3.45)$$

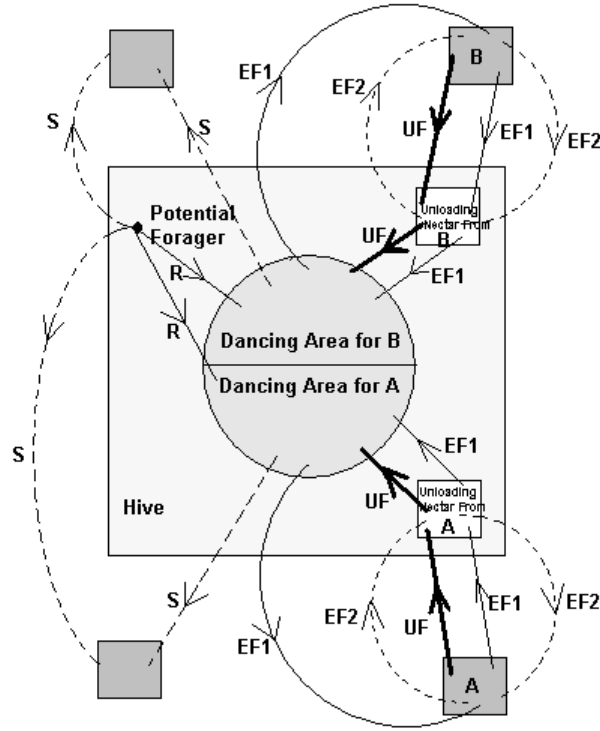
Burada, D_i^a ve V_i^a sırasıyla i'inci kolondan kolona bağlantısındaki üst sütunun derinliği ve birim hacmidir, D_i^b ve V_i^b sırasıyla i'inci kolondan kolona bağlantısındaki alt sütunun derinliği ve birim hacmi, n_{cc} ise toplam kolondan kolona olan sayısıdır Yapıdaki bağlantılar, B_i^b kirişin genişliğidir, D_i^c kirişten kolona bağlantı tipi 1'deki kolonun derinliğidir, B_i^c kirişten kolona bağlantı tipi 2'de kolonun genişliğidir, n_{bc1} ve n_{bc2} , sırasıyla tip1 kirişten kolona bağlantısı ve tip 2 kolondan kolona bağlantısının toplam sayılarıdır.

3.4. Meta-Sezgisel Yöntemler

3.4.1. Yapay arı kolonisi optimizasyonu

YAKO yöntemi Karaboğa (2005), yapay arı kolonisi yöntemini, arı kolonilerinin polen toplama sürecinde minimum enerji harcayarak sergiledikleri davranışlardan esinlenerek geliştirmiştir. Arı kolonisinin devamlılığını sağlamak için önemli olan işlerden biri, besin arayışıdır. Kovan içinde biriken kaynaklar, çevrede bulunan yiyecek kaynakları ve arılar arasındaki etkileşimler bu süreçte önemli bir rol oynar. Belirli görevleri olan işçi arılar, önceden belirlenmiş kaynaklardan topladıkları yiyecekleri kovana getirir ve bu kaynakların konum ve kalite bilgilerini diğer arılarla paylaşır. Görevi belirlenmemiş iki tür işçi arı bulunmaktadır: Kâşif arılar rastgele kaynak arayarak yiyecek toplarken, gözcü arılar kovanda bekleyerek görevli arıları izler ve onların bilgisine dayanarak yeni kaynaklara yönelirler. Arılar arasında bilgi paylaşımı dans yoluyla gerçekleşir ve bu paylaşılan bilgi sayesinde kaliteli yeni yiyecek kaynakları keşfedilir.

Yapay Arı Kolonisi Algoritması (YAKO), yiyecek kaynağı katsayılarını ve yiyecek miktarını amaç fonksiyonunun değerine benzeterek oluşturulur. Her bir yiyecek kaynağı için bir işçi ve bir gözcü arı görevlendirilir. Bu nedenle, işçi arı sayısı ile gözcü arı sayısı eşittir.



Şekil 3.5. Arıların yiyecek arama davranışları (Karaboğa, 2005)

Şekil 3.5'te arıların yiyecek arama ve getirme davranışları gösterilmiştir. Bu davranışlar şekil üzerinde incelenmiş ve Akay tarafından şu şekilde açıklanmıştır: A ve B, mevcut yiyecek kaynakları olarak ifade edilmiştir. Öncelikle görevi belli olmayan ve kaynak bilgisine sahip olmayan arı, aramaya başlayacaktır. Bu arı için iki durum mevcuttur: Birincisi, S ile gösterilen bu arı, kâşif arı olabilir ve yiyecek aramaya başlayabilir. İkincisi, dans eden arıları izleyerek tarif edilen kaynaklara giden bir gözcü arı olabilir, bu arı R ile gösterilmiştir. Kaynaklara giden arılar, buldukları kaynaklardan nektar getirmeye başlar. Böylece bu arılar görevli bir arı haline gelmişlerdir. Nektarı kovana getiren arı için üç seçenek vardır:

- i) Bilgi paylaşımında bulunmadan kaynaktan nektar getirmeye devam edebilir, bu arı EF2 ile gösterilmiştir.
- ii) Kaynağa dönmeden önce dans ederek nektar kaynağının yeri ve miktarı hakkında diğer arılara bilgi verir ve onları bu kaynağa yönlendirir, bu arı EF1 ile gösterilmiştir.
- iii) Kaynağı terk ederek dans alanında gözcü arı olabilir, bu arı UF ile gösterilmiştir.

Yiyecek aranırken başlangıç olarak kâşif arılar rastgele yiyecek aramaya başlar. Kaynağı bulan kâşif arı, artık görev sahibi bir arı haline gelmiştir ve kovana nektar götürmeye başlar. Görevli arılar kovana nektarlarını taşıy ve getirdikleri kaynaklarla ilgili bilgiyi dans ederek bekleyen gözcü arılara iletirler. Eğer kaynaktaki nektar tükenmişse, gözcü arı haline gelir. Gözcü arılar, dansları izledikten sonra yiyeceğin kalitesine göre bir kaynağı tercih ederler.

Yapay Arı Kolonisi (YAK) algoritmasının adımları şu şekildedir:

- Başlangıçta yiyecek kaynağı bölgelerinin oluşturulması
- REPEAT:
 - İşçi arılar yiyecek kaynağına gönderilir ve nektar miktarı hesaplanır.
 - Gözcü arıların seçiminde kullanacakları olasılık değerleri hesaplanır.
 - Gözcü arılar, hesaplanan olasılık değerlerine göre yiyecek kaynağı bölgesini seçerler. Kaynaktan ayrılma kriteri belirlenir: limit ve kâşif arı üretilmesi.
 - UNTIL çevrim sayısı tamamlanır.
 -

3.4.2. Biyocoğrafya tabanlı optimizasyon

Biyocoğrafya Yöntemi, Dan Simon (2008) tarafından, habitat içindeki canlıların göç etme ve habitatların göç alma ilkelerinden esinlenerek geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntem, yeni bir biyo-ilham ve popülasyon tabanlı optimizasyon tekniğidir ve Robert MacArthur ile Edward Wilson tarafından biyocoğrafyanın matematiksel modellerinden esinlenilerek oluşturulmuştur. Biyocoğrafya tabanlı optimizasyon (BTO) yöntemi, uçak motoru durumu tahmini ve genel kriter fonksiyonları için sensör seçimi problemlerinde kullanılmıştır. Bu algoritma, dikdörtgen mikroşerit yama antenin rezonans frekansının hesaplanması, güç sistemlerinin analizi ve standart güç akış problemleri gibi optimizasyon problemlerinin çözümünde kendini kanıtlamıştır.

Biyocoğrafya yönteminde, her bir bireyin bulunduğu habitatın uygunluğuna göre bir göç etme olasılığı hesaplanır. Bu göç etme olasılığına göre bireyler göç eder. Biyocoğrafya algoritmasında göç etme durumu, yeni tasarımların bulunması anlamına gelmektedir. Ayrıca, biyocoğrafya yönteminde habitatın mutasyon olasılığı da vardır. Bu olasılık gerçekleştiğinde, bireyler mutasyona uğrar. Bu olay, biyocoğrafya yönteminde bazı tasarım değişkenlerinin yok edilerek yerine yeni tasarım değişkenlerinin rastgele oluşturulması anlamına gelmektedir. En basit şekliyle biyocoğrafya yönteminin çözüm algoritması aşağıdaki gibi gösterilebilir:

1. **Adım:** Habitat içerisindeki bireyleri (tasarımları) rastgele oluştur ve bireylerin (tasarımların) performans değerlerini hesapla.
2. **Adım:** Habitat içerisindeki her bir bireylerin göç etme olasılığını hesapla, göç etme olasılığı gerçekleşirse habitatta göç eden bireylerin yerine yeni bireyler oluştur.
3. **Adım:** Mutasyon olasılığı gerçekleşirse mutasyon oranı gerçekleşen bireyi öldür. Yerine yeni bireyi rastgele oluştur.
4. **Adım:** Maksimum yineleme sayısı ulaşıncaya algoritmayı bitir. Ulaşılmadıysa 2. Adıma dön.

Biyocoğrafya doğadaki türlerin dağılımına ait bir çalışmadır. Olası her çözüm bir ada olarak kabul edilir ve uygunluk endeksi değişkenleri (SIV) adı verilen yaşanabilirliğin karakterize edildiği özellikler mevcuttur. Her çözümün özüne kendi

yaşam uygunluğu endeksi adı verilir (HIS). BTO'da, bir yaşam ortamı H , rastgele başlatılan N 'nin (SIVs) bir vektörü olarak kabul edilir. Daha sonra hedefe ulaşmak amacıyla asgari göç ve mutasyon adımı takip edilir. Göçteki bilgi her çözümün göç oranları μ ve göçmenlik oranları λ 'ya bağlı olan yaşam ortamları arasında paylaşılır. Her çözüm, kullanıcı tanımlı bir parametre olan P_{mod} olasılığına bağlı şekilde değiştirilir. Her bir bireyde λ ve μ mevcuttur ve doğal ortamı içinde K türlerinin sayısının bir fonksiyonu olup denklem (3.46) ve (3.47) ile ifade edilebilir.

$$\lambda = \frac{EK}{P} \quad (3.46)$$

$$\mu = I \left(1 - \frac{K}{P} \right) \quad (3.47)$$

Burada E , maksimum λ ; I maksimum μ ve P popülasyon boyutunu temsil eder.

Göçmenlik ve göç eğrileri E : I durumu için düz çizgilerdir. Daha çok tür ile yaşam ortamı (yüksek HIS, iyi çözüm) yüksek μ ve düşük λ 'ya sahip iken, birkaç tür ile yaşam ortamı (düşük HIS, zayıf çözüm) düşük μ ve yüksek λ 'ya sahiptir. Zayıf çözümler algoritma sömürü yeteneğini geliştiren iyi çözümden daha yararlı bilgileri kabul eder. Göç algoritması aşağıdaki gibi açıklanmıştır:

- α, λ_i olasılığı ile H_i seçilir
- Eğer H_i
- Dön $j = 1$ 'den P kadar
- α, μ_i olasılığı ile H_i seçilir
- Eğer H_i
- H_i 'den SIV için rastgele bir σ seç
- σ ile H_i de rastgele bir SIV'ı değiştir
- Eğer sonu
- Eğer sonu
- Döngü sonu

$$x_m(s) = P_{mutate} \left(1 - \frac{P_i}{P_{maks}} \right) \quad (3.48)$$

BTO'da, mutasyon iyi çözümler edinmek amacıyla popülasyonun çeşitliliğinin artırılması amacıyla kullanılır. Mutasyon operatörü E : I durumu için m tabanlı mutasyon oranı ile rastgele bir yaşam kullanıcısının SIV'ını değiştirir. Mutasyon oranı m aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

Burada, P_{mutate} kullanıcı tanımlı bir parametredir ve $P_{maks} = \arg_{maks} P_i, i = 1, \dots, p$.

Mutasyon algoritması aşağıdaki gibi tanımlanır:

- Dön $j = 1$ 'den N kadar
- P_i olasılığını hesaplamak için λ_i ve μ_i kullan
- αP_i olasılığı ile SIV $H_i(j)$ seçilir
- Eğer $H_i(j)$

- Rastgele üretilen SIV ile $H_i(j)$ 'yi yer değiştir
- Eğer sonu
- Döngü sonu

3.4.3. Ağaç tohum optimizasyonu

Kıran tarafından 2015 yılında önerilen Ağaç Tohum Algoritması (ATO), sürekli optimizasyon problemlerinin çözümü için yeni bir metaheuristik algoritmadır (Kıran, 2015). Bu popülasyon temelli algoritma, doğada bulunan ağaç-tohum ilişkisini modellemektedir. Arama uzayında birçok noktadan arama işlemi gerçekleştiren bu algoritma, yeni nesil oluşturmak için ağaçlardan tohumlar üretmektedir. ATO'da bir ağaçtan üretilen tohum sayısı rastgele bir değer olarak elde edilir. Optimizasyon probleminde çözüm uzayında arama işlemini ağaçlar ve tohumları temel alarak gerçekleştiren bu algoritma, tekrarlı ve sezgisel bir araştırma mantığında şekillenmiştir.

Aşağıda ATO algoritmasının psödo kodu verilmiştir. Bu algoritmada, bir problem için olası tüm çözümler ağaçlar ve tohumlar olarak ifade edilmektedir. Başlangıç popülasyonu ise belirlenen miktarda rastgele oluşturulmaktadır. N sayıda oluşturulan popülasyonda, her bir ağaç için modellenmiş problemin amaç fonksiyonu değeri hesaplanır. Amaç değerlerinin hesaplanmasının ardından, çözüm arama yöntemi her bir ağaçtan tohum üretme yoluyla gerçekleşir. Üretilen tohumların amaç fonksiyon değerleri hesaplandıktan sonra, bu değerler ebeveyn ağaçları ve tohum kümeleri ile kıyaslanır. Bu kıyaslama, optimizasyon probleminin minimize veya maksimize edilmesine bağlı olarak yapılır. Bu kıyaslama sonucunda başarılı bulunan tohum veya ağaç, bir sonraki nesle aktarılacak üzere yeni neslin ağacı olarak kabul edilir. Algoritma başlangıcında belirlenen maksimum sayıya ulaşınca kadar, tohum üretim ve kıyaslama işlemi devam eder. Maksimum sayıya ulaşıldığında elde edilen en iyi sonuç, algoritmanın ilgili değerler için probleme bulduğu çözüm olarak kabul edilir.

ATO'daki doğal fenomen, ağaçlar ve tohumları arasındaki ilişkidir. Bu tohumlar zamanla büyür ve yeni ağaçlar oluşturur. Optimizasyon problemi için bu ağaçların yüzeyi bir arama alanı olarak varsayıldığında, ağaçların ve tohumların konumları olası çözümler olarak kabul edilmektedir. Bir ağaçtan üretilen tohumun konumunun belirlenmesi optimizasyon problemi için önemlidir. Bunun sebebi süreç esnasında aramanın çekirdeğini oluşturmaktadır. Bu işlem için iki arama denklemi önerilmektedir. İlki denklem (3.39) için, bu ağaç için tohumun üretileceği ağaç konumunu ve ağaç popülasyonunun en iyi konumunu dikkate alınır. Bu arama denklemi ayrıca önerilen algoritmanın yerel arama yeteneğini de geliştirmektedir. İkinci güncelleme kuralı denklem (3.40), ağaç için yeni bir tohum üretmek amacıyla iki farklı ağaç konumu kullanır.

$$S_{i,j} = T_{i,j} + \alpha_{i,j} \times (B_j - T_{r,j}) \quad (3.49)$$

$$S_{i,j} = T_{i,j} + \alpha_{i,j} \times (T_{i,j} - T_{r,j}) \quad (3.50)$$

Burada; $S_{\{i,j\}}$, i. ağaçta üretilecek i. tohumun j. boyutu, $T_{\{i,j\}}$, i. ağacın j. boyutu, B_j , o ana kadar elde edilen en iyi ağaç konumunun j. boyutu, $T_{\{r,j\}}$, rastgele seçilen r. popülasyonun j. boyutu α , $[-1, 1]$ aralığında rastgele üretilen ölçekleme faktörüdür. i ve r aynı değerlerdir.

En önemlisi, yeni bir tohum konumu üretmek için tercih edilen denklemdir. Bu tercih, yöntemin $[0, 1]$ aralığında arama eğilimi (ST) olarak adlandırılan bir kontrol parametresi tarafından kontrol edilmektedir. ST değerinin artması, güçlü bir yerel arama ve hızlı yakınsama sağlamakta, değerin düşmesi durumunda, yavaş yakınsamaya ancak güçlü küresel aramaya sebep olmaktadır. Kısacası, ATO'nun keşif ve kullanım yetenekleri ST parametresi tarafından kontrol edilir.

ATO'da arama başlangıcında, denklem (3.51) kullanılarak optimizasyon problemi için olası çözümler olan ilk ağaç konumları üretilir.

$$T_{i,j} = L_{j,min} + r_{i,j}(H_{j,max} - L_{j,min}) \quad (3.51)$$

Burada; $L_{j,min}$ arama uzayının alt sınırı, $H_{j,max}$ arama uzayının üst sınırı ve $r_{i,j}$ her bir boyut ve konum için $[0, 1]$ aralığında üretilmiş rastgele bir sayıdır. Minimizasyon için, Denklem (3.52) kullanılarak popülasyondan en iyi çözüm seçilir.

$$B = \min\{f(\vec{T}_i)\} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.52)$$

N, popülasyondaki ağaç sayısıdır.

Bir ağaç için yeni tohum konumları oluşturulurken, tohum sayısı birden fazla olabilir ve bu sayı popülasyon büyüklüğüne bağlıdır. Kontrol parametrelerinin ATO performansına etkisinin analizinde, popülasyon büyüklüğünün %10'u bir ağaç için üretilen minimum tohum sayısı, %25'i ise maksimum tohum sayısıdır. ATO'da tohum üretiminin sayısı rastgele olarak üretilmektedir.

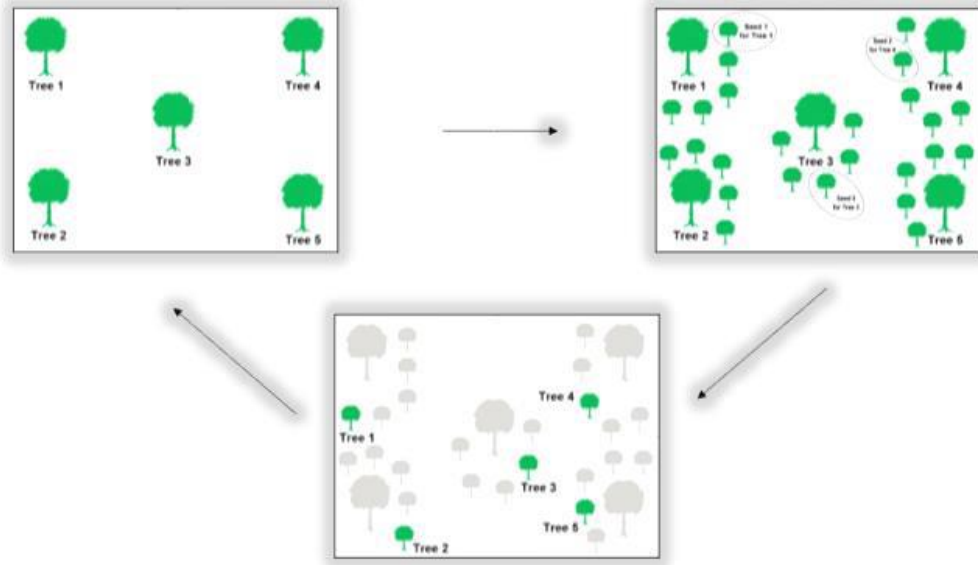
ATO'un algoritmasında ST kontrol parametresine bağlıdır. $[0, 1]$ aralığında rastgele üretilen sayı ST'den küçükse, boyutu güncellemek için denklem (3.49), aksi takdirde denklem (3.50) kullanılır.

Aşağıda ATO'nun algoritma adımları gösterilmektedir.

- 1. Adım:** Algoritma parametrelerini belirleme
- 2. Adım:** Başlangıç popülasyonunu oluşturma
- 3. Adım:** Tohumlarla araştırma
- 4. Adım:** Popülasyonda en iyi çözümü belirleme
- 5. Adım:** Durdurma şartını kontrol et

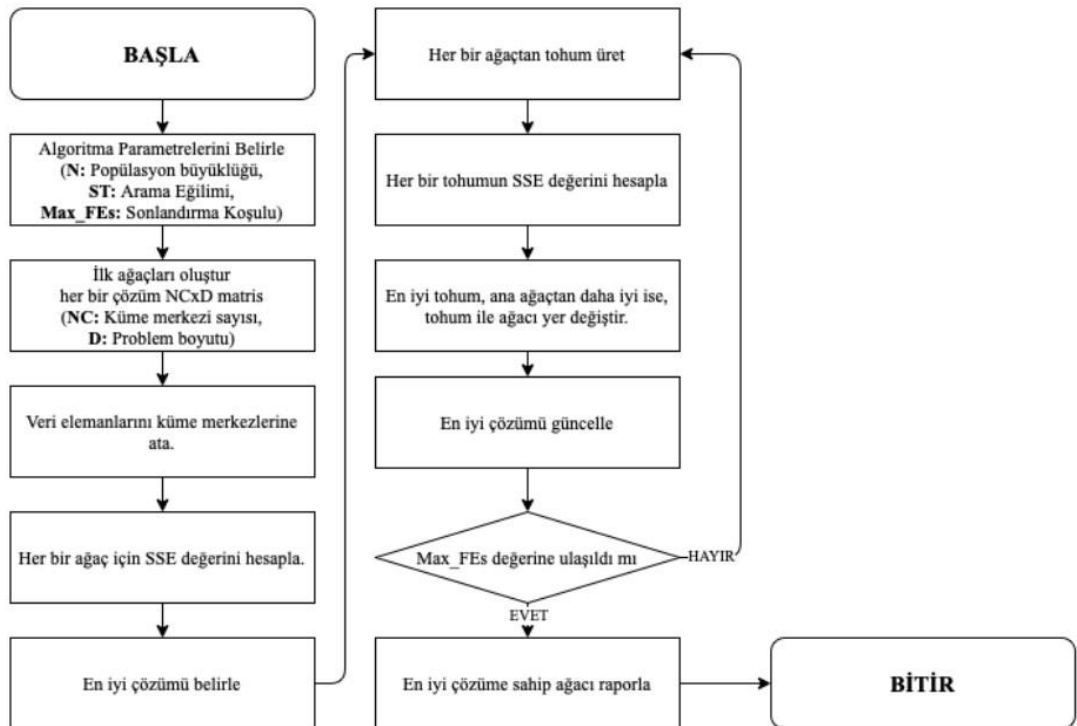
Eğer durdurma şartı sağlanmazsa adım 3'e dön.

Eğer durdurma şartı sağlanırsa en iyi çözümü raporla.



Şekil 3.6. Ağaç tohum optimizasyonu (Kiran, 2015)

Ağaç tohum optimizasyonu akış diyagramı Şekil 3.7’de gösterilmektedir.

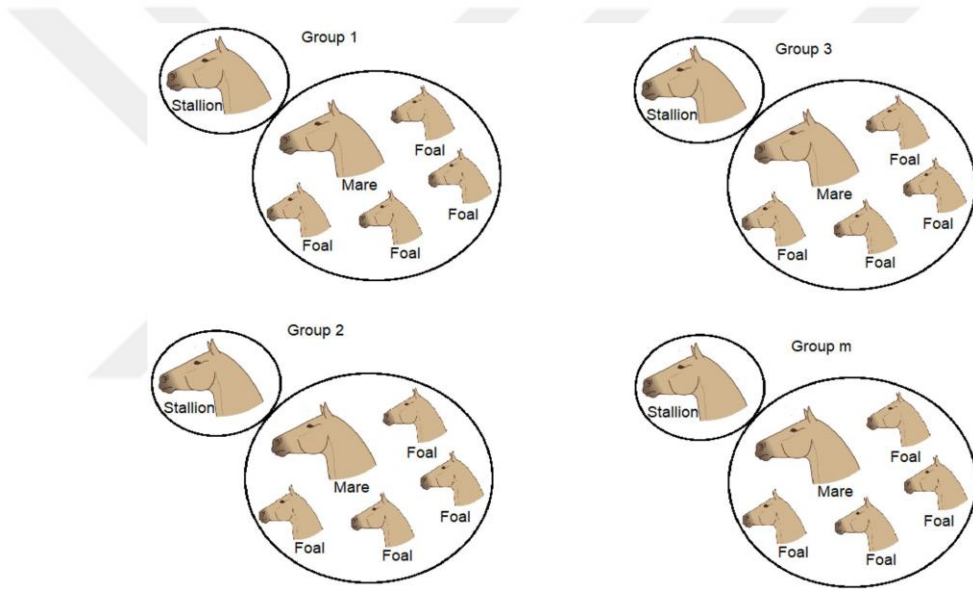


Şekil 3.7. Ağaç tohum optimizasyonu akış şeması

3.4.4. Vahşi at optimizasyonu

Naruei ve Keynia, (2021) tarafından önerilmiş olan VHO algoritması yeni bir meta-heuristik algoritmadır. Vahşi atların sergilediği liderlik, beslenme, kovalama ve çiftleşme davranışlarının matematiksel olarak modellendiği görülmektedir (Ali ve ark., 2022).

Genel olarak atlar, sosyal durumlarına göre (bölgesel ve bölgesel olmayan) iki sınıfa ayrılabilir. Yavrular, aygırlar ve kısıraklar gibi farklı yaş gruplarından oluşan gruplar halinde yaşarlar (bkz. Şekil 3.8). Hem aygırlar hem de kısıraklar birlikte yaşarlar ve olatmada birbirleriyle etkileşime girerler. Taylar büyüdükten sonra gruplarından ayrılır ve kendi ailelerini kurmak için diğer gruplara katılır. Bu davranış aygırlar ve kardeşler arasında çiftleşmeyi engeller. Vahşi at optimizasyonu (VAO) algoritması, olatma, tahakküm, liderlik hiyerarşisi ve çiftleşme gibi atların sosyal davranışlarından ilham alan meta-sezgisel sürü tabanlı bir algoritmadır.



Şekil 3.8. İlk popülasyona uygun at gruplarının oluşturulması (Naruei ve Keynia, 2021)

Vahşi at optimizasyonu aşağıdaki gibi beş ana adımdan oluşur:

- 1. Adım:** Bir başlangıç popülasyonu yaratmak ve at grupları oluşturmak ve liderleri seçmek;
- 2. Adım:** Atların olatılması ve çiftleştirilmesi;
- 3. Adım:** Lider (aygır) tarafından liderlik ve gruba liderlik etme;
- 4. Adım:** Lider değişimi ve seçimi;
- 5. Adım:** En iyi çözümü kaydedin.

3.4.3.1. İlk popülasyonların oluşturulması, at gruplarının oluşturulması, liderlerin belirlenmesi

N birey ve G grup varsa, lider olmayanların (kısıraklar ve taylar) sayısı $N - G$ 'dir ve lider sayısı G 'dir. Aygırların oranı, G/N olan PS olarak tanımlanır. Şekil 3.8 de, çeşitli gruplar oluşturmak için liderlerin temel kuşaktan nasıl belirlendiğini göstermektedir.

3.4.3.2. Otlatma davranışı

Daha önce belirtildiği gibi, bir tayın hayatının çoğu, grubunun yakınında otlayarak geçer. Otlatma aşamasını simüle etmek için, aygır pozisyonunun otlatma alanı merkezinde var olduğunu varsayılır. Diğer bireylerin hareket etmesini sağlamak için denklem (3.53) kullanılır:

$$X_{G,j}^i = 2Z\cos(2\pi RZ) \times (\text{Stallion}_{G,j} - X_{G,j}^i) + \text{Stallion}_{G,j} \quad (3.53)$$

Burada $X_{G,j}^i$, grup üyesinin (tay veya kısırak) mevcut konumudur, $\text{Stallion}_{G,j}$, aygırın (grup lideri) konumudur, Z , Denklem (3.43) ile hesaplanan uyarlanabilir bir parametredir. R , atların grup liderinin farklı açılarda (360 derece) otlamasına neden olan $[-2, 2]$ aralığında rasgele bir sayıdır, π , 3.14'e eşit olan π sayısı ile aynıdır. π ve R 'yi birleştiren $\cos$ işlevi, farklı yarıçapta harekete neden olur ve son olarak $X_{G,j}^i$, otlatma sırasında grup üyesinin yeni konumudur.

$$P = \vec{R1} < \text{TDR}, \text{IDX} = (P == 0), Z = R2\theta\text{IDX} + \vec{R3}\theta(\sim\text{IDX}) \quad (3.54)$$

Burada P , 0 ve 1 içeren bir vektördür ve boyutu problemin boyutuna eşittir, $\vec{R1}$ ve $\vec{R3}$; 0 ile 1 arasında rastgele vektörlerdir ve $R2$, 0 ile 1 arasında rastgele bir sayıdır. Denklem (3.55) ile hesaplanan azalan parametre:

$$\text{TDR} = 1 - \frac{t}{T} \quad (3.55)$$

Burada t ve T sırasıyla mevcut ve maksimum yinelemelerdir.

3.4.3.3. At çiftleşme davranışı

Atların diğer hayvanlara göre benzersiz davranışlarından biri de tayları gruptan ayırıp çiftleştirme davranışıdır. Taylar ergenliğe ulaşmadan gruptan ayrılırlar ve erkek taylar tek at grubuna, dişi taylar ise ergenliğe ulaşp eşlerini bulmak için başka bir aile grubuna katılır. Bu ayrılma, babanın kızı veya kardeşleri ile çiftleşmesini engellemek içindir. Bu davranışı uygulamak için işlemler yapılır. Bu işlemler bir tay i grubundan ayrılır ve geçici bir gruba katılır, bir tay j grubundan ayrılır ve geçici bir gruba katılır. Bu iki tayın erkek ve dişi olduğunu varsayılır ve bu iki tayın aile ilişkisi olmadığı için ergenlik çağından sonra çiftleşebilir. Ortaya çıkan çocuk geçici gruptan ayrılmalı ve k gibi başka bir gruba katılmalıdır. Bu ayrılma, çiftleşme ve üreme döngüsü, tüm farklı at grupları için tekrarlanır. Atların ayrılma ve çiftleşme davranışını simüle etmek için, ortalama tipin çaprazlama operatörü ile aynı olan denklem (3.46) kullanılır:

$$X_{G,k}^p = \text{Crossover}(X_{G,i}^q, X_{G,j}^z), i \neq j \neq k, q = z = \text{end} \quad (3.56)$$

$$\text{Crossover} = \text{Mean}$$

Burada; $X_{G,k}^p$, k grubundan p atının pozisyonudur ve gruptan ayrılır ve yerini, ebeveynleri i ve j grubundan ayrılmak zorunda kalan ve ergenliğe ulaşmış atlardan oluşan bir ata verir. Aile ilişkileri yoktur ve çiftleşip ürerler. $X_{G,i}^q$ Tay q 'nun konumu, gruptan ayrılan i. grubundandır ve ergenlik çağına ulaştıktan sonra, j. grubundan ayrılan $X_{G,j}^z$ konumundaki z atı ile çiftleşir.

3.4.3.4. Grup liderliği

Grup lideri, grubu uygun bir alana yönlendirmelidir. Bu uygun alan, su birikintisi olarak değerlendirilir ve grup bu su birikintisine doğru hareket etmelidir. Diğer gruplar da aynı şekilde bu su birikintisine doğru hareket ederler. Liderler, bu su birikintisi için rekabet ederler; böylece hâkim olan grup, bu su birikintisini kullanabilir ve hâkimiyet grubunun ayrılmasına kadar diğer grupların bu su birikintisini kullanmasına izin verilmez.

Grup liderleri, gruplarını bu su birikintisine doğru yönlendirmeli ve su birikintisinin hâkimiyeti altındaysa onu kullanmalı; başka bir grup hâkimse, oradan uzaklaşmalıdır. Bu davranışı simüle etmek için denklem (3.72) kullanılır:

$$\overline{\text{Stallion}}_{G,j} = \begin{cases} 2Z\cos(2\pi RZ) \times (WH - \text{Stallion}_{G,j}) + WH & \text{if } rand > 0.5 \\ 2Z\cos(2\pi RZ) \times (WH - \text{Stallion}_{G,j}) - WH & \text{if } rand \leq 0.5 \end{cases} \quad (3.57)$$

Burada $\overline{\text{Stallion}}_{G,j}$ i grubu liderinin bir sonraki konumu, WH su birikintisinin konumu, $\text{Stallion}_{G,j}$ i. grubu liderinin mevcut konumu, Z Denklem (3.44) ile hesaplanan uyarlanabilir bir mekanizmadır, R, $[-2, 2]$ aralığında düzgün bir rasgele sayıdır ve π simgesi pi sayısı ile aynıdır.

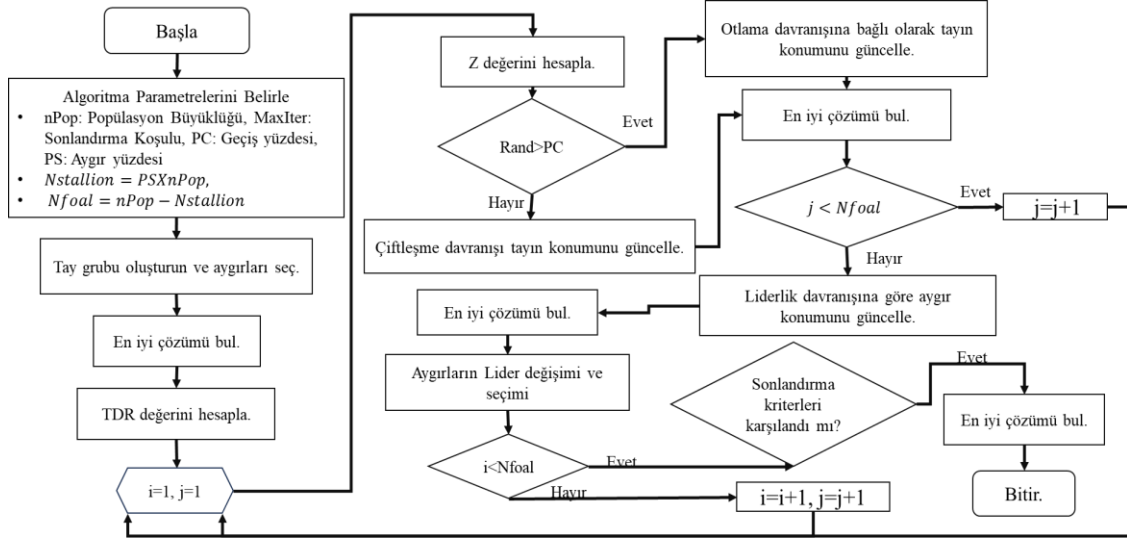
3.4.3.5. Liderlerin değişimi ve seçimi

Başlangıçta, liderler rasgele seçilir. Ardından, uygunluk değerlerine dayalı olarak liderler belirlenir. Eğer bir grup üyesi, gruptaki liderden daha iyi uygunluk gösteriyorsa, liderin ve ilgili üyenin pozisyonu denklem (3.58) ile değişecektir. Lider pozisyonlarının ve diğer bireyler arasındaki alışverişi simüle etmek için denklem (3.58) kullanılır:

$$\text{Stallion}_{G,j} = \begin{cases} X_{G,j}^i, & \text{if } f(X_{G,j}^i) < f(\text{Stallion}_{G,j}) \\ \text{Stallion}_{G,i}, & \text{if } f(X_{G,j}^i) \geq f(\text{Stallion}_{G,j}) \end{cases} \quad (3.58)$$

$f(X_{G,j}^i)$ ve $f(\text{Stallion}_{G,j})$ sırasıyla tay ve aygırın uygunluk değerleridir.

Yöntemin akış diyagramı Şekil 3.9'da gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Vahşi at optimizasyonu akış şeması

Vahşi At Optimizasyonu (VAO) yöntemine, en kötü üyenin (worst member) belirlenmesi ve açgözlü seçim (greedy selection) stratejilerinin eklenmesiyle yöntemin performansı artırılmıştır. En kötü üyenin belirlenmesi, popülasyondaki en düşük performanslı bireyin tanımlanarak bu bireyin yerini daha iyi performans gösteren bireylerle değiştirilmesini sağlar. Açgözlü seçim stratejisi ise, popülasyonun en iyi üyelerinin seçilerek yeni nesillerin oluşturulması sürecini optimize eder. Bu iyileştirmeler sayesinde, yöntem daha hızlı ve etkili bir şekilde en iyi çözümleri bulabilmektedir. Söz konusu geliştirilmiş yöntem, İyileştirilmiş Vahşi At Optimizasyonu (İVAO) olarak adlandırılmaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışma kiriş ve çerçeve optimum tasarımlarını 2 ana başlık altında incelenmektedir. İlk olarak lifli betonarme kirişin optimum tasarımı için firmadan ve literatürdeki makale çalışmalarından alınan farklı CMOD test verileri kullanılmaktadır. Firmadan alınan test verileri ticari kaygılardan dolayı paylaşılmamaktadır. Makalelerdeki referans kaynaklar kullanılmaktadır. (Venkateshwaran ve Tan 2017; Chen vd. 2021) İkinci aşamada çerçevenin hem kolon hem de kiriş olarak optimum tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Optimizasyon yöntemleri için kullanılan parametreler çizelge 4.1 ve 4.2’de gösterilmektedir. Bu parametreler YAKO yöntemi için (Aydoğdu vd., 2016), BTO için Aydoğdu vd., (2017), ATO için Carbas ve Artar (2021) ve VAO ve İVAO için Naruei ve Keynia (2022) çalışmaları referans alınmıştır.

Çizelge 4.1. YAKO ve BTO yöntemlerinin parametreleri

YAKO Parametre	Değer	BTO Parametre	Değer
Parametre alt değer	1	Popülasyon Sayısı	100
Parametre üst değer	120	Boyut	Grup Sayısı
Koloni sayısı	100	Mutasyon Faktörü	0,1
Yiyecek Kaynağı Limiti	50	Maksimum Döngü Sayısı	10000
Maksimum Döngü Sayısı	10000		

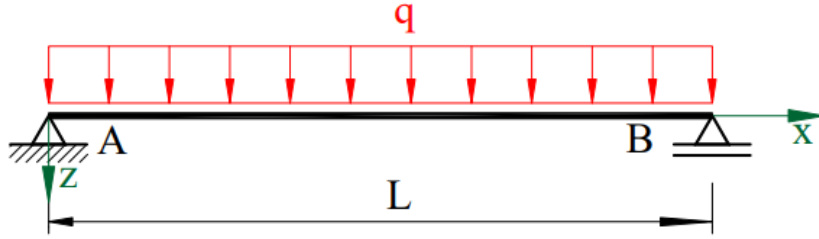
Çizelge 4.2. ATO, VAO ve İVAO yöntemlerinin parametreleri

ATO Parametre	Değer	VAO ve İVAO Parametre	Değer
Popülasyon Sayısı	20	Popülasyon Sayısı	50
Boyut	Grup Sayısı	Boyut	Grup Sayısı
Arama Eğilimi	0,5	Geçiş Yüzdesi	0,13
Maksimum Döngü Sayısı	10000	Aygır Yüzdesi	0,2
		Maksimum Döngü Sayısı	10000

4.1. Lifli Betonarme Kirişin Optimum Analizi ve Tasarımı

4.1.1. Test sonuçlarına bağlı gerçekleştirilen lifli betonarme kirişin optimum analizi ve tasarımı

Firmadan alınan test verileri kullanılarak, tek açıklıklı basit bir lifli betonarme kiriş tasarım örneği oluşturulmuştur (Şekil 4.1). Kiriş modeline $q = 13 \text{ N/mm}$ yaylı yük tanımlanmış ve kirişin açıklığı 3m ile 10m arasında 0.25m aralıklar ile değişmektedir. Kiriş genişliği 150-600 mm arasında 50mm aralıkla, kiriş yüksekliği 250-1000 mm arasında 50 mm aralıkla kirişin 144 farklı tasarım modeli oluşturulmuştur. Donatının çapı ve sayısı, lifin türü ve dozajı ve C30 ve C40 beton sınıfına ait tasarım değişkenleri, çizelge 4.3’de gösterilmektedir. Maliyetler dolar cinsinden alınmaktadır. Betonun birim maliyeti C30 için 39.29\$, C40 için 44\$, Donatının birim maliyeti 1\$, lifin birim maliyeti Lif türü-2 için 3.5\$ ve Lif Türü-3 için 4.75\$ alınmıştır. Yöntemlerin detaylı tasarım analiz sonuçları Ek’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Tek açıklıklı basit kiriş örneği

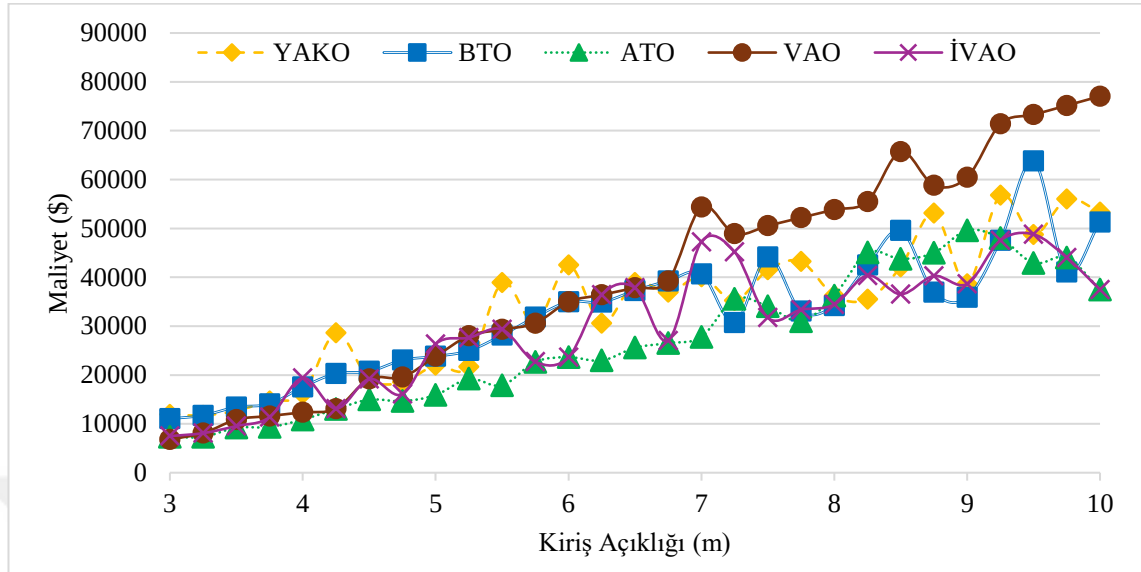
Çizelge 4.3. Tasarım değişkenleri

Tasarım Değişkenleri	Değişken Aralıkları
b(mm)	150/250/300/350/400/450/500/550/600
h(mm)	250/300/350/400/450,500/550/600/650/700/750/800/850/900/950/1000
Donatı Çapı (mm)	6/10/12/14/16/18/20/22/24/26/28/30/32
Donatı Sayısı (adet)	1/2/3/4/5/6/7/8/9/10
Lif Türü	Lif Türü-2, Lif Türü-3
Lif Dozajı(kg/m³)	20/25/30/35/40
Beton Sınıfı	C30/C40

Lifli kirişin optimum tasarımında Yapay Arı Kolonisi Optimizasyonu (YAKO), Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon (BTO), Ağaç Tohum Optimizasyonu (ATO) ve Vahşi At Optimizasyonu (VAO) yöntemlerinin maliyet durumları Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Optimizasyon yöntemlerinin stokastik tabanlı çözüm durumu nedeniyle, kiriş aralıklarındaki performanslarda farklılıklar gözlemlenmektedir. Toplam maliyet açısından en yüksek performansı gösteren yöntem Ağaç Tohum Optimizasyonu olarak belirlenmiştir. Diğer yöntemlere göre daha düşük performans sergileyen yöntem ise Vahşi At Optimizasyonu olarak tespit edilmiştir. Bu nedenle, VAO yönteminin performansını artırmak amacıyla ağaçlı seçim ve en kötü üye özellikleri eklenerek iyileştirilmiştir. İyileştirilmiş Vahşi At Optimizasyonu (İVAO), performansını en iyi çözüme sahip olan Ağaç Tohum Optimizasyonu (ATO) yöntemine yakın bir seviyeye getirmiştir. Yapay Arı Kolonisi Optimizasyonu (YAKO) ve Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon (BTO) yöntemleri ise benzer performans sergilemektedir.

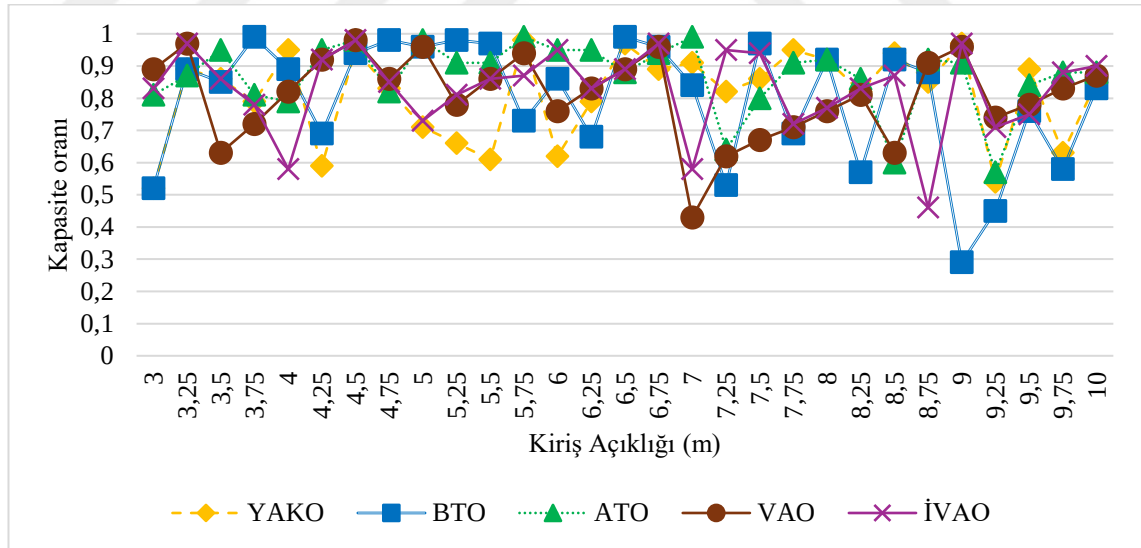
Yöntemler, üç farklı kapasite oranı üzerinden değerlendirilmiştir: Farklı açıklıklara bağlı lifli betonarme kirişin optimum tasarımı için eğilme kapasite oranı Şekil 4.3'de, kesme kapasite oranı Şekil 4.4'te ve çatlak kapasite oranları 4.5'de gösterilmektedir. yüksek eğilme kapasitesi, açıklık arttıkça yükselen kesme kapasitesi ve açıklık arttıkça düşen çatlak kapasitesi olarak belirlenmiştir. Vahşi At Optimizasyonu dışındaki yöntemlerde açıklık arttıkça kesme kapasitesi artma eğilimindedir. Vahşi At Optimizasyonu ise kesme kapasitesinde maksimum %50, eğilme kapasitesinde maksimum %99, çatlak kapasitesinde ise maksimum %56 performans sergilemektedir. Daha düşük performans gösteren Vahşi At Optimizasyonu için iyileştirmeler yapılmış ve

iyileştirilmiş versiyonunda 10m için eğilme kapasitesi %98, kesme kapasitesi %99 ve çatlak kapasitesi %3 oranında performans artışı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.2. Maliyet analizi sonuçları (USD)

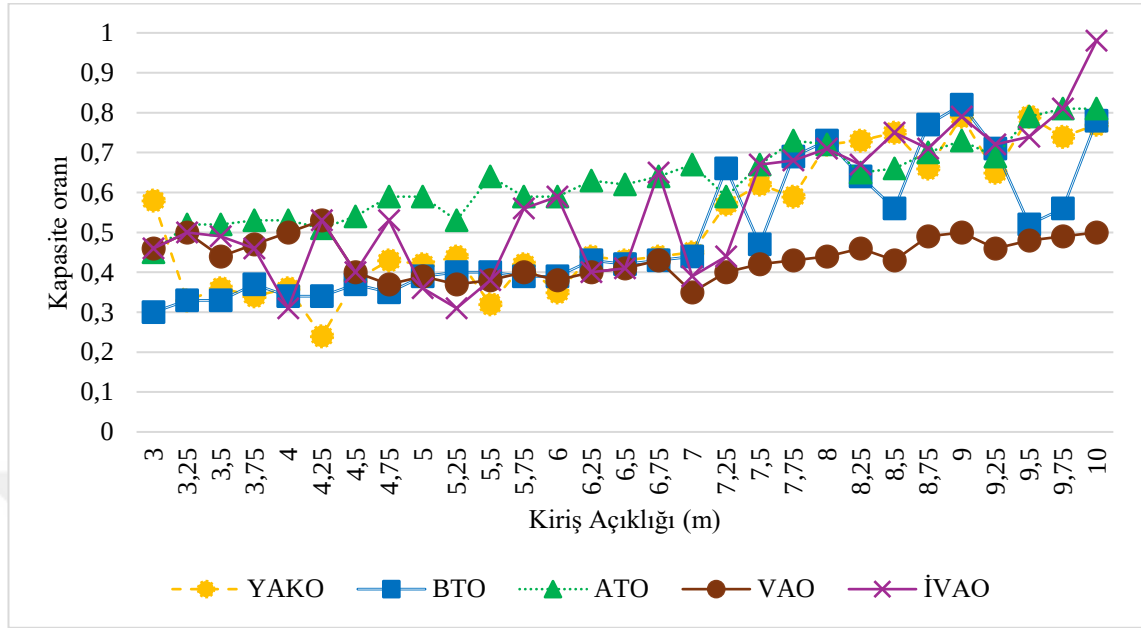
Lifli betonarme kirişin optimum tasarımıdaki yöntemlerin çatlak kapasitesinde açıklık arttıkça bir düşüş gözlemlenmektedir. Özellikle 6-7m'den itibaren kapasitenin sifıra yaklaştığı görülmektedir. Ağaç Tohum ve İyileştirilmiş Vahşi At yöntemlerinde diğer yöntemlere göre daha yüksek çatlak kapasitesi sergilenmektedir.



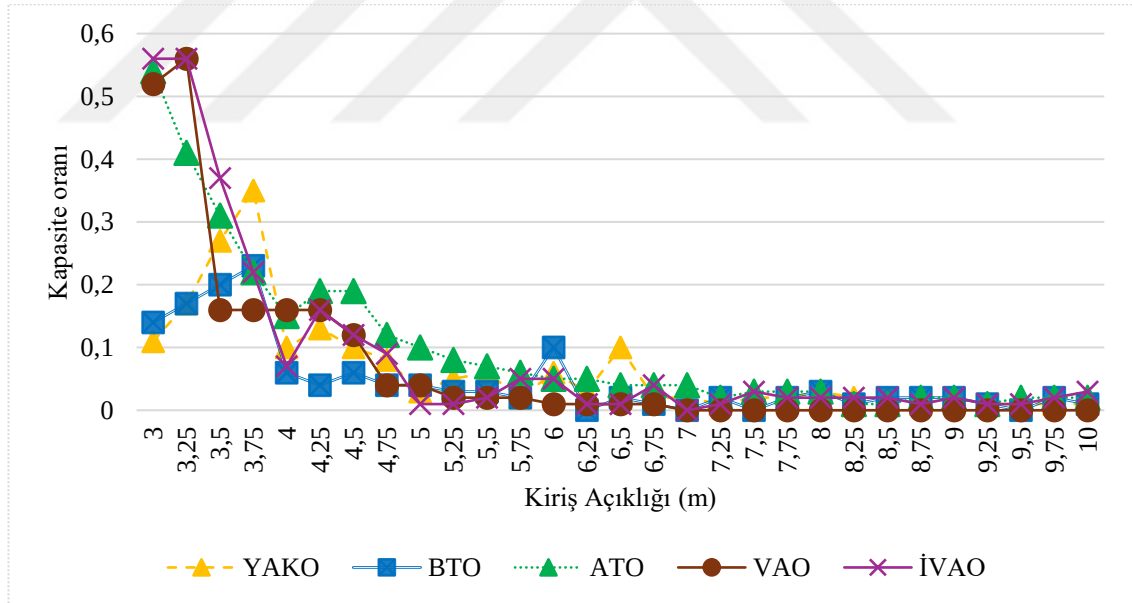
Şekil 4.3. Optimizasyon yöntemlerin eğilme kapasite oranları

Ayrıca optimizasyon yöntemlerinde, kiriş açıklıklarında belirli farklılıklar olmasına rağmen genel olarak eğilme kapasitesinin %90'a yakın olduğu gözlemlenmektedir. Ancak stokastik çözümler kullanıldığından, her iterasyonda %90 seviyesine ulaşmak mümkün olmayabilir. Eğilme kapasiteleri, tüm optimizasyon

yöntemlerinde kiriş açıklığı arttıkça artış göstermektedir. Öte yandan, çatlak kapasitesi ise tüm yöntemlerde açıklık artışıyla azalma eğilimi göstermektedir.



Şekil 4.4. Optimizasyon yöntemlerin kesme kapasite oranları



Şekil 4.5. Optimizasyon yöntemlerinin çatlak kapasite kontrolü

Kirişin optimum tasarımında, optimizasyon yöntemlerin farklı kapasite kriterlerine nasıl cevap verdiğini ve iyileştirilmiş yöntemlerin performansını nasıl artırdığını açıklamaktadır. Kesme kapasitesi açısından, yöntemlerin performansı açıklığa bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Ağaç Tohum yöntemi hemen hemen her açıklıkta iyi bir performans sergilemektedir. İyileştirilmiş Vahşi At Optimizasyonunda

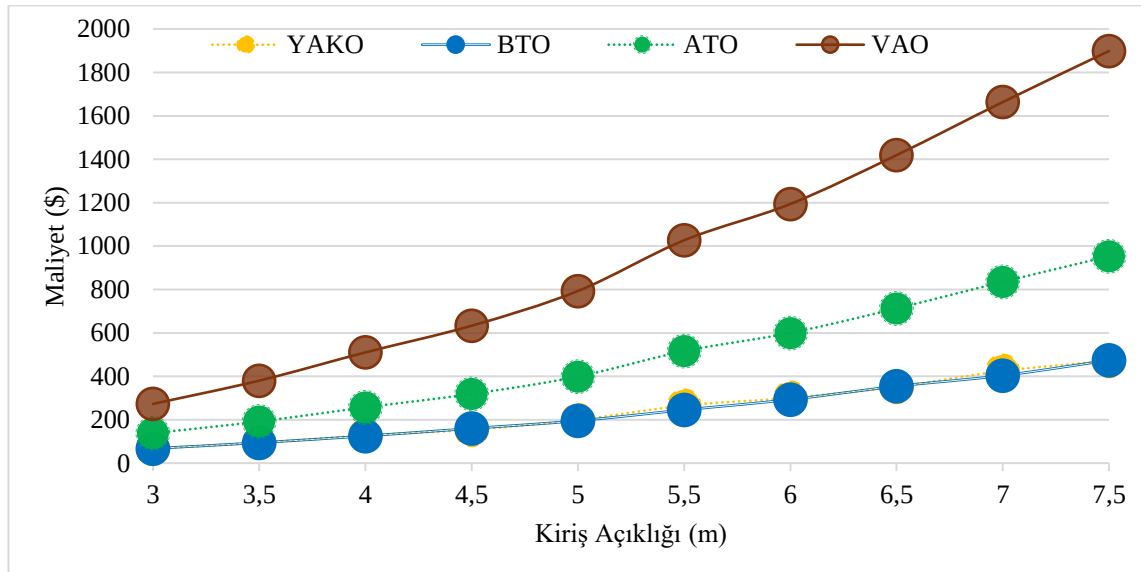
ise performans değişkenlik göstermektedir. Bu durum, eklenen en kötü üye ve aç gözlü seçim özelliği sayesinde iyi çözümlerin silinip tekrar atanmasından kaynaklanmaktadır.

4.1.2. Farklı test sonuçlarına bağlı gerçekleştirilen lifli betonarme kirişin optimum analizi ve tasarımı

Firmadan ve makale çalışmalarından referans alınan farklı CMOD testleri sonuçları kullanılarak bir önceki bölümde yer alan tek açıklıklı kiriş örneği için optimum tasarım gerçekleştirilmiştir. Tek açıklıklı kiriş örneği için $q=100$ kN/m yaylı yük tanımlanmıştır. Bir önceki bölümde yer alan kiriş genişliği ve yüksekliği, donatı çapı ve sayısı ve lif türü aynı tasarım değişkenleri kullanılmaktadır (Çizelge 4.4). Kiriş açıklığı 3m ile 7m arasında 0.5m aralıklarla değişen ve beton sınıfı C30 ile C50 arasında, 3 farklı lif türü olan tasarım değişkenleri kullanılmıştır. Maliyetler dolar cinsinden hesaplanmış olup, betonun birim maliyeti C30 için 76.045\$, C40 için 82.96\$, C50 için 89.87\$ olarak belirlenmiştir. Donatının birim maliyeti ise 1\$, lifin birim maliyeti Lif Türü-1 için 2.25\$, Lif Türü-2 için 3.5\$, ve Lif Türü-3 için 4.75\$ olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.4. Tasarım değişkenleri

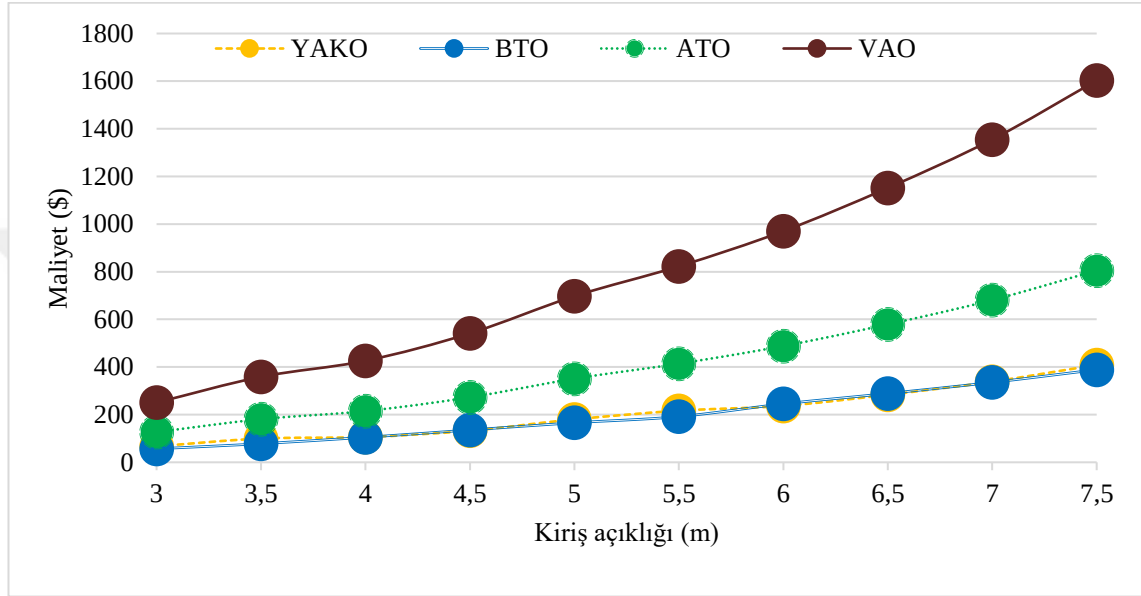
Tasarım Değişkenleri	Değişken Aralıkları
b(mm)	150/250/300/350/400/450/500/550/600
h(mm)	225/300/350/400/450/500/550/600/650/700/750/800/850/900/950/1000
Donatı Çapı (mm)	6/10/12/14/16/18/20/22/24/26/28/30/32
Donatı Sayısı (adet)	1/2/3/4/5/6/7/8/9/10
Lif Türü	Lif Türü-1, Lif Türü-2, Lif Türü-3
Lif Dozajı(kg/m³)	20/25/30/35/40
Beton Sınıfı	C30/C40/C50



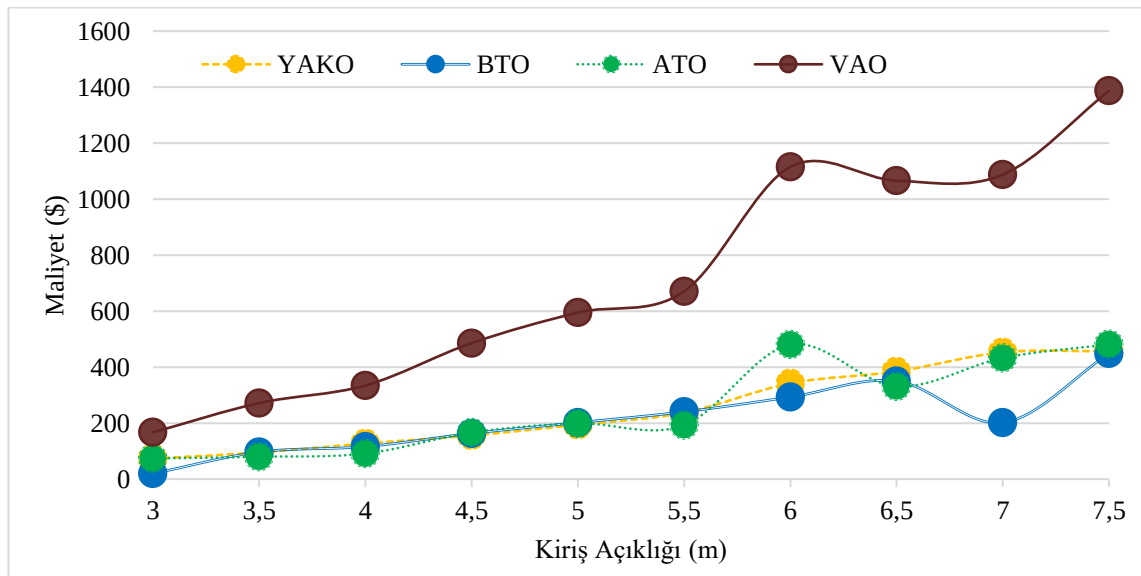
Şekil 4.6. Maliyet değerleri (USD) 1. Çözüm

Analizi gerçekleştirmek için firmadan alınan ve referans makalelerden alınan CMOD test verileri kullanılmaktadır (Chen, Gao, Zhu, Yuan, vd., 2021; Venkateshwaran vd., 2018b). Farklı lif kullanımı ile maliyete etkisi gözlemlenmiş ve bu etkilerin değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.6'da, firmadan alınan verilerin kırıç açıklığına bağlı olarak maliyetin arttığı ve test verilerinin çeşitliliği sebebiyle bu artışın doğrusal bir ilişki gösterdiği gözlemlenmektedir. YAKO ve BTO yöntemleri yöntemler arasında en iyi performansı sergilerken, en kötü performans VAO yönteminde gözlemlenmiştir.



Şekil 4.7. Maliyet değerleri (USD) 2. çözüm



Şekil 4.8. Maliyet değerleri (USD) 3. çözüm

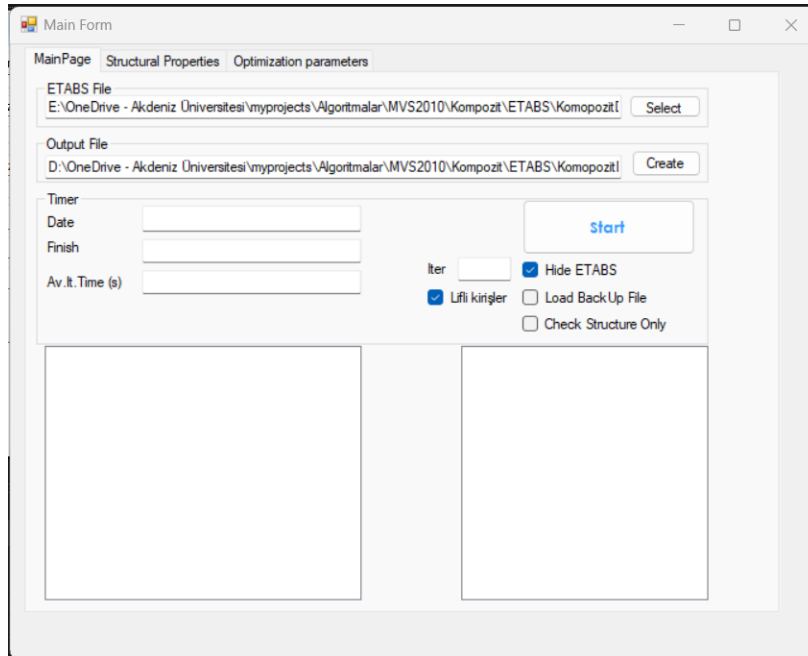
Şekil 4.7'de Makalelerden referans alınan CMOD test sonuçları kullanılarak elde edilen ikinci çözümde, açıklık artışına bağlı olarak maliyetlerde artış gözlemlenirken,

fiyatın birinci çözüme göre azalması CMOD testlerinin maliyet üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. YAKO ve BTO yöntemleri bu çözümde de benzer şekilde en ekonomik sonuçları sağlarken, en düşük performans VAO yönteminde gözlemlenmiştir.

Şekil 4.8’de Makalelerden referans alınan CMOD test sonuçları kullanılarak elde edilen üçüncü çözümde, açıklık artışına bağlı olarak maliyetlerde artış gözlemlenirken, 5,5m’den sonrasında fiyatlarda optimizasyon yöntemlerine göre maliyetlerin değişkenlik gösterdiği görülmektedir. CMOD test verilerinin çeşitliliği maliyeti minimizasyon üzerine etkisini göstermektedir. Ayrıca yöntemlerin açıklıklara bağlı olarak en iyi çözümü farklı yöntemlerin göstermesi stokastik tabanlı optimizasyon yöntemlerinin etkisini göz önüne sermektedir. YAKO ve BTO yöntemleri bu çözümde de benzer şekilde en ekonomik sonuçları sağlarken, en düşük performans VAO yönteminde gözlemlenmiştir.

4.2. Lifli ve Lifsiz Betonarme Çerçevenin Optimum Analizi ve Tasarımı

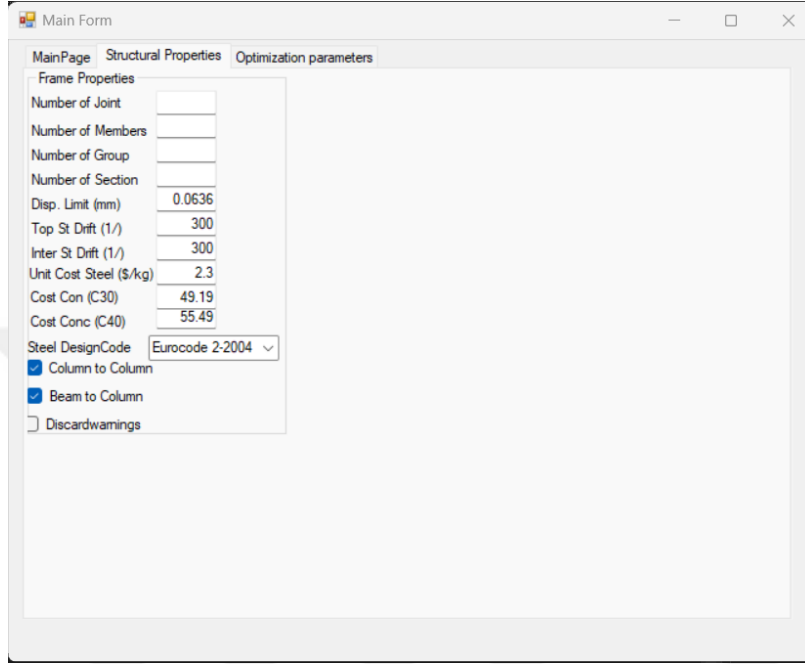
Lifli ve lifsiz betonarme çerçeve tasarımı için üç örnek kullanılmaktadır. Çerçeve tasarım örneklerinde birim maliyetler, ülkemizin Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Yüksek Fen Kurulu Başkanlığı tarafından 2022, 2023 ve 2024 yıllarında yayınlanan İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları Kitabı’nda birim fiyat poz birim maliyetlerinin ortalaması kullanılarak hesaplanmıştır. Birim maliyetlerin TL para biriminde değişkenlik göstermesi nedeniyle, maliyet hesaplamalarında dolar para birimi kullanılmaktadır. Her bir çerçeve örneği için birim maliyetler aynı olarak alınmıştır. Maliyetler dolar cinsinden alınmaktadır. Betonun birim maliyeti C30 için 49,19\$, C40 için 55,49\$, donatının birim maliyeti 2,3\$, lifin birim maliyeti Lif Türü-2 için 3,5\$ ve Lif Türü-3 için 4,75\$ olarak belirlenmiştir.



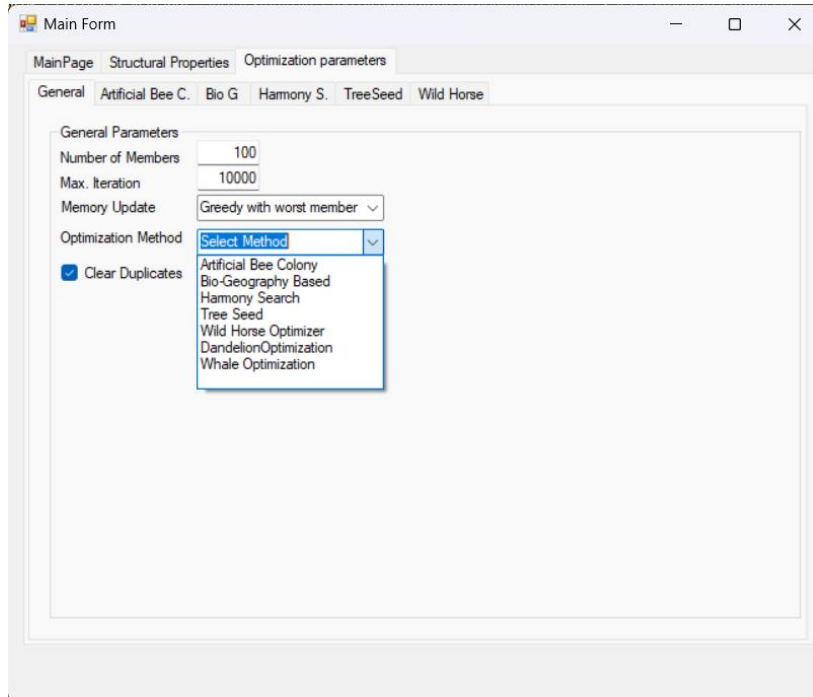
Şekil 4.9. Çerçeve tasarımı yazılan programın ana sayfası

Şekil 4.9 ‘da gösterilen çerçeve analizi için yazılan programın ana model 3 bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm ana sayfada çerçeve tasarım örneğin Etaps dosyasını

seçmemizi, analiz tamamlandığında çıktı olarak dosya oluşturmamızı gösteren 2 sekme bulunmaktadır. Çerçeve tasarımın lifli kirişler seçili durumda olduğunda kirişleri lifli olarak tasarlamayı seçili değilse lifsiz olarak tasarlamayı yedekleme dosyasını yükle seçeneği çalışan dosyayı yarım kaldığı yerden devam ettirmeyi ve yalnızca yapıyı kontrol et seçeneğine tıklandığında ise analizi yapılmış örneğin değerlerini kontrol etmeyi sağlamaktadır.



Şekil 4.10. Çerçeve tasarımı yazılan programın yapı özellikleri



Şekil 4.11. Çerçeve tasarımı yazılan programın optimizasyon parametreleri

Program çalıştırıldıktan sonra iterasyon sayısı aşama olarak yazılmakta ve alt sekmede bulunan 2 boşlukta ise sol tarafta her analizde en iyi çözümün gruplandırmaya göre kesit ve beton sınıfı bilgilerini, sol tarafta ise amaç fonksiyonuna göre en iyi çözümün yazdırıldığı bölüm olmaktadır. Ayrıca analizin başladığı, bittiği tarih saat ve ne kadar süre analizin gerçekleştiğine dair bilgiler program tarafından kaydedilmektedir.

Şekil 4.10'da Yapı özellikleri bölümünde ise Çerçeve yapılar için birim maliyetlerin değerlerinin girildiği ve kesit özellikleri, üst kat ve katlar arası ötelenme sınırlayıcı ve geometrik sınırlayıcı özelliklerinin girildiği bölümden oluşmaktadır.

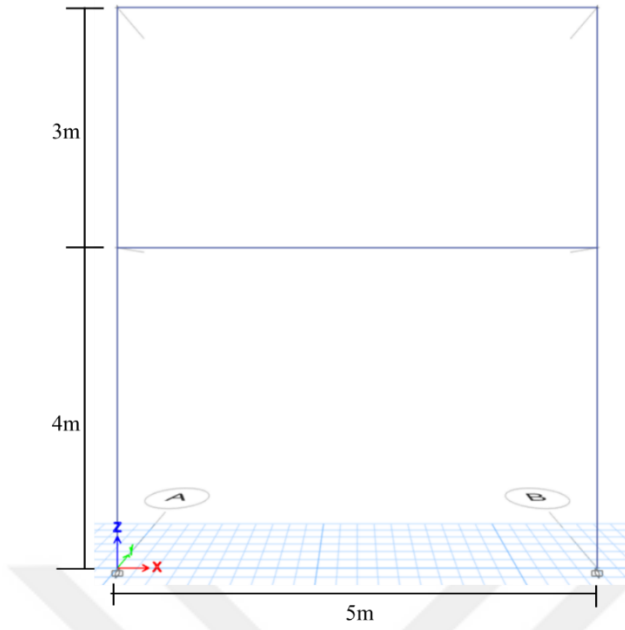
Şekil 4. 11'de ise üçüncü bölümde ise optimizasyon parametreleri sayfasında popülasyon sayısı, döngü sayısı, hafıza güncellemesi için özellik seçilmesi ve hangi optimizasyon yönteminin seçileceği bu bölümde ifade edilir.

Şekil 4.12. Çerçeve tasarımı yazılan programın optimizasyon yöntemleri

Şekil 4.12'de ise optimizasyon parametrelerinde seçilen optimizasyon yöntemine göre yönlendirilen sayfayı temsil etmektedir. Tercih edilen optimizasyonuna göre ilgili sekmedeki optimizasyon parametreleri içeren bilgiler bulunmaktadır. Programda tercih edilen optimizasyon yöntemine göre farklı parametreler 4. Bölümünde referans alınan parametre değerleri kullanılmaktadır.

4.2.1. İki boyutlu altı elemanlı çerçevenin lifli ve lifsiz çerçevenin optimum tasarımı

İlk örnek, iki boyutlu altı elemanlı çerçevenin lifli çerçeve modeli olarak tasarlanmıştır. Örneğin ölü yükü $Q = 30 \text{ kN/m}$ ve hareketli yükü $L = 20 \text{ kN/m}$ 'dir. Deprem yer hareketi düzeyi (DD-2) için kısa periyot tasarım spektral ivme katsayıları (DD – 2) Deprem yer hareketi düzeyinde, kısa periyot tasarım spektral ivme katsayıları $S_{DS} = 1.2$, $S_{D1} = 0.3$ olarak belirlenmiştir. Ayrıca, bina önem katsayısı $I = 1$, dayanım fazlalığı katsayısı $D = 3$ ve bina davranış katsayısı $R = 8$ olarak alınmıştır.



Şekil 4.13. İki boyutlu altı elemanlı çerçeve sistem

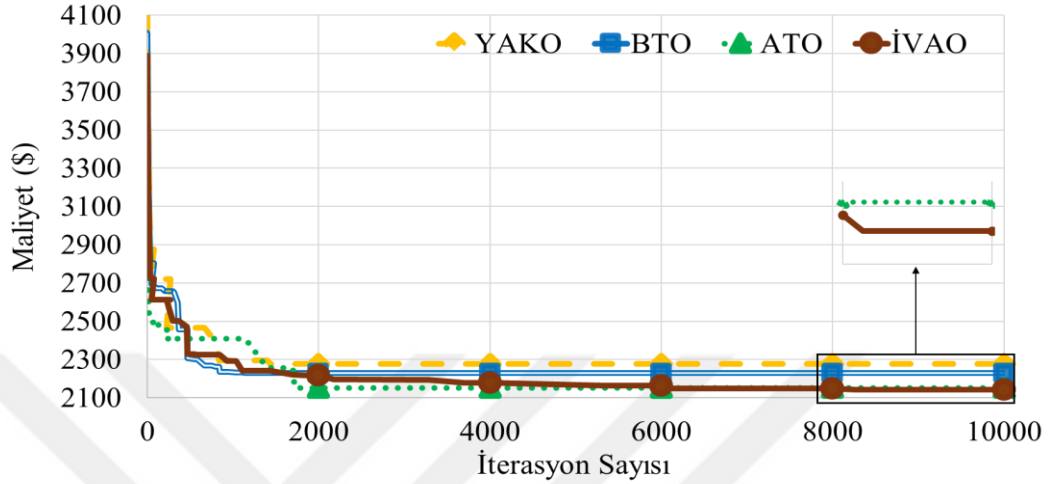
Bölüm 4.1.1'de yer alan kiriş genişliği ve yüksekliği, donatı çapı ve donatı sayısı, lif türü, lif dozajı ve beton sınıfı aynı tasarım değişkenleri kullanılmaktadır. Tasarım değişkenleri ve ölü yük, hareketli yük ve deprem yüküne bağlı olarak oluşturulan altı farklı yük kombinasyonu Çizelge 4.5'te gösterilmektedir. Tasarımda kullanılan değişkenler ve yük kombinasyonları, lifli çerçeve modelinin performansını ve dayanıklılığını değerlendirmek için kritik öneme sahiptir.

Çizelge 4.5. İki boyutlu altı elemanlı lifli betonarme çerçeve tasarım değişkenleri ve yük kombinasyonları

Tasarım Değişkenleri	Değişken Aralıkları
b(mm)	250/300/350/400/450/500/550/600
h(mm)	225/300/350/400/450,500/550/600/650/700/750/800/850/900/950/1000
Donatı Çapı (mm)	6/10/12/14/16/18/20/22/24/26/28/30/32
Donatı Sayısı (adet)	1/2/3/4/5/6/7/8/9/10
Lif Türü	Lif Türü-2, Lif Türü-3
Lif Dozajı(kg/m³)	20/25/30/35/40
Beton Sınıfı	C30/C40
Yük Kombinasyonları	1.4G + 1.6Q 0.9D ± E, D + Q ± E

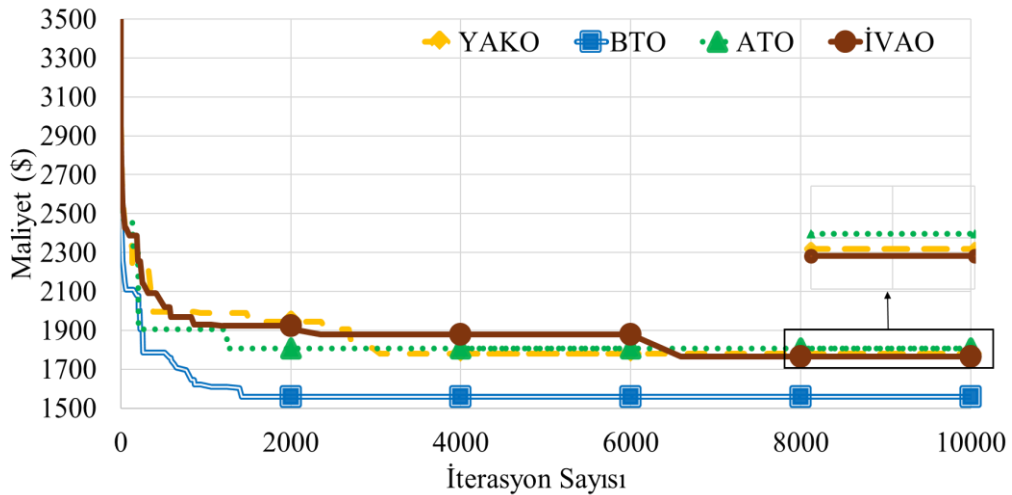
İki boyutlu, altı elemanlı lifli çerçeve tasarım modeli, YAKO, BTO, ATO ve İVAO olmak üzere dört farklı optimizasyon yöntemine bağlı olarak değerlendirilmiştir. İki boyutlu, altı elemanlı lifsiz çerçeve tasarımına ait arama geçmişi sonuçları Şekil 4.14'de gösterilmektedir. Bu tasarım örneğinde, kullanılan her optimizasyon yönteminin

birbirine yakın iyi bir performans sergilediği gözlemlenmiştir. Özellikle BTO ve İVAO yöntemleri, diğerlerine kıyasla daha iyi bir performans sergilemiştir. BTO ve İVAO optimizasyon yöntemlerinin yakınsamaları neredeyse 1000. iterasyonda tamamlanmasına rağmen, son iterasyonlara kadar devam etmişlerdir ve en iyi çözüm İVAO yöntemi ile elde edilmiştir.



Şekil 4.14. İki boyutlu altı elemanlı lifsiz betonarme çerçeve modelinin arama geçmişi

İki boyutlu, altı elemanlı lifli çerçeve modeline ait arama geçmişi sonuçları Şekil 4.15'te sunulmuştur. Bu sonuçlar, YAKO ve İVAO yöntemlerinin performanslarının neredeyse birbirine yakın olduğunu ve İVAO'nun 7000. iterasyonda bile küçük iyileştirmelere devam ettiğini göstermektedir. En iyi performansı gösteren ve yakınsamayı en hızlı tamamlayan yöntem BTO olurken, en düşük performansı sergileyen yöntem ise ATO olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.15. İki boyutlu altı elemanlı betonarme lifli çerçeve modelinin arama geçmişi

Çizelge 4.6'te, iki boyutlu altı elemanlı betonarme lifsiz çerçeve modelinden elde edilen en iyi kolon ve kiriş kesitleri ile maliyet analizi sonuçları sunulmaktadır. Çeşitli

optimizasyon yöntemlerinde kolon ve kiriş kesitlerinin birbirine oldukça yakın seçildiği gözlemlenmiştir. Tüm yöntemlerde aynı beton sınıfı (C30) kullanılmıştır. Optimizasyon yöntemlerinin sonuçlarına göre, en üst kat ötelemelerinin YAKO, BTO ve İVAO yöntemlerinde limit değerin oldukça uzağında kaldığı, ancak ATO yönteminde bu değere yakın olduğu belirlenmiştir. Maksimum kiriş/kolon kapasite oranında, ATO'nun diğer yöntemlere kıyasla %85 kapasitede kaldığı, YAKO ve BTO'nun %95 ve üzerinde kapasiteye ulaştığı, İVAO'nun ise %92 kapasitede olduğu tespit edilmiştir. Maksimum kesme kapasitesi açısından ise ATO %60 kapasitede kalırken, diğer optimizasyon yöntemlerinin %45 ile %35 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Geometrik sınırlayıcı oranlarına bakıldığında, kiriş/kolon için oran 0,83, kolon/kolon için ise oran 1 olarak ifade edilmektedir. Bu sonuçlar, optimizasyon yöntemlerinin performans ve verimlilik açısından farklılıklarını ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.6. İki boyutlu altı elemanlı liffsiz betonarme çerçeve modelin maliyet analizi

Optimizasyon Yöntemleri	YAKO	BTO	ATO	İVAO
1. Kat Kirişler	70X25	5X25	60X25	70X25
2.Kat Kirişler	70X25	70X25	60X25	70X25
1. Kat Kolonlar	55X30	45X30	30X30	50X30
Zemin kat Kolonlar	55X30	45X30	30X30	50X30
Beton Sınıfı	C30	C30	C30	C30
MKÖ (mm)	3.25	4.55	12.83	3.89
MEÜKÖ (mm)	5.55	7.12	18.64	6.39
Maksimum kiriş/kolon kapasite oranı	0.946	0.968	0.858	0.923
Maksimum Kesme oranı	0.362	0.436	0.622	0.39
Maksimum kiriş /kolon GSO	0.83	0.83	0.83	0.83
Maksimum kolon/ kolon GSO	1	1	1	1

*MKA: Maksimum Katlararası Öteleme; MEÜKÖ: Maksimum En Üst Kat Ötelemesi; GSO: Geometrik Sınırlayıcı Oranı

Çizelge 4.7. İki boyutlu altı elemanlı lifli betonarme çerçeve modelinin maliyet analizi

Grup ismi	YAKO	BTO	ATO	İVAO
1. Kat Kirişler	35X25	35X25	30X25	35X25
2.Kat Kirişler	35X25	35X25	30X25	35X25
1. Kat Kolonlar	50X30	50X30	50X30	50X30
Zemin kat Kolonlar	50X30	50X30	55X30	50X30
Beton Sınıfı	C30	C30	C30	C30
MKÖ (mm)	9.33	9.33	9.99	9.33
MEÜKÖ (mm)	17.16	17.16	17.37	17.16
Maksimum eğilme kapasite oranı	0.94	0.94	0.83	0.94
Maksimum kesme kapasite oranı	1	1	1	1
Maksimum çatlak kapasite oranı	0.20	0.20	0.37	0.20
Maksimum kiriş /kolon GSO	0.83	0.83	0.83	0.83
Maksimum kolon/ kolon GSO	1	1	1	1

*MKA: Maksimum Katlararası Öteleme; MEÜKÖ: Maksimum En Üst Kat Ötelemesi; GSO: Geometrik Sınırlayıcı Oranı

Çizelge 4.7'te, iki boyutlu altı elemanlı betonarme lifli çerçeve modelinin maliyet analizi sonuçları sunulmaktadır. Bu sonuçlarda, maksimum eğilme kapasitesinin BTO yöntemi dışında %94'ün üzerinde olduğu gözlemlenmiştir. Kesme kapasitelerinde ise tüm yöntemlerde bu oranın 1 olduğu görülmektedir; bu da kesme kapasitesinin zorlandığını göstermektedir. Çatlak kapasite oranlarının oldukça düşük olduğu ve en fazla %36 civarında olduğu tespit edilmiştir. Geometrik sınırlayıcılar açısından pek bir değişiklik olmadığından, benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu örneğin donatı detaylandırmaları Ek'te gösterilmektedir. Bu sonuçlar, farklı optimizasyon yöntemlerinin performansını ve verimliliğini kıyaslamak için önemli veriler sunmaktadır. Özellikle kesme ve çatlak kapasite oranları, yapı güvenliği ve dayanıklılığı açısından dikkate alınması gereken kritik parametrelerdir.

Çizelge 4.8'da, iki boyutlu altı elemanlı liffsiz betonarme çerçeve modelinin metrajı sunulmaktadır. Betonarme liffsiz çerçeve için toplam maliyetin en düşük olduğu yöntem ATO olarak belirlenmiş olup, bu yöntem en yakın maliyet İVAO yönteminde gözlemlenmiştir. Toplam maliyetin en az %90'ını donatı maliyetinin oluşturduğu tespit edilmiştir. Bulgularda, maliyet etkinliği açısından ATO ve İVAO yöntemlerinin öne çıktığını göstermektedir.

Çizelge 4.8. İki boyutlu altı elemanlı liffsiz çerçeve modelin toplam maliyeti

Örnek1: Liffsiz	YAKO	BTO	ATO	İVAO
Donatı Miktarı (kg)	843.23	881.21	864.23	841.50
Beton Miktarı (m ³)	4.41	4.14	3.06	4.20
Donatı Maliyeti (\$)	2059.52	2026.77	1987.74	1935.44
Beton Maliyeti (\$)	216.928	203.64	150.52	206.58
Toplam maliyet (\$)	2276.448	2230.41	2138.26	2142.02

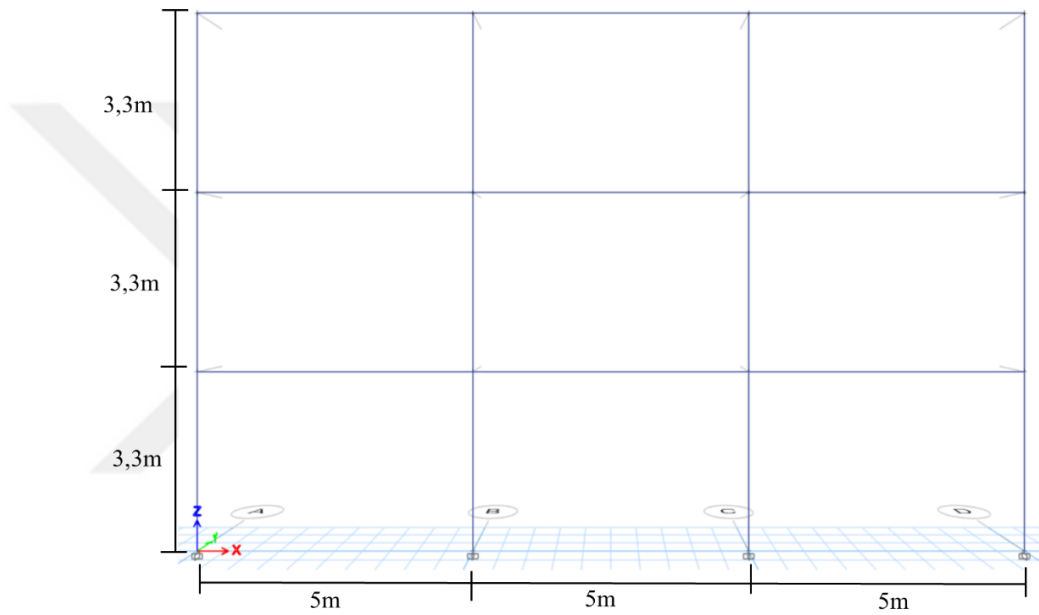
Çizelge 4.9. İki boyutlu altı elemanlı lifli çerçeve modelin toplam maliyeti

	YAKO	BTO	ATO	İVAO
Donatı Miktarı (kg)	657.92	562.99	681.86	652.01
Beton Miktarı (m ³)	3.15	3.15	3.27	3.15
Lif Dozajı(kg/m ³)	30	30	20	30
Lif Maliyeti (\$)	110.25	110.25	73.5	110.25
Donatı Maliyeti (\$)	1513.21	1294.50	1568.28	1499.61
Beton Maliyeti (\$)	154.95	154.95	165.28	154.95
Toplam maliyet (\$)	1778.41	1559.70	1807.06	1764.81

Çizelge 4.9'de, iki boyutlu altı elemanlı lifli betonarme çerçeve modelinin metrajı sunulmaktadır. Lifli tasarımda lif maliyetinin, toplam maliyetin en fazla %7'si oranında BTO yönteminde gözlemlendiği belirlenmiştir. Toplam maliyetin en büyük kısmını yine donatı maliyeti oluşturmaktadır. Yöntemler arasında minimum donatı maliyeti %83 ile BTO yönteminde elde edilmiştir. Genel olarak, toplam maliyetin en az olduğu yöntem BTO yöntemi olarak tespit edilmiştir. İki boyutlu altı elemanlı betonarme çerçeve modelinde, lifli tasarımın donatı maliyetini azaltarak, liffsiz tasarıma göre daha ekonomik bir çözüm sunduğu görülmektedir.

4.2.2. İki boyutlu 21 elemanlı çerçevenin lifli ve lifsiz betonarme çerçevenin optimum tasarımı

Şekil 4.16'da, iki boyutlu 21 elemanlı çerçeve modeli örneği, referans alınan makaleden maliyet açısından optimize edilmiştir (Duysak, Nigdeli ve Gebrail, 2023). Sistemde tüm açıklıklar 5 metre genişliğinde olup, tüm katların yüksekliği 3.3 metredir. Tasarımda beton sınıfı olarak C30, çelik sınıfı olarak ise S420 seçilmiştir. Tüm açıklıklarda ölü yük olarak $Q = 30 \text{ kN/m}$ ve hareketli yük olarak $L = 20 \text{ kN/m}$ değerleri kullanılmaktadır. Referans alınan örnekte yük kombinasyonları uygulanmadığı için bu çalışmada yük kombinasyonları kullanılmamıştır. Bu tasarım özellikleri, çerçeve modelinin performansını ve maliyet etkinliğini değerlendirmek açısından önemli veriler sunmaktadır.



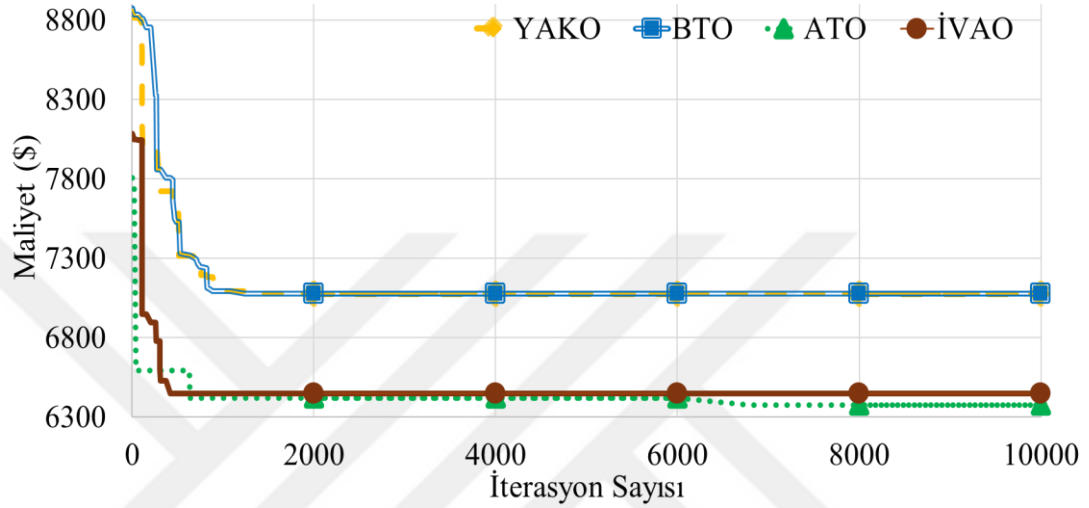
Şekil 4.16. İki boyutlu 21 elemanlı çerçeve sistem

Kiriş ve kolon genişlikleri 250-450 mm arasında, 50 mm aralıklarla, kiriş ve kolon yüksekliği ise 300-600 mm arasında, yine 50 mm aralıklarla kısıtlanmaktadır. Donatı çapı ve sayısı, lif türü ve lif dozajı, bir önceki örnekle aynı değer aralığına sahip olan tasarım değişkenleri Çizelge 4.10'da sunulmaktadır.

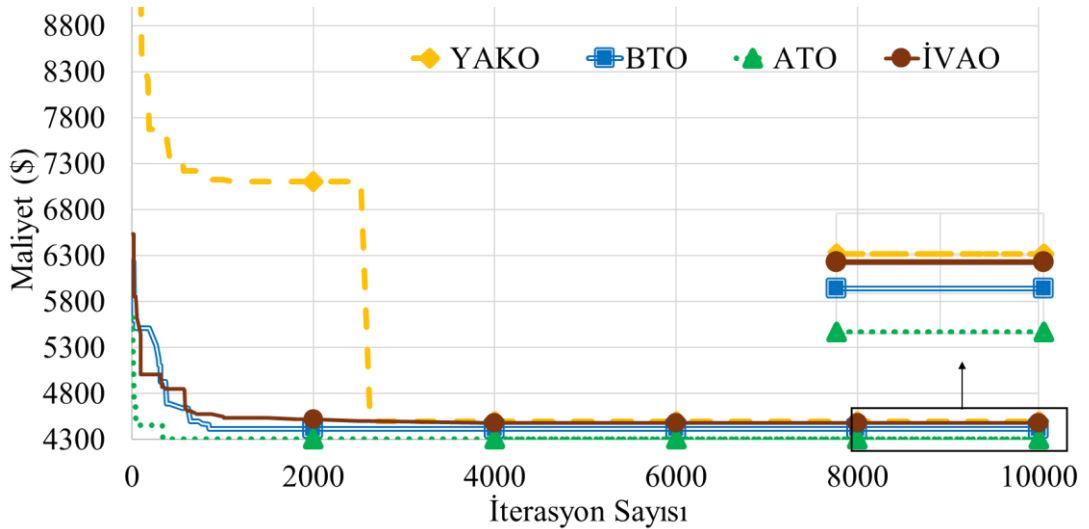
Çizelge 4.10. İki boyutlu 21 elemanlı lifli betonarme çerçeve tasarım değişkenleri

Tasarım Değişkenleri	Değişken Aralıkları
b(mm)	250/300/350/400/450/
h(mm)	300/350/400/450,500/550/600
Donatı Çapı (mm)	6/10/12/14/16/18/20/22/24/26/28/30/32
Donatı Sayısı (adet)	1/2/3/4/5/6/7/8/9/10
Lif Türü	Lif Türü-2, Lif Türü-3
Lif Dozajı(kg/m³)	20/25/30/35/40
Beton Sınıfı	C30

İki boyutlu 21 elemanlı lifsiz betonarme çerçeve tasarımının arama geçmişi sonuçları Şekil 4.17’te sunulmaktadır. Şekil 4.17’e göre, bu çerçeve örneğinde ATO ve VAOİ yöntemlerinin birbirine yakın iyi bir performans sergilediği gözlemlenmektedir. En iyi performans ATO yönteminde elde edilmiştir. BTO ve İVAO optimizasyon yöntemlerinin yakınsamaları, YAKO ve BTO’ya göre daha hızlı bir şekilde gerçekleşmiş olup, 1000. iterasyonda tamamlandıkları gözlemlenmiştir. Ancak, bu yöntemlerin son iterasyonlara kadar devam ettikleri ve en iyi çözümün ATO yöntemi tarafından gerçekleştirildiği belirlenmiştir.



Şekil 4.17. İki boyutlu 21 elemanlı lifsiz betonarme çerçeve modelinin arama geçmişi



Şekil 4.18. İki boyutlu 21 elemanlı lifli betonarme çerçeve modelinin arama geçmişi

İki boyutlu 21 elemanlı lifli betonarme çerçeve modeline ait arama geçmişi sonuçları Şekil 4.18’te sunulmaktadır. Optimizasyon yöntemlerinin yaklaşık olarak 3000. iterasyondan itibaren birbirine yakın bir performans sergilediği gözlemlenmiştir. En iyi

performans ve en iyi yakınsama, ATO optimizasyon yöntemi tarafından elde edilmiştir. En düşük yakınsama ise YAKO yönteminde gözlemlenmektedir.

Çizelge 4.11'de, iki boyutlu 21 elemanlı liffsiz betonarme çerçeve modelinden elde edilen en iyi kolon ve kiriş kesitleri ile maliyet analizi sonuçları sunulmaktadır. Kolon kesitlerinin aynı olduğu durumlarda, kiriş kesitlerinin optimizasyon yöntemleri arasında birbirine yakın seçildiği gözlemlenmektedir. Tüm optimizasyon yöntemlerinde aynı beton sınıfı (C30) kullanılmıştır. En üst kat ötelemelerinin optimizasyon yöntemlerinde limit değerin uzağında kaldığı belirlenmiştir. Maksimum kiriş/kolon kapasite oranı ve maksimum kesme oranı, referans alınan modelde sadece ölü yük etkisinde kaldığı için Etaps programında hesaplanamamıştır. Geometrik sınırlayıcı oranlarına bakıldığında, kiriş/kolon ve kolon/kolon için bu oranların 1 olarak ifade edildiği görülmektedir. Bu bulgular, yapı tasarımında kullanılan optimizasyon yöntemlerinin performansını ve kısıtlamalarını anlamak açısından önem taşımaktadır.

Çizelge 4.11. İki boyutlu 21 elemanlı liffsiz betonarme çerçeve modelin maliyet analizi

Grup ismi	YAKO	BTO	ATO	VAO
1. Kat Kirişler	60X25	55X25	45X25	55X25
2.Kat Kirişler	55X25	60X25	55X25	60X25
3. Kat Kirişler	55X25	55X25	55X25	55X25
1. Kat Kolonlar	30X25	30X25	30X25	30X25
2. Kat Kolonlar	30X25	30X25	30X25	30X25
Zemin kat Kolonlar	30X25	30X25	30X25	30X25
Beton Sınıfı	C30	C30	C30	C30
MKÖ (mm)	0.105	0.097	0.091	0.097
MEÜKÖ (mm)	0.086	0.083	0.084	0.083
Maksimum kiriş/kolon kapasite oranı	N/A	N/A	N/A	N/A
Maksimum Kesme oranı	N/A	N/A	N/A	N/A
Maksimum kiriş /kolon GSO	1	1	1	1
Maksimum kolon/ kolon GSO	1	1	1	1

*MKA: Maksimum Katlararası Öteleme; MEÜKÖ: Maksimum En Üst Kat Ötelemesi; GSO: Geometrik Sınırlayıcı Oranı

Çizelge 4.12'de, iki boyutlu 21 elemanlı lifli betonarme çerçeve modelinin maliyet analizi sonuçları sunulmaktadır. Bu sonuçlara göre, maksimum eğilme kapasitesinin %70'in üzerinde olduğu gözlemlenmektedir. Kesme kapasiteleri incelendiğinde, ATO hariç diğer yöntemlerde bu oranın %64'ün üzerinde olduğu görülmektedir. Bu durum, eğilme ve kesme kapasitesinin birbirine yakın oranlarda zorlandığını göstermektedir. Çatlak kapasite oranları ise oldukça düşük olup, en fazla %32 civarında tespit edilmiştir. Geometrik sınırlayıcılarda önemli bir değişiklik olmadığı için benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu örneğin donatı detaylandırmaları Ek'te gösterilmektedir.

İki boyutlu 21 elemanlı liffsiz betonarme çerçeve modelinin metrajı Çizelge 4.13'te sunulmaktadır. Liffsiz betonarme çerçevenin toplam maliyetinin en az olduğu yöntemler ATO ve bu yöntem en yakın maliyet İVAO yönteminde gözlemlenmiştir. ATO optimizasyon yönteminde kirişlerde beton sınıfının C40 olduğu tespit edilmiştir. YAKO ve BTO yöntemlerinde ise benzer sonuçlar elde edilmiştir. Optimizasyon yöntemlerinde toplam maliyetin en az %93'ünü donatı maliyetinin oluşturduğu belirlenmiştir. Bu

bulgular, maliyet etkinliği açısından ATO ve İVAO yöntemlerinin avantajlarını vurgulamaktadır.

Çizelge 4.12. İki boyutlu 21 elemanlı lifli betonarme çerçeve modelin maliyet analizi

Grup ismi	YAKO	BTO	ATO	VAO
1. Kat Kirişler	45X25	30X25	30X25	40X25
2.Kat Kirişler	55X25	35X25	30X25	50X25
3. Kat Kirişler	50X25	50X25	30X25	55X25
1. Kat Kolonlar	30X25	30X25	30X25	30X25
2. Kat Kolonlar	30X25	30X25	30X25	30X25
Zemin kat Kolonlar	35X25	50X25	30X25	40X25
Beton Sınıfı	C30	C30	C30/C40	C30
MKÖ (mm)	0.112	0.153	0.207	0.097
MEÜKÖ (mm)	0.092	0.105	0.156	0.080
Maksimum eğilme kapasite oranı	0.669	0.775	0.749	0.728
Maksimum kesme kapasite oranı	0.641	0.641	0.572	0.647
Maksimum çatlak kapasite oranı	0.320	0.328	0.262	0.328
Maksimum kiriş /kolon GSO	1	1	1	1
Maksimum kolon/ kolon GSO	1	1	1	1

*MKA: Maksimum Katlararası Öteleme; MEÜKÖ: Maksimum En Üst Kat Ötelemesi; GSO: Geometrik Sınırlayıcı Oranı

Çizelge 4.13. İki boyutlu 21 elemanlı lifsiz betonarme çerçeve modelin toplam maliyeti

	YAKO	BTO	ATO	İVAO
Donatı Miktarı (kg)	2876.39	2876.39	2583.93	2603.03
Beton Miktarı (m ³)	9.34	9.34	8.78	9.34
Donatı Maliyeti (\$)	6615.70	6615.70	5943.04	5986.97
Beton Maliyeti (\$)	459.43	459.43	431.74	459.43
Toplam maliyet (\$)	7075.13	7075.13	6374.78	6446.40

Çizelge 4.14. İki boyutlu 21 elemanlı lifli betonarme çerçeve modelin toplam maliyeti

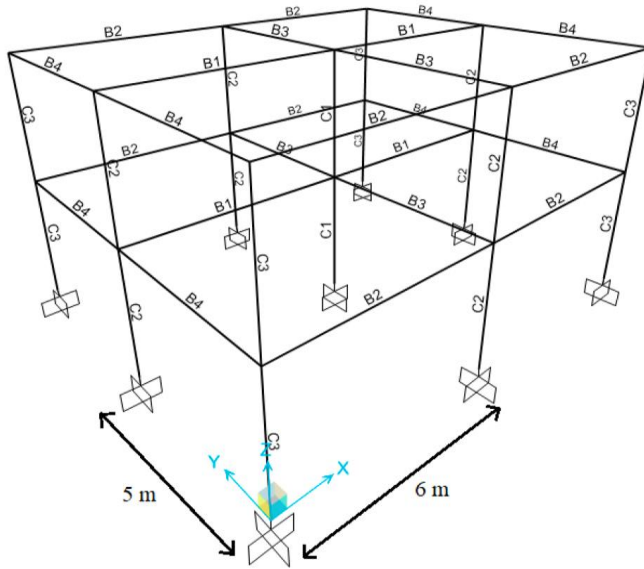
	YAKO	BTO	ATO	İVAO
Donatı Miktarı (kg)	1469.19	1552.71	1547.49	1470.97
Beton Miktarı (m ³)	8.75	7.93	6.33	8.73
Lif Dozajı(kg/m ³)	35.00	30.00	35.00	35.00
Lif Maliyeti (\$)	688.45	451.50	411.60	665.18
Donatı Maliyeti (\$)	3379.15	3571.23	3559.23	3383.23
Beton Maliyeti (\$)	430.41	390.08	332.54	429.43
Toplam maliyet (\$)	4498.01	4412.81	4303.37	4477.83

İki boyutlu 21 elemanlı lifli betonarme çerçeve modelinin metrajı Çizelge 4.14'de sunulmaktadır. Lifli tasarımda lif maliyeti, toplam maliyetin en az %9'u oranında ATO yönteminde, en fazla %15'in üzerinde ise YAKO ve İVAO yöntemlerinde gözlemlenmiştir. Toplam maliyetin en büyük kısmını donatı maliyeti oluşturmaktadır. Minimum donatı maliyeti %75 ile YAKO ve İVAO yöntemlerinde tespit edilmiştir.

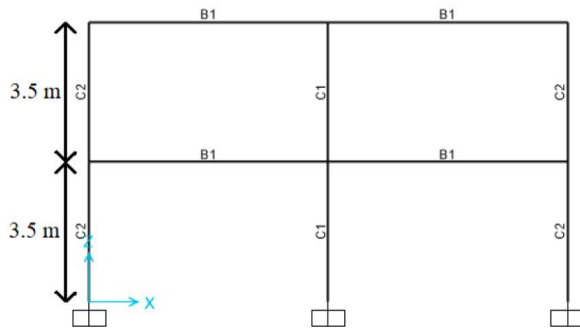
Toplam maliyetin en az olduğu ve donatı oranının en fazla olduğu yöntem ise ATO yöntemiyle elde edilmiştir. Bu durum, iki boyutlu 21 elemanlı betonarme çerçeve modelinin lifli tasarımının donatı maliyetini azaltarak, lifsiz tasarıma göre daha ekonomik bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

4.2.3. Üç boyutlu 42 elemanlı lifli ve lifsiz betonarme çerçevenin optimum tasarımı

Şekil 4.19’da 3 Boyutlu 42 elemanlı çerçeve modeli örneği makaleden referans alınmış maliyet açısından optimize edilmiştir (Tapo vd. 2017). Sistemde x eksenindeki açıklıklar 5 metre y ekseninde ise 6 metredir. Şekil 4.16’de çerçeve modeli kat yükseklikleri 3.3 metre olduğu gösterilmektedir. 3 Boyutlu çerçeve tasarımında beton sınıfı C30 çelik sınıfı için ise S420 seçilmiştir. Referans olarak alınan Üç Boyutlu 42 Elemanlı Çerçeve Modelinin gruplandırması diğer çerçeve modellerinden farklı olarak katlara göre değil kolonlarda orta (C1), orta kenar (C2), ve kenar (C3), kirişlerde ise x ve y eksenlerine orta (B1,B3) ve kenar (B2,B4) olacak şekilde gruplandırılmaktadır (Şekil 4.15, Şekil 4.20).



Şekil 4.19. Üç boyutlu 42 elemanlı çerçeve sistem (Tapo vd. 2017)



Şekil 4.20. Üç boyutlu 42 elemanlı çerçeve sistem düzlem merkezi çerçeve gösterimi (Tapo vd. 2017)

Tasarım değişkenleri kirişin genişliği 200-400 arasında 50mm aralıklarla yüksekliği 250-600 arasında 50mm aralıklarla örneğe göre referans olarak alınmıştır. Donatı çapı ve sayısı, lif türü ve dozajı beton sınıfı diğer çerçeve örneklerinde kullanılan tasarım değişkenleri kullanılmaktadır. Tasarım değişkenleri Çizelge 4.15 'te gösterilmektedir.

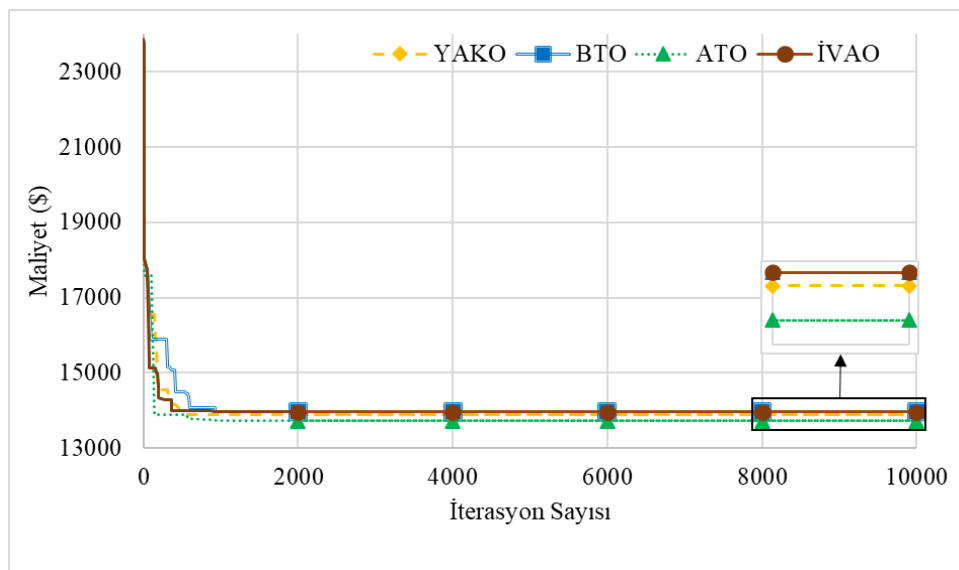
Çizelge 4.15. Üç boyutlu 42 elemanlı lifli betonarme çerçeve tasarım değişkenleri

Tasarım Değişkenleri	Değişken Aralıkları
b(mm)	200 /300/350/400/450/600
h(mm)	300/350/400/450,500/550/600
Donatı Çapı (mm)	6/10/12/14/16/18/20/22/24/26/28/30/32
Donatı Sayısı (adet)	1/2/3/4/5/6/7/8/9/10
Lif Türü	Lif Türü-2, Lif Türü-3
Lif Dozajı(kg/m³)	20/25/30/35/40
Beton Sınıfı	C30/C40

Ölü, Hareketli ve Rüzgâr yüklerin katlara ve yüksekliğe bağlı değerleri ve bu yüklerin kombinasyonları Çizelge 4.16'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.16. Yük değerleri ve kombinasyonları

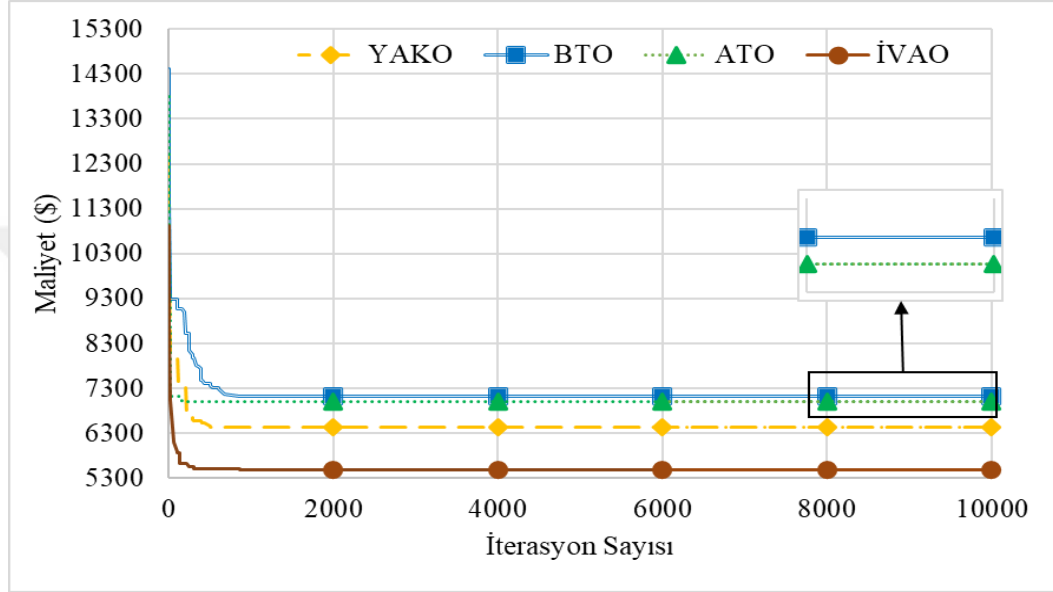
Yük Değerleri		Yük kombinasyonları
Birinci kattaki ölü yük	4.80 kN/m ²	1.2D+1.6L
Çatıdaki ölü yük	5.43 kN/m ²	1.2D+0.8W
Birinci kattaki hareketli yük	4.00 kN/m ²	1.2D+1.4W +0.5L
Çatıdaki hareketli yük	0.80 kN/m ²	0.9D+1.4W
Rüzgâr yükü	0.92 kN/m ²	0-5 m
	1.01 kN/m ²	7 m



Şekil 4.21. Üç boyutlu 42 elemanlı lifsiz betonarme çerçeve modelinin arama geçmişi

Üç Boyutlu 42 elemanlı lifsiz betonarme çerçeve tasarımının arama geçmişi sonuçları Şekil 4.20'ye göre, bu çerçeve örneğinde Optimizasyon yöntemlerinin birbirine yakın iyi bir performans sergilediği ve yöntemlerin çok hızlı yakınsadığı görülmektedir. En iyi performans ve yakınsama ATO yönteminde elde edilmiştir.

Şekil 4.22'de Üç boyutlu 42 elemanlı lifli betonarme çerçeve tasarımının arama geçmişi sonuçlarında en hızlı yakınsama, en iyi performans İVAO yönteminde ve YAKO yöntemi BTO VE ATO yöntemine göre daha hızlı yakınsamaktadır. En düşük performans ve en düşük yakınsama BTO görülmektedir.



Şekil 4.22. Üç boyutlu 42 elemanlı lifli betonarme çerçeve modelinin arama geçmişi

Çizelge 4.17'te, iki boyutlu 21 elemanlı lifsiz betonarme çerçeve modelinden elde edilen en iyi kolon ve kiriş kesitleri ile maliyet analizi sonuçları sunulmaktadır. Kolon kesitlerinin aynı olduğu durumlarda, kiriş kesitlerinin optimizasyon yöntemleri arasında birbirine yakın seçildiği gözlemlenmektedir. Tüm optimizasyon yöntemlerinde aynı beton sınıfı (C30) kullanılmıştır. En üst kat ötelemelerinin optimizasyon yöntemlerinde limit değerin uzağında kaldığı belirlenmiştir. Maksimum kiriş/kolon kapasite oranı ve maksimum kesme oranı, referans alınan modelde Etaps programında hesaplanamamıştır. Geometrik sınırlayıcı oranlarına bakıldığında, kiriş/kolon ve kolon/kolon için bu oranların 1 olarak ifade edildiği görülmektedir. Bu bulgular, yapı tasarımında kullanılan optimizasyon yöntemlerinin performansını ve kısıtlamalarını anlamak açısından önem taşımaktadır.

Çizelge 4.18'de, Üç Boyutlu 42 elemanlı betonarme lifli çerçeve modelinin metraj sonuçları sunulmaktadır. Yöntemlerden elde edilen en iyi kolon ve kiriş kesitleri ile maliyet analizi sonuçları sunulmaktadır. Kolon kesitlerinin aynı olduğu durumlarda, kiriş kesitlerinin optimizasyon yöntemleri arasında birbirine yakın seçildiği gözlemlenmektedir. Tüm optimizasyon yöntemlerinde YAKO yöntemi C40 diğer yöntemlerde aynı beton sınıfı (C30) olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca kapasite oranlarına göre, maksimum eğilme kapasitesinin %91'in üzerinde ve kesme kapasitelerinin %52'nin üzerinde olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, en çok zorlanan

eğilme kapasitesi olduğu ve yöntemlerin birbirlerine göre eğilme ve kesme kapasitesinin birbirine yakın oranlarda zorlandığını ortaya çıkarmaktadır. Çatlak kapasite oranları ise oldukça düşük olup, en fazla %20 civarında tespit edilmiştir. Geometrik sınırlayıcılarda önemli bir değişiklik olmadığı için benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu örneğin donatı detaylandırmaları Ek'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.17. Üç boyutlu 42 elemanlı betonarme lifsiz çerçeve modelin maliyet analizi

Grup ismi	YAKO	BTO	ATO	VAO
B1	40X20	45X20	40X20	45X20
B2	45X20	45X20	40X20	45X20
B3	25X20	25X20	25X20	25X20
B4	25X20	25X20	25X20	25X20
C1	25X25	25X25	25X25	25X25
C2	25X25	25X25	25X25	25X25
C3	25X25	25X25	25X25	25X25
Beton Sınıfı	C30	C30	C30	C30
MKÖ (mm)	6.906	6.641	7.079	6.641
MEÜKÖ (mm)	10.663	9.941	11.037	9.941
Maksimum kiriş/kolon kapasite oranı	N/A	N/A	N/A	NA
Maksimum Kesme oranı	N/A	N/A	N/A	NA
Maksimum kiriş /kolon GSO	0.8	0.8	0.8	0.8
Maksimum kolon/ kolon GSO	1	1	1	1

*MKA: Maksimum Katlararası Öteleme; MEÜKÖ: Maksimum En Üst Kat Ötelemesi; GSO: Geometrik Sınırlayıcı Oranı

Çizelge 4.18. Üç boyutlu 42 elemanlı betonarme lifli çerçeve modelin maliyet analizi

Grup ismi	YAKO	BTO	TSA	İVAO
B1	30X20	35X20	25X20	35X20
B2	25X20	30X20	25X20	25X20
B3	25X20	25X20	25X20	25X20
B4	25X20	25X20	25X20	25X20
C1	25X25	25X25	25X25	25X25
C2	25X25	25X25	25X25	25X25
C3	25X25	25X25	25X25	25X25
Beton Sınıfı	C40/C30	C30	C30	C30
MKÖ (mm)	0.13	0.17	0.19	0.24
MEÜKÖ (mm)	0.10	0.13	0.15	0.20
Maksimum eğilme kapasite oranı	0.97	0.91	0.91	0.91
Maksimum kesme kapasite oranı	0.52	0.56	0.56	0.56
Maksimum çatlak kapasite oranı	0.22	0.25	0.20	0.20
Maksimum kiriş /kolon GSO	0.8	0.8	0.8	0.8
Maksimum kolon/ kolon GSO	1	1	1	1

*MKA: Maksimum Katlararası Öteleme; MEÜKÖ: Maksimum En Üst Kat Ötelemesi; GSO: Geometrik Sınırlayıcı Oranı

Üç Boyutlu 42 elemanlı lifsiz betonarme çerçeve modelinin toplam maliyetleri Çizelge 4.19'da sunulmaktadır. Lifsiz betonarme çerçevenin toplam maliyet performanslarının birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Toplam maliyetin en az olduğu ATO yönteminde gözlemlenmiştir. Optimizasyon yöntemlerinde toplam maliyetin en az % 95'ini donatı maliyeti oluşturmaktadır.

Çizelge 4.19. Üç boyutlu 42 elemanlı lifsiz betonarme çerçeve modelin toplam maliyeti

	YAKO	BTO	ATO	İVAO
Donatı Miktarı (kg)	5760.59	5784.95	5731.67	5784.70
Beton Miktarı (m3)	13.18	13.42	11.02	13.42
Donatı Maliyeti (\$)	13249.35	13305.39	13182.84	13304.81
Beton Maliyeti (\$)	648.18	659.98	541.95	660.01
Toplam maliyet (\$)	13897.53	13965.37	13724.79	13964.82

Üç Boyutlu 42 elemanlı lifli betonarme çerçeve modelinin metrajı Çizelge 4.20'de sunulmaktadır. Lifli tasarımda lif maliyeti, toplam maliyetin YAKO yönteminde %13'un BTO ve İVAO yönteminde %11'in oranında en düşük %8 ATO yönteminde oluşmaktadır. Toplam maliyetin en büyük kısmını donatı maliyeti oluşturmaktadır. YAKO yönteminde %91'in üzerinde, ATO ve BTO yönteminde % 80 üzerinde en düşük %78 oranında İVAO yönteminde olduğu tespit edilmiştir. Toplam maliyette en iyi performans İVAO yönteminde görülmektedir. En düşük performans BTO yönteminde görülmektedir. Ayrıca, üç boyutlu 42 elemanlı betonarme çerçeve modelinin kullanılan yöntemlerde lifli tasarımının donatı maliyetini azaltarak, lifsiz tasarıma göre daha ekonomik bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.20. Üç boyutlu 42 elemanlı betonarme lifli çerçeve modelin toplam maliyeti

	YAKO	BTO	ATO	İVAO
Donatı Miktarı (kg)	2552.71	2510.52	2562.50	1856.744
Beton Miktarı (m3)	10.78	11.50	10.74	11.5675
Lif Dozajı(kg/m3)	35.00	30.00	25.00	25.00
Lif Maliyeti (\$)	837.90	793.80	595.00	637.00
Donatı Maliyeti (\$)	5871.24	5774.19	5893.75	4270.512
Beton Maliyeti (\$)	573.24	565.56	528.18	569.0053
Toplam maliyet (\$)	6444.48	7133.55	7016.92	5476.517

5. SONUÇLAR

Sonuç bölümü, çalışmanın iki temel noktasına odaklanmaktadır. İlk olarak, firmadan elde edilen test verileri üzerinden farklı açıklıklara sahip bir lifli betonarme kirişin optimal tasarımı ve maliyeti değerlendirilmiştir. Bu analiz, kirişin açıklığı arttıkça maliyetin nasıl değiştiğini ve bu değişimin doğrusal bir ilişki gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, firmadan elde edilen verilerin yanı sıra literatürdeki çeşitli makalelerden elde edilen test sonuçları da kullanılarak, lifli betonarme kiriş tasarımının optimal şekilde nasıl yapılabileceği ve bu tasarımın maliyet üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. İkinci olarak, üç farklı örneğe dayanarak oluşturulan betonarme çerçeve tasarımının, lifli ve lifsiz olarak tasarlanması durumunda optimum maliyete olan etkisi değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme, lifli betonarme kirişin kullanımının maliyet-etkinliğini ve performansını, lifsiz bir alternatifle karşılaştırmayı hedeflemiştir. Bu bağlamda, lifli betonarme kirişin sunduğu avantajlar ve maliyet-etkinlik, çalışmanın önemli bulguları arasında yer almaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, lifli kiriş tasarımlarında optimal çözümlerin belirlenmesi ve maliyet-etkin tasarımın sağlanması için farklı optimizasyon yöntemlerinin kullanımının önemini vurgulamaktadır. Elde edilen sonuçlar, mühendislik uygulamalarında lifli kirişlerin kullanımının gerekliliğini ve avantajlarını desteklemekte ve gelecekteki araştırmalar için önemli bir temel oluşturmaktadır.

5.1. Lifli Betonarme Kirişin Optimum Tasarım Sonuçları

Öncelikle lifli kirişlerin optimum tasarımında Yapay Arı Kolonisi Optimizasyonu (YAKO), Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon (BTO), Ağaç Tohum Optimizasyonu (ATO) ve Vahşi At Optimizasyonu (VAO) yöntemlerinin maliyet etkinliğini incelemiştir. Firmadan alınan test verileri ile yapılan analizler, her bir optimizasyon yönteminin performansını değerlendirmiş ve farklı açıklıklar için tasarım kriterlerinin nasıl etkilendiğini ortaya koymuştur. Çalışmanın sonuçları, optimizasyon yöntemlerinin stokastik doğası gereği belirli farklılıklar göstermesi ile, genel olarak kiriş tasarımında sağlanan iyileşmeleri ve maliyet avantajlarını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, Ağaç Tohum Optimizasyonu (ATO) yönteminin toplam maliyet açısından en yüksek performansı gösterdiğini belirtmektedir. Bu durum, ATO yönteminin, diğer optimizasyon yöntemlerine kıyasla daha etkili bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Vahşi At Optimizasyonu (VAO) ise, genel olarak daha düşük performans sergileyerek çalışmanın en zayıf halkası olarak tespit edilmiştir. VAO'nun performansını artırmak amacıyla yapılan iyileştirmeler sonucunda geliştirilen İyileştirilmiş Vahşi At Optimizasyonu (İVAO), ATO'ya yakın sonuçlar elde ederek dikkate değer bir gelişim göstermiştir.

Lifli betonarme kirişlerin çeşitli kapasite oranları üzerinden yapılan değerlendirmeler, kiriş açıklıkları ile kapasite ilişkisini gözler önüne sermektedir. Elde edilen sonuçlar, yüksek eğilme kapasitesinin, açıklık arttıkça yükseldiğini; kesme kapasitesinin ise açıklık ile birlikte artış gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, çatlak kapasitesinin açıklık arttıkça azaldığı gözlemlenmiştir. Özellikle 6-7 m'lik açıklıklarda çatlak kapasitesinin sıfıra yaklaşması, tasarım açısından önemli bir kısıtlama teşkil etmektedir. Ağaç Tohum ve İyileştirilmiş Vahşi At yöntemleri, diğer yöntemlere göre daha yüksek çatlak kapasitesi sergileyerek bu açıdan avantaj sağlamaktadır.

Genel olarak, optimizasyon yöntemleri arasında eğilme kapasitesinin %90 seviyelerine yakın olması dikkat çekmektedir. Ancak, stokastik çözümler kullanıldığından, her iterasyonda bu seviyeye ulaşmanın mümkün olmadığı ifade edilmelidir. Tüm optimizasyon yöntemleri, kiriş açıklığı arttıkça eğilme kapasitesinin artış gösterdiğini destekleyen sonuçlar sunmaktadır. Bununla birlikte, çatlak kapasitesinin tüm yöntemlerde açıklık artışıyla azalma eğilimi göstermesi, tasarımın dikkatli bir şekilde ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Yani lifli kirişlerin optimum tasarımında farklı optimizasyon yöntemlerinin performansını ve maliyet etkinliğini kapsamlı bir şekilde değerlendirildiğinde Ağaç Tohum Optimizasyonu, maliyet açısından en etkili yöntem olarak öne çıkarken, Vahşi At Optimizasyonu'nun performansını artırmak için yapılan iyileştirmeler önemli kazanımlar sağlamıştır. Elde edilen bulgular, mühendislik uygulamalarında optimizasyon yöntemlerinin seçiminde dikkate alınması gereken önemli kriterleri belirlemekte ve gelecekteki çalışmalar için bir temel oluşturmakta önemli bir rol oynamaktadır.

Diğer bir çalışma ise firmadan alınan ve literatürden referans alınan CMOD test verileri kullanılarak tek açıklıklı kiriş örneği için optimum tasarım gerçekleştirilmiştir. Analiz sürecinde, CMOD test verileri (Chen, Gao, Zhu, Yuan, vd., 2021; Venkateshwaran vd., 2018b) kullanılarak farklı lif kullanımlarının maliyet üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen bulgular, kiriş tasarımında malzeme seçiminin önemini ve farklı optimizasyon yöntemlerinin performansını ortaya koymaktadır.

Firmadan alınan verilerin analizinde, kiriş açıklığına bağlı olarak yer alan veriler, test sonuçlarının az çeşitliliği nedeniyle maliyet artışının doğrusal bir ilişki gösterdiğini ortaya koymaktadır. Makalelerden referans alınan CMOD test sonuçlarıyla elde edilen ikinci çözümde açıklık artışına bağlı olarak maliyetlerin yine artış gösterdiği, ancak fiyatın birinci çözüme göre azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, farklı CMOD testlerin maliyet üzerindeki etkisini vurgulamakta ve farklı optimizasyon stratejilerinin sonuçlarının nasıl değiştiğini ortaya koymaktadır. YAKO ve BTO yöntemleri, bu ikinci çözümde de benzer şekilde en ekonomik sonuçları sağlayarak, maliyet etkinliği açısından üstünlüklerini sürdürmüştür. Bununla birlikte, VAO yöntemi yine en düşük performansı sergileyerek optimizasyon sürecinde belirgin bir sorun teşkil ve VAO yönteminin ise iyileştirme gereksinimini vurgulamaktadır.

Bu bağlamda, gelecekteki çalışmalarda optimizasyon yöntemlerinin geliştirilmesi ve daha etkili maliyet yönetimi stratejilerinin araştırılması büyük önem taşımaktadır. Tasarım süreçlerinde, bu tür optimizasyon tekniklerinin dikkate alınması, mühendislik uygulamalarında daha sürdürülebilir ve ekonomik çözümler elde edilmesine katkıda bulunacaktır.

5.2. Lifli ve Lifsiz Betonarme Çerçeve Sistemin Optimum Tasarım Sonuçları

İki boyutlu altı elemanlı çerçevelerin lifli ve lifsiz tasarımları için optimum tasarım süreçleri Yapay Arı Kolonisi Optimizasyonu (YAKO), Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon (BTO), Ağaç Tohum Optimizasyonu (ATO) ve İyileştirilmiş Vahşi At Optimizasyonu (İVAO) yöntemleri, üç farklı tasarımını lifli ve lifsiz betonarme çerçeve modelinde maliyet etkinliğini ve performansı değerlendirmek amacıyla analiz edilmiştir.

İlk olarak, lifsiz betonarme çerçeve modeli üzerinden yapılan analizlerde, tüm optimizasyon yöntemlerinin birbirine yakın performanslar sergilediği gözlemlenmiştir. Özellikle BTO ve İVAO yöntemleri, yüksek yakınsama göstererek diğer yöntemlere kıyasla daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Lifli çerçeve modelinde ise YAKO ve İVAO yöntemleri benzer performanslar sergilemekte, İVAO'nun 8000. iterasyonda bile küçük iyileştirmelere devam ettiği görülmektedir. BTO yöntemi, en hızlı yakınsamayı sağlarken, ATO yöntemi en düşük performans göstermiştir. Lifsiz çerçeve için en düşük toplam maliyet ATO yöntemiyle elde edilmiş olup, İVAO yöntemi de buna yakın maliyet değerleri sunmuştur. Donatı maliyetinin toplam maliyetin en az %90'ını oluşturduğu tespit edilmiştir. ATO ve İVAO yöntemlerinin maliyet etkinliği açısından öne çıkması, yapı tasarımında bu yöntemlerin tercih edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Lif maliyetinin toplam maliyetin en fazla %7'si oranında BTO yönteminde görüldüğünü ve donatı maliyetinin yine en büyük payı oluşturduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, iki boyutlu altı elemanlı çerçeveler için yapılan bu çalışma, lifli ve lifsiz tasarımların optimizasyonunda farklı yöntemlerin performans ve maliyet etkinliği açısından önemli veriler sunmaktadır. Lifli tasarımın donatı maliyetini azaltarak, lifsiz tasarıma göre daha ekonomik bir çözüm sunduğu sonucuna varılmıştır. Bu bulgular, gelecekteki yapısal tasarım çalışmalarında maliyet optimizasyonunun önemini bir kez daha gözler önüne sermektedir.

İki boyutlu 21 elemanlı lifsiz betonarme çerçeve modelinin metrajı sonucunda, toplam maliyetin en düşük olduğu yöntem ATO, buna en yakın maliyet ise İVAO yöntemi ile elde edilmiştir. Tüm optimizasyon yöntemlerinde toplam maliyetin en az %93'ünü donatı maliyetinin oluşturduğu tespit edilmiştir. Lifli tasarımda, lif maliyetinin toplam maliyetin %9'u oranında ATO yönteminde, en fazla %15 oranında ise YAKO ve İVAO yöntemlerinde bulunduğu gözlemlenmiştir. Donatı maliyetinin toplam maliyetin en büyük kısmını oluşturduğu, minimum donatı maliyetinin %75 ile YAKO ve İVAO yöntemlerinde tespit edildiği belirlenmiştir. ATO yöntemi, toplam maliyetin en az olduğu ve donatı oranının en yüksek olduğu yöntemi sunarak, lifli tasarımın donatı maliyetini azaltarak lifsiz tasarıma göre daha ekonomik bir çözüm sağladığını göstermektedir.

Üç boyutlu 42 elemanlı lifsiz betonarme çerçeve modelinin maliyet açısından optimizasyon yöntemleri birbirine yakın iyi bir performans sergilemiş ve yöntemlerin hızlı yakınsama sağladığı belirlenmiştir. En iyi performans ve yakınsama, Ağaç Tohum Optimizasyonu (ATO) yöntemi ile elde edilmiştir. Toplam maliyetin en düşük olduğu yöntem ATO, buna en yakın maliyet ise YAKO yönteminde gözlemlenmiştir. Optimizasyon yöntemlerinde toplam maliyetin en az %95'ini donatı maliyetinin oluşturduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, maliyet etkinliği açısından ATO ve YAKO yöntemlerinin avantajlarını vurgulamaktadır.

Üç boyutlu 42 elemanlı lifli betonarme çerçeve tasarımında, en hızlı yakınsama ve en iyi performans İVAO yöntemiyle elde edilmiştir. YAKO yöntemi BTO ve ATO yöntemlerine göre daha hızlı yakınsamış, ancak en düşük performans BTO yöntemiyle elde edilmiştir. Lifli betonarme çerçeve modelinin metraj ve maliyet analizleri incelendiğinde, lif maliyetinin toplam maliyetin YAKO yönteminde %13'ünü, BTO ve İVAO yönteminde %11'ini ve ATO yönteminde %8'ini oluşturduğu belirlenmiştir. Donatı maliyeti, toplam maliyetin en büyük kısmını oluşturarak YAKO yönteminde %91'in üzerinde, ATO ve BTO yönteminde %80'in üzerinde ve İVAO yönteminde %78 oranında

olmuştur. Toplam maliyette en iyi performans İVAO yöntemiyle, en düşük performans ise BTO yöntemiyle elde edilmiştir. Üç boyutlu 42 elemanlı betonarme çerçeve modelinin lifli tasarımının donatı maliyetini azaltarak, lifsiz tasarıma göre daha ekonomik bir çözüm sunduğunu tespit edilmektedir. Sonuç olarak, üç boyutlu 42 elemanlı çerçeve tasarımında farklı optimizasyon yöntemlerinin performansı ve maliyet etkinliği bakımından önemli veriler elde edilmiştir. ATO ve İVAO yöntemlerinin sağladığı avantajlar, yapı tasarımında maliyet optimizasyonunun önemini vurgulamakta ve gelecekteki araştırmalara referans noktası oluşturmaktadır. Bu bulgular, yapı mühendisliğinde kullanılan optimizasyon tekniklerinin etkinliğini değerlendirmek için kritik bir kaynak teşkil etmektedir.

Sonuç olarak lifli betonarme çerçeve tasarımların donatı maliyetini azaltarak, lifsiz tasarıma göre daha ekonomik bir çözüm sunduğu sonucuna varılmıştır. Bu bulgular, gelecekteki yapısal tasarım çalışmalarında maliyet optimizasyonunun önemini bir kez daha gözler önüne sermektedir. Bu çalışma, betonarme çerçevelerin farklı optimizasyon yöntemleriyle tasarlanması ve maliyetlerin etkin bir şekilde yönetilmesi için değerli bir katkı sunmaktadır. Mevcut yazılan programlarda analizler lineer olarak gerçekleştirdiğinden, plastik deformasyonlara izin vermemekte ve çözüm sürecinde kesit büyütme yol açmaktadır. Yazılan programların yazılımların sadece lineer olmayan malzeme davranışlarını değil aynı zamanda geometrik olarak lineer olmayan analizleri de kapsayacak şekilde genişletilmesi ve performanslarının test edilmesi gerekmektedir. Gelecekte, daha karmaşık yapı tipleri ve farklı optimizasyon kriterleri üzerine daha detaylı çalışmalar yapılması hedeflenmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Abdelmgeed F. A., Ghallah G., & Hamoda A. (2022). Optimum cost design of reinforced concrete beams using artificial bee colony algorithm. *Int J Adv Struct Geotech Eng*, 06(03), 110-129.
- Abed, G. R. (2020). Güncel metasezgisel optimizasyon algoritmalarının çelik yapıların optimum boyutlandırılması problemindeki performanslarının incelenmesi. *Doktora tezi, Antalya*.
- Abid A., & Franzén K. (2011). Design of Fibre reinforced concrete beams and slabs. *Master's of Thesis, Chalmers University Of Technology, Göteborg, Sweden*.
- Akin, A., & Saka, M. P. (2015). Harmony search algorithm based optimum detailed design of reinforced concrete plane frames subject to ACI 318-05 provisions. *Computers & Structures*, 147, 79-95.
- Aslan M., Beskirli M., Kodaz H., & Kiran M. S. (2018). An improved tree seed algorithm for optimization problems. *Int J Mach Learn Comput*, *ijml.org*, 8(1), 20-25.
- Atabay Ş., & Gülay F. G. (2010). Genetik algoritmalar ile perdeli yapı sisteminin maliyet optimizasyonu. *İTÜ Dergisi*, 160.75.25.161.
- Aydogdu, I. , Carbas, S. , & Akin A. (2017). Effect of Levy Flight on the discrete optimum design of steel skeletal structures using metaheuristics. *Steel and Composite Structures*, 24(1), 93-112.
- Aydoğdu, İ., Akın, A., & Saka, M. P. (2016). Design optimization of real world steel space frames using artificial bee colony algorithm with Levy flight distribution. *Advances In Engineering Software*, 92, 1-14. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997815001581>
- Bencardino, F., Rizzuti, L., Spadea, G., & Swamy, R. N. (2013). Implications of test methodology on post-cracking and fracture behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete. *Composites Part B: Engineering*, 46, 31-38.
- Bitencourt Jr, Manzoli L. A., Bittencourt, T. N. , & Vecchio, F. J. (2019). Numerical modeling of steel fiber reinforced concrete with a discrete and explicit representation of steel fibers. *International Journal of Solids and Structures*, 159, 171-190.
- Boulekbache, B., Hamrat, M., & Chemrouk M. (2016). Flexural behaviour of steel fibre-reinforced concrete under cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 126, 253-262.
- Butenweg, C. , & Thierauf G. (1998). Optimum design of reinforced concrete structures. *In The Fourth International Conference on Computational Structures Technology, Edinburgh, Scotland." Advances in computational structural mechanics"* , 447-458.
- Carbas S., & Artar M. (2021). Optimum design of cold-formed steel frames via five novel nature-inspired metaheuristic algorithms under consideration of seismic loading. *Structures*, *Elsevier*, 33, 4011-4030.
- Casanova P., & Rossi P. (1997). Analysis and design of steel fiber reinforced concrete beams. *Structural Journal*, 94(5), 595-602.
- Chen, G., Gao, D., Zhu, H., Song Yuan, J., Xiao, X., & Wang, W. (2021). Effects of novel multiple hooked-end steel fibres on flexural tensile behaviour of notched concrete beams with various strength grades. *Structures*, 33, 3644-3654.
- Code, M. (2013). fib Model Code for Concrete Structures 2010. *fib Model Code for Concrete Structures 2010*, 1-402.

- Çarbaş S. (2017). Optimum structural design of spatial steel frames via biogeography-based optimization. *Neural Computing and Applications*, Springer, 28(6), 1525-1539.
- Dvorkin, L. , Dvorkin, O. , Zhitkovsky, V., & Ribakov, Y. (2011). A method for optimal design of steel fiber reinforced concrete composition. *Materials & Design*, 32(6), 3257-3262.
- Eser, C. (2014). Optimum design of steel structures via artificial bee colony (abc) algorithm and SAP2000. *Master's thesis, Middle East Technical University*.
- Farrokh Ghatte H. (2021). A Hybrid of Firefly and Biogeography-Based Optimization Algorithms for Optimal Design of Steel Frames. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(5), 4703-4717.
- Fragiadakis Michalis, & Papadrakakis Manolis. (2008). Performance-based optimum seismic design of reinforced concrete structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37(6), 825-844.
- Govindaraj, V. , & Ramasamy J. V. (2007). Optimum detailed design of reinforced concrete frames using genetic algorithms. *Engineering Optimization*, 39(4), 471-494.
- Gu, Z., Wang, J., Gao, D., & Zhao, J. (2024). Effects of steel fibers on the flexural behavior of recycled concrete beam: Testing and analysis. *Journal of Building Engineering*, 85, 108718.
- Guerra A. (2004). Design optimization of reinforced concrete structures. *Mines Theses & Dissertations*, 2000-2009.
- Gülşan M. E. (2019). Yüksek Mukavemetli Çelik Lif Katkılı Betonarme Değişken Kesitli Kirişlerin Mekanik Davranışı. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 206-214.
- Jahjouh, M. M. , Arafa, M. H. , & Alqedra M. A. (2013). Artificial Bee Colony (ABC) algorithm in the design optimization of RC continuous beams. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 47(6), 963-979.
- Karaboga, D. (2005). *An idea based on honey bee swarm for numerical optimization*.
- Kaveh A., S. O. (2012). Optimal design of reinforced concrete frames using big bang-big crunch algorithm. *International Journal of Civil Engineering*, 10 (3), 189-200.
- Kiran M. S. (2015). TSA: Tree-seed algorithm for continuous optimization. *Expert Systems with Applications*, 42 (19), 6686-6698.
- Koksal F., Ilki A., & Tasdemir M. A. (2013). Optimum mix design of steel-fibre-reinforced concrete plates. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38(11), 2971-2983.
- Kozak M. (2013). Çelik lifli betonlar ve kullanım alanlarının araştırılması. *Teknik Bilimler Dergisi*, 3(1), 26-35.
- Lee, D. H., Hwang, J. H., Ju, H., Kim, K. S., & Kuchma, D. A. (2012). Nonlinear finite element analysis of steel fiber-reinforced concrete members using direct tension force transfer model. *Finite Elements in Analysis and Design*, 50, 266-286.
- Lee S. C., Cho J. Y., & Vecchio F. J. (2013). Simplified diverse embedment model for steel fiber-reinforced concrete elements in tension. *Materials Journal*, 110(4), 403-412.
- Lee S. C., Cho J. Y., & Vecchio F. J. (2016). Analysis of steel fiber-reinforced concrete elements subjected to shear. *ACI Struct. J*, 113(2), 275-285.

- Martins, A. M. B., Simões, L. M. C., Negrão, J. H. J. O., & Lopes, A. V. (2020). Sensitivity analysis and optimum design of reinforced concrete frames according to Eurocode 2. *Engineering Optimization*, 52(12), 2011-2032.
- Melih, S., Gebrail, N., Aylin, B., & Kayabekir, E. (2023). Metasezgisel Yöntemlerle Betonarme Yapı Elemanlarının Optimizasyonu. *iuc-universitypress.org* SM Nigdeli, G Bekdaş, AE Kayabekiriuc-universitypress.org.
- Mergos P. E. (2017). Optimum seismic design of reinforced concrete frames according to Eurocode 8 and fib Model Code 2010. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 46(7), 1181-1201.
- Mergos, P. E. (2018). Efficient optimum seismic design of reinforced concrete frames with nonlinear structural analysis procedures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 58(6), 2565-2581.
- Moradi, M., Bagherieh, A. R., & Esfahani, M. R. (2019). Tensile modeling of steel fiber reinforced concrete. *Asian Journal of Civil Engineering*, 20(2), 269-280.
- Muhammad Afzal, Yuhan Liu, Jack C.P. Cheng, & Vincent J.L. Gan. (2020). Reinforced concrete structural design optimization: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, , 260, 120623.
- Naruei I., & Keynia F. (2022). Wild horse optimizer: a new meta-heuristic algorithm for solving engineering optimization problems. *Engineering with Computers*, 38, 3025-3056.
- Negrin, I. A. , Roose, D. , Chagoyen E.L., & Lombaert G. (2021). Biogeography-Based Optimization of RC structures including static soil-structure interaction. *Struct Eng Mech* 80 (3), 285-300.
- Nigdeli, S. M. , & Bekdaş G. (2016). Detailed optimum design of reinforced concrete frame structures. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*, 11(28), 220-228.
- Ozturk H.T., D. A. , D. A. (2012). Optimum design of a reinforced concrete beam using artificial bee colony algorithm. *Computers & Concrete*, 10(3), 295-306.
- Palancı M. (2014). Optimum design of industrial precast buildings by harmony search algorithm. *Pamukkale University Journal Of Engineering Sciences*, 20, 85-91.
- Polizzotto, C., & Rizzo, S. (1987). Optimum design of reinforced concrete structures under variable loadings. *Engineering Optimization*, 11(3-4), 327-338.
- Ren, H., Li, T., Ning, J., & Song S. (2023). Bending damage and fractal characteristics of steel fiber-reinforced concrete under three-point bending test. *Construction and Building Materials*, 409, 134053.
- Sadat, Z., & Arslan, A. S. (2022). Genetic Algorithm approach in the prevention of torsional irregularity in reinforced concrete structures. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37(3), 1469-1482.
- Saka, M. P., Aydogdu, I., Taymus, R. B., & Geem, Z. W. (2023). Optimum Design of 3D Steel Frames with Composite Slabs Using Adaptive Harmony Search Method. *Soft Computing: Recent Advances and Applications in Engineering and Mathematical Sciences*, 179-210.
- Saka, P. M. , Akın A., & Aydoğdu İ. (2009). *Betonarme ve çelik yapıların deprem yüklerinin de göz önüne alınarak optimum boyutlandırılması*.
- Singh, H. (2017). Steel Fiber Reinforced Concrete behavior, modelling and design. *Springer Singapore*.
- Sphanish Code. (t.y.). *Code on Structural Concrete (EHE-08) Articles and Annexes*.

- Taerwe, L., & Matthys, S. (2010). Fib model code for concrete structures 2010. *Structural Concrete*, 14.
- Tapao, A. , & Cheerarot R. (2017). Optimal parameters and performance of artificial bee colony algorithm for minimum cost design of reinforced concrete frames. *Engineering Structures*, 151, 802-820.
- Ulusoy, S., Kayabekir, A. E., Bekdaş, G., & Melih Nigdeli, S. (2020). *Metaheuristic algorithms in optimum design of reinforced concrete beam by investigating strength of concrete*.
- Vandewalle, L., Nemegeer, D., Balazs, L., Barr, B., Barros, J., Bartos, P., ... & Walraven, J. (2003). RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete'-sigma-epsilon-design method-Final Recommendation. *Materials and Structures*, 36(262), 560-567.
- Venkateshwaran, A., Tan, K. H., & Li, Y. (2018a). Residual flexural strengths of steel fiber reinforced concrete with multiple hooked-end fibers. *Structural Concrete*, 19(2), 352-365. <https://doi.org/10.1002/SUCO.201700030>
- Venkateshwaran, A., Tan, K. H., & Li, Y. (2018b). Residual flexural strengths of steel fiber reinforced concrete with multiple hooked-end fibers. *Structural Concrete*, 19(2), 352-365.
- Yang Jian, Yang Zhiyong, & Wang Yuhao. (2024). Enhancing transmission type frame structures: A BBO algorithm-based integrated design approach. *Plos one*, 19(5).
- Yücel, M., Nigdeli, S. M., & Bekdaş G. (2022). Generation of sustainable models with multi-objective optimum design of reinforced concrete (RC) structures. *Structures*, 40, 223-226.
- Zhan, Y. , & Meschke, G. (2016). Multilevel Computational Model for Failure Analysis of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 142(11).

7. EKLER

EK-1: Yapay arı kolonisi örnek tasarım değişkenleri

TASARIM DEĞİŞKENLERİ							
L=(m)	b(mm)	h(mm)	fi(mm)	n	<i>fck</i>	Lif Türü	Lif dozajı
3	250	300	6	4	c30	Lif Türü-2	30
3.25	250	300	6	2	c30	Lif Türü-2	40
3.5	250	300	10	1	c30	Lif Türü-2	40
3.75	250	300	12	1	c30	Lif Türü-2	40
4	250	300	6	4	c30	Lif Türü-3	30
4.25	400	300	16	1	c30	Lif Türü-3	25
4.5	250	300	10	2	c30	Lif Türü-2	30
4.75	250	300	6	4	c30	Lif Türü-2	40
5	250	350	6	4	c30	Lif Türü-2	40
5.25	250	300	6	5	c30	Lif Türü-2	40
5.5	250	500	16	1	c30	Lif Türü-3	25
5.75	250	350	12	2	c30	Lif Türü-2	25
6	250	500	18	1	c30	Lif Türü-2	25
6.25	250	300	10	3	c30	Lif Türü-2	40
6.5	250	350	14	2	c30	Lif Türü-2	25
6.75	250	300	14	2	c30	Lif Türü-2	40
7	250	300	12	3	c30	Lif Türü-2	35
7.25	150	450	12	2	c50	Lif Türü-2	35
7.5	150	300	14	4	c30	Lif Türü-2	30
7.75	150	500	20	1	c30	Lif Türü-3	25
8	150	300	12	3	c30	Lif Türü-3	35
8.25	150	400	10	3	c30	Lif Türü-2	35
8.5	150	300	10	5	c30	Lif Türü-2	30
8.75	150	400	12	4	c30	Lif Türü-3	25
9	150	400	10	3	c30	Lif Türü-2	35
9.25	150	400	14	3	c30	Lif Türü-2	35
9.5	150	550	12	2	c30	Lif Türü-2	35
9.75	150	350	14	4	c30	Lif Türü-2	35
10	150	350	16	2	c30	Lif Türü-2	40

EK-2: Yapay arı kolonisi örnek kapasite oranları ve metraj hesapları

(YAKO) Kapasite Oranları			(YAKO) Metraj Hesapları (USD)			
$\frac{M_{max}}{M_{rdu}}$	$\frac{V_{max}}{V_{rdF}}$	$\frac{W_d}{W_{dlin}}$	Betonun toplam maliyeti	Donatının toplam maliyeti	Lifin toplam maliyeti	Toplam Maliyeti
0.52	0.58	0.11	8840.25	3058.2	23.62	11922.08
0.89	0.33	0.17	9576.94	2122.72	34.12	11733.78
0.86	0.36	0.27	10313.62	2329.8	36.75	12680.18
0.79	0.34	0.35	11050.31	3577.09	39.38	14666.78
0.95	0.36	0.1	11787	4309.16	42.75	16138.91
0.59	0.24	0.13	20037.9	8522.93	60.56	28621.4
0.95	0.38	0.1	13260.38	5893.93	35.44	19189.75
0.83	0.43	0.08	13997.06	4465.81	49.88	18512.75
0.71	0.42	0.03	17189.38	4732.43	61.25	21983.05
0.66	0.44	0.05	15470.44	6137.71	55.12	21663.28
0.61	0.32	0.06	27011.88	11805.1	81.64	38898.62
0.98	0.42	0.02	19767.78	10797.93	44.02	30609.74
0.62	0.35	0.06	29467.5	12947.52	65.62	42480.65
0.79	0.44	0.03	18417.19	12081.02	65.62	30563.83
0.97	0.43	0.1	22346.19	16511.66	49.77	38907.61
0.89	0.44	0.02	19890.56	16995.51	70.88	36956.95
0.91	0.45	0.02	20627.25	19396.29	64.31	40087.85
0.82	0.57	0.01	21532.5	13641.83	59.95	35234.28
0.86	0.62	0.02	13260.38	28214.97	35.44	41510.79
0.95	0.59	0.02	22837.31	20304.76	69.02	43211.09
0.92	0.72	0.03	14144.4	22062.45	44.1	36250.95
0.82	0.73	0.02	19448.55	15969.17	60.64	35478.36
0.94	0.75	0.02	15028.42	27078.15	40.16	42146.73
0.85	0.66	0.01	20627.25	32438.24	62.34	53127.83
0.97	0.79	0.02	21216.6	17357.79	66.15	38640.54
0.54	0.65	0.01	21805.95	34928.5	67.99	56802.44
0.89	0.79	0.01	30793.54	17818.81	96.01	48708.36
0.63	0.74	0.01	20111.57	35815.37	62.7	55989.64
0.85	0.77	0.01	20627.25	32625.86	73.5	53326.61

EK-3: Biyo coğrafya örnek tasarım değişkenleri

TASARIM DEĞİŞKENLERİ							
L=(m)	b(mm)	h(mm)	fi(mm)	n	Beton Sınıfı	Lif Türü	Lif dozajı
3	250	300	6	3	c30	Lif Türü-2	40
3.25	250	300	6	2	c30	Lif Türü-2	40
3.5	250	300	10	1	c30	Lif Türü-3	40
3.75	250	300	10	1	c30	Lif Türü-2	35
4	250	300	10	1	c30	Lif Türü-2	35
4.25	250	350	10	2	c30	Lif Türü-2	30
4.5	250	350	12	1	c30	Lif Türü-2	30
4.75	300	300	10	2	c30	Lif Türü-2	35
5	250	350	10	2	c30	Lif Türü-2	30
5.25	250	350	10	2	c30	Lif Türü-2	35
5.5	250	350	16	1	c30	Lif Türü-2	30
5.75	250	300	10	4	c30	Lif Türü-2	30
6	250	400	12	2	c30	Lif Türü-2	30
6.25	250	400	6	7	c30	Lif Türü-2	30
6.5	250	300	12	3	c30	Lif Türü-3	30
6.75	250	400	12	2	c30	Lif Türü-2	35
7	250	400	12	2	c30	Lif Türü-2	40
7.25	150	400	6	8	c30	Lif Türü-3	30
7.5	250	400	10	3	c30	Lif Türü-2	35
7.75	150	500	10	2	c30	Lif Türü-2	40
8	150	300	14	2	c30	Lif Türü-2	40
8.25	150	400	12	3	c30	Lif Türü-2	35
8.5	250	450	6	6	c30	Lif Türü-2	35
8.75	150	400	12	2	c30	Lif Türü-2	40
9	150	400	6	7	c30	Lif Türü-2	40
9.25	150	400	12	3	c30	Lif Türü-2	40
9.5	250	400	12	3	c30	Lif Türü-2	40
9.75	150	400	6	8	c30	Lif Türü-3	35
10	150	400	12	3	c30	Lif Türü-2	35

EK-4: Biyo coğrafya örnek kapasite oranları ve metraj hesapları

Kapasite Oranları			Metraj Hesapları (USD)			
$\frac{M_{max}}{M_{rdu}}$	$\frac{V_{max}}{V_{rdF}}$	$\frac{W_d}{W_{dlin}}$	Betonun toplam maliyeti	Donatının toplam maliyeti	Lifin toplam maliyeti	Toplam Maliyeti
0.52	0.3	0.14	8840.25	2182.92	31.5	11054.67
0.89	0.33	0.17	9576.94	2122.72	34.12	11733.78
0.85	0.33	0.2	10313.62	3084.79	43.64	13442.05
0.99	0.37	0.23	11050.31	2992.63	34.45	14077.4
0.89	0.34	0.06	13751.5	3766.6	42.88	17560.98
0.69	0.34	0.04	14610.97	5647.07	39.05	20297.08
0.94	0.37	0.06	15470.44	5219.78	41.34	20731.56
0.98	0.35	0.04	16796.47	6202.52	52.37	23051.36
0.96	0.39	0.04	17189.38	6572.82	45.94	23808.13
0.98	0.4	0.03	18048.84	6881.4	56.27	24986.52
0.97	0.4	0.03	18908.31	9203.18	50.53	28162.02
0.73	0.39	0.02	16943.81	14873.7	45.28	31862.79
0.86	0.39	0.1	23574	11331.17	63	34968.17
0.68	0.43	0	24556.25	10303.58	65.62	34925.46
0.99	0.42	0.02	19153.88	18063.21	69.47	37286.55
0.96	0.43	0.01	25520.75	12664.24	82.69	39267.68
0.84	0.44	0	27503	13108.6	98	40709.6
0.53	0.66	0.02	17091.15	13552.96	61.99	30706.1
0.97	0.47	0	29467.5	14580.54	91.88	44139.92
0.69	0.69	0.02	22837.31	10152.38	81.38	33071.07
0.92	0.73	0.03	14144.4	20019.63	50.4	34214.43
0.57	0.64	0.01	19448.55	22995.6	60.64	42504.79
0.92	0.56	0.02	37571.06	11897.72	117.14	49585.92
0.88	0.77	0.02	20627.25	16219.12	73.5	36919.87
0.29	0.82	0.02	21216.6	14580.54	75.6	35872.74
0.45	0.71	0.01	21805.95	25661.76	77.7	47545.41
0.76	0.52	0	37325.5	26328.3	133	63786.8
0.58	0.56	0.02	22984.65	17996.56	97.26	41078.47
0.83	0.78	0.01	23574	27661.37	73.5	51308.87

EK-5: Ağaç tohum örnek tasarım değişkenleri

TASARIM DEĞİŞKENLERİ							
L=(m)	b(mm)	h(mm)	fi(mm)	n	fck	Lif Türü	Lif dozajı
3	150	300	10	1	c30	Lif Türü-2	30
3.25	150	300	6	2	c30	Lif Türü-2	40
3.5	150	225	10	2	c30	Lif Türü-2	20
3.75	150	300	6	3	c30	Lif Türü-2	35
4	150	300	6	4	c30	Lif Türü-2	30
4.25	150	300	14	1	c30	Lif Türü-2	30
4.5	150	400	12	1	c30	Lif Türü-2	25
4.75	150	400	6	3	c30	Lif Türü-2	35
5	150	225	12	2	c30	Lif Türü-2	35
5.25	150	400	14	1	c30	Lif Türü-2	35
5.5	150	225	10	3	c30	Lif Türü-2	35
5.75	150	350	12	2	c30	Lif Türü-2	25
6	150	350	12	2	c30	Lif Türü-2	30
6.25	150	400	10	2	c30	Lif Türü-2	35
6.5	150	350	12	2	c30	Lif Türü-2	35
6.75	150	350	12	2	c30	Lif Türü-2	35
7	150	450	10	2	c30	Lif Türü-2	35
7.25	150	400	14	2	c30	Lif Türü-2	35
7.5	150	300	12	3	c30	Lif Türü-2	35
7.75	150	350	10	3	c30	Lif Türü-2	35
8	150	300	12	3	c30	Lif Türü-2	35
8.25	150	450	12	3	c30	Lif Türü-2	25
8.5	150	400	12	3	c30	Lif Türü-2	35
8.75	150	400	12	3	c30	Lif Türü-2	30
9	150	300	14	3	c30	Lif Türü-2	25
9.25	150	450	14	2	c30	Lif Türü-2	40
9.5	150	450	12	2	c30	Lif Türü-2	40
9.75	150	450	12	2	c30	Lif Türü-2	40
10	150	400	6	6	c30	Lif Türü-2	40

EK-6: Ağaç tohum örnek kapasite oranları ve metraj hesapları

Kapasite Oranları			Metraj Hesapları (USD)			
$\frac{M_{max}}{M_{rdu}}$	$\frac{V_{max}}{V_{rdF}}$	$\frac{W_d}{W_{dlin}}$	Betonun toplam maliyeti	Donatının toplam maliyeti	Lifin toplam maliyeti	Toplam Maliyeti
0.81	0.45	0.54	5304.15	2021.22	14.18	7339.54
0.87	0.52	0.41	5746.16	1566.37	20.48	7333
0.95	0.52	0.31	4641.13	4567.03	8.27	9216.43
0.81	0.53	0.22	6630.19	2682.82	20.67	9333.68
0.79	0.53	0.15	7072.2	3799.27	18.9	10890.37
0.95	0.51	0.19	7514.21	5473.64	20.08	13007.94
0.98	0.54	0.19	10608.3	4332.5	23.62	14964.43
0.82	0.59	0.12	11197.65	3416.01	34.91	14648.58
0.98	0.59	0.1	6630.19	9242.68	20.67	15893.54
0.91	0.53	0.08	12376.35	6804.25	38.59	19219.19
0.91	0.64	0.07	7293.21	10553.54	22.74	17869.48
0.99	0.59	0.06	11860.67	10797.93	26.41	22685.02
0.95	0.59	0.05	12376.35	11242.29	33.08	23651.72
0.95	0.63	0.05	14733.75	8177.45	45.94	22957.14
0.88	0.62	0.04	13407.71	12131.01	41.8	25580.53
0.94	0.64	0.04	13923.39	12575.37	43.41	26542.18
0.99	0.67	0.04	18564.52	9164.91	57.88	27787.32
0.64	0.59	0.02	17091.15	18447.09	53.29	35591.53
0.8	0.67	0.03	13260.38	20729.37	41.34	34031.09
0.91	0.73	0.03	15986.12	14950.84	49.84	30986.8
0.92	0.72	0.03	14144.4	22062.45	44.1	36250.95
0.86	0.65	0.01	21879.62	23128.91	48.73	45057.26
0.6	0.66	0.01	20037.9	23662.14	62.48	43762.52
0.92	0.7	0.02	20627.25	24328.68	55.12	45011.05
0.91	0.73	0.02	15912.45	33658.38	49.61	49620.44
0.57	0.69	0.01	24531.69	23406.63	87.41	48025.73
0.84	0.79	0.02	25194.71	17641.07	89.78	42925.56
0.88	0.81	0.02	25857.73	18085.43	92.14	44035.3
0.88	0.81	0.02	23574	13830.69	84	37488.69

EK-7: Vahşi at optimizasyonu örnek tasarım değişkenleri

TASARIM DEĞİŞKENLERİ							
L=(m)	b(mm)	h(mm)	fi(mm)	n	fck	Lif Türü	Lif dozajı
3	150	225	12	1	c30	Lif Türü-2	30
3.25	150	300	10	1	c30	Lif Türü-2	25
3.5	150	300	10	2	c30	Lif Türü-2	25
3.75	150	300	10	2	c30	Lif Türü-2	25
4	150	300	10	2	c30	Lif Türü-2	25
4.25	150	300	10	2	c30	Lif Türü-2	25
4.5	250	300	10	2	c30	Lif Türü-2	25
4.75	250	300	10	2	c30	Lif Türü-2	30
5	250	350	10	2	c30	Lif Türü-2	30
5.25	250	350	12	2	c30	Lif Türü-2	30
5.5	250	350	12	2	c30	Lif Türü-2	30
5.75	250	350	12	2	c30	Lif Türü-2	30
6	250	400	12	2	c30	Lif Türü-2	35
6.25	250	400	12	2	c30	Lif Türü-2	35
6.5	250	400	12	2	c30	Lif Türü-2	35
6.75	250	400	12	2	c30	Lif Türü-2	35
7	250	400	14	3	c30	Lif Türü-2	35
7.25	250	400	12	3	c30	Lif Türü-2	35
7.5	250	400	12	3	c30	Lif Türü-2	35
7.75	250	400	12	3	c30	Lif Türü-2	35
8	250	400	12	3	c30	Lif Türü-2	35
8.25	250	400	12	3	c30	Lif Türü-2	35
8.5	250	400	14	3	c30	Lif Türü-2	35
8.75	250	400	12	3	c30	Lif Türü-2	35
9	250	400	12	3	c30	Lif Türü-2	35
9.25	250	400	14	3	c30	Lif Türü-2	35
9.5	250	400	14	3	c30	Lif Türü-2	35
9.75	250	400	14	3	c30	Lif Türü-2	35
10	250	400	14	3	c30	Lif Türü-2	35

EK-8: Vahşi at optimizasyonu örnek kapasite oranları ve metraj hesapları

Kapasite Oranları			Metraj Hesapları (USD)			
$\frac{M_{max}}{M_{rd}}$	$\frac{V_{max}}{V_{rd}}$	$\frac{W_d}{W_{din}}$	Betonun toplam maliyeti	Donatının toplam maliyeti	Lifin toplam maliyeti	Toplam Maliyeti
0.89	0.46	0.52	3978.11	2843.9	10.63	6832.64
0.97	0.5	0.56	5746.16	2342.49	12.8	8101.45
0.63	0.44	0.16	6188.17	4659.6	13.78	10861.55
0.72	0.47	0.16	6630.19	4968.19	14.77	11613.15
0.82	0.5	0.16	7072.2	5276.77	15.75	12364.72
0.92	0.53	0.16	7514.21	5585.35	16.73	13116.29
0.98	0.4	0.12	13260.38	5893.93	29.53	19183.84
0.86	0.37	0.04	13260.38	6264.23	43.64	19568.25
0.96	0.39	0.04	17189.38	6572.82	45.94	23808.14
0.78	0.37	0.02	18048.84	9909.22	48.23	28006.29
0.86	0.38	0.02	18908.31	10353.57	50.53	29312.41
0.94	0.4	0.02	19767.78	10797.93	52.83	30618.54
0.76	0.38	0.01	23574	11331.17	73.5	34978.67
0.83	0.4	0.01	24556.25	11775.52	76.56	36408.33
0.89	0.41	0.01	25538.5	12219.88	79.62	37838
0.96	0.43	0.01	26520.75	12664.24	82.69	39267.68
0.43	0.35	0	27503	26763.4	85.75	54352.15
0.62	0.4	0	28485.25	20329.44	88.81	48903.5
0.67	0.42	0	29467.5	20995.98	91.88	50555.36
0.71	0.43	0	30449.75	21662.52	94.94	52207.21
0.76	0.44	0	31432	22329.06	98	53859.06
0.81	0.46	0	32414.25	22995.6	101.06	55510.91
0.63	0.43	0	33396.5	32206.8	104.12	65707.42
0.91	0.49	0	34378.75	24328.68	107.19	58814.62
0.96	0.5	0	35361	24995.22	110.25	60466.47
0.74	0.46	0	36343.25	34928.5	113.31	71385.06
0.78	0.48	0	37325.5	35835.74	116.38	73277.62
0.83	0.49	0	38307.75	36742.97	119.44	75170.16
0.87	0.5	0	39290	37650.2	122.5	77062.7

EK-9: İyileştirilmiş vahşi at optimizasyonu örnek tasarım değişkenleri

TASARIM DEĞİŞKENLERİ							
L=(m)	b(mm)	h(mm)	fi(mm)	n	fck	Lif Türü	Lif dozajı
3	150	300	10	1	c30	Lif Türü-2	25
3.25	150	300	10	1	c30	Lif Türü-2	25
3.5	150	300	12	1	c30	Lif Türü-2	25
3.75	150	350	12	1	c30	Lif Türü-2	30
4	250	300	12	2	c30	Lif Türü-2	25
4.25	150	300	10	2	c30	Lif Türü-2	25
4.5	250	300	10	2	c30	Lif Türü-2	25
4.75	150	350	10	2	c30	Lif Türü-2	30
5	250	400	10	2	c30	Lif Türü-2	35
5.25	250	400	10	2	c30	Lif Türü-2	35
5.5	250	350	12	2	c30	Lif Türü-2	30
5.75	150	350	12	2	c30	Lif Türü-2	30
6	150	350	12	2	c30	Lif Türü-2	35
6.25	250	400	12	2	c30	Lif Türü-2	35
6.5	250	400	12	2	c30	Lif Türü-2	35
6.75	150	350	10	3	c30	Lif Türü-2	30
7	250	400	12	3	c30	Lif Türü-2	35
7.25	250	350	12	3	c30	Lif Türü-2	30
7.5	150	400	12	2	c30	Lif Türü-2	35
7.75	150	400	10	3	c30	Lif Türü-2	35
8	150	400	10	3	c30	Lif Türü-2	35
8.25	150	400	14	2	c30	Lif Türü-2	35
8.5	150	400	10	3	c30	Lif Türü-2	35
8.75	150	450	10	3	c30	Lif Türü-2	40
9	150	400	10	3	c30	Lif Türü-2	35
9.25	150	400	12	3	c30	Lif Türü-2	35
9.5	150	400	12	3	c30	Lif Türü-2	35
9.75	150	450	12	2	c30	Lif Türü-2	40
10	150	400	6	6	c30	Lif Türü-2	35

EK-10: İyileştirilmiş vahşi at optimizasyonu örnek kapasite oranları ve metraj hesapları

Kapasite Oranları			Metraj Hesapları (USD)			
$\frac{M_{max}}{M_{rdu}}$	$\frac{V_{max}}{V_{rdF}}$	$\frac{W_d}{W_{dlin}}$	Betonun toplam maliyeti	Donatının toplam maliyeti	Lifin toplam maliyeti	Toplam Maliyeti
0.83	0.46	0.56	5304.15	2176.36	11.81	7492.32
0.97	0.5	0.56	5746.16	2342.49	12.8	8101.45
0.86	0.49	0.37	6188.17	3354.91	13.78	9556.86
0.78	0.46	0.22	7735.22	3621.53	20.67	11377.42
0.58	0.31	0.07	11787	7598.55	26.25	19411.8
0.92	0.53	0.16	7514.21	5585.35	16.73	13116.29
0.98	0.4	0.12	13260.38	5893.93	29.53	19183.84
0.85	0.53	0.09	9797.94	6264.23	26.18	16088.35
0.73	0.36	0.01	19645	6634.53	61.25	26340.78
0.81	0.31	0.01	20627.25	6943.12	64.31	27634.68
0.86	0.38	0.02	18908.31	10353.57	50.53	29312.41
0.87	0.56	0.05	11860.67	10797.93	31.7	22690.3
0.95	0.59	0.05	12376.35	11242.29	33.08	23651.72
0.83	0.4	0.01	24556.25	11775.52	76.56	36408.33
0.89	0.41	0.01	25538.5	12219.88	79.62	37838
0.97	0.65	0.04	13923.39	13099.35	37.21	27059.95
0.58	0.39	0	27503	19662.9	85.75	47251.65
0.95	0.44	0.01	24924.59	20196.14	66.61	45187.34
0.94	0.67	0.03	17680.5	13997.32	55.12	31732.94
0.72	0.68	0.02	18269.85	15043.42	56.96	33370.23
0.77	0.71	0.02	18859.2	15506.29	58.8	34424.29
0.83	0.67	0.02	19448.55	20866.38	60.64	40375.57
0.87	0.75	0.02	20037.9	16432.04	62.48	36532.42
0.46	0.71	0.01	23205.66	16987.49	82.69	40275.84
0.97	0.79	0.02	21216.6	17357.79	66.15	38640.54
0.71	0.72	0.01	21805.95	25661.76	67.99	47535.7
0.75	0.74	0.01	22395.3	26328.3	69.83	48793.43
0.88	0.81	0.02	25857.73	18085.43	92.14	44035.3
0.9	0.98	0.03	23574	13830.69	73.5	37478.19

EK-11: 1. YAKO yönteminin iki boyutlu altı elemanlı lifsiz çerçeve örneğinin donatı detaylandırılması

Örnek1: Lifsiz YAKO	1. Kat Kirişler	2.Kat Kirişler	Zemin kat Kolonlar	1. Kat Kolonlar
Genişlik (cm)	25	25	30	30
Yükseklik (cm)	70	70	55	55
Paspayı (cm)	3.46	3.46	4	4
Etriye aralığı (orta bölge) (cm)	12	12	15	15
Etriye aralığı (destek bölgesi) (cm)	35	35	45	45
Etriye donatısı	φ12	φ12	φ10	φ10
Çekme Bölgesi Boyuna donatı	8φ20	8φ20	6φ20	6φ20
Basınç Bölgesi Boyuna donatı	10φ20	10φ20		
Gövde Donatısı	-	-	6φ20	6φ20
İlave Donatı	4φ20	4φ20	-	-
Donatı Maliyeti (\$)	445.73	445.73	503.3	664.76
Beton Maliyeti (\$)	51.65	51.65	64.93	48.698
Toplam maliyet (\$)	497.38	497.38	568.23	713.458
Donatı Miktarı (kg)	193.79	193.79	236.83	218.82
Beton Miktarı (m3)	1.05	1.05	1.32	0.99

EK-12: 1. BTO yönteminin iki boyutlu altı elemanlı lifsiz çerçeve örneğinin donatı detaylandırılması

Örnek1: Lifsiz BTO	1. Kat Kirişler	2.Kat Kirişler	Zemin kat Kolonlar	1. Kat Kolonlar
Genişlik (cm)	25	25	30	30
Yükseklik (cm)	75	75	45	45
Paspayı (cm)	3.46	3.46	4	4
Etriye aralığı (orta bölge) (cm)	12	12	15	15
Etriye aralığı (destek bölgesi) (cm)	37.5	37.5	45	45
Etriye donatısı	φ12	φ12	φ10	φ10
Çekme Bölgesi Boyuna donatı	8φ20	8φ20	6φ20	6φ20
Basınç Bölgesi Boyuna donatı	10φ20	10φ20		
Gövde Donatısı	-	-	6φ20	6φ20
İlave Donatı	4φ20	4φ20	-	-
Donatı Maliyeti (\$)	439.206	439.206	656.22	492.14
Beton Maliyeti (\$)	55.34	55.34	53.12	39.84
Toplam maliyet (\$)	494.546	494.546	709.34	531.98
Donatı Miktarı (kg)	190.96	190.96	285.31	213.97
Beton Miktarı (m3)	1.13	1.13	1.08	0.81

EK-13: 1. ATO yönteminin iki boyutlu altı elemanlı lifsiz çerçeve örneğinin donatı detaylandırılması

Örnek1: Lifsiz ATO	1. Kat Kirişler	2.Kat Kirişler	Zemin kat Kolonlar	1. Kat Kolonlar
Genişlik (cm)	25	25	30	30
Yükseklik (cm)	60	60	30	30
Paspayı (cm)	3.46	3.46	4	4
Etriye aralığı (orta bölge) (cm)	12	12	15	15
Etriye aralığı (destek bölgesi) (cm)	30	30	45	45
Etriye donatısı	φ12	φ12	φ10	φ10
Çekme Bölgesi Boyuna donatı	7φ20	7φ20	6φ20	6φ20
Basınç Bölgesi Boyuna donatı	8φ20	8φ20		
Gövde Donatısı	-	-	8φ20	8φ20
İlave Donatı	8φ20	8φ20	-	-
Donatı Maliyeti (\$)	441.48	441.48	475.39	629.39
Beton Maliyeti (\$)	44.27	44.27	35.42	26.56
Toplam maliyet (\$)	485.75	485.75	510.81	655.95
Donatı Miktarı (kg)	191.95	191.95	206.69	273.65
Beton Miktarı (m3)	0.90	0.90	0.72	0.54

EK-14: 1. İVAO yönteminin iki boyutlu altı elemanlı lifsiz çerçeve örneğinin donatı detaylandırılması

Örnek1: Lifsiz İVAO	1. Kat Kirişler	2.Kat Kirişler	Zemin kat Kolonlar	1. Kat Kolonlar
Genişlik (cm)	25	25	30	30
Yükseklik (cm)	70	70	50	50
Paspayı (cm)	3.46	3.46	4	4
Etriye aralığı (orta bölge) (cm)	12	12	15	15
Etriye aralığı (destek bölgesi) (cm)	35	35	45	45
Etriye donatısı	φ12	φ12	φ10	φ10
Çekme Bölgesi Boyuna donatı	10φ20	10φ20	6φ20	6φ20
Basınç Bölgesi Boyuna donatı	12φ20	12φ20	6φ20	6φ20
Gövde Donatısı	-	-	6φ20	6φ20
İlave Donatı	4φ20	4φ20	-	-
Donatı Maliyeti (\$)	446.5	446.5	544.72	497.72
Beton Maliyeti (\$)	51.64	51.64	59.028	44.27
Toplam maliyet (\$)	498.14	498.14	603.748	541.99
Donatı Miktarı (kg)	194.13	194.13	236.83	216.40
Beton Miktarı (m3)	1.05	1.05	1.20	0.90

EK-15: 1. YAKO yönteminin iki boyutlu altı elemanlı lifli çerçeve örneğinin donatı detaylandırılması

Örnek1: Lifli YAKO	1. Kat Kirişler	2.Kat Kirişler	Zemin kat Kolonlar	1. Kat Kolonlar
Genişlik (cm)	25	25	30	30
Yükseklik (cm)	35	35	50	50
Paspayı (cm)	2	2	4	4
Etriye aralığı (orta bölge) (cm)	15	15	15	15
Etriye aralığı (destek bölgesi) (cm)	20	20	45	45
Etriye donatısı	φ10	φ10	φ10	φ10
Boyuna donatı	6φ20	6φ20	12φ20	12φ20
İlave Donatı	-	-	-	-
Lif Türü	Lif Türü-2	Lif Türü-2	-	-
Lif Dozajı (kg/m ³)	30	30	-	-
Lif Maliyeti (\$)	55.13	55.13	-	-
Donatı Maliyeti (\$)	78.81	78.46	585.281	770.661
Beton Maliyeti (\$)	25.82	25.82	59.028	44.271
Toplam maliyet (\$)	159.76	159.41	644.309	814.932
Donatı Miktarı (kg)	34.26	34.11	254.47	335.07
Beton Miktarı (m ³)	0.525	0.525	1.2	0.9

EK-16: 1. BTO yönteminin iki boyutlu altı elemanlı lifli çerçeve örneğinin donatı detaylandırılması

Örnek1: Lifli BTO	1. Kat Kirişler	2.Kat Kirişler	Zemin kat Kolonlar	1. Kat Kolonlar
Genişlik (cm)	25	25	30	30
Yükseklik (cm)	35	35	50	50
Paspayı (cm)	2.5	2.5	4	4
Etriye aralığı (orta bölge) (cm)	15	15	15	15
Etriye aralığı (destek bölgesi) (cm)	20	20	45	45
Etriye donatısı	φ10	φ10	φ10	φ10
Boyuna donatı	6φ20	6φ20	12φ20	12φ20
İlave Donatı	-	-	-	-
Lif Türü	Lif Türü-2	Lif Türü-2	-	-
Lif Dozajı (kg/m ³)	30	30	-	-
Lif Maliyeti (\$)	55.13	55.13	-	-
Donatı Maliyeti (\$)	78.81	78.46	491.809	645.43
Beton Maliyeti (\$)	25.82	25.82	59.028	44.271
Toplam maliyet (\$)	159.76	159.41	550.837	689.701
Donatı Miktarı (kg)	34.26	34.11	213.83	280.78
Beton Miktarı (m ³)	0.525	0.525	1.2	0.9

EK-17: 1. ATO yönteminin iki boyutlu altı elemanlı lifli çerçeve örneğinin donatı detaylandırılması

	1. Kat Kirişler	2.Kat Kirişler	Zemin kat Kolonlar	1. Kat Kolonlar
Genişlik (cm)	25	25	30	30
Yükseklik (cm)	35	35	55	50
Paspayı (cm)	2.5	2.5	4	4
Etriye aralığı (orta bölge) (cm)	15	15	15	15
Etriye aralığı (destek bölgesi) (cm)	20	20	45	45
Etriye donatısı	φ12	φ12	φ10	φ10
Boyuna donatı	6φ20	6φ20	12φ20	12φ20
İlave Donatı	-	-	-	-
Lif Türü	Lif Türü-2	Lif Türü-2	-	-
Lif Dozajı (kg/m ³)	20	20	-	-
Lif Maliyeti (\$)	36.75	36.75	-	-
Donatı Maliyeti (\$)	125.62	125.97	657.8115	658.881
Beton Maliyeti (\$)	25.82	25.82	64.93	48.698
Toplam maliyet (\$)	188.20	188.54	722.7415	707.579
Donatı Miktarı (kg)	54.62	54.77	286.005	286.47
Beton Miktarı (m ³)	0.525	0.525	1.32	0.9

EK-18: 1. İVAO yönteminin iki boyutlu altı elemanlı lifli çerçeve örneğinin donatı detaylandırılması

	1. Kat Kirişler	2.Kat Kirişler	Zemin kat Kolonlar	1. Kat Kolonlar
Genişlik (cm)	25	25	30	30
Yükseklik (cm)	35	35	50	50
Paspayı (cm)	2.5	2.5	4	4
Etriye aralığı (orta bölge) (cm)	15	15	15	15
Etriye aralığı (destek bölgesi) (cm)	20	20	45	45
Etriye donatısı	φ12	φ12	φ10	φ10
Boyuna donatı	6φ20	6φ20	12φ20	12φ20
İlave Donatı	-	-	-	-
Lif Türü	Lif Türü-2	Lif Türü-2	-	-
Lif Dozajı (kg/m ³)	30	30	-	-
Lif Maliyeti (\$)	55.13	55.13	-	-
Donatı Maliyeti (\$)	78.81	78.46	645.794	696.555
Beton Maliyeti (\$)	25.82	25.82	59.028	44.271
Toplam maliyet (\$)	159.76	159.41	704.82	740.83
Donatı Miktarı (kg)	34.26	34.11	280.78	302.85
Beton Miktarı (m ³)	0.525	0.525	1.2	0.9

EK-19: YAKO yönteminin iki boyutlu 21 elemanlı lifsiz çerçeve örneğinin donatı detaylandırılması

	1. Kat Kirişler	2.Kat Kirişler	3. Kat Kirişler	Zemin kat Kolonlar	1. Kat Kolonlar	2. Kat Kolonlar
Genişlik (cm)	25	25	25	25	25	25
Yükseklik (cm)	60	55	55	30	30	30
Paspayı (cm)	3.46	3.46	3.46	40	40	40
Etriye aralığı (orta bölge) (cm)	12	12	12	15	15	15
Etriye aralığı (destek bölgesi) (cm)	30	27.5	27.5	45	45	45
Etriye donatısı	φ12	φ12	φ12	φ10	φ10	φ10
Çekme Bölgesi Boyuna donatı	8φ20	8φ20	8φ20	6φ20	6φ20	6φ20
Basınç Bölgesi Boyuna donatı	10φ20	12φ20	12φ20			
Gövde Donatısı	-	-	-	6φ20	6φ20	6φ20
İlave Donatı	4φ20	4φ20	4φ20	-	-	-
Donatı Maliyeti (\$)	986.88	969.73	969.73	1227.16	1227.16	1235.03
Beton Maliyeti (\$)	110.68	101.33	101.33	48.70	48.70	48.70
Toplam maliyet (\$)	1097.56	1071.06	1071.06	1275.86	1275.86	1283.73
Donatı Miktarı (kg)	429.08	421.62	421.62	533.55	533.55	536.97
Beton Miktarı (m3)	2.25	2.06	2.06	0.99	0.99	0.99

EK-20: BTO yönteminin iki boyutlu 21 elemanlı lifsiz çerçeve örneğinin donatı detaylandırılması

	1. Kat Kirişler	2.Kat Kirişler	3. Kat Kirişler	Zemin kat Kolonlar	1. Kat Kolonlar	2. Kat Kolonlar
Genişlik (cm)	25	25	25	25	25	25
Yükseklik (cm)	55	60	55	30	30	30
Paspayı (cm)	3.46	3.46	3.46	40	40	40
Etriye aralığı (orta bölge) (cm)	12	12	12	15	15	15
Etriye aralığı (destek bölgesi) (cm)	27.5	27.5	27.5	45	45	45
Etriye donatısı	φ12	φ12	φ12	φ12	φ12	φ12
Çekme Bölgesi Boyuna donatı	8φ20	8φ20	8φ20	6φ20	6φ20	6φ20
Basınç Bölgesi Boyuna donatı	12φ20	12φ20	12φ20			
Gövde Donatısı	-	-	-	6φ20	6φ20	6φ20
İlave Donatı	4φ20	4φ20	4φ20	-	-	-
Donatı Maliyeti (\$)	969.73	986.88	969.73	1227.165	1235.031	1227.165
Beton Maliyeti (\$)	101.33	110.68	101.33	48.6981	48.6981	48.6981
Toplam maliyet (\$)	1071.06	1097.56	1071.06	1275.86	1283.73	1275.86
Donatı Miktarı (kg)	421.62	429.08	421.62	533.55	536.97	533.55
Beton Miktarı (m3)	2.06	2.25	2.06	0.99	0.99	0.99

EK-21: ATO yönteminin iki boyutlu 21 elemanlı lifsiz çerçeve örneğinin donatı detaylandırılması

	1. Kat Kirişler	2.Kat Kirişler	3. Kat Kirişler	Zemin kat Kolonlar	1. Kat Kolonlar	2. Kat Kolonlar
Genişlik (cm)	25	25	25	25	25	25
Yükseklik (cm)	45	55	55	30	30	30
Paspayı (cm)	3.46	3.46	3.46	40	40	40
Etriye aralığı (orta bölge) (cm)	11.2	12	12	15	15	15
Etriye aralığı (destek bölgesi) (cm)	22.5	27.5	27.5	45	45	45
Etriye donatısı	φ12	φ12	φ12	φ12	φ12	φ12
Çekme Bölgesi Boyuna donatı	8φ20	8φ20	8φ20	6φ20	6φ20	6φ20
Basınç Bölgesi Boyuna donatı	12φ20	10φ20	12φ20			
Gövde Donatısı	-	-	-	6φ20	6φ20	6φ20
İlave Donatı	4φ20	4φ20	4φ20	-	-	-
Donatı Maliyeti (\$)	942.95	969.73	969.73	1020.211	1020.211	1020.211
Beton Maliyeti (\$)	82.98	101.33	101.33	48.6981	48.6981	48.6981
Toplam maliyet (\$)	1025.94	1071.06	1071.06	1068.91	1068.91	1068.91
Donatı Miktarı (kg)	409.98	421.62	421.62	443.57	443.57	443.57
Beton Miktarı (m3)	1.69	2.06	2.06	0.99	0.99	0.99

EK-22: İVAO yönteminin iki boyutlu 21 elemanlı lifsiz çerçeve örneğinin donatı detaylandırılması

	1. Kat Kirişler	2.Kat Kirişler	3. Kat Kirişler	Zemin kat Kolonlar	1. Kat Kolonlar	2. Kat Kolonlar
Genişlik (cm)	25	25	25	25	25	25
Yükseklik (cm)	55	60	55	30	30	30
Paspayı (cm)	3.46	3.46	3.46	40	40	40
Etriye aralığı (orta bölge) (cm)	12	12	12	15	15	15
Etriye aralığı (destek bölgesi) (cm)	27.5	30	27.5	45	45	45
Etriye donatısı	φ12	φ12	φ12	φ12	φ12	φ12
Çekme Bölgesi Boyuna donatı	8φ20	8φ20	8φ20	6φ20	6φ20	6φ20
Basınç Bölgesi Boyuna donatı	12φ20	10φ20	12φ20			
Gövde Donatısı	-	-	-	6φ20	6φ20	6φ20
İlave Donatı	4φ20	4φ20	4φ20	-	-	-
Donatı Maliyeti (\$)	969.73	986.88	969.73	1020.21	1020.21	1020.21
Beton Maliyeti (\$)	101.33	110.68	101.33	48.70	48.70	48.70
Toplam maliyet (\$)	1071.06	1097.56	1071.06	1068.91	1068.91	1068.91
Donatı Miktarı (kg)	421.62	429.08	421.62	443.57	443.57	443.57
Beton Miktarı (m3)	2.06	2.25	2.06	0.99	0.99	0.99

EK-23: YAKO yönteminin iki boyutlu 21 elemanlı lifli çerçeve örneğinin donatı detaylandırılması

	1. Kat Kirişler	2.Kat Kirişler	3. Kat Kirişler	Zemin kat Kolonlar	1. Kat Kolonlar	2. Kat Kolonlar
Genişlik (cm)	25	25	25	25	25	25
Yükseklik (cm)	45	55	50	35	30	30
Paspayı (cm)	2.5	2.5	2.5	4	4	4
Etriye aralığı (orta bölge) (cm)	-	-	-	15	15	15
Etriye aralığı (destek bölgesi) (cm)	-	-	-	45	45	45
Etriye donatısı	-	-	-	φ10	φ10	φ10
Boyuna donatı	3φ12	2φ12	3φ12	12φ20	12φ20	12φ20
Lif Türü	Lif türü-2	Lif türü-2	Lif türü-2	-	-	-
Lif Dozajı (kg/m ³)	35	35	35	-	-	-
Lif Maliyeti (\$)	207.03	252.35	229.08	-	-	-
Donatı Maliyeti (\$)	101.68	96.15	106.15	1032.49	1021.34	1021.34
Beton Maliyeti (\$)	83.13	101.33	91.99	56.57	48.70	48.70
Toplam maliyet (\$)	391.84	449.83	427.21	1089.06	1070.04	1070.04
Donatı Miktarı (kg)	44.21	41.80	46.15	448.91	444.06	444.06
Beton Miktarı (m ³)	1.69	2.06	1.87	1.15	0.99	0.99

EK-24: BTO yönteminin iki boyutlu 21 elemanlı lifli çerçeve örneğinin donatı detaylandırılması

	1. Kat Kirişler	2.Kat Kirişler	3. Kat Kirişler	Zemin kat Kolonlar	1. Kat Kolonlar	2. Kat Kolonlar
Genişlik (cm)	25	25	25	25	25	25
Yükseklik (cm)	30	35	50	50	30	30
Paspayı (cm)	2.5	2.5	2.5	4	4	4
Etriye aralığı (orta bölge) (cm)	-	-	-	15	15	15
Etriye aralığı (destek bölgesi) (cm)	-	-	-	45	45	45
Etriye donatısı	-	-	-	φ10	φ10	φ10
Boyuna donatı	2φ18	2φ18	2φ16	12φ20	12φ20	12φ20
Lif Türü	Lif türü-2	Lif türü-2	Lif türü-2	-	-	-
Lif Dozajı (kg/m ³)	30	30	30	-	-	-
Lif Maliyeti (\$)	117.60	137.55	196.35	-	-	-
Donatı Maliyeti (\$)	144.92	148.35	132.83	1065.98	1013.17	1065.98
Beton Maliyeti (\$)	55.09	64.44	91.99	81.16	48.69	48.69
Toplam maliyet (\$)	317.62	350.34	421.16	1147.14	1061.87	1114.68
Donatı Miktarı (kg)	63.01	64.5	57.75	463.47	440.51	463.47
Beton Miktarı (m3)	1.12	1.31	1.87	1.65	0.99	0.99

EK-25: ATO yönteminin iki boyutlu 21 elemanlı lifli çerçeve örneğinin donatı detaylandırılması

	1. Kat Kirişler	2.Kat Kirişler	3. Kat Kirişler	Zemin kat Kolonlar	1. Kat Kolonlar	2. Kat Kolonlar
Genişlik (cm)	25	25	25	25	25	25
Yükseklik (cm)	30	30	30	30	30	30
Paspayı (cm)	2.5	2.5	2.5	4	4	4
Etriye aralığı (orta bölge) (cm)	-	-	-	15	15	15
Etriye aralığı (destek bölgesi) (cm)	-	-	-	45	45	45
Etriye donatısı	-	-	-	φ10	φ10	φ10
Boyuna donatı	5φ12	3φ16	5φ12	12φ20	12φ20	12φ20
Lif Türü	Lif türü-2	Lif türü-2	Lif türü-2	-	-	-
Lif Dozajı (kg/m ³)	35	35	35	-	-	-
Lif Maliyeti (\$)	137.20	137.20	137.20	-	-	-
Donatı Maliyeti (\$)	163.62	164.82	166.77	1021.34	1021.34	1021.34
Beton Maliyeti (\$)	62.15	62.15	62.15	48.69	48.69	48.69
Toplam maliyet (\$)	362.97	364.17	366.12	1070.03	1070.03	1070.03
Donatı Miktarı (kg)	71.14	71.66	72.51	444.06	444.06	444.06
Beton Miktarı (m3)	1.12	1.12	1.12	0.99	0.99	0.99

EK-26: İVAO yönteminin iki boyutlu 21 elemanlı lifli çerçeve örneğinin donatı detaylandırılması

	1. Kat Kirişler	2.Kat Kirişler	3. Kat Kirişler	Zemin kat Kolonlar	1. Kat Kolonlar	2. Kat Kolonlar
Genişlik (cm)	25	25	25	25	25	25
Yükseklik (cm)	40	50	55	40	30	30
Paspayı (cm)	2.5	2.5	2.5	4	4	4
Etriye aralığı (orta bölge) (cm)	-	-	-	15	15	15
Etriye aralığı (destek bölgesi) (cm)	-	-	-	45	45	45
Etriye donatısı	-	-	-	φ10	φ10	φ10
Boyuna donatı	3φ12	3φ12	3φ12	12φ20	12φ20	12φ20
Lif Türü	Lif Türü-2	Lif Türü-2	Lif Türü-2	-	-	-
Lif Dozajı (kg/m ³)	35	35	35	-	-	-
Lif Maliyeti (\$)	183.75	229.08	252.35	-	-	-
Donatı Maliyeti (\$)	103.89	99.22	103.45	1033.99	1021.34	1021.34
Beton Maliyeti (\$)	73.79	91.99	101.33	64.93	48.70	48.70
Toplam maliyet (\$)	361.43	420.28	457.14	1098.92	1070.04	1070.04
Donatı Miktarı (kg)	45.17	43.14	44.98	449.56	444.06	444.06
Beton Miktarı (m3)	1.5	1.87	2.06	1.32	0.99	0.99

EK-27: YAKO yönteminin üç boyutlu 42 elemanlı lifsiz çerçeve örneğinin donatı detaylandırılması

	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3
Genişlik (cm)	20	20	20	20	25	25	25
Yükseklik (cm)	40	45	25	25	25	25	25
Paspayı (cm)	3.46	3.46	3.46	3.46	4	4	4
Etriye aralığı (orta bölge) (cm)	10	11.2	6.2	6.2	15	15	15
Etriye aralığı (destek bölgesi) (cm)	20	22.5	12.5	12.5	45	45	45
Etriye donatısı	φ12	φ12	φ12	φ12	φ10	φ10	φ10
Boyuna donatı	8φ20	8φ20	8φ20	8φ20	12φ20	2φ20	2φ20
Donatı Maliyeti (\$)	1385.61	2861.36	1240.21	2480.78	584.43	2352.07	2344.89
Beton Maliyeti (\$)	94.44	212.50	49.19	98.38	21.50	86.08	86.08
Toplam maliyet (\$)	1480.06	3073.86	1289.40	2579.16	605.92	2438.15	2430.98
Donatı Miktarı (kg)	602.44	1244.07	539.22	1078.60	254.10	1022.64	1019.52
Beton Miktarı (m3)	1.92	4.32	1.00	2.00	0.437	1.75	1.75

EK-28: BTO yönteminin üç boyutlu 42 elemanlı lifsiz çerçeve örneğinin donatı detaylandırılması

	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3
Genişlik (cm)	20	20	20	20	20	20	20
Yükseklik (cm)	45	25	25	25	25	25	25
Paspayı (cm)	3.46	3.46	3.46	3.46	4	4	4
Etriye aralığı (orta bölge) (cm)	11.2	6.2	6.2	6.2	15	15	15
Etriye aralığı (destek bölgesi) (cm)	22.5	12.5	12.5	12.5	45	45	45
Etriye donatısı	φ12	φ12	φ12	φ12	φ10	φ10	φ10
Boyuna donatı	8φ20	8φ20	8φ20	8φ20	12φ20	12φ20	12φ20
Donatı Maliyeti (\$)	1430.69	2861.36	1240.39	2480.78	588.02	2352.07	2352.07
Beton Maliyeti (\$)	106.25	212.50	49.19	98.38	21.50	86.08	86.08
Toplam maliyet (\$)	1536.94	3073.86	1289.58	2579.16	609.51	2438.15	2438.15
Donatı Miktarı (kg)	622.04	1244.07	539.30	1078.60	255.66	1022.64	1022.64
Beton Miktarı (m3)	2.16	4.32	1.00	2.00	0.437	1.75	1.75

EK-29: TSA yönteminin üç boyutlu 42 elemanlı lifsiz çerçeve örneğinin donatı detaylandırılması

	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3
Genişlik (cm)	20	20	20	20	25	25	25
Yükseklik (cm)	40	40	25	25	25	25	25
Paspayı (cm)	3.46	3.46	3.46	3.46	4	4	4
Etriye aralığı (orta bölge) (cm)	10	10	6.2	6.2	15	15	15
Etriye aralığı (destek bölgesi) (cm)	20	20	12.5	12.5	45	45	45
Etriye donatısı	φ12	φ12	φ12	φ12	φ10	φ10	φ10
Boyuna donatı	8φ20	8φ20	8φ20	8φ20	12φ20	12φ20	12φ20
Donatı Maliyeti (\$)	1430.69	2771.22	1240.39	2480.78	584.32	2337.72	2337.72
Beton Maliyeti (\$)	106.25	94.44	49.19	98.38	21.52	86.08	86.08
Toplam maliyet (\$)	1536.94	2865.67	1289.58	2579.16	605.84	2423.80	2423.80
Donatı Miktarı (kg)	622.04	1204.88	539.30	1078.60	254.05	1016.40	1016.40
Beton Miktarı (m3)	2.16	1.92	1.00	2.00	0.4375	1.75	1.75

EK-30: İVAO yönteminin üç boyutlu 42 elemanlı lifsiz çerçeve örneğinin donatı detaylandırılması

	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3
Genişlik (cm)	20	20	20	20	25	25	25
Yükseklik (cm)	45	45	25	25	25	25	25
Paspayı (cm)	3.46	3.46	3.46	3.46	4	4	4
Etriye aralığı (orta bölge) (cm)	11.2	11.2	6.2	6.2	15	15	15
Etriye aralığı (destek bölgesi) (cm)	22.5	22.5	12.5	12.5	45	45	45
Etriye donatısı	φ12	φ12	φ12	φ12	φ10	φ10	φ10
Boyuna donatı	8φ20	8φ20	8φ20	8φ20	12φ20	12φ20	12φ20
Donatı Maliyeti (\$)	1430.69	2861.36	1240.21	2480.39	588.02	2352.07	2352.07
Beton Maliyeti (\$)	106.25	212.50	49.19	98.38	21.52	86.08	86.08
Toplam maliyet (\$)	1536.94	3073.86	1289.40	2578.77	609.54	2438.15	2438.15
Donatı Miktarı (kg)	622.04	1244.07	539.22	1078.43	255.66	1022.64	1022.64
Beton Miktarı (m3)	2.16	4.32	1.00	2.00	0.4375	1.75	1.75

EK-31: YAKO yönteminin üç boyutlu 42 elemanlı lifli çerçeve örneğinin donatı detaylandırılması

	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3
Genişlik (cm)	20	20	20	20	25	25	25
Yükseklik (cm)	30	25	25	25	25	25	25
Paspayı (cm)	2.5	3.46	3.46	3.46	4	4	4
Etriye aralığı (orta bölge) (cm)	15	15	15	15	15	15	15
Etriye aralığı (destek bölgesi) (cm)	20	20	20	20	45	45	45
Etriye donatısı	-	-	-	-	φ10	φ10	φ10
Boyuna donatı	5φ18	5φ20	3φ18	5φ16	12φ20	12φ20	12φ20
Lif Türü	Lif türü-2	Lif türü-2	Lif türü-2	Lif türü-2	-	-	-
Lif Dozajı (kg/m ³)	35	35	35	35	-	-	-
Lif Maliyeti (\$)	176.40	294.00	122.50	245.00	-	-	-
Donatı Maliyeti (\$)	117.41	243.97	66.83	190.82	584.43	2330.06	2337.72
Beton Maliyeti (\$)	79.91	133.18	55.49	110.98	21.52	86.08	86.08
Toplam maliyet (\$)	197.31	377.14	122.32	301.80	605.95	2416.14	2423.80
Donatı Miktarı (kg)	51.046	106.07	29.06	82.96	254.1	1013.07	1016.4
Beton Miktarı (m ³)	1.44	2.4	1	2	0.4375	1.75	1.75

EK-32: BTO yönteminin üç boyutlu 42 elemanlı lifli çerçeve örneğinin donatı detaylandırılması

	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3
Genişlik (cm)	20	20	20	20	25	25	25
Yükseklik (cm)	35	30	25	25	25	25	25
Paspayı (cm)	2.5	2.5	2.5	2.5	4	4	4
Etriye aralığı (orta bölge) (cm)	15	15	15	15	15	15	15
Etriye aralığı (destek bölgesi) (cm)	20	20	20	20	45	45	45
Etriye donatısı	-	-	-	-	φ10	φ10	φ10
Boyuna donatı	4φ12	2φ18	3φ12	3φ12	12φ20	12φ20	12φ20
Lif Türü	Lif türü-2	Lif türü-2	Lif türü-2	Lif türü-2	-	-	-
Lif Dozajı (kg/m ³)	30	30	30	30	-	-	-
Lif Maliyeti (\$)	176.40	302.40	105.00	210.00	-	-	-
Donatı Maliyeti (\$)	108.43	218.91	62.33	124.65	584.43	2337.72	2337.72
Beton Maliyeti (\$)	82.64	141.67	49.19	98.38	21.52	86.08	86.08
Toplam maliyet (\$)	367.47	662.98	216.52	433.03	605.95	2423.80	2423.80
Donatı Miktarı (kg)	47.14	95.17	27.10	54.19	254.1	1016.4	1016.4
Beton Miktarı (m ³)	1.68	2.88	1	2	0.4375	1.75	1.75

EK-33: ATO yönteminin üç boyutlu 42 elemanlı lifli çerçeve örneğinin donatı detaylandırılması

	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3
Genişlik (cm)	20	20	20	20	25	25	25
Yükseklik (cm)	25	25	25	25	25	25	25
Paspayı (cm)	2.5	2.5	2.5	2.5	4	4	4
Etriye aralığı (orta bölge) (cm)	15	15	15	15	15	15	15
Etriye aralığı (destek bölgesi) (cm)	20	20	20	20	45	45	45
Etriye donatısı	-	-	-	-	φ10	φ10	φ10
Boyuna donatı	5φ14	5φ14	4φ12	4φ12	12φ20	12φ20	12φ20
Lif Türü	Lif türü-2	Lif türü-2	Lif türü-2	Lif türü-2	-	-	-
Lif Dozajı (kg/m ³)	25	25	25	25	-	-	-
Lif Maliyeti (\$)	105.00	210.00	105.00	175.00	-	-	-
Donatı Maliyeti (\$)	145.47	288.75	78.03	156.06	580.59	2322.43	2322.43
Beton Maliyeti (\$)	59.03	118.06	59.03	98.38	21.52	86.08	86.08
Toplam maliyet (\$)	309.50	616.81	242.06	429.44	602.11	2408.51	2408.51
Donatı Miktarı (kg)	63.25	125.54	33.92	67.85	252.43	1009.75	1009.75
Beton Miktarı (m3)	1.2	2.4	1.2	2	0.4375	1.75	1.75

EK-34: İVAO yönteminin üç boyutlu 42 elemanlı lifli çerçeve örneğinin donatı detaylandırılması

	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3
Genişlik (cm)	20	20	20	20	25	25	25
Yükseklik (cm)	35	25	25	25	25	25	25
Paspayı (cm)	2.5	2.5	2.5	2.5	4	4	4
Etriye aralığı (orta bölge) (cm)	15	15	15	15	15	15	15
Etriye aralığı (destek bölgesi) (cm)	20	20	20	20	45	45	45
Etriye donatısı	-	-	-	-	φ10	φ10	φ10
Boyuna donatı	5φ12	5φ14	4φ12	4φ12	12φ20	12φ20	12φ20
Lif Türü	Lif Türü -2	Lif Türü -2	Lif Türü -2	Lif Türü -2	-	-	-
Lif Dozajı (kg/m ³)	25	25	25	25	-	-	-
Lif Maliyeti (\$)	147.00	210.00	105.00	175.00	-	-	-
Donatı Maliyeti (\$)	135.91	284.61	78.03	156.06	584.31	2330.07	701.53
Beton Maliyeti (\$)	82.64	118.06	59.03	98.38	21.52	86.08	103.30
Toplam maliyet (\$)	365.55	612.67	242.06	429.44	605.83	2416.15	804.83
Donatı Miktarı (kg)	59.09	123.74	33.93	67.85	254.05	1013.07	305.01
Beton Miktarı (m ³)	1.68	2.4	1.2	2	0.4375	1.75	2.1

ÖZGEÇMİŞ

Seda TURAN

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora	Akdeniz Üniversitesi
2019-2024	Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2017-2019	Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2013-2017	Mühendislik Fakültesi. İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Öğretim Görevlisi	Antalya Akev Üniversitesi
2020-2023	Meslek Yüksek Okulu. İnşaat Bölümü. İnşaat Teknolojisi Programı. Antalya
Öğretim Görevlisi	Antalya Belek Üniversitesi
2023-Devam Ediyor	Meslek Yüksek Okulu. İnşaat Bölümü. İnşaat Teknolojisi Programı. Antalya

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1- Turan S., Aydoğdu İ. Ve Emsen E. (2023). Optimum Design of Elastic Continuous Foundations with The Artificial Bee Colony Method 30(4). 1013-1020. Doi: 10.2298/FIL1604013C.