



*Ekim 2024*

# İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ALANINDA ULUSLARARASI ÇALIŞMA VE DEĞERLENDİRMELER

EDİTÖR

PROF. DR. EROL İSKENDER

 SERÜVEN  
YAYINEVİ

**Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana**

**Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi**

**Birinci Basım / First Edition • © Ekim 2024**

**ISBN • 978-625-6172-10-4**

**© copyright**

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

**Serüven Yayınevi / Serüven Publishing**

**Türkiye Adres / Turkey Address:** Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

**Telefon / Phone:** 05437675765

**web:** www.serüvenyayınevi.com

**e-mail:** serüvenyayınevi@gmail.com

**Baskı & Cilt / Printing & Volume**

Sertifika / Certificate No: 47083

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
ALANINDA  
ULUSLARARASI ÇALIŞMA  
VE DEĞERLENDİRMELER

Ekim 2024

Editör

PROF. DR. EROL İSKENDER



## İçindekiler

### *Bölüm 1*

#### **GERİ KAZANILMIŞ AGREGALI BETONLARDA OPTİMUM KARIŞIM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİNİN ÖNEMİ**

*Hasan DİLBAS, Furkan BİRDAL* ..... 1

### *Bölüm 2*

#### **BETONARME ÇERÇEVENİN TEKRARLI YATAY YÜK ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞINDA MODELLEME PARAMETRELERİNİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

*Halit Erdem ÇOLAKOĞLU* ..... 17

### *Bölüm 3*

#### **BİTKİSEL ATIK YAĞ İLAVESİNİN RET MODİFİYELİ BİTÜMÜN DÜKTİLİTESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

*Erhan Burak PANCAR, Aytuğ KUMANDAŞ* ..... 31

### *Bölüm 4*

#### **DEPREM BÖLGESİNDE BULUNAN FARKLI TAŞIYICI SİSTEME SAHİP BETONARME BİNALARDA DOLGU DUVAR ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

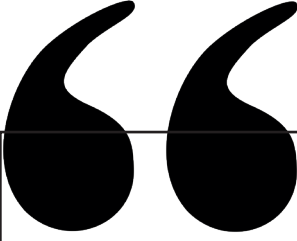
*Muhammed ÖZTEMEL*..... 45

### *Bölüm 5*

#### **AŞAMALI GÖÇME TASARIM PROSEDÜRÜ: BAĞ KUVVETLERİ METODU**

*Saffet KILIÇER* ..... 57





## Bölüm 1

### **GERİ KAZANILMIŞ AGREGALI BETONLARDA OPTİMUM KARIŞIM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİNİN ÖNEMİ**

*Hasan DİLBAS<sup>1</sup>, Furkan BİRDAL<sup>2</sup>*

---

1 Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Van, TÜRKİYE, hasandilbas@yyu.edu.tr, ORCID:0000-0002-3780-8818 FURKHASA Ar-Ge Mühendislik Teknoloji İnovasyon ve Danışmanlık A.Ş., Erciyes Teknopark, Kayseri, TÜRKİYE.

2 Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırşehir, TÜRKİYE, f.birdal@ahievran.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2243-418X FURKHASA Ar-Ge Mühendislik Teknoloji İnovasyon ve Danışmanlık A.Ş., Erciyes Teknopark, Kayseri, TÜRKİYE.

## 1. Beton Atıkları ve Geri Dönüştürme

Beton avantajlarıyla birlikte yapı endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ve kullanımı gittikçe artan önemli bir yapı malzemesidir. Ülkemizde mühendislik uygulamalarında beton kullanımı geçmişten günümüze artarak devam etmektedir. Dünya genelinde ise başta şehir merkezleri olmak üzere yapı ihtiyacının artması ile kullanılan beton hacminde ciddi bir ivme meydana gelmiştir. Bununla birlikte beton atıkları dünyada gittikçe artan bir çevresel sorun haline gelmektedir. Şehirlerde kentsel dönüşüm faaliyetleri neticesinde ortaya çıkan beton atıklarının depolanması ve yönetimi geniş araziler ile finansman gerektirmektedir. Bu sebeple beton atıklarının geri dönüşümü konusu oldukça önem kazanmıştır. Yıkım atıklarının yol inşaatları veya çöp sahaları boyunca bertaraf edilmesine yönelik uygulamalar son yıllarda yaygınlaşsa da bu yaklaşımların ekoloji ve ekonomi optimizasyonu çerçevesinde fayda/maliyet oranı yüksek olamayabilmektedir. Bu nedenle beton atıklarının dönüşümüne ve mühendislik uygulamalarında kullanımına yönelik çevre dostu yaklaşımlar günümüz bilimsel çalışmalarına konu olmaktadır. Bu çerçevede en önemli aşama beton atıklarının tamamının geri kullanımüdür. Ancak bilimsel araştırmalarının geldiği aşamada beton atıklarının tamamının kullanımının yanı sıra bu atıkların yeni betonların üretiminde agrega olarak kullanımı detaylandırılmaktadır. (H Dilbas, Şimşek, & Çakır, 2014; İsmail& Ramli, 2013a; Martín-Morales, Zamorano, Ruiz-Moyano, & Valverde-Espinosa, 2011).

Deprem kuşağı içerisinde bulunan ülkelerde yapıların yenilenmesine yönelik dönüştürülmesi ve bu dönüşümler sonucunda ortaya çıkan atıkların geri kazanılmış agrega olarak değerlendirilmesi (RA: Recycled Aggregate-geri dönüştürülmüş agrega) süreçleri çalışılmaktadır. (Collins & P. J. Nixon, 2003; İsmail& Ramli, 2013b; M. C. Rao, Bhattacharyya, & Barai, 2019; van Gerven et al., 2005; J. Xiao, 2018). Ülkemizde TÜRKİYE CUMHURİYETİ 12. Kalkınma Planında (2024-2028) içerisinde "Afetlere Dirençli Yaşam Alanları, Sürdürülebilir Çevre" başlığı altında 3.4.5 Çevrenin Korunması kapsamında "Sürdürülebilir tüketim ve üretime ilişkin mevcut en iyi çevresel uygulamaların yaygınlaştırılmasına yönelik çalışmalar yürütülecektir." ifadesi ile "Tüm atıkların insan sağlığına ve çevreye olan zararlı etkilerinin en aza indirilebilmesi için havaya, suya ve toprağa salınımına ilişkin gerekli tedbirler alınacaktır." ifadesi yer almaktadır (T.C. Cumhurbaşkanlığı, 2023). Ayrıca, 12. Kalkınma Planı'nın 870.3. maddesinde "Çevresel, sosyal ve yönetimsel kriterler çerçevesinde uluslararası finans piyasalarına katılım hızlanacak, Yeşil Dönüşüme yönelik yenilikçi ve sürdürülebilir finansman araçları geliştirilecektir." şeklinde politika belirlenmiştir. Dolayısıyla beton atıklarının geri dönüştürülmesi ve ekonomiye kazandırılması hem çevresel olumlu etkileri açısından hem de sürdürülebilir finansman sağlaması açısından oldukça önem kazanmıştır. 6306 sayılı "Afet Riski Altında Alanların Dönüştürülmesi Kanunu" (Turkish Law 6306, 2012) çerçevesinde kentsel dönüşüm çalışmalarının oldukça hız kazandığı düşünül-



düğünde beton atıklarının dönüştürülmesi ve yeni beton üretiminde kullanılmasına yönelik yaklaşımların bilimsel açıdan irdelenmesi gerekli hale gelmiştir. Çünkü doğa kaynaklı afetler ve kentsel dönüşüm çalışmaları sonucunda milyonlarca ton beton atığı oluşmaktadır. Özellikle asrın felaketi 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş merkezli depremlerde çok büyük alana yayılan beton atıkları ortaya çıkmıştır. Ayrıca, ülkemiz bir deprem kuşağında yer aldığı için depremler sürekli meydana gelmekte ve beklenen büyük depremlere yönelik hazırlıklar hızla devam etmektedir. Bu kapsamda, dönüştürülmesi tamamlanan ve gereken binlerce mevcut yapı stoku bulunmaktadır. Bu hususlar, beton atıklarının geri dönüşümünün ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Çünkü beton atığı çağımızın en büyük çevresel kirliliğini oluşturmaktadır. Bununla birlikte, beton atıklarının içerisinde yer alan endüstriyel ürünler bu kirliliğin derecesini artırmakta, bunun yanında diğer atıklardan daha fazla ekonomik bir öneme sahip olmaktadır. Günümüzde bu alanda birçok akademik çalışma gerçekleştirilmektedir. Ancak, beton atıklarının yeni beton üretiminde kullanılması bir optimizasyon problemidir. Çünkü karışım içeriğindeki her oran istenilen beton hedefinden oldukça farklı sonuçlar ortaya çıkarabilmektedir. Bununla birlikte, henüz gerçek mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmayan bu betonun mekanik ve durabilite özelliklerini iyileştirilmesine yönelik çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kitap bölümünde öncelikle beton atıklarının geri dönüşümünün önemi ifade edildikten sonra, çok detaylı literatür araştırmasıyla bu betonun konvansiyonel betona kıyasla avantajları ve dezavantajları, beton atıklarının geri dönüşüm prosesi ve en optimum karışım oranlarına ilişkin önerileri içeren bölümlere yer verilmiştir.

## **2. Bilimsel Araştırmalarda Geri Dönüştürülmüş Beton ve İyileştirme Prosesi**

Ülkemizde 2000’li yılların başında RA ile ilgili çalışmalar ve yıkım atıklarından RA üretimi başlamış olsa da ortaya çıkan yöntemlerin endüstride kullanımı oldukça sınırlıdır (Hasan Dilbas, 2014, 2020, 2021, 2022; Hasan Dilbas & Çakır, 2020; Erdal, 2011; Saribas, Goksu, Binbir, & İlki, 2019, 2021; Tüfekçi, 2011; Tüfekçi et al., 2017). Çalışmalar beton atıklarından elde edilen agregalardan (RA) oluşan betona (RAC: Recycled Aggregate Concrete – Geri Dönüştürülmüş Agregalı Beton) ve yapısal elemanlara odaklanmış ve çeşitli uygulamalar geliştirilmiştir. Ancak RA’nın betonda yüksek oranlarda kullanılabilirliğinin mümkün olmadığı ve %30’a kadar kullanımının mümkün olabileceği rapor edilmiştir (H Dilbas et al., 2014; Erdal, 2011; Tüfekçi, 2011; Tüfekçi et al., 2017). Bununla birlikte literatürde bu kullanım oranının artırılabilmesine yönelik farklı yöntemler geliştirilmiştir (H Dilbas, Çakır, & Atiş, 2019; H Dilbas et al., 2014; Hasan Dilbas & Çakır, 2020, 2021). Literatürde gerçekleştirilen tüm çalışmaların beton atıkların geri dönüşümü ve yeni beton üretiminde daha büyük oranda kullanılabilmesini motivasyon olarak aldığı görülmüştür. Yapı yıkıntı atığı ve yeni betonda bertaraf edilmesi üzeri-

ne yapılan literatür çalışmaları burada kısaca özetlenmiştir. RAC'nin fiziksel (örneğin, (Cantero, Sáez del Bosque, Matías, & Medina, 2018; Hu, Tang, Li, Li, & Tam, 2019)), mekanik (örneğin, (Cabral, A. E. B., Schalch, V., Molin, 2010; Corinaldesi, 2010; M. Rao, Bhattacharyya, & Barai, 2010; Riaz, Hameed, Ilyas, Akram, & Siddiqi, 2015; J. Z. Xiao, Li, & Zhang, 2005)), kalıcılık (örneğin, (Dhir et al., 2019; Guo et al., 2018; Ridzuan, Ibrahim, Ismail, & Diah, 2005; Thomas, Setién, Polanco, Alaejos, & Sánchez de Juan, 2013; Vieira, 2013; Xuan, Zhan, & Poon, 2017)), özelliklerini beton ve betonarme boyutunda incelemiş, ayrıca RA'nin yaşam döngüsü (örneğin, (Coelho & de Brito, 2013; Kurda, de Brito, & Silvestre, 2020; Lotfi & Rem, 2018; Quattrone, Angulo, & John, 2014; Teh, Wiedmann, Castel, & de Burgh, 2017)) üzerine çalışmalar yürütülmüştür. Yeni beton üretiminde RA ve doğal agrega (NA: Natural Aggregate- doğal agrega) oranlarının %30 RA + %70 NA olması ile C32/40 dayanım sınıfına kadar dayanım elde edilebileceği (Corinaldesi, 2010), RAC'nin Poisson oranının doğal agregalı beton (NAC) ile benzerlik gösterdiği ve 0,14-0,20 aralığında olduğu (Martínez-Lage, Martínez-Abella, Vázquez-Herrero, & Pérez-Ordóñez., 2012), RAC'nin su emme değerinin NAC'den yüksek ve RAC'nin yoğunluğunun NAC'den düşük olduğu ve burada RA'nın NA'ya kıyasla düşük yoğunluklu ve yüksek su emme özelliğine sahip olmasının etkili olduğu (J. Xiao, 2018), RAC'nin elastisite modülünün NAC'den düşük olduğu ve RA'nın boşluklu ve kırıklı yapısının NA'dan daha dirençsiz olduğu, ayrıca RA'nın matris fazı ile güçlü bir ara geçiş bölgesi oluşturamamasının etkili olduğu (Belén, Fernando, Diego, & Sindy, 2011; Wang, Zhao, Liu, & Li, 2014; J. Xiao, Li, Sun, Lange, & Shah, 2013), RAC'nin dayanıklılığının (örneğin, kuruma büzülmesi, klorür geçirgenliği, karbonatlaşma) da NAC'den önemli ölçüde düşük olduğu (Roy, Ahmad, Rahman, & Salauddin, 2023; Tran, Mouret, Cassagnabère, & Phung, 2022) belirtilmektedir. Diğer yönden, yapılan çalışmalar RAC'nin NAC'ye kıyasla görecel olarak düşük özelliklerinin (örneğin, kalıcılık) iyileştirilebileceğini kanıtlamıştır (Bahraq, Jose, Shameem, & Maslehuddin, 2022; Katz, 2004; Purushothaman, Amirthavalli, & Karan, 2015; Spaeth & Tegguer, 2013). RAC'nin düşük test sonuçları elde edilmesinde RA'nın zayıf özelliklerinin rol oynadığı ve RA'daki zayıf yapıyı eski harç kalıntısı (AOM: Attached Old Mortar – Eski Harç Kalıntısı) içeriğinin etken olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, RA'daki eski harç kalıntısına rağmen, RA ve RAC' de özellik iyileştirme mümkündür ve olumlu sonuçlara ulaşılabilmektedir. RA ve RAC kalitesinin iyileştirilmesi için geliştirilmiş/önerilen teknikler agrega boyutunda ve beton boyutunda olmak üzere iki gruba ayrılabilir ve burada RA iyileştirme yaklaşımları ise iki gruptur:

1) Atık betondaki harcın güçlendirilmesi (örneğin, puzolan çamuru emdirme (silis dumanı, uçucu kül, vb.), polimer emdirme, karbonatlaşma (Shi et al., 2016)).

2) Atık betondaki harcın RA'dan giderilmesi (örneğin, mekanik öğütme

(bilyeli değirmen, mekanik aşındırma, vb.), asitte çözme (hidroklorik asit, sülfirik asit, vb.), ısıtarak ayrıştırma, mikrodalgayla ayrıştırma (H Dilbas et al., 2019)).

Yöntemlerin farklı avantajları/dezavantajları olmasına rağmen, RA'yı mekanik/mikrodalga ile iyileştirme düşük karbon emisyonu ve yöntemlerin düşük enerji tüketimi gibi çevresel etki parametreleri açısından dikkat çekici olduğu görülmektedir (Quattrone et al., 2014). Ek olarak, optimize edilmiş mekanik iyileştirme kullanımı (özellikle, optimize edilmiş sayıda çelik bilye ve tambur dönüşü kullanılan bilyeli değirmen kullanımı), herhangi bir optimizasyon yapılmadan mekanik iyileştirme kullanılmasından daha etkili bir yol olduğu da bilinmektedir (Çakır & Dilbas, 2021; H Dilbas et al., 2019; Hasan Dilbas, Çakır, & Yıldırım, 2020). Atık özelliğine göre etkili bir optimizasyon yapılması ve optimize bir yöntem kullanımı burada dikkatleri çekmektedir. Diğer yünden, düşük RAC özellikleri için beton boyutunda beton kalitesi artırma yöntemleri liste olarak sıralanabilir ve karışımda mineral katkı kullanımı (silis dumanı, uçucu kül, cüruf, vb.) (Corinaldesi & Moriconi, 2009), eşdeğer harç hacmi yöntemi (Hasan Dilbas & Güneş, 2021), iki aşamalı karıştırma yöntemi (Tam, Gao, & Tam, 2005) listedeki bazı yaklaşımlardır. Yukarıda anlatılan geliştirmelere ek olarak, çimento dozajının artırılması (Etcheberria, Marí, & Vázquez, 2007) ve su-bağlayıcı-oranının RAC için düzenlenmesi (Paine & Dhir, 2010) yapılan çalışmalarda rapor edilen RAC ve NAC'nin aynı performans elde edilmesi için önerilen bazı yaklaşımlardır.

Fakat, RAC'nin performansını karışım parametrelerini değiştirerek/düzenleyerek ve iyileştirme yöntemi kullanarak vb. şekilde araştıran optimum parametreler öneren (örneğin, betonda optimum RA kullanım oranı, optimum mineral katkı kullanım oranı, hedef dayanım için optimum su-bağlayıcı-oranını, iyileştirme yönteminde optimum ısıtma süresi/sıcaklık değeri, bilyeli değirmende optimum bilye ve döngü sayısı/süresi, asitle iyileştirmede optimum asit konsantrasyonu) araştırmalara rağmen, bu yaklaşımlar kritik durumlar (deprem, sel, toprak kayması, vb.) anında/sonrasında hızlı ekipman erişimi eksikliği sebebiyle kullanılamayabilirler. Bu nedenle, hızlı ve etkili çözümlere sahip olmak daha uygun olabilecektir. Yukarıdaki anlatılan durumlardan dolayı bahsedilen iyileştirme yöntemlerini kullanmak yerine daha hızlı ve etkili çözümlere daha çok ihtiyaç olacaktır. Bu nedenle, bu kitap bölümünde, en optimum yöntemlerle tasarlanmış RAC'nin performansı incelenmekte/tartışılmakta/araştırılmakta ve böylece literatürde önerilen RAC'nin özelliğini iyileştiren performansını artıran karışım tasarım parametreleri ortaya konmaktadır (maks-min efektif tane çapı (Turkish Standards Institution, 2016; J. Xiao et al., 2012), efektif karışım agregası tane dağılımı (Hasan Dilbas, 2022), efektif çimento dozajı ve su-bağlayıcı-oranı (Chang, Huang, Lee, & Weng, 2011; J. Xiao et al., 2012), efektif akışkanlaştırıcı kimyasal katkı türü (Bravo, de Brito, Evangelista, & Pacheco, 2017), efektif karışım yöntemi (Hasan Dilbas & Gü-

neş, 2021), kütleme yöntemi (Liu, Farzadnia, Khayat, & Shi, 2021; Mechtcherine et al., 2021)). Bu kapsamda en optimum karışım oranının elde edilmesine yönelik de bir araştırma yapılmıştır. Örneğin, RA çapı 4 mm altında olması RA'nın bünyesinde çatlakların fisürlerin genellikle daha çok olmasını ve zayıf özellikler sağlayan eski harç (AOM) içeriğinin ince RA'da iri RA'ya kıyasla daha fazla olmasına yol açar (J. Xiao et al., 2012). Ayrıca, pompalanabilirlik için taze betonun maksimum dane çapının 22,5 mm olması gerekliliği bilinmektedir (Turkish Standards Institution, 2016). Bu kıstasları dikkate alarak bu çalışmada 4-16 mm RA üzerinde durulmuştur. Karışım agregası dane dağılımı etkisinin incelendiği bir çalışmada üst, ideal ve alt agrega dane dağılımları TS 802'ye göre incelenmiş ve üst agrega karışım eğrisinin RAC için daha yüksek basınç dayanımına sebep olduğu belirlenmiştir (Hasan Dilbas, 2022). Bu sebeple, TS 802'de belirtilen üst agrega karışım eğrisi bu kitap bölümünde dikkate alınacaktır. Diğer yönden başka bir çalışmada, minimum 4 mm çaplı RA'nın dikkate alınmasıyla ve %50'ye kadar RA kullanımıyla betonun 0,50 su-bağlayıcı-oranında tasarlanmasının optimal karışımlar vereceği belirtilmektedir (Chang et al., 2011; J. Xiao et al., 2012). Buna istinaden yapılacak RAC karışımlarında su-bağlayıcı oranı 0,50 olarak seçilecek ve RA kullanım miktarı en fazla %50 olarak belirlenecektir. Bravo ve ark. tarafından akışkanlaştırıcı tiplerinin araştırıldığı ve polikarboksilat esaslı katkının daha iyi işlenebilirlik sağladığı, böylelikle RA'nın çatlaklı ve kırıklı yapılarına çimento şerbetinin kolaylıkla girdiği ve netice itibarıyla polikarboksilat kullanılan RAC'nin mekanik özelliklerin diğer katkı kullanımı durumuna göre daha iyi olduğu rapor edilmektedir. Bu sebeple, bu kitap bölümünde polikarboksilat esaslı akışkanlaştırıcı önerilmiştir. Eşdeğer harç hacmi yöntemi (EVM: Equivalent Mortar Volume Method: Eşdeğer Harç Hacmi Yöntemi), kontrol betonundaki NA ve harç hacmi ile RAC'deki NA hacmi ve harç hacminin aynı olması koşuluna dayanarak geliştirilmiş bir karışım tasarımı yöntemidir (Hasan Dilbas & Güneş, 2021). Bu yöntem, betonun iskeletini oluşturan agreganın miktarının RAC'de korunmasını ve NAC ile aynı olmasını gerektirmektedir. Böylelikle talep edilen RAC dayanım değeri elde edilebilmektedir. Bu kitap bölümü kapsamında EVM bir karışım yöntemi olarak önerilmiştir. Beton karışımlar çimento esaslı birer kompozit olması nedeniyle hidrasyon ile sertleşme sürecine sahip olacaktırlar. Küremelerinin önemi bu noktada öne çıkacak ve kür yöntemi beton karışımlarının sertleşmelerinde ve dayanım/dayanıklılık kazanmalarında etkili olacaktır. Bu sebeple, içsel kütleme su kürü olmayan durumlarda önemli bir anahtar olabilecek ve akrilik esaslı süper absorban polimerin (SAP: Super Absorbant Polymer – Süper Emici Polimer) 100 katına kadar su emebildikleri göz önüne alındığında, karışımlarda SAP kullanımı neticesinde SAP ile içsel kütleme yapılabilmesi, bu kür sonucu standart su kürü olmaksızın betonların dayanım ve dayanıklılık kazanabildikleri bilinmektedir (Hasan Dilbas & Birdal, 2023; Hasan Dilbas, Birdal, Parim, & Güneş, 2023; Liu et al., 2021; Mechtcherine et al., 2021). Bu kitap bölümünde, en optimum RAC için SAP önerilmiş

ve SAP ile içsel kür sağlanarak dayanım dayanıklılık artışı elde edilebileceği öngörülmüştür. Literatürde RAC'deki performans artışı için önerilen yöntemlerin bir veya birkaçının bir araya gelmesi ile RAC'nin NAC ile aynı veya yakın dayanım/dayanıklılık özellikleri sergileyebileceği beklenmektedir. Bu kitap bölümünün en optimum karışım parametreleri önerisini sunması, çalışmanın özgün yönünü oluşturmakta ve diğer mevcut çalışmalardan ayrılmaktadır.

### 3. Geri Kazanılmış Agregalı Betonda Önerilen Optimum Parametreler

Bu kitap bölümünde esas alınan geri kazanılmış agregalı betonda kullanılacak içerik parametreleri literatürden alınmıştır. Bu içerik parametreleri için ayrı ayrı en optimum değerler önerilmiştir. Bu öneriler çok kapsamlı literatür araştırması ve yazarların bu kapsamda gerçekleştirmiş oldukları deneysel akademik çalışmalar neticesinde ortaya çıkmıştır. Her parametreye ilişkin detay tanımı ve en ideal beton elde edilmesi için dikkat edilecek açıklama Tablo 1'de sunulmuştur. Yapılan bu çalışmanın motivasyonu; beton atıklarının geri dönüşümü ile elde edilebilecek yeni beton üretimi süreçlerine yol gösterici olmak, araştırmacıların birçok parametreyi irdeleyerek çok fazla deney yapmaları yerine belli başlı parametrelere odaklanmalarını sağlamak ve sektörde bu kapsamda gerçekleştirilmesi planlanan üretim aşamalarına hız vermek şeklinde belirlenmiştir. Ayrıca, çalışmamız ile sürdürülebilir şehirler, sıfır atık projesi ve yeşil dönüşüm çalışmalarına da katkı sunulması amaçlanmıştır.

Tablo 1 Geri kazanılmış agregalı beton optimum tasarım parametreleri

Beton Tasarım Parametresi	Detay	Açıklama
⇒ NA ve RA için agrega boyutu	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>D_{\min} = 4 \text{ mm}</math></li> <li>• <math>D_{\max} = 22,5 \text{ mm}</math></li> </ul>	<p>Min. Agrega boyutu 4 mm olmalı, dane boyutu azaldıkça RA bünyesinde daha fazla kırık ve kusur bulundurmaktadır (J. Xiao et al., 2012).</p> <p>Maks. dane boyutu pompalanabilirlik açısından 22,5 mm olmalıdır (Turkish Standards Institution, 2016).</p>
⇒ RA eski harç kalıntısı miktarı	<ul style="list-style-type: none"> <li>• HCl ile çözme</li> </ul>	<p>RA bünyesindeki yapışmış eski harç kalıntısı miktarı 0,1 Molar HCl asitte 24 saatte çözme tekniği ile belirlenmelidir (Katkhuda &amp; Shatarat, 2017). RA'da bulunan eski harç kalıntısı miktarı aşağıda anlatılacak Eşdeğer Harç Hacmi Yöntemi karışım tasarımı yönteminde kullanılmaktadır.</p>

⇒ NA tipi ve agregası boyutu	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dere kumu / kırma kum</li> <li>• Doğal beton agregası</li> </ul>	Betonlarda 0-4 mm agregası olarak dere kumu/kırma kum kullanılabilir, 4-22,5 mm agregası olarak doğal beton agregası kullanılabilir. Agregalar TS 706'daki şartları sağlayan beton agregası olmalıdır (Turkish Standards Institution, 2009).
⇒ Agregası karışım eğrisi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Üst karışım eğrisi</li> </ul>	TS 802'de belirtilen mevcut 3 eğriye (alt, ideal ve üst eğri) ait basınç dayanımları RA içeren betonlar için deneylerde incelendiğinde, üst eğrinin daha yüksek dayanım verdiği belirlenmiştir (DİLBAS, 2022).
⇒ Su/bağlayıcı oranı	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Su/bağlayıcı oranı = 0,50</li> </ul>	Su/bağlayıcı üzerine yapılan çalışmalarda, 4 mm ve üzeri boyutta RA yaklaşık %50 dolaylarında betonda kullanılırsa, bu betonda optimum su/bağlayıcı oranı yaklaşık 0,50 olarak belirtilmekle birlikte (J. Xiao et al., 2012), 4 mm'den büyük RA'nın yaklaşık %42 civarında 0,50 su/bağlayıcı oranı seçimi ile optimal karışımlar elde edilebildiği rapor edilmektedir (Chang et al., 2011).
⇒ Kimyasal katkı tipi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polikarboksilik eter esaslı</li> </ul>	Dikkate alınan birçok akışkanlaştırıcı tiplerine kıyasla, RA içeren betonlarda en iyi test sonuçlarının polikarboksilat esaslı katkı ile sağlandığı rapor edilmektedir (Bravo et al., 2017).
⇒ Beton karışım yöntemi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eşdeğer Harç Hacmi Karışım Yöntemi (EVM)</li> </ul>	RA içeren betonlar üzerine yapılan araştırmada, dayanım sonuçları üzerine Eşdeğer Harç Hacmi Karışım Yöntemi (EVM)'nin olumlu katkısının olduğu da rapor edilmektedir (Hasan Dilbas & Güneş, 2021).
⇒ İçsel Kür Yöntemi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Süper absorban polimer ile içsel kürlenme</li> </ul>	Betonda içsel kür SAP ile sağlanabilmektedir (Hasan Dilbas & Birdal, 2023; Hasan Dilbas et al., 2023; Köseömur, Birdal, & Dilbas, 2023; Liu et al., 2021). Geri kazanılmış agregalı betonda da aynı etkinin olacağı öngörülmektedir.

#### 4. Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Atık betonun geri kazanılmış agregaya olarak betonda kullanılması durumu beton özelliklerini olumsuz etkileyebilmektedir (örneğin, basınç dayanımını düşürmesi). Diğer yönden, mevcut literatürde birçok çalışmada rapor edilen optimum karışım tasarım parametreleri sınırlı sayıda ele alınmaktadır. Ancak, geri kazanılmış agregalı beton için birçok parametrenin optimize edilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, atık betondan elde edilen agreganın da çeşitli mekanik iyileştirme yöntemleriyle hazırlanması gerekmektedir. Bu kitap bölümünde, çok detaylı literatür araştırması ve yazarların konuyla ilgili deneysel tecrübeleri esas alınarak geri kazanılmış agregalı betona ilişkin içerik parametrelerinin büyük bir kısmına ilişkin optimum değerler önerilmiştir. Bu değerler kullanıldığında, standart karışımlara oranla daha yüksek performanslı geri kazanılmış agregalı beton elde edilebileceği öngörülmüştür. Çalışma ile farklı nedenlerle ortaya çıkabilecek milyonlarca ton beton atığının değerlendirilerek yeni beton üretiminde kullanılmasına yönelik basitleştirilmiş bir tasarım algoritmasının ortaya çıkartılması hedeflenmiştir. Bu tasarım algoritması ile bilim insanlarının çok vakit alan ve iş yükü fazla olan deneysel çalışmalarını optimum değerler arasında sınırlandırarak hedeflerine daha az deneyle ulaşmasına imkân sağlanması amaçlanmıştır. Ayrıca, sektörel bazda henüz yaygınlaşma aşaması tamamlanmamış geri kazanılmış agregalı beton üretim detay proseslerinde sadeleştirme yapılarak çalışmalara hız verilebileceği düşünülmüştür. Bu kitap bölümünün ana motivasyonunu; inşaat sektörünün çevre ve sürdürülebilir ekonomik kalkınma ile kesiştiği noktada fayda/maliyet açısından büyük katkılar sunabileceği düşünülen beton atıklarının geri dönüştürülmesi süreçlerine katkı sunulabilmesi oluşturmaktadır.

## KAYNAKÇA

- Bahraq, A. A., Jose, J., Shameem, M., & Maslehuddin, M. (2022). A review on treatment techniques to improve the durability of recycled aggregate concrete: Enhancement mechanisms, performance and cost analysis. *Journal of Building Engineering*, 55, 104713. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104713>
- Belén, G.-F., Fernando, M.-A., Diego, C. L., & Sindy, S.-P. (2011). Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2335–2342. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.031>
- Bravo, M., de Brito, J., Evangelista, L., & Pacheco, J. (2017). Superplasticizer's efficiency on the mechanical properties of recycled aggregates concrete: Influence of recycled aggregates composition and incorporation ratio. *Construction and Building Materials*, 153, 129–138. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.103>
- Cabral, A. E. B., Schalch, V., Molin, D. C. C. D. (2010). Mechanical Properties Modeling of Recycled Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials*, 24, 421–430.
- Çakır, Ö., & Dilbas, H. (2021). Durability properties of treated recycled aggregate concrete: Effect of optimized ball mill method. *Construction and Building Materials*, 268, 121776. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121776>
- Cantero, B., Sáez del Bosque, I. F., Matías, A., & Medina, C. (2018). Statistically significant effects of mixed recycled aggregate on the physical-mechanical properties of structural concretes. *Construction and Building Materials*, 185, 93–101. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.060>
- Chang, C. Y., Huang, R., Lee, P. C., & Weng, T. L. (2011). Application of a weighted Grey-Taguchi method for optimizing recycled aggregate concrete mixtures. *Cement and Concrete Composites*, 33(10), 1038–1049. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.06.005>
- Coelho, A., & de Brito, J. (2013). Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – Part I: Energy consumption and CO2 emissions. *Waste Management*, 33(5), 1258–1267. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2013.01.025>
- Collins, R. J., & P. J. Nixon. (2003). *Implications of the harmonisation of construction product standards for the use of recycled and secondary aggregates*. Retrieved from Banbury, UK:
- Corinaldesi, V. (2010). Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1616–1620. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.031>
- Corinaldesi, V., & Moriconi, G. (2009). Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Construction and Building Ma-*



- terials*, 23(8), 2869–2876. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.004>
- Dhir, R. K., de Brito, J., Silva, R. V, Lye, C. Q., Dhir, R. K., de Brito, J., ... Lye, C. Q. (2019). Recycled Aggregate Concrete: Durability Properties. *Sustainable Construction Materials*, 365–418. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100985-7.00010-8>
- DİLBAS, H. (2022). An investigation on effect of aggregate distribution on physical and mechanical properties of recycled aggregate concrete (RAC). *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 7(2), 108–118. Retrieved from <https://doi.org/10.47481/jscmt.1106786>
- Dilbas, H, Çakır, Ö., & Atiş, C. D. (2019). Experimental investigation on properties of recycled aggregate concrete with optimized Ball Milling Method. *Construction and Building Materials*, 212, 716–726. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.007>
- Dilbas, H, Şimşek, M., & Çakır, Ö. (2014). An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume. *Construction and Building Materials*, 61, 50–59. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.057>
- Dilbas, Hasan. (2014). *An Examination on Mechanical Behaviour of A Cantilever Beam Produced With Recycled Aggregate Concrete* (thesis). Graduate School of Natural and Applied Science, Yıldız Technical University. Retrieved from [tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/](http://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/)
- Dilbas, Hasan. (2020). *An Investigation of the Effect of Recycled Aggregate Use on Concrete Properties* (Ph.D.). Yıldız Technical University. Retrieved from [tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/](http://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/)
- Dilbas, Hasan. (2021). GERİ KAZANILMIŞ AGREGA İYİLEŞTİREN SU JETİ CİHAZI ve İYİLEŞTİRİLMİŞ GERİ KAZANILMIŞ AGREGA ELDE ETME YÖNTEMİ. Türkiye.
- Dilbas, Hasan. (2022). An investigation on effect of aggregate distribution on physical and mechanical properties of recycled aggregate concrete (RAC). *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 7(2), 108–118. Retrieved from <https://doi.org/10.47481/jscmt.1106786>
- Dilbas, Hasan, & Birdal, F. (2023). Süper Emici Polimer Katkılı Harçların Isıl İşlem ile Hava Küründe Mekanik Özellikleri. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 6(1), 45–50. Retrieved from <https://doi.org/10.51764/smutgd.1217163>
- Dilbas, Hasan, Birdal, F., Parim, C., & Güneş, M. Ş. (2023). Mechanical performance improvement of super absorbent polymer-modified concrete. *MethodsX*, 10, 102151. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102151>
- Dilbas, Hasan, & Çakır, Ö. (2020). Influence of basalt fiber on physical and mechanical properties of treated recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 254, 119216. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119216>

- Dilbas, Hasan, & Çakır, Ö. (2021). Physical and Mechanical Properties of Treated Recycled Aggregate Concretes: Combination of Mechanical Treatment and Silica Fume. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(6), 04021096. Retrieved from [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003658](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003658)
- Dilbas, Hasan, Çakır, Ö., & Yıldırım, H. (2020). An experimental investigation on fracture parameters of recycled aggregate concrete with optimized ball milling method. *Construction and Building Materials*, 252, 119118. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119118>
- Dilbas, Hasan, & Güneş, M. Ş. (2021). Mineral Addition and Mixing Methods Effect on Recycled Aggregate Concrete. *Materials*, 14(4), 907. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/ma14040907>
- Erdal, B. (2011). *Properties of concrete containing polypropylene fiber produced with recycled aggregate* (MSc). Yıldız Technical University Institute of Science, İstanbul, Turkey.
- Etcheberria, M., Mari, A. R., & Vázquez, E. (2007). Recycled aggregate concrete as structural material. *Materials and Structures*, 40(5), 529–541. Retrieved from <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9161-5>
- Guo, H., Shi, C., Guan, X., Zhu, J., Ding, Y., Ling, T. C., ... Wang, Y. (2018). Durability of recycled aggregate concrete – A review. *Cement and Concrete Composites*, 89, 251–259. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.008>
- Hu, Y., Tang, Z., Li, W., Li, Y., & Tam, V. W. Y. (2019). Physical-mechanical properties of fly ash / GGBFS geopolymer composites with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 226, 139–151. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.211>
- Ismail, S., & Ramli, M. (2013a). Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications. *Construction and Building Materials*, 44, 464–476. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.014>
- Ismail, S., & Ramli, M. (2013b). Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications. *Construction and Building Materials*, 44, 464–476. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.014>
- Katkhuda, H., & Shatarat, N. (2017). Improving the mechanical properties of recycled concrete aggregate using chopped basalt fibers and acid treatment. *Construction and Building Materials*, 140, 328–335. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.128>
- Katz, A. (2004). Treatments for the Improvement of Recycled Aggregate. *J. Mater. Civ. Eng.*, 16(December), 597–603. Retrieved from [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:6\(597\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:6(597))
- Köseömur, E., Birdal, F., & Dilbas, H. (2023). Sürdürülebilir Çimento Esaslı Kompozit (ECC) İle Üretilmiş Betonarme Çerçevelerin Yatay Yük Kapasitelerinin Analitik Olarak İncelenmesi. In *SİVAS 2. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar ve İnovasyon Kongresi* (pp. 801–811). Sivas.

- Kurda, R., de Brito, J., & Silvestre, J. D. (2020). A comparative study of the mechanical and life cycle assessment of high-content fly ash and recycled aggregates concrete. *Journal of Building Engineering*, 29, 101173. Retrieved 23 September 2020 from <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2020.101173>
- Liu, J., Farzadnia, N., Khayat, K. H., & Shi, C. (2021). Effects of SAP characteristics on internal curing of UHPC matrix. *Construction and Building Materials*, 280, 122530. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122530>
- Lotfi, S., & Rem, P. (2018). Recycling of End of Life Concrete Fines (0–4 mm) from Waste to Valuable Resources. In *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet* (pp. 224–232). Cham: Springer International Publishing. Retrieved from [https://doi.org/10.1007/978-3-319-59471-2\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-59471-2_28)
- Martínez-Lage, I., Martínez-Abella, F., Vázquez-Herrero, C., & Pérez-Ordóñez, J. L. (2012). Properties of plain concrete made with mixed recycled coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 37, 171–176. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.045>
- Martín-Morales, M., Zamorano, M., Ruiz-Moyano, A., & Valverde-Espinosa, I. (2011). Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. *Construction and Building Materials*, 25(2), 742–748. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.012>
- Mechtcherine, V., Wyrzykowski, M., Schröfl, C., Snoeck, D., Lura, P., de Belie, N., ... Igarashi, S.-I. (2021). Application of super absorbent polymers (SAP) in concrete construction—update of RILEM state-of-the-art report. *Materials and Structures*, 54(2), 80. Retrieved from <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01668-z>
- Paine, K. A., & Dhir, R. K. (2010). Recycled aggregates in concrete: a performance-related approach. *Magazine of Concrete Research*, 62(7), 519–530. Retrieved from <https://doi.org/10.1680/macr.2010.62.7.519>
- Purushothaman, R., Amirthavalli, R. R., & Karan, L. (2015). Influence of Treatment Methods on the Strength and Performance Characteristics of Recycled Aggregate Concrete. *American Society of Civil Engineers*, 27(5), 1–7. Retrieved from [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001128](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001128)
- Quattrone, M., Angulo, S. C., & John, V. M. (2014). Energy and CO2 from high performance recycled aggregate production. *Resources, Conservation & Recycling*, 90, 21–33. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.06.003>
- Rao, M., Bhattacharyya, S., & Barai, S. (2010). Influence of recycled aggregate on mechanical properties of concrete. In *5th Civil Engineering Conference in the Asian Region and Australasian Structural Engineering Conference 2010* (pp. 749–754). Sydney, Australia.
- Rao, M. C., Bhattacharyya, S. K., & Barai, S. V. (2019). *Systematic Approach of Characterisation and Behaviour of Recycled Aggregate Concrete*. Singapore: Springer Singapore. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/978-981-10-6686-3>
- Riaz, M. R., Hameed, R., Ilyas, M., Akram, A., & Siddiqi, Z. A. (2015). Mechanical

- Characterization of Recycled Aggregate Concrete. *Pak. J. Engg. & Appl. Sci.*, 16, 25–32.
- Ridzuan, A. R. M., Ibrahim, A., Ismail, A. M. M., & Diah, A. B. M. (2005). Durability performance of recycled aggregate concrete. In *International Conference on Global construction: Ultimate Concrete Opportunities: Achieving Sustainability in Construction* (pp. 193–202). London, UK.
- Roy, S., Ahmad, S. I., Rahman, Md. S., & Salauddin, M. (2023). Experimental investigation on the influence of induction furnace slag on the fundamental and durability properties of virgin and recycled brick aggregate concrete. *Results in Engineering*, 17, 100832. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100832>
- Saribas, I., Goksu, C., Binbir, E., & Ilki, A. (2019). Seismic performance of full-scale RC columns containing high proportion recycled aggregate. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(11), 6009–6037. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00687-0>
- Saribas, I., Goksu, C., Binbir, E., & Ilki, A. (2021). Shear-flexure interaction in RAC columns under simulated seismic actions. *Engineering Structures*, 231, 111746. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111746>
- Shi, C., Li, Y., Zhang, J., Li, W., Chong, L., & Xie, Z. (2016). Performance enhancement of recycled concrete aggregate – A review. *Journal of Cleaner Production*, 112, 466–472. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057>
- Spaeth, V., & Tegguer, A. D. (2013). Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2(2), 143–152. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.IJS-BE.2014.03.003>
- Tam, V. W. Y., Gao, X. F., & Tam, C. M. (2005). Micro-structural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cem Concr Res*, 35, 1195–1203.
- T.C. Cumhurbaşkanlığı. (2023). *12. Kalkınma Planı*. Retrieved from Ankara:
- Teh, S. H., Wiedmann, T., Castel, A., & de Burgh, J. (2017). Hybrid life cycle assessment of greenhouse gas emissions from cement, concrete and geopolymers in Australia. *Journal of Cleaner Production*, 152, 312–320. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.122>
- Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A., Alaejos, P., & Sánchez de Juan, M. (2013). Durability of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 40, 1054–1065.
- Tran, D. L., Mouret, M., Cassagnabère, F., & Phung, Q. T. (2022). Effects of intrinsic granular porosity and mineral admixtures on durability and transport properties of recycled aggregate concretes. *Materials Today Communications*, 33, 104709. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104709>
- Tüfekçi, M. M. (2011). *Geri Kazanılmış Agregaların Beton Üretiminde Yeniden Kullanılması*.

*labilirliğinin Araştırılması.* Yıldız Technical University.

- Tüfekçi, M. M., Çakır, Ö., Mansur, M., Özgür, T., Tüfekçi, M. M., & Çakır, Ö. (2017). An Investigation on Mechanical and Physical Properties of Recycled Coarse Aggregate (RCA) Concrete with GGBFS. *International Journal of Civil Engineering*, 15(4), 549–563. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s40999-017-0167-x>
- Turkish Law 6306. (2012). *The Law on Transformation of the Areas under Disaster Risk.* Retrieved from Ankara, Turkey:
- Turkish Standards Institution. (2009). *TS 706 EN 12620 Aggregates for concrete.* Retrieved from Ankara Turkey:
- Turkish Standards Institution. (2016). *TS 802 Design of concrete mixes.* Retrieved from Ankara Turkey:
- Van Gerven, T., Geysen, D., Stoffels, L., Jaspers, M., Wauters, G., & Vandecasteele, C. (2005). Management of incinerator residues in Flanders (Belgium) and in neighbouring countries. A comparison. *Waste Management*, 25(1), 75–87. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.09.002>
- Vieira, T. (2013). *Concrete incorporating fine recycled ceramic aggregates: Durability-related performance.* University of Lisbon.
- Wang, W., Zhao, L., Liu, Y., & Li, Z. (2014). Mechanical properties and stress–strain relationship in axial compression for concrete with added glazed hollow beads and construction waste. *Construction and Building Materials*, 71, 425–434. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.005>
- Xiao, J. (2018). *Recycled Aggregate Concrete Structures.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53987-3>
- Xiao, J., Li, W., Poon, C., Jianzhuang, X., Wengui, L. I., Chisun, P., ... Poon, C. (2012). Recent studies on mechanical properties of recycled aggregate concrete in China-A review. *Science China Technological Sciences*, 55(6), 1463–1480. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11431-012-4786-9>
- Xiao, J., Li, W., Sun, Z., Lange, D. A., & Shah, S. P. (2013). Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation. *Cement and Concrete Composites*, 37, 276–292. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.006>
- Xiao, J. Z., Li, J., & Zhang, C. (2005). Mechanical properties of recycled aggregate Concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1187–1194. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.020>
- Xuan, D., Zhan, B., & Poon, C. S. (2017). Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 84, 214–221. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2017.09.015>





## *Bölüm 2*

### **BETONARME ÇERÇEVENİN TEKRARLI YATAY YÜK ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞINDA MODELLEME PARAMETRELERİNİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

*Halit Erdem ÇOLAKOĞLU<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Öğr. Gör. Dr, Giresun Üniversitesi, Keşap Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Giresun erdem.colakoglu@giresun.edu.tr, 0000-0002-4498-3569

## 1. Giriş

Günümüzde hızla gelişen malzeme teknolojisi, beraberinde yapı imalatında kullanılan sistemlerin de gelişmesine sebep olmaktadır. Yapım sistemleri arasında en çok kullanılanı ise betonarme yapı sistemleridir. Betonarmenin yaygın olarak kullanılmasındaki en önemli faktörler; dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin yüksek olması ile yapım ve onarım maliyetlerinin düşük olmasıdır.

Betonarme bir binanın taşıyıcı sisteminin parçalarını oluşturan betonarme çerçeve, binanın kendi ağırlığının yanı sıra sabit veya ölü yük adı verilen düşey yükleri de güvenli bir şekilde taşımalı, ilave olarak kullanım amacına göre meydana gelecek hareketli yükler ile rüzgâr ve deprem yüklerine karşı performansının yüksek olması gerekmektedir.

Ülkemizin de içinde bulunduğu ve sık sık maruz kaldığı depremler bina türü yapıların tasarımında göz önünde bulundurulmuş en önemli etkenlerin başında gelmektedir. Depreme karşı dayanıklı yapı tasarımında taşıyıcı sistemlerin sünek davranış göstermesi istenmektedir. Bunun yanı sıra taşıyıcı sistemde yatay yer değiştirmeleri sınırlandıracak yeterli rijitliğin oluşturulması da en az süneklik kadar önemlidir (Ersoy ve Özcebe, 2001).

Son yıllarda malzeme teknolojisindeki gelişmelerin, bilgisayar teknolojisindeki gelişmelerle paralel olarak ilerlemesi sonucunda yapı ve elemanlarının sonlu eleman teknikleri kullanılarak modellenmesi ve çeşitli yapısal analizlerin gerçekleştirilmesi oldukça yaygın hale gelmiştir (Dede, 2006). Yapı ve yapı elemanlarının çeşitli sabit ve hareketli yükler ile deprem veya rüzgâr gibi yük etkileri altındaki davranışlarının incelenmesi için deneysel çalışmaların gerekliliği tartışılmazdır. Ancak, deneysel çalışmaların maddi boyutu ve harcanan zaman da göz ardı edilemeyecek kadar fazladır. Bu noktada sonlu eleman modelleme yöntemleri hem zamandan hem de maddi açıdan tasarruf sağlamaktadır. Sonlu eleman modellemelerinde ABAQUS ve ANSYS gibi birçok ticari paket programı kullanılabilir. Ancak bu programların kullanılarak betonarme çerçevelerin modellenmesinde gerçek davranışa uygun malzeme modellerinin kullanılması sonuçların doğruluğu açısından son derece önemlidir.

Sonlu eleman yöntemi ilk olarak 1967 yılında betonarme kirişlerin üzerinden betonarmeye uygulanmıştır (Wasti, 1990). Fanning (2001) yaptığı çalışmada normal betonarme kiriş ile T kesitli art gerilmeli betonarme kirişi sonlu eleman tekniği kullanarak modellemiş ve doğrusal olmayan analizini gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen yük – yerdeğiştirme eğrisi deneysel sonuçlara uygun olarak elde edilmiştir. Chansawat (2003), saf eğilme, kesme ve kesmeli eğilme etkisindeki betonarme kirişin karbon fiber malzeme kullanılarak güçlendirilmesi durumunu sonlu eleman metodu ile simüle etmiştir. Yapılan doğrusal ve doğrusal olmayan analiz sonuçlarının deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Farklı beton dayanım sınıfında-



ki betonarme kirişlerin eğilme davranışındaki değişimi incelemek amacıyla C25/30 ile C30/37 dayanım sınıfındaki betondan imal edilen betonarme kirişlerin doğrusal olmayan analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda beton dayanımının artmasının kirişin eğilme kapasitesi ile yerdeğiştirme kapasitesini arttırdığı belirlenmiştir (Öztemel ve Çolakoğlu, 2024).

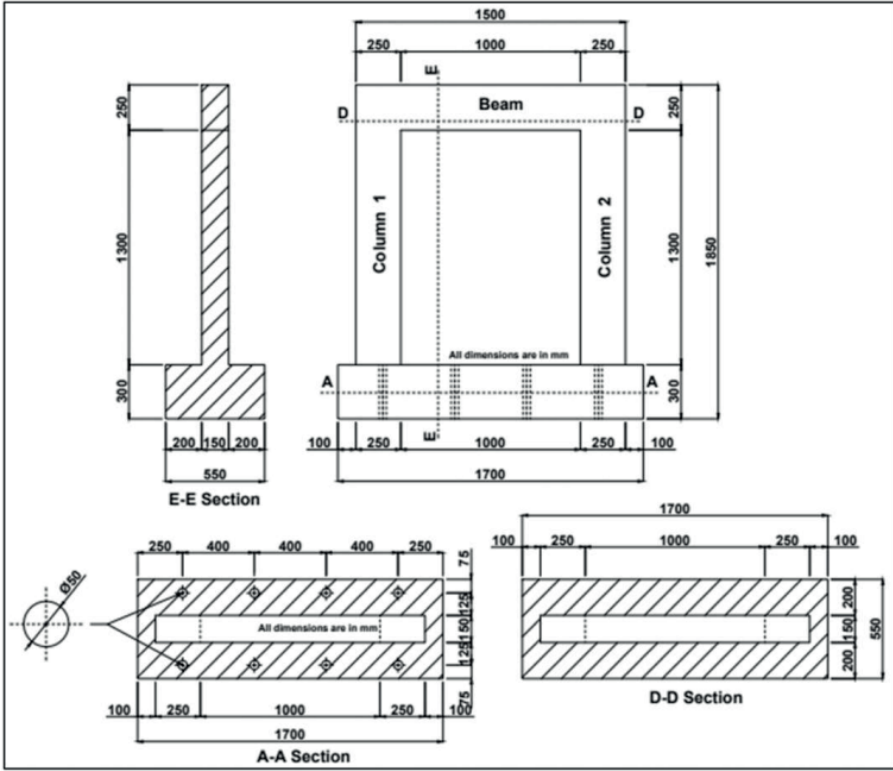
Literatürdeki çalışmaların birçoğunda da beton ile donatı arasındaki aderans ilişkinin sonlu eleman modellemesi üzerinde çalışılmıştır. Lundgren vd. (2002) beton ve donatı arasındaki aderansı modellemiş, sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılarak modellemenin doğruluğu ve kullanılabilir olduğu belirlenmiştir. Korozyon etkisine maruz kalmış betonarme kolonun deprem davranışını araştırmak amacıyla betonarme kolonun sonlu eleman modelinin oluşturulduğu bir çalışmada beton ile donatı arasındaki aderans, Bhargava vd., (2008) tarafından önerilen denklemler kullanılarak azaltılmış ve sonlu eleman modeline yansıtılmıştır (Çolakoğlu ve Öztemel, 2024).

Literatürdeki bazı çalışmalarda da ABAQUS programı kullanılarak yapılan sonlu eleman modellemede dilasyon açısı, dışmerkezlik, vizkozite gibi parametrelerin değişimi ele alınmıştır. Bu çalışmalarda (Ali vd., 2013, Zhou vd., 2016, Hamunzala ve Teklemariam, 2016, Sümer ve Aktaş, 2015) dilasyon açısı  $5^\circ$  ile  $45^\circ$  arasında seçilerek deneysel çalışmalarla uyum sağlanması hedeflenmiştir. Literatürde (Molina vd., 2015, Ren vd., 2015, Zhao vd., 2016) eksantrisite değeri genel olarak 0,1 olarak alınmış, bazı çalışmalarda da (Shahryari ve Esfandiari, 2015, Dere ve Köroğlu, 2017, Michal ve Andrzej, 2015, Ren vd., 2015, Labibzadeh vd., 2017) viskozite değeri  $1 \times 10^{-7}$  ile  $667 \times 10^{-3}$  arasında seçilmiştir.

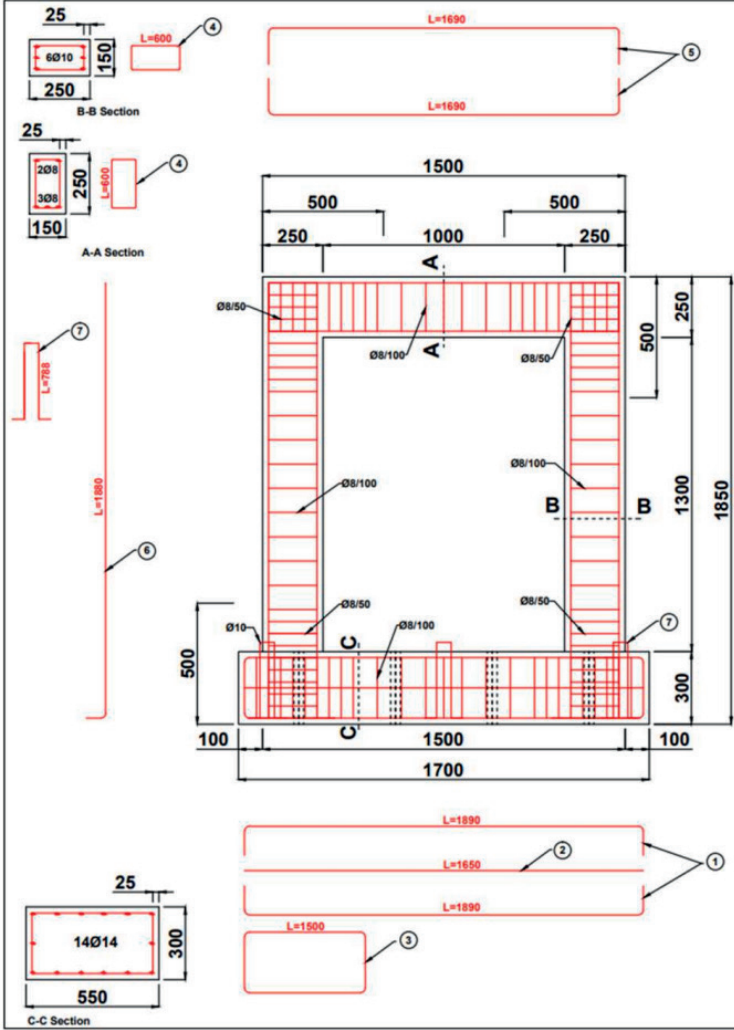
Bu çalışmada ABAQUS paket programı kullanılarak sonlu eleman modeli oluşturulan betonarme çerçevenin tekrarlı yatay yük etkisinde doğrusal olmayan davranışının araştırılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda ABAQUS paket programının kullanıcıdan istediği dilasyon açısı ile vizkozite parametreleri değişken olarak ele alınarak, bu parametrelerdeki değişimin betonarme çerçevenin davranışına etkisinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, ABAQUS paket programı kullanılarak sonlu eleman modeli yapılan betonarme çerçevenin tekrarlı yatay yük etkisinde doğrusal olmayan davranışı araştırılmıştır. Bu amaçla Şekil 1’de enkesit ve boyut özellikleri, Şekil 2’de donatı düzeni gösterilen betonarme çerçevenin sonlu eleman modeli oluşturulmuştur.



Şekil 1. Betonarme Kirişin Boyut ve Enkesit Özellikleri

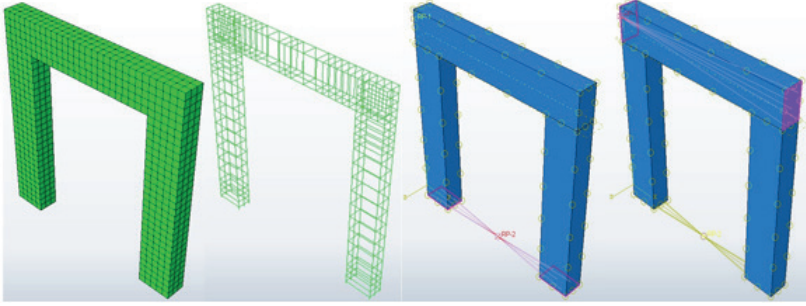


Şekil 2. Betonarme Çerçeve Donatı Planı

Sonlu elemanlar metodu ile hazırlanan ve uygulanan nümerik analizlerde eleman boyutunun küçültülmesi analizlerin sonuca ulaşabilmesi bakımından oldukça önemlidir. Sonlu eleman boyutundaki küçülme eleman sayısında artışa neden olmakla birlikte, analiz süresini uzatmakta, eleman boyutundaki artış ise analiz süresini kısaltarak, yakınsama hatalarında artış ile birlikte analizin tamamlanamamasına neden olmaktadır.

Betonarme çerçevenin sonlu eleman modelinin tasarlanmasında analiz sürelerinin mümkün olan en kısa zamanda gerçekleşmesi ve betonda oluşabilecek ezilme ve çatlaklarını en iyi şekilde simüle edebilmek amacıyla en uygun sonlu eleman ağının (mesh) belirlenmesine çalışılmıştır. Bu amaçla, betonar-

me elemanda sonlu eleman ağı 50mmx50mm olarak belirlenmiştir. Şekil 3'de betonarme çerçeve elemanın sonlu eleman ağına ayrılmış modelleri gösterilmiştir.



Şekil 3. Betonarme Çerçevenin Sonlu Eleman Modeli

Sonlu eleman modelinde eleman sayısını arttırmamak adına betonarme çerçevenin temel kısmı modellenmemiştir. Bunun yerine her iki kolon alt ucundaki tüm düğüm noktaları RP-2 olarak adlandırılan referans noktasına ankastre olarak mesnetlenmiştir.

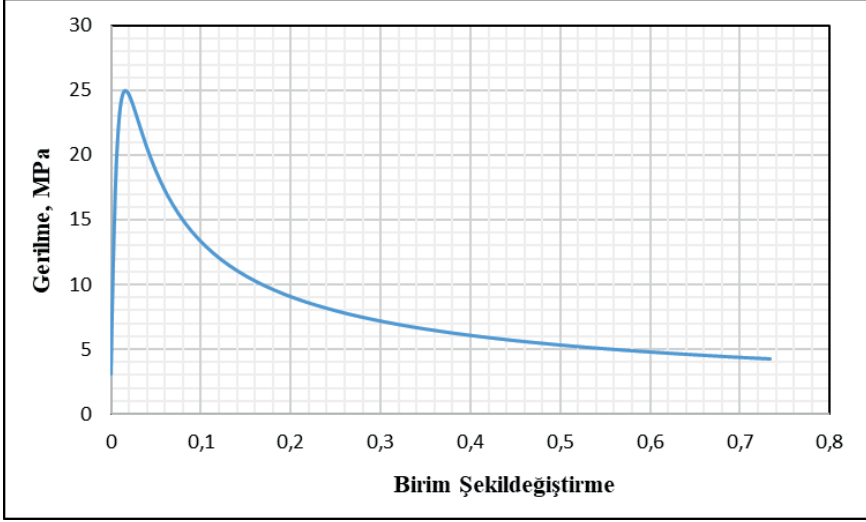
Modelde kiriş her iki uç bölgesindeki tüm düğüm noktaları seçilerek RP-1 olarak adlandırılan referans noktasına tekrarlı yatay yük uygulanmıştır. Böylece yatay yükün betonarme çerçeveye eşit bir şekilde dağıtılması amaçlanmıştır (Şekil 3). Betonarme çerçevenin sonlu eleman modelinde kullanılan beton ve çelik donatının mekanik özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Sonlu Eleman Modellemede Kullanılan Malzeme Özellikleri

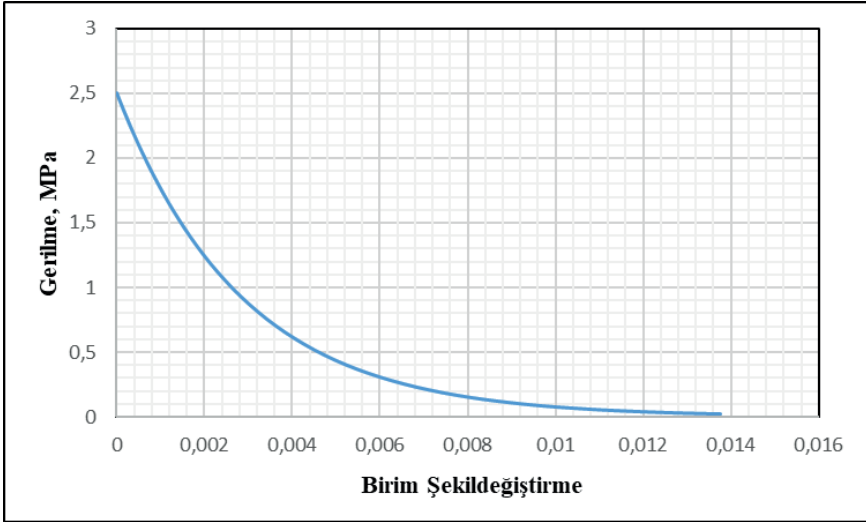
Malzeme Türü	Dayanım Sınıfı	Elastisite Modülü (MPa)
Beton	C30/37	26400
	C40/50	27600
Çelik	B420Ç	210000

Betonarme çerçevenin sonlu eleman modelinde hem beton hem de çelik malzemenin gerçek davranışını en doğru şekilde temsil edecek malzeme modellerinin seçilmesi çalışmanın güvenilirliği açısından son derece önemlidir. ABAQUS paket programı beton malzeme için; beton hasar plastisite, beton yayılı çatlak ve beton kırılğan çatlak olmak üzere üç farklı malzeme modelinin tanımlanmasına olanak vermektedir. Bu çalışmada betonarme çerçeve elemanın beton kısmı için basınç altında ezilme ve çekme etkisinde çatlama davranışını en iyi şekilde yansıtabilen CDP (Concrete Damage Plasticity Model)

malzeme modeli kullanılmıştır. Buna göre sonlu eleman modellemede betonun basınç etkisindeki gerilme – birim şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 4’de, çekme etkisindeki gerilme – birim şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 5’de gösterilmiştir.



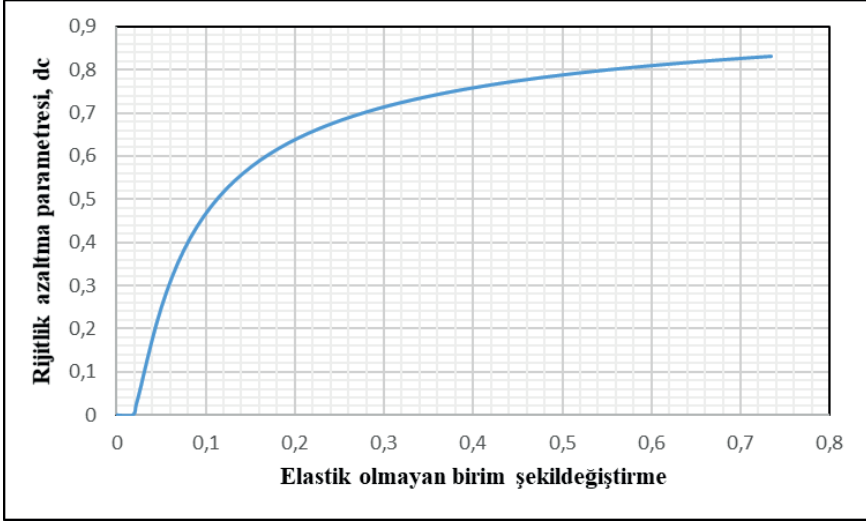
Şekil 4. Betonun Gerilme – Birim Şekildeğiştirme Eğrisi (Basınç için)



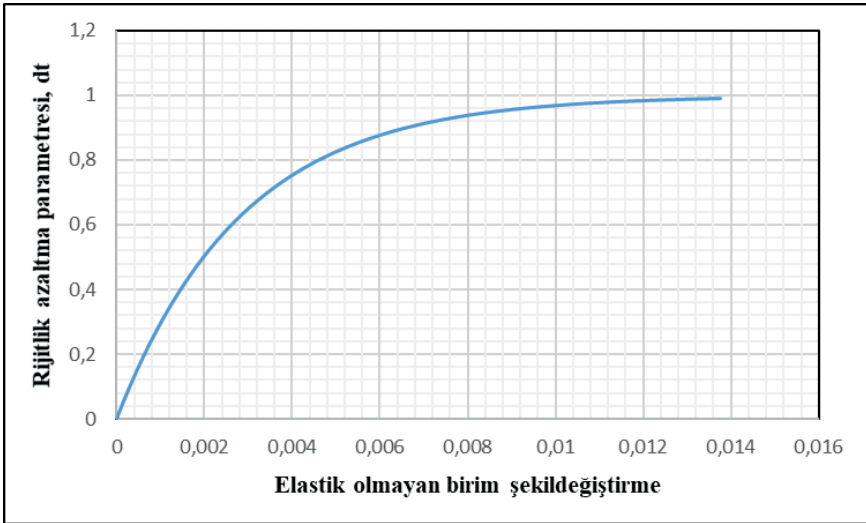
Şekil 5. Betonun Gerilme – Birim Şekildeğiştirme Eğrisi (Çekme için)

Tekrarlı yatay yük etkisindeki betonarme çerçevede beton malzemede meydana gelecek rijitlik kayıpları ABAQUS programında basınç için “dc” ve çekme için “dt” ile simgelenen rijitlik azaltma parametresi ile temsil edilmekte-

dir. Betonarme çerçevenin sonlu eleman modelinde kullanılan rijitlik azaltma parametreleri Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 6. Sonlu Eleman Modelinde Rijitlik Azaltma Parametresi  $dc$



Şekil 7. Sonlu Eleman Modelinde Rijitlik Azaltma Parametresi  $dt$

ABAQUS paket programı betonarme çerçevenin sonlu eleman modelinde kullanılan CDP malzeme modeli için dilasyon açışı ( $\Psi$ ), dışmerkezlik ( $e$ ), vizkozite ( $\mu$ ) ve iki eksenli yükleme durumundaki akma gerilmesinin, tek eksenli yükleme durumundaki akma gerilmesine oranı  $f_{bo}/f_{co}$  olarak tanımlanmış

parametrelerin programa girilmesini gerektirmektedir.

Bu çalışmada betonarme çerçevenin tekrarlı yatay yük etkisindeki davranışı doğrusal olmayan sonlu eleman analizi yapılarak incelenmiştir. Sonlu eleman analizlerinde dilasyon açısı ve vizkozite parametreleri değiştirilerek sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan deney matrisi Tablo 2'de gösterilmiştir.

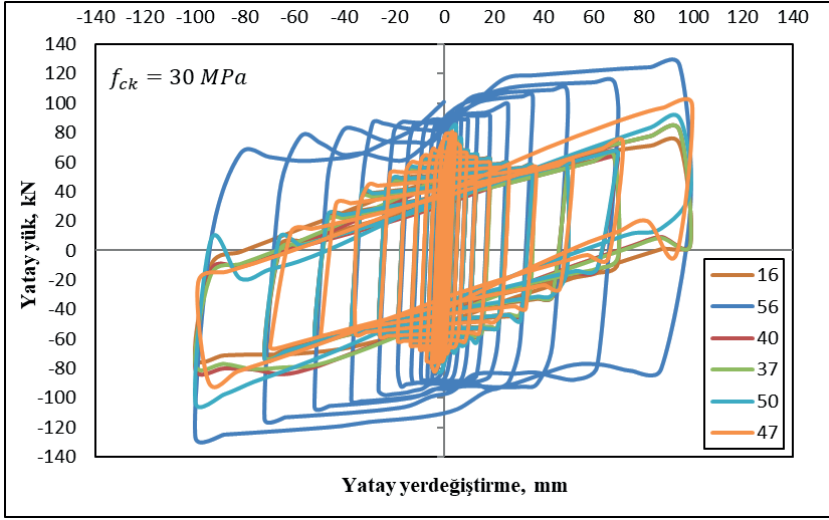
*Tablo 2. Sonlu Eleman Analizlerinde Kullanılan Deney Matrisi*

Grup No	Beton Basınç Dayanımı (MPa)	Vizkozite ( $\mu$ )	Dilasyon Açısı ( $\Psi$ )
1	30	0,00007	16
			37
			40
			47
			50
			56
2	40	0,0001	36
		0,0005	
		0,00007	

Betonarme çerçevenin sonlu eleman modelinde çelik malzeme için elastoplastik malzeme modeli kullanılmıştır.

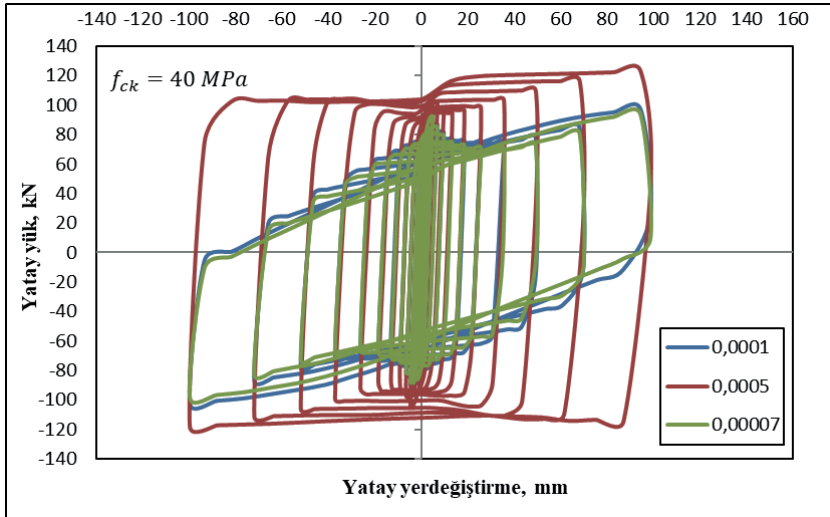
### 3. Bulgular

Betonarme çerçevelerin tekrarlı yatay yük etkisindeki davranışını belirlemek amacıyla yapılan sonlu eleman analizlerinden elde edilen yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrileri Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 8. Yatay Yük – Yatay Yerdeğiştirme İlişkisinin Dilasyon Açısı ile Değişimi

Dilasyon açısı ( $\psi$ ), kayma gerilmesi veya kayma şekildeğiştirmesi altında malzemedeki hacimsel değişimin sayısal olarak ifade edilmesidir. Dilasyon açısının değişimi, aynı şekildeğiştirmeler altında daha rijit ya da daha elastik bir malzeme davranışı ortaya çıkarabilir. Bu çalışmada dilasyon açısının  $16^\circ$ ,  $37^\circ$  ve  $40^\circ$  olduğu durumlarda betonarme çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesi yaklaşık 80 MPa iken,  $50^\circ$  de yatay yük taşıma kapasitesi 90 MPa olarak belirlenmiştir. Dilasyon açısının  $56^\circ$  olması halinde ise betonarme çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesi 125 MPa'a kadar yükselmektedir.



Şekil 9. Yatay Yük – Yatay Yerdeğiştirme İlişkisinin Vizkozite ile Değişimi



Viskozite ( $\mu$ ), sayısal analizlerde beton malzeme denklemlerinin vizko – plastik olarak düzenlenmesini sağlayan parametredir. Malzeme modellerinde, kesitlerde meydana gelen yumuşama ve rijitlik kayıpları, analizlerde yakınsama problemlerini oluşturmakta, viskozite parametresi bu tür problemlerin en aza indirgenmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada diğer tüm parametreler sabit tutulup, vizkozitenin üç farklı değeri için sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Vizkozitenin 0,00007 ve 0,0001 olduğu sonlu eleman analizlerinde betonarme çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesi yaklaşık 95 MPa olarak elde edilmiştir. Ancak vizkozite değerinin 0,0005 olduğu durumda yatay yük taşıma kapasitesi 130 MPa'ya kadar yükselmiş, çevrim alanları genişlemiştir.

#### 4. Sonuçlar ve Tartışma

Betonarme çerçevelerin ABAQUS programı kullanılarak gerçekleştirilen doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri sonucunda, dilasyon açısı ve vizkozite parametrelerindeki değişimin analiz sonuçlarını önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir.

Öyleki, sonlu eleman modellemede kullanılan dilasyon açısının  $40^\circ - 56^\circ$  aralığında seçilmesi halinde çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesinde %12,5 ile %56 arasında bir artışın meydana geldiği belirlenmiştir. Benzer şekilde vizkozite değerinin de 0,0001'den daha büyük seçilmesi halinde yatay yük taşıma kapasitesinde artışın olduğu belirlenmiştir. Bu artış %37 seviyelerine kadar çıkmaktadır.

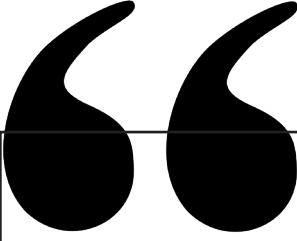
Bu sonuçlara göre ABAQUS programı kullanılarak yapılacak sonlu eleman analizlerinden elde edilecek verilerin güvenilirliği ve kullanılabilirliği için programa doğru veri girişi yapılmasının son derece önemli olduğu ortadadır. Bu doğrultuda sonlu eleman analizlerinin, deneysel çalışmalar için bir ön veri niteliği taşıyabileceği ve doğru kişiler tarafından doğru şekilde kullanıldığında deneysel çalışmalardan elde edilecek verilere yakın sonuçların elde edilebileceği söylenebilir.

## KAYNAKÇA

- Ersoy, U., Özcebe, G., (2001). Betonarme Temel İlkeler TS 500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine Göre Hesap, Evrim Yayınevi.
- Dede, F.T., (2006). Tersinir-Tekrarlanır Yükleme Altındaki Betonarme Çerçevesinin ANSYS Programı ile Nonlinear Sonlu Eleman Analizi.
- Lundgren, K., Gustavson, R., Manusson, J., (2002). Finite Element Modelling as tool to Understand the Bond Mechanisms, In “Proceedings Bond in Concrete - from research to standards”, Budapest, Hungary.
- Fanning, P., (2001). Nonlinear Models of Reinforced and Post-tensioned Concrete Beams, *Electronic Journal of Structural Engineering*, 2.
- Chansawat, K., (2003). Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates, PhD. Thesis, Oregon State University, USA
- Öztemel, M., Çolakoğlu, H.E. (2024), Farklı Beton Dayanım Sınıfının Betonarme Kiriş Davranışına Etkisinin Sayısal Olarak Araştırılması, Erol İSKENDER, *İnşaat Mühendisliği Alanında Uluslararası Akademik Çalışmalar*, (s. 67-79), Ankara: Serüven Yayınevi.
- Çolakoğlu, H. E., & Öztemel, M. (2024). Investigation of Linear and Nonlinear Behaviour of Reinforced Concrete Column Exposed to Corrosion Effect for Different Damage Limit Levels. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 7(3), 409-422. <https://doi.org/10.34248/bsengineering.1424973>
- Bhargava K, Ghosh AK, Yasuhiro M, Ramanujam S. (2008). Suggested empirical model for corrosion-induced bond degradation in reinforced concrete. *J Struct Eng*, 134(2): 221– 230.
- Ali, A., Kim, D. & Cho, S.G. (2013). Modeling of Nonlinear Cyclic Load Behavior of Ishaped Composite Steel-concrete Shear Walls of Nuclear Power Plants. *Nuclear Engineering and Technology*, 45(1), 89–98.
- Zhou, D., Liu, L., & Zhu, L. (2016). Lateral Load-carrying Capacity Analyses of Composite Shear Walls with Double Steel Plates and Filled Concrete with Binding Bars. *Journal of Central South University*, 23(8), 2083–2091.
- Hamunzala, B. & Teklemariam, D. (2016). Design of Thick Concrete Beams: Using NonLinear FEM, KTH Royal Institute of Tecnology, Master Thesis
- Sümer, Y. & Aktaş, M. (2015). Defining Parameters for Concrete Damage Plasticity Model. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 1(3), 149–155.
- Molina, L., Ruiz, M.A., Montes, E. & Alonso, M.C. (2015). Bond Strength of Galvanized Steel: Experimental and Numerical Study Based on Pull-out Tests. 3rd International Conference on Mechanical Models in Structural Engineering, 143–158.
- Ren, W., Sneed, L.H., Yang, Y. & He, R. (2015). Numerical Simulation of Prestressed

- Precast Concrete Bridge Deck Panels Using Damage Plasticity Model. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 9(1), 45–54.
- Zhao, G., Zhang, M., Li, Y., & Li, D. (2016). The Hysteresis Performance and Restoring Force Model for Corroded Reinforced Concrete Frame Columns. *Journal of Engineering*, 1–19.
- Shahryari, L. & Esfandiari, M. (2015). Comparison of Plasticity and Stiffness of Steel Shear Walls with Composite Steel Plate Shear Wall. *Journal of Structural Engineering and Geo-Techniques*, 5(3), 21–26.
- Dere, Y. & Koroglu, M.A. (2017). Nonlinear FE Modeling of Reinforced Concrete. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 6(1), 71–74
- Michał, S. & Andrzej, W. (2015). Calibration of the CDP Model Parameters in Abaqus, The 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM2015), Incheon, Korea.
- Labibzadeh, M., Zakeri, M. & Adel Shoaib, A. (2017). A New Method for CDP Input Parameter Identification of the ABAQUS Software Guaranteeing Uniqueness and Precision, *International Journal of Structural Integrity*, 8(2), 264–284.





## *Bölüm 3*

### **BİTKİSEL ATIK YAĞ İLAVESİNİN RET MODİFİYELİ BİTÜMÜN DÜKTİLİTESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

*Erhan Burak PANCAR<sup>1</sup>,  
Aytuğ KUMANDAŞ<sup>2</sup>*

1 Doç. Dr., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye. (ORCID: 0000-0002-7958-3434)

2 Arş. Gör., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye. (ORCID: 0000-0003-1765-9963)

## 1. Giriş

Asfalt kaplamalar günümüzde halen karayolu taşımacılığının vazgeçilmez elemanlarındandır. Ülkemizde karayollarının yaklaşık %95'inde kaplama türü olarak asfalt kaplamalar seçilmiştir (KGM, 2024). Dolayısıyla, ülkemiz asfalt kaplama endüstrisinde deneyim sahibi ve yetkin ülkeler arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, asfalt kaplamaların performansının ve hizmet ömrünün artırılması adına dünya genelinde halen akademik çalışmalar büyük bir hızla devam etmektedir .

Asfalt kaplamaların en kritik malzemelerinden olan bitüm, petrol damıtma işleminin bir yan ürünü olup sürdürülebilir bir malzeme olarak görülmektedir. Buna ilaveten, asfalt kaplama teknolojisinin geliştirildiği ilk dönemlerde asfalt kaplama içerisindeki bitüm trafik koşullarına karşı yeterli dayanımını sergileyebilmiştir. Ancak, günümüzde artan trafik hacmi, trafik yükleri ve olumsuz çevre koşulları sebebiyle asfalt kaplamalarda planlanan hizmet ömründen daha kısa sürede bozulmalar meydana gelmektedir (Kabadayı vd., 2024). Bitümün fiziksel ve reolojik özelliklerinin yeterli seviyede olmaması, bu bozulmaların sebepleri arasındadır. Bu noktadan yola çıkılarak, asfalt kaplamaların performansının artırılması adına bitümün performansının iyileştirilmesi konusu gündeme gelmiştir. Bu doğrultuda, araştırmacılar farklı katkı maddeleri ile bitümü modifiye ederek performansını geliştirmek adına birçok çalışma yürütmüşlerdir.

Bitüm için kullanılan katkı maddeleri arasında en sık tercih edilen malzeme türü polimerlerdir. Polimerlerin sağlamış olduğu esneklik ve sertlik, bitümün çeşitli özelliklerini iyileştirmektedir. Bitüm modifikasyonunda kullanılan polimerler genellikle elastomerler ve plastomerler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır (Şahan vd., 2023). Elastomerlerin en önemli örneği stiren-bütadien-stiren (SBS) polimeridir (Çavdar vd., 2024). Öyle ki, bu katkı maddesinin faydası dünya genelinde yapılan birçok çalışmada ispatlanmış ve kullanımına şartnamelerde bile yer verilmiştir. Öte yandan, diğer grup olan plastomerlerin en önemli örnekler arasında ise etilen-vinil-asetat (EVA) ve polietilen (PE) polimerleri bulunmaktadır (Airey, 2002). Bu gruptaki polimerlerin de faydası birçok çalışmada ifade edilmiş olup özellikle PE bazlı atık plastiklerin bitüm modifikasyonunda kullanılması çevrecilik açısından oldukça önemli bir husustur (Behnood & Gharehveran, 2019).

Günümüzde halen farklı polimerlerin bitüm üzerindeki etkisinin incelenmesi devam etmekte ve literatürde bitüm modifikasyonunda kullanılan polimer çeşitliliği giderek artmaktadır. Son zamanlarda, elastomerlerin ve plastomerlerin ortak dezavantajı olarak görülen depolama stabilitesi düşüklüğüne çözüm üretmek amacıyla reaktif polimerler üretilmiş ve bitüm modifikasyonunda kullanılmaya başlanmıştır (Bulatovic vd., 2014; Gama vd., 2018; Jasso vd., 2015). Bu grubun en önemli üyelerinden biri de reaktif etilen terpolimeri-

dir (RET). RET'lerin içerisinde bulunan fonksiyonel grupların bitüm ile etkileşime geçerek bir kimyasal bağ kurduğu varsayılmaktadır (Polacco vd., 2004). Bu sayede, RET modifiyeli bitümler yüksek sıcaklıklarda depolandığında dahi faz ayrışımı problemi gözlemlenmemektedir. Buna ilaveten, RET modifiyeli bitümler üzerine yapılan çalışmalar bitüme RET ilavesinin, bitümün yumuşama noktasını, duktilitesini, tekerlek izi direncini ve viskozitesi arttırırken, penetrasyonunu azalttığını göstermiştir. Bununla birlikte, RET ilavesiyle saf bitümün düşük sıcaklık performansı etkilenmemektedir.

RET modifiyeli bitümün düşük sıcaklık performansını ve işlenebilirliğini arttırmak adına, bu çalışmanın yazarları tarafından daha önce yapılan çalışmalarda, bitkisel atık yağın (BAY) RET modifiyeli bitüme ilavesi incelenmiştir (Kumandaş vd., 2022; 2024). Bu doğrultuda, RET modifiyeli bitüme farklı oranlarda BAY ilave edilerek, BAY ilavesinin bitümün yüksek ve düşük sıcaklık performansına etkisi incelenmiş olup, artan BAY ilavesiyle düşük sıcaklık performansının arttığı ancak yüksek sıcaklık performansını azaldığı belirtilmiştir. Öte yandan, BAY'nin RET modifiyeli bitümün tekerlek izi direnci üzerindeki etkisini detaylı bir şekilde incelendiği diğer çalışmada ise, %4 oranından daha fazla BAY ilavesinin RET modifiyeli bitümün direnç gösterebileceği trafik yükünü olumsuz yönde etkilediğini belirtilmiştir.

Yukarıda bahsedilen çalışmalardan farklı olarak bu çalışma kapsamında, RET modifiyeli bitüme BAY ilavesinin deformasyon davranışı üzerindeki etkisinin kuvvet ölçümlü duktilite deneyi ile detaylı bir şekilde belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, 50/70 penetrasyon sınıfındaki saf bitüme, bitümün ağırlığına %1.5 RET, %0.2 polifosforik asit (PPA) ve %2-8 oranlarında BAY ilave edilerek kompozit modifiyeli bitüm oluşturulmuştur. Hazırlanan modifiyeli bitümler kuvvet ölçümlü duktilite deneyine tabi tutularak deformasyon davranışları incelenmiştir.

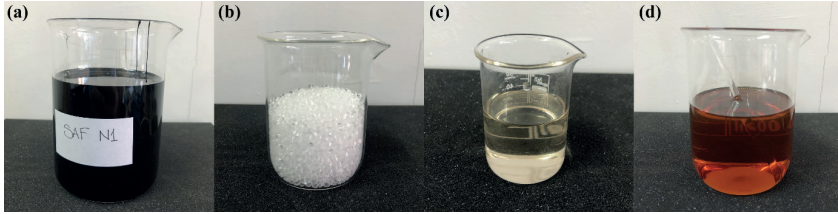
## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Malzemeler

Bu çalışma kapsamında öncelikli olarak Pen 50/70 penetrasyon sınıfında saf bitüm temin edilmiş olup bu malzeme çalışmanın ana malzemesidir. İlk aşamada saf bitümün performansının arttırılması için polimer modifikasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, saf bitüm 180 °C sıcaklığa ısıtılmış ağırlığına %1.5 oranında RET ilave edilerek 1000 dev/dk karıştırma hızında bir mekanik karıştırıcıda 2 saat süreyle karıştırılmıştır. Buna ilaveten, RET ile bitümün etkileşimini hızlandırmak adına katalizör olarak aynı sıcaklıkta %0.2 oranında PPA eklenmiş ve 30 dk ilave süreyle karıştırma işlemine devam edilmiştir. Ardından, hazırlanan karışım 90 dk süreyle 180 °C sıcaklıktaki bir etüve yerleştirilmiş ve kür işlemine tabi tutulmuştur. Böylece, RET modifiyeli bitümün (RETMB) hazırlanma işlemi tamamlanmıştır.

Farklı beherlerde hazırlanan RETMB'lere %2, 4, 6 ve 8 oranlarında BAY ilave edilerek kompozit modifiyeli bitümler hazırlanmıştır. BAY'nin sıvı halde olması ve bitüm ile uyumluluğunun yüksek olması sebebiyle bitüme ilave edilirken sıcaklık 150 °C olarak tercih edilebilmektedir. Bu doğrultuda, hazırlanan RETMB'ler 150 °C'ye ısıtılmış ve belirli bir oranda BAY ilave edildikten sonra mekanik karıştırıcıda 30 dk süreyle karıştırılmıştır. Böylece, çalışmada kullanılacak olan kompozit modifiyeli bitümler üretilmiştir.

Çalışmada kullanılan malzemelerin nereden temin edildiği ve modifiyeli bitüm hazırlama sürecine ait detaylı bilgilere bu çalışmanın yazarlarının yürüttüğü önceki çalışmalardan erişmek mümkündür (Kumandaş vd., 2022). Çalışmada kullanılan malzemelerin görünüşleri Şekil 1'de verilmiştir. Buna ilaveten, metin içerisinde kompozit modifiyeli bitümlerin daha kısa şekilde ifade edilebilmesi adına kodlandırmalar yapılmıştır. Bu doğrultuda, hazırlanan numunelere ait kodlandırmalar Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışma kapsamında kullanılan malzemeler: (a) Pen 50/70 saf bitüm, (b) RET, (c) PPA ve (d) BAY.

Tablo 1. Modifiyeli bitümlere ait kodlandırmalar.

İçerik	Numune Kodu
Saf bitüm	SAF
Saf bitüm + %2 RET + %0.2 PPA	RETMB
Saf bitüm + %2 RET + %0.2 PPA + %2 BAY	RET+2BAY
Saf bitüm + %2 RET + %0.2 PPA + %4 BAY	RET+4BAY
Saf bitüm + %2 RET + %0.2 PPA + %6 BAY	RET+6BAY
Saf bitüm + %2 RET + %0.2 PPA + %8 BAY	RET+8BAY

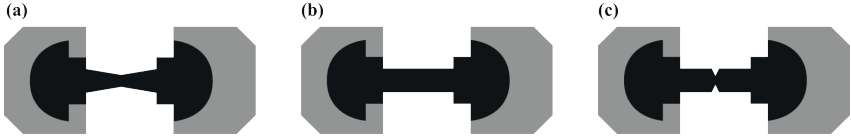
## 2.2. Metodoloji

### 2.2.1. Kuvvet Ölçümlü Düktilite Deneyi

Bitüm numunelerinin kopmadan uzayabilme kabiliyetlerinin belirlenmesinde geleneksel düktilite deneyi uzun yıllardır kullanılmaktadır. TS EN 13398, ASTM D113 ve AASHTO T51 standartlarında kendine yer edinmiş bu deney bitümün içsel kohezyonu, esnekliği ve bağlayıcılık özelliği hakkında araştırmacılara fikir verebilmektedir.

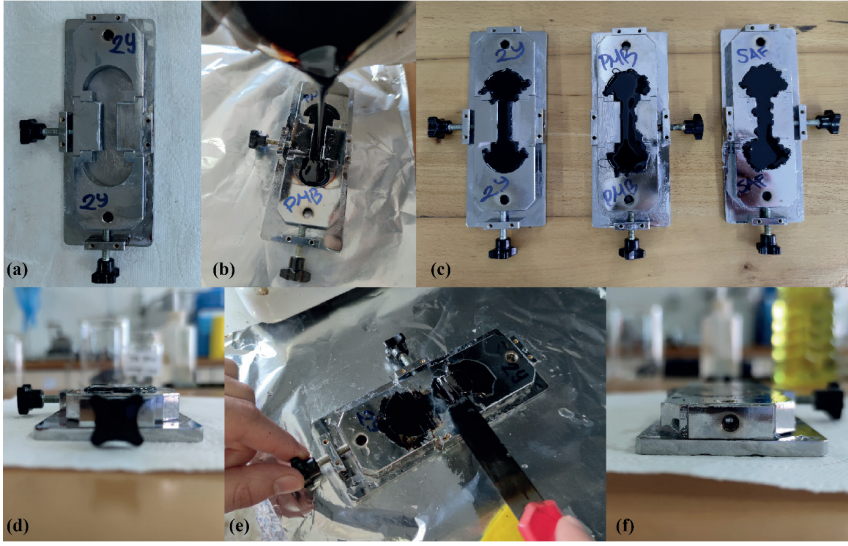


Deney için öncelikle bitüm numuneleri akışkan hale gelene kadar 135 °C sıcaklıktaki etüvde ısıtılır. Ardından hazırlanan numuneler belirli boyut ve biçimdeki düktilite kalıplarına dökülür. Burada şunu belirtmekte fayda vardır: düktilite deneyinde kullanılacak numune kalıplarına ait farklı geometriler mevcuttur (Şekil 2). Şekil 2 (a)'da gösterilen kalıp türü geleneksel düktilite deneylerinde kullanılırken, Şekil 2 (b)'deki kalıp geometrisi ise kuvvet ölçümlü düktilite deneyi için şartnamelerde önerilen kalıp türüdür. Buna ilaveten, özellikle bitüm numunelerinin düşük sıcaklık özelliklerini belirlemek adına düşük sıcaklıklardaki düktilite deneyinden faydalanılan çalışmalarda Şekil 2 (c)'deki kalıp türünün kullanıldığını görmek mümkündür. Bu çalışma kapsamında kuvvet ölçümlü düktilite deneyi yürütüldüğü için Şekil 2 (b)'de geometrisi gösterilen kalıp türü kullanılmış olup ilgili kalıbın gerçek görseli Şekil 3 (a)'da verilmiştir.



Şekil 2. Düktilite kalıp geometrileri: (a) simetrik konik kiriş, (b) sabit en-kesit ve (c) çift kenar çentikli.

Hazırlanan bitüm numunesi Şekil 3 (b)'de gösterilen şekilde yekpare biçimde numune kalıbına dökülür. Elde edilen numunelerin üst kısmında bir miktar taşmalar meydana gelmesi gerekir (Şekil 3 (c) ve (d)). Sıcak bitüm ile dolu olan numuneler 30-40 dakika süreyle oda sıcaklığında bekletilir ve soğuması sağlanır. Bu süre tamamlanınca, deney sıcaklığına yani 25 °C'ye ayarlanmış su banyosuna yerleştirilir ve burada da 30-40 dakika bekletilir. Süre tamamlandıktan sonra kalıplar su banyosundan çıkarılır ve üst kısımları kâğıt havlu yardımıyla hafifçe kurulanır. Ardından, sıcak bir spatula yardımıyla numune tıraşlanarak bitüm numunesinin fazlalık kısımları atılır (Şekil 3 (e)). Tıraşlama işlemi tamamlandıktan sonra numune deney başlangıcından 85-95 dakika önce deney sıcaklığındaki su banyosuna yerleştirilir. Numune kalıbındaki fazlalık parçalar kayma hareketleri ile numunedan ayrılır. Böylece, kalıp içindeki numune deneyin başlaması için hazır hale getirilmiş olur (Şekil 3 (f)). Ardından, deneye tabi tutulacak numune deney cihazına yerleştirilerek 5 cm/dk hızındaki sabit çekme kuvvetine maruz bırakılır (Şekil 4 (a)). Deney numunesinde kopma meydana gelene kadar veya deney cihazının maksimum ölçüm sınırı olan 1500 mm'lik mesafeye kadar cihaza uygulanan yük değerindeki değişimler ve uzama miktarları bilgisayar yazılımı aracılığıyla kaydedilir (Şekil 4 (b)). İlgili deney prosedürüne ait detaylara ASTM D 113 ve TS EN 13589 standartlarından erişmek mümkündür.

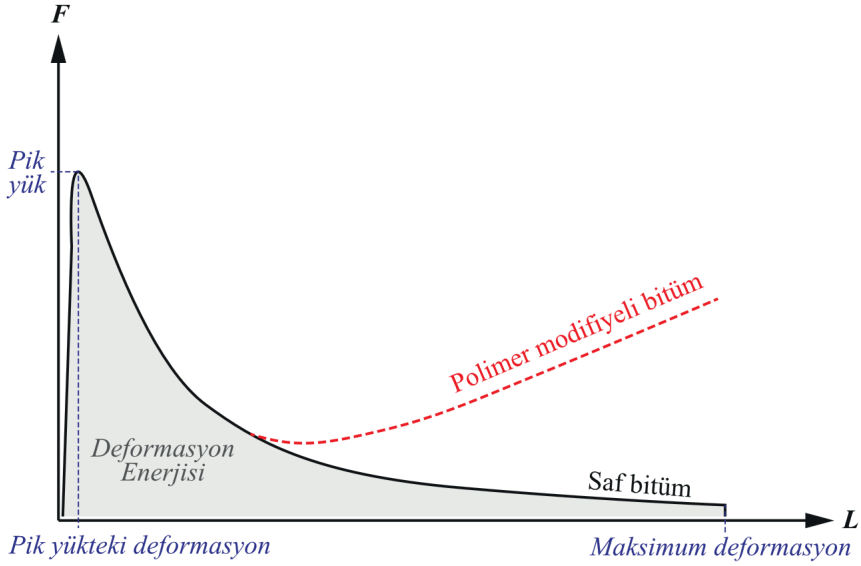


Şekil 3. Düktilite numunesi hazırlama: (a) kalıp, (b) kalıba bitüm dökme, (c) bitüm dökülmüş kalıplar, (d) kalıp üzerindeki fazlalık bitüm, (e) fazlalık bitümün traşlanması ve (f) traşlanmış numune üst yüzeyi.



Şekil 4. Düktilite deneyinin yürütülüşü: (a) deney cihazı içerisinde sabit hızdaki çekme kuvvetine maruz bırakılan numuneler ve (b) deney cihazından yük-ve deformasyon verisinin bilgisayar aracılığıyla kaydedilmesi.

Deney sonucunda bitüm numunelerine ait yük-deformasyon eğrileri elde edilebilmektedir. Pereira vd. (2018) yaptıkları çalışmada bitüm numunelerine düktilite deneyindeki tipik yük-deformasyon eğrilerini göstermiştir. İlgili eğri Şekil 5'te yeniden düzenlenerek verilmiştir. Bu figür incelendiğinde saf bitümler ve polimer modifiyeli bitümler için eğrilerde bir farklılık meydana geldiği anlaşılmaktadır. Öyle ki, saf bitümlerde maksimum yük gözlemlendikten sonra yükteki değişim sadece azalma yönünde ilerlemekte ve sonunda sıfırlanmaktadır. Ancak, polimer modifiyeli bitümlerde bu durum farklılık göstermekte ve pik yük gözlemlendikten sonra bir süre yükte düşüş meydana gelmekte, ancak bunu takiben tekrar yükte bir artış meydana gelmektedir. Bunun sebebinin, polimer modifiyeli bitümlerin bileşenlerinin molekülleri arasındaki güçlü poler etkileşimlerin kırılması olduğu ifade edilmektedir (Mieczkowski vd., 2021; Pereira vd., 2018; Ruan vd., 2003).



Şekil 5. Sabit enkesitli numuneler için tipik yük-deformasyon eğrisi (Pereira vd. (2018) çalışmasından esinlenerek düzenlenmiştir.)

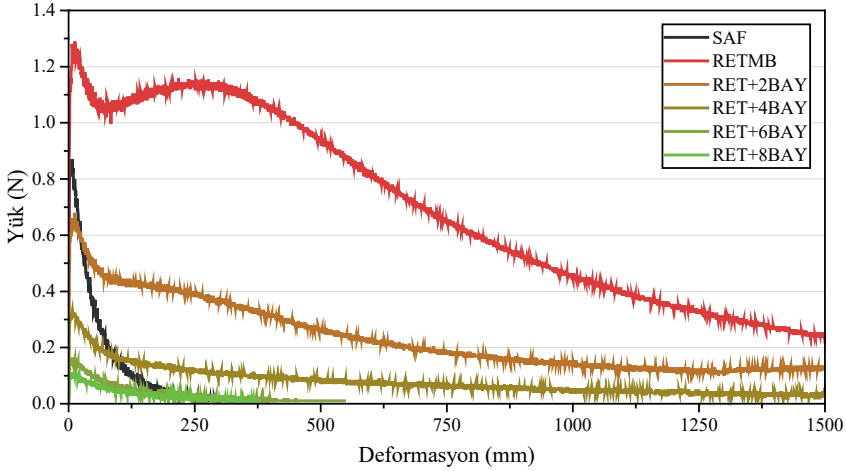
Bu bilgiler ışığında, bu çalışma kapsamında hazırlanan bitüm numunelerinin düktilite davranışı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu doğrultuda, RET-MB'ye ilave edilmesi uygun olan optimum BAY miktarının belirlenmesi hedeflenmiştir.

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Yük-Deformasyon Eğrisi

SAF, RETMB ve RET+BAY numunelerine ait düktilite deneylerinden elde edilen yük-deformasyon eğrileri Şekil 6'da verilmiştir. İlgili şekilde elde edilen yük değerlerinin öncelikli olarak literatürle kıyaslaması yapıldığında, 25 °C düktilite deneyi yürütülen diğer çalışmalarla benzer ölçekte çıkmıştır (Pereira vd., 2018). Şekildeki, eğri tipleri numunelere göre incelendiğinde, SAF numunesinde tipik bitüm davranışı gözlemlenmiş olup maksimum yük gözlemlendikten sonra, yükte sürekli bir düşüş meydana gelmiştir. RETMB numunesinde ise tipik bir polimer modifiyeli bitüm davranışı gözlemlenmiş olup maksimum yük gözlemlendikten sonra bir miktar yükte düşüş meydana gelmiş ardından da tekrar yük artmış ve sonrasında sürekli olarak azalmıştır (Mieczkowski vd., 2021; Pereira vd., 2018; Ruan vd., 2003). RET+2BAY numunesi incelendiğinde ise ilgili yük dalgalanmasının belirginliğinin bu numune azaldığı anlaşılmaktadır. Bu doğrultuda, RETMB'ye BAY ilavesinin bitümün bileşenlerinin molekülleri arasındaki kuvvetli polar etkileşimleri olumsuz

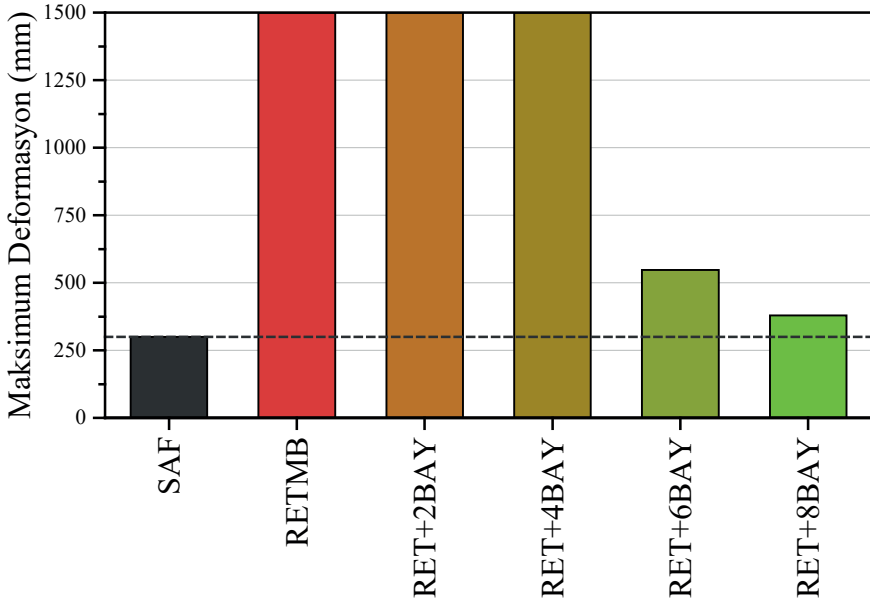
olarak etkilediği anlaşılmaktadır. Buna ilaveten, RET+4BAY, RET+6BAY ve RET+8BAY numunelerinde ise ilgili dalgalanma tamamen kaybolarak kompozit modifiyeli bitümlerin eğri türü tipik saf bitüm eğrisine benzer hale gelmiştir. Sonuç olarak, %2'den fazla BAY ilavesinin eğri türünü tamamen değiştirdiğini söylemek mümkündür.



Şekil 6. RET ve BAY modifiyeli bitümlerin kuvvet ölçümlü düktilite deneyinden elde edilen yük-deformasyon eğrileri.

### 3.2. Maksimum Deformasyon

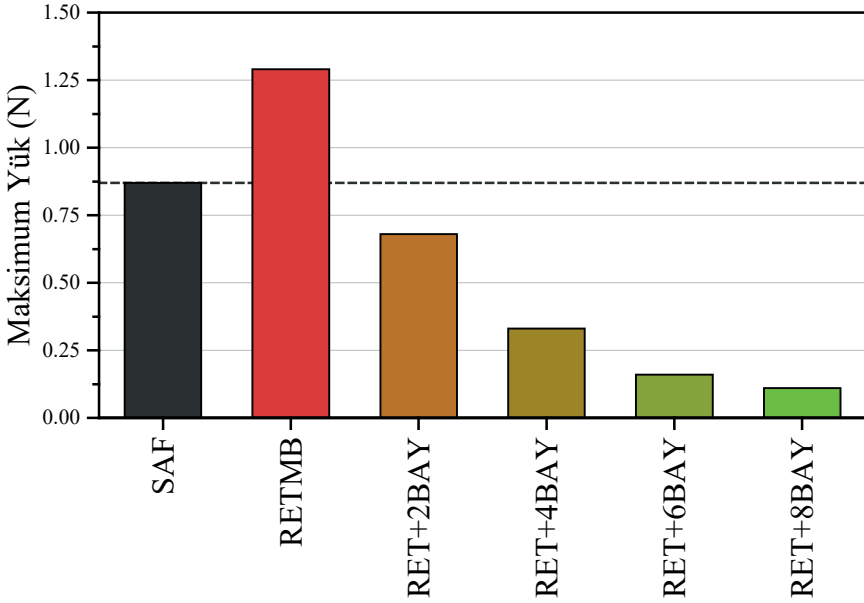
Kuvvet ölçümlü düktilite deneyinde yük değerinin sıfır olduğu veya numunede kopmanın gözlemlendiği deformasyon değeri geleneksel düktilite değerini ifade etmektedir. Bu doğrultuda, SAF, RETMB ve RET+BAY numunelerine ait maksimum deformasyon değerleri Şekil 7'de verilmiştir. İlgili Şekil incelendiğinde RETMB, RET+2BAY ve RET+4BAY numunelerinde deney cihazının maksimum ölçüm mesafesi olan 1500 mm'lik uzunlukta kopma meydana gelmediği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, bu üç numunenin göreceli olarak birbirleri ile kıyaslanması mümkün olmayıp her birinin oldukça yüksek bir seviyede düktil davranış sergilediklerini söylemek mümkündür. Öte yandan RET+6BAY ve RET+8BAY numuneleri incelendiğinde genel olarak BAY ilavesinin RETMB'nin düktilitesinin olumsuz yönde etkilediğini söylemek mümkündür. Buna ilaveten, SAF numunesinin düktilite değeri diğer tüm numunelerle kıyasla oldukça düşüktür. Sonuç olarak saf bitüme RET ilavesinin düktilitesini önemli ölçüde artırdığını ve RETMB'ye BAY ilavesinin de RETMB'nin düktilitesini azalttığını söylemek mümkündür. Ayrıca, RET+8BAY numunesinde bile saf bitümden daha düktil bir davranış gözlemlenmiştir.



Şekil 7. Numunelere ait maksimum deformasyon sonuçları.

### 3.3. Maksimum Yük

Kuvvet ölçümlü düktilite deneyi sonuçlarından elde edilebilecek bir diğer kritik parametre ise maksimum yüküdür. Bu değerler sayesinde numunenin direnç gösterebildiği maksimum yük değerinin belirlenmesi ve göreceli olarak diğer numunelerle kıyaslanması mümkündür. Bu çalışmada hazırlanan numunelere ait maksimum yük değerleri Şekil 8'de verilmiştir. İlgili şekil incelendiğinde en yüksek maksimum yük değerinin RETMB numunesinde en düşük maksimum yük değerinin ise RET+8BAY numunesinde gözlemlendiği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, RET+2BAY numunesinin SAF numunesinden daha düşük maksimum yük değerine sahip olması ilgi çekici bir husustur. Öyle ki bu sonuç RETMB'ye BAY ilave oranının %2 bile olsa saf bitüme kıyasla daha düşük değerlerde maksimum yük elde edilmesine sebep olacağını göstermektedir. Dolayısıyla, RET ilavesi saf bitümün çekme yüküne direncini arttırsa da RET ve BAY'nin kombine ilavesinin saf bitümün yük taşıma kapasitesini olumsuz yönde etkilediği görülmektedir.

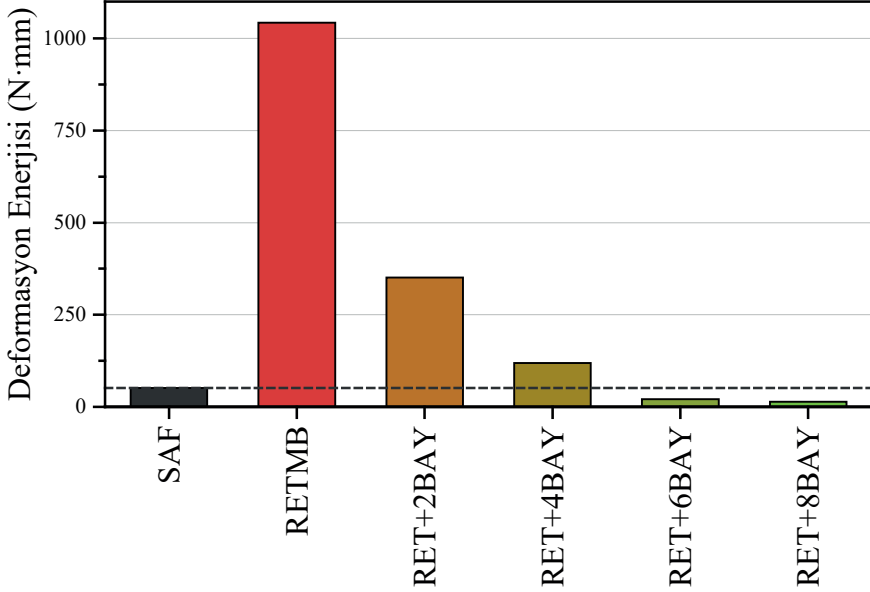


Şekil 8. Numunelere ait maksimum yük değerleri.

### 3.4. Deformasyon Enerjisi

Kuvvet ölçümlü düktilite deneyi sonuçlarının sadece deformasyon veya sadece yük üzerinden nicel olarak değerlendirilmesi bu çalışmada olduğu gibi bazı durumlarda yetersiz kalmaktadır. Dolayısıyla, ilgili değerlerin dikkate alındığı daha kapsamlı bir değerlendirmenin yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu doğrultuda, yük-deformasyon eğrisinin altında kalan alanın hesaplanarak edilen sonucun deformasyon enerjisi adı altında değerlendirilmesi yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Dziadosz vd., 2021; Kalampokis vd., 2022; Yalcin & Demirbag, 2022; Yalçın, 2022).

Bu çalışma kapsamında hazırlanan numunelerin Şekil 5'te verilen yük-deformasyon eğrilerinin altında kalan alan hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 8'de verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde saf bitüme RET ilavesinin deformasyon enerjisini belirgin bir şekilde arttırdığı anlaşılmaktadır. Buna ilaveten, RETMB'ye BAY ilavesi ise deformasyon enerjisinde düşüşe sebep olmuştur. Ayrıca, RETMB'ye %4-6 BAY ilave edildiğinde elde edilen deformasyon enerjisinin saf bitümün deformasyon enerjisine denk olabileceği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, optimum BAY ilavesi olarak %4-6 BAY oranlarının tercih edilmesi uygun olacaktır. Bununla birlikte, bu oranlardan daha fazla BAY ilavesi bitümün içsel yapısındaki bağ kuvvetlerini zayıflatacağından önerilmemektedir.



Şekil 9. Numunelere ait deformasyon enerjisi sonuçları.

Bu çalışma kapsamında deformasyon enerjisi üzerinden %4-6 aralığında, maksimum yük üzerinden %2'den daha az oranda ve deformasyon üzerinden %8'den fazla oranlarda BAY ilavesinin saf bitüme denk sonuçlara sebep olabileceği anlaşılmaktadır. Bu parametrelerden hangisini daha gerçekçi bir sonuç verdiğini belirtmek adına önceki çalışmalar incelendiğinde, reolojik özellikler açısından da optimum BAY ilavesinin %4-6 aralığında olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, bu sonuçlar deformasyon enerjisini daha genel geçer sonuçlar verdiğini göstermektedir.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, Pen 50/70 penetrasyon sınıfındaki saf bitüme %1.5 reaktif etilen terpolimer (RET) ve %0.2 oranında polifosforik asit (PPA) ilave edilerek polimer modifiyeli bitüm hazırlanmış, ardından polimer modifiyeli bitüme %2-8 oranlarından bitkisel atık yağ (BAY) ilave edilerek kompozit modifiyeli bitüm numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler kuvvet ölçümlü düktilite deneyine tabi tutularak, RET modifiyeli bitüme BAY ilavesinin sabit hızdaki çekme kuvveti altındaki davranışına etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Aşağıda bu çalışmanın sonuçları maddeler halinde özetlenmiştir.

- Saf bitümün yük-deformasyon grafiği tipik saf bitüm davranışı ile, RETMB'nin yük-deformasyon grafiği de tipik polimer modifiyeli bitüm davranışı ile benzer çıkmıştır. Buna ilaveten, RETMB'ye %2 oranında BAY ilavesi eğrideki dalgalanmayı azaltmış, bu orandan yüksek oranlarda ise dalgalanma

kaybolarak grafik saf bitüme benzer şekilde gözlemlenmiştir.

- RETMB, RET+2BAY ve RET+4BAY numunelerinde düktilite değerleri cihazın üst limiti olan 1500 mm'den yüksek çıkmıştır. Buna ilaveten, genel olarak BAY ilavesi RETMB'nin düktilitesini azaltırken, %8 BAY ilavesinde dahi saf bitümden daha yüksek deformasyon değerleri elde edilmiştir.

- Maksimum yükler açısından en yüksek yük RETMB numunesinde en düşük yük RET+8BAY numunesinde gözlemlenmiştir. RETMB'ye %2 BAY ilavesinde dahi elde edilen maksimum yük değeri saf bitümden düşüktür.

- Deformasyon enerjisi sonuçlarında, RET ilavesinin saf bitümün deformasyon enerjisini büyük ölçüde arttırdığı net bir şekilde belirlenmiştir. RETMB'ye %4-6 oranında BAY ilavesinin deformasyon enerjisinin saf bitümle eş değer seviyeye getirebileceği anlaşılmaktadır.

- Kuvvet ölçümlü düktilite deneyine ait sonuçların değerlendirilmesinde deformasyon veya yük değerlerinden ziyade deformasyon enerjisi değerlerinin daha genel geçer bir kıyaslama sağlayacağı düşünülmektedir.

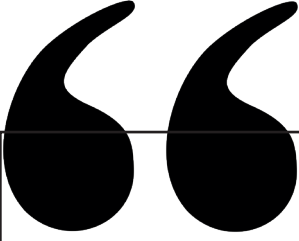
Bu çalışmada düktilite deneyleri 25 °C sıcaklıkta yürütülmüştür. Ancak, bu sıcaklıkta elde edilen yük değerlerinin oldukça küçük değerler olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, yazarlar tarafından, kuvvet ölçümlü düktilite deney sonuçlarının hassasiyetinin artırılması adına deneylerin 5 °C ve 15 °C gibi daha düşük sıcaklıklarda yürütülmesi önerilmektedir.



## Kaynaklar

- Airey, G. D. (2002). Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens. *Construction and Building Materials*, 16(8), 473-487. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00103-4](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00103-4)
- Behnood, A., & Gharehveran, M. M. (2019). Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders. *European Polymer Journal*, 112, 766-791. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.10.049>
- Bulatovic, V. O., Rek, V., & Markovic, K. J. (2014). Effect of polymer modifiers on the properties of bitumen. *Journal of Elastomers and Plastics*, 46(5), 448-469. <https://doi.org/10.1177/0095244312469964>
- Çavdar, E., Kumandaş, A., Şahan, N., Kabadayı, E., & Oruç, Ş. (2024). Investigation of Rheological and Physical Properties of SBS and WCO Composite Modified Bitumen. *Turkish Journal of Civil Engineering*, 35(6). <https://doi.org/10.18400/tjce.1393363>
- Dziasosz, S., Słowik, M., Niwczyk, F., & Bilski, M. (2021). Study on Styrene-Butadiene-Styrene Modified Asphalt Binders Relaxation at Low Temperature. *Materials*, 14(11), 2888. <https://doi.org/10.3390/ma14112888>
- Gama, D. A., Yan, Y., Rodrigues, J. K. G., & Roque, R. (2018). Optimizing the use of reactive terpolymer, polyphosphoric acid and high-density polyethylene to achieve asphalt binders with superior performance. *Construction and Building Materials*, 169, 522-529. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.206>
- Jasso, M., Hampl, R., Vacin, O., Bakos, D., Stastna, J., & Zanzotto, L. (2015). Rheology of conventional asphalt modified with SBS, Elvaloy and polyphosphoric acid. *Fuel Processing Technology*, 140, 172-179. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.09.002>
- Kabadayı, E., Çavdar, E., Kumandaş, A., Şahan, N., & Oruç, Ş. (2024). Investigation of Using Ulexite as a Filler in Various Combinations in Stone Mastic Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(2), 04023556. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-16231>
- Kalampokis, S., Papamoschou, M., Kalama, D. M., Pappa, C. P., Manthos, E., & Triantafyllidis, K. S. (2022). Investigation of the Characteristic Properties of Lignin-Modified Bitumen. *CivilEng*, 3(3), 734-747. <https://doi.org/10.3390/civileng3030042>
- KGM. (2024). *Yol Ağrı Bilgileri*. Retrieved 25 Ağustos 2024 from <https://www.kgm.gov.tr/sayfalar/kgm/sitetr/kurumsal/yolagi.aspx>
- Kumandaş, A., Çavdar, E., Oruç, Ş., Pancar, E. B., & Kök, B. V. (2022). Effect of WCO addition on high and low-temperature performance of RET modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 323, 126561. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126561>

- Kumandaş, A., Çavdar, E., Şahan, N., Kök, B., Pancar, E. B., & Oruç, Ş. (2024). Investigation of Rutting and Low Temperature Cracking Behavior of Reactive Ethylene Terpolymer and Waste Cooking Oil Modified Bitumen. *Turkish Journal of Civil Engineering*, 35(4), 1-26. <https://doi.org/10.18400/tjce.1335810>
- Mieczkowski, P., Budziński, B., Słowik, M., Kempa, J., & Sorociak, W. (2021). Experimental Study of Tensile Properties of Styrene-Butadiene-Styrene Modified Asphalt Binders. *Materials*, 14(7), 1734. <https://doi.org/10.3390/ma14071734>
- Pereira, L., Freire, A. C., Sá da Costa, M., Antunes, V., Quaresma, L., & Micaelo, R. (2018). Experimental study of the effect of filler on the ductility of filler-bitumen mastics. *Construction and Building Materials*, 189, 1045-1053. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.063>
- Polacco, G., Stastna, J., Biondi, D., Antonelli, F., Vlachovicova, Z., & Zanzotto, L. (2004). Rheology of asphalts modified with glycidylmethacrylate functionalized polymers. *Journal of Colloid and Interface Science*, 280(2), 366-373. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.08.043>
- Ruan, Y., Davison, R. R., & Glover, C. J. (2003). The effect of long-term oxidation on the rheological properties of polymer modified asphalts☆. *Fuel*, 82(14), 1763-1773. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00144-3](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00144-3)
- Şahan, N., Kumandaş, A., Kabadayı, E., Çavdar, E., & Oruç, Ş. (2023). The use of wax-based additives in bitumen modification: A systematic quantitative literature review. *Construction and Building Materials*, 407, 133423. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133423>
- Yalcin, E., & Demirbag, A. (2022). Effects of modified binders obtained from different polymers on conventional and rheological properties. *Construction and Building Materials*, 357, 129366. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129366>
- Yalçın, E. (2022). Farklı gençleştiricilerle modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların fiziksel, kimyasal ve reolojik özelliklerinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(1), 497-510. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.832495>



## *Bölüm 4*

### **DEPREM BÖLGESİNDE BULUNAN FARKLI TAŞIYICI SİSTEME SAHİP BETONARME BİNALARDA DOLGU DUVAR ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

*Muhammed ÖZTEMEL<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Öğr. Gör, Giresun Üniversitesi, Keşap Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Giresun,  
muhammed.oztemel@giresun.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6530-0739

## 1 1. Giriş

Deprem, yapıların dayanıklılığı ve güvenliği üzerinde doğrudan etki eden en önemli doğal afetlerden biridir. Türkiye, coğrafi konumu nedeniyle yüksek deprem riski taşıyan bir bölgede yer almaktadır. Bu durum, inşa edilen yapıların depreme dayanıklı bir şekilde tasarlanmasını ve inşa edilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, betonarme yapı sistemleri, dünya genelinde dayanıklılığı ve güvenilirliği ile tercih edilmektedir. Betonarme binaların deprem performansını değerlendirmek, modern mühendislik uygulamaları açısından kritik bir önem taşır. Yapıların depreme karşı performansını artırmak amacıyla, dolgu duvarlar gibi yapı elemanlarının etkileri detaylı bir şekilde incelenmelidir. Betonarme yapı sistemleri, dayanım ve güvenilirlik gibi özelliklerinden dolayı dünya genelinde en çok tercih edilen yapı sistemleri arasında yer almaktadır (Çolakoğlu ve Öztemel, 2024). Yapıların deprem performansının değerlendirilmesi, modern deprem mühendisliği alanında kritik bir öneme sahiptir (Korkmaz ve Uçar, 2006). Türkiye'nin deprem riski yüksek bir bölgede bulunması, inşa edilecek yapı projelerinin depreme dayanıklı bir şekilde tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır (Çolakoğlu, Öztemel ve Turan, 2022). Bu bağlamda, dolgu duvarların, yapıların deprem dayanıklılığını artırmada kritik bir rol oynadığı ve sismik etkiler karşısında yapının rijitliğini sağlamak için önemli bir unsur olduğu bilinmektedir. Binalarda, mekanları bölmek ve kullanım alanlarını dış koşullardan ayırmak için tuğla, bims ve gazbeton gibi malzemelerle yapılan dolgu duvarlar sıkça tercih edilmektedir (Öztürkoğlu, Uçar, ve Yeşilce, 2015). Betonarme binalarda yatay deprem kuvvetleri göz önünde bulundurularak yapılan taşıyıcı sistem analizlerinde, bölme duvarlar genellikle taşıyıcı olmayan elemanlar olarak değerlendirilir (Tekin, Alsancak ve Ay, 2007). Yapıya eklenen dolgu duvarlar, yanal rijitliği önemli ölçüde artırsa da, düzensiz yerleşimleri sonucunda burulma etkileri, yumuşak kat oluşumu ve kısa kolon davranışı gibi olumsuz etkiler görülebilir (Sivri, Demir ve Kuyucular, 2006).

Dolgu duvarlar üzerine literatürde birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda kısa bir şekilde özetlenmiştir.

Garip ve Dibekoğlu (2023) dolgu duvarların betonarme binalar üzerindeki etkilerinin araştırılması için 6 farklı özellikte bina modeli geliştirmiştir. Yumuşak kat düzensizliğini incelemek ve dolgu duvarların etkilerini anlamak amacıyla iki farklı zemin kat yüksekliği ele alınmıştır. Boş çerçeve, çizgisel yüklü çerçeve ve çizgisel yük ile eşdeğer basınç çubuğu kullanılan çerçeve olmak üzere üç farklı betonarme bina modeli oluşturulmuş ve bu modellerin doğrusal ile doğrusal olmayan analizleri yapılmıştır. Sonuçlar, eşdeğer basınç çubuğu kullanılan sistemlerde, boş ve çizgisel yüklü modellere göre periyot, tepe noktası yer değiştirme ve görelî kat öteleme değerlerinin azaldığını; ancak spektral ivme ve taban kesme kuvvetlerinde artış gözlemlendiğini ve yumuşak kat düzensizliği oluşumunun tespit edildiğini göstermektedir. Bu nedenle, be-

tonarme yapılarda dolgu duvarların eşdeğer basınç çubuğu modeliyle değerlendirilmesinin daha doğru sonuçlar vereceği sonucuna ulaşılmıştır.

Sancioğlu, Soydoğan ve Can (2022) betonarme yapının davranışını etkileyen çeşitli dolgu duvar malzemeleri ve planda yerleşim biçimlerinin etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada, yapısal davranışa etkisi incelenen iki dolgu duvar tipi olarak boşluklu fabrika tuğlası ve gazbeton blok kullanılmıştır. 16 adet model, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018'e dayanarak sonlu elemanlar yöntemiyle SAP2000 programında değerlendirilmiştir. Boşluklu fabrika tuğlası kullanılan modeller, gazbeton blok kullanılan modellere oranla hem x- hem de y- doğrultusunda daha az tepe noktası yatay hareketine sahiptir. Bu nedenle, incelenen yapı için dolgu duvar malzemesi olarak boşluklu fabrika tuğlasının kullanılması önerilmiştir.

Ertürkmen ve Çağatay (2016) 2007 Deprem Yönetmeliği'nde yer alan yapı düzensizlikleri kapsamında yumuşak kat ve zayıf kat düzensizlikleri değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, 10 katlı ve farklı geometrilere sahip 5 dolgu duvarlı yapı, her iki deprem yönü için Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ile incelenmiştir. Dolgu duvarlar, eşdeğer basınç çubuğu modeliyle modellenmiş olup, analizler SAP2000 programı ile gerçekleştirilmiştir. C, D, E, F ve G olarak adlandırılan yapılar, önce tamamen dolgu duvarlı olarak modellenmiş, ardından her kat sırasıyla duvarsız hale getirilerek, duvarların yokluğunda yapıların periyot ve maksimum deplasman değerlerindeki değişim ile yumuşak kat ve zayıf kat düzensizliklerinin oluşumu incelenmiştir. Dolgu duvarın yokluğunda alt ve üst katlar arasında büyük deplasman farklarının oluşmasına ve yapının rijitliğinin azalmasına neden olmaktadır. Rijitlik azaldıkça yapının periyot değeri artmakta, bu da yanıl kuvvetlere karşı daha savunmasız hale gelmesine yol açmaktadır. Sonuç olarak, dolgu duvarların yapısal hesaplarda mutlaka dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Tekin vd (2007) betonarme çerçevelerde dolgu duvarın yapısal etkilerini araştırmışlardır. Dolgulu ve dolgusuz 4 katlı betonarme binanın pushover analizini Sap 2000 paket programını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Hesaplamalar sonucunda, dolgu duvar etkisi ile kapasite kuvvetinde %40'lık bir artış ortaya çıkmıştır.

Sivri vd (2006) taşıyıcı eleman olarak hesaba katılmayan dolgu duvarların, betonarme binaların deprem davranışına olan etkilerini araştırmışlardır. Yapılan bu çalışmada üç farklı çerçeve modeli çalışmanın konusunu oluşturmaktadır. Birinci modelde dolgu duvarların bulunmadığı ve ağırlıklarının göz önüne alınmadığı bir durum ele alınırken ikinci modelde dolgu duvarların yer aldığı çerçeve (dolgulu çerçeve) üçüncü modelde ise sadece zemin kat dışında dolgu duvar bulunan çerçeve (yumuşak kat) modeli ele alınarak analizler yapılmıştır. Yapılan analizler, dolgu duvarlarının yapıların dinamik performansını önemli bir şekilde etkilediğini ortaya çıkarmıştır. Dolgu duvarların etkilerini

göz önünde bulundurmeyen yaklaşımlar, yapının güvenliğini olumsuz yönde etkilediği sonucuna varmışlardır.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada farklı taşıyıcı sistemlerle inşa edilen betonarme binaların yapı performansına dolgu duvarlarının etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu doğrultuda, dolgu duvarların tüm katlarda yer aldığı çerçeve sistem ve perdeli-çerçeve sistemlere sahip düzenli yapıların analizleri gerçekleştirilerek, bu duvarların deprem davranışına etkileri araştırılmıştır. Araştırmada, modal analiz yöntemlerinden biri olan mod birleştirme yöntemi ile 4 farklı çerçeve ve çerçeve perdeli yapısal model analiz edilmiş ve deprem riski açısından en uygun yapının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Yapılan analizler doğrultusunda her bir durumda yapının performansını belirleyen yatay deplasman ve görel kat ötelemesi gibi faktörler incelenerek, deprem riski yüksek bölgelerde kullanılacak en uygun bina tasarımı belirlenmiştir. Bu çalışmada taşıyıcı elemanların farklı özelliklere sahip olduğu 4 ayrı yapısal model bir sonlu elemanlar programı kullanılarak geliştirilmiş ve elde edilen sonuçlar yatay yer değiştirmeler ve görel kat ötelemesi gibi yapısal parametreler açısından incelenmiştir. Birinci model olarak dolgu duvarsız çerçeve sistem, ikinci modelde tüm katlarda dolgu duvarların yer aldığı çerçeve sistemi, üçüncü modelde dolgu duvarsız çerçeve-perdeli sistem ve son modelde ise tüm katlarda dolgu duvarların bulunduğu çerçeve-perdeli sistem tercih edilmiştir.

*Tablo 1. Taşıyıcı elemanların farklı özelliklere sahip olduğu 4 ayrı yapısal model*

Yapısal Modeller	Taşıyıcı Sistem	Dolgu Duvar
Tasarım 1	Çerçeve	Yok
Tasarım 2	Çerçeve	Var
Tasarım 3	Çerçeve-Perdeli	Yok
Tasarım 4	Çerçeve- Perdeli	Var

Burada, dört farklı yapı modelinin planları İdeCAD Statik 11 programı aracılığıyla tasarlanmış ve sisteme girilen parametreler doğrultusunda gerekli analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, Excel grafikleri yardımıyla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

## 3. Yapıların Genel Özellikleri

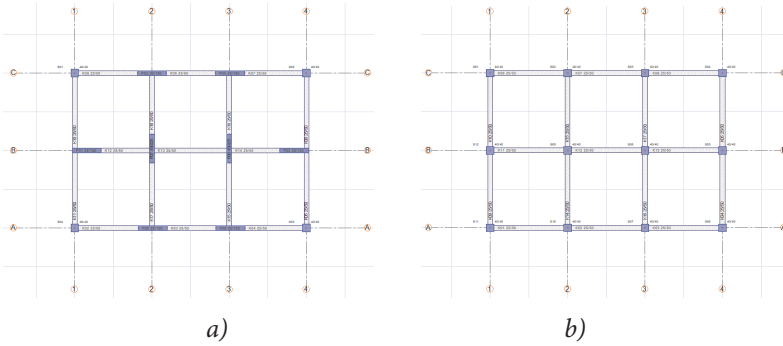
Aşağıda verilen Tablo 2, çalışmanın konusunu oluşturan betonarme yapının tasarımına ilişkin temel parametreleri içermektedir. Yapının deprem yer hareketi düzeyi “DD-2”, yerel zemin sınıfı “ZD” olarak belirlenmiştir. Kullanılan beton sınıfı C30, kat yüksekliği ise 2.85 metre olarak tasarlanmıştır. Bonyuna ve enine donatılarda B420C sınıfı çelik tercih edilmiştir. Bina, standart önem katsayısı olan 1 ile değerlendirilmiş ve 5 katlıdır. Bu parametreler, yapı-

nın deprem dayanımı, zemin özellikleri ve kullanılan malzemeler açısından nasıl tasarlandığını göstermektedir.

Tablo 2. Betonarme yapıya ait genel parametreler

Deprem Yer Hareketi Düzeyi	DD-2
Yerel Zemin Sınıfı	ZD
Beton Sınıfı	C30
Kat Yüksekliği	2.85m
Boyuna Donatılar	B420C
Enine Donatılar	B420C
Bina Önem Katsayısı	1
Kat Sayısı	5

Deprem Yer Hareketi Düzeyi DD-2 ve Yerel Zemin Sınıfı ZD çerçevesinde, çalışmamızda ele alınan yapının enlem ve boylam değerleri doğrultusunda AFAD Deprem Daire Başkanlığı'nın Türkiye Deprem Tehlike Haritası'ndan elde edilen tasarım spektrumu aşağıda belirtilmiştir.

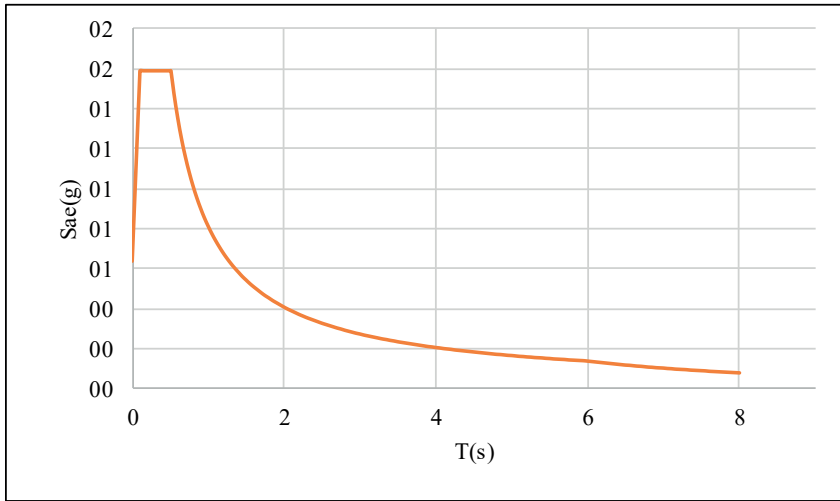


Şekil 1. Farklı taşıyıcı sisteme sahip kat planları

Bu çalışmada, toplamda 5 katlı bir bina incelenmiştir. Yapının aks açıklığı 4 metre olup, 2x3 açıklıklı olarak IdeCAD Statik 11 programı kullanılarak modellenmiştir. Şekil 1.âda verilen planda, çerçevesel ve perdeli taşıyıcı sistemlerin bir arada kullanıldığı bir yapı sistemi mevcuttur. 40x40 cm boyutlarındaki kolonlar, çerçevesel taşıyıcı sistemin temel elemanları olarak görev yaparken, 25x150 cm boyutlarındaki betonarme perdeler, yatay yükler karşısında yapının dayanımını ve rijitliğini artıran önemli taşıyıcı elemanlardır. Şekil 1.b'de verilen planda sadece 40x40 cm ölçülerindeki kolonların kullanıldığı ve tama-

men çerçevesi bir taşıyıcı sistem tercih edilmiştir. Betonarme perdelerin bulunmadığı bu düzenlemede, kolonlar ve kirişler, yapının yatay ve düşey yüklerine karşı başlıca taşıyıcı elemanlar olarak görev yapmaktadır. Her iki planda da kirişlerin ölçüleri 25x50 cm olarak belirlenmiş ve bu ölçüler doğrultusunda tasarlanmıştır.

Tablo' 1 de verilen farklı taşıyıcı sistem özelliklerine sahip dört farklı yapısal model oluşturulmuştur. Tasarım 1, yalnızca çerçevesi bir taşıyıcı sisteme sahip olup dolgu duvar içermez iken tasarım 2 ise çerçevesi bir taşıyıcı sisteme sahip olmakla birlikte, dolgu duvarlarla desteklenmiştir. Tasarım 3'te hem çerçevesi hem de perdeli bir taşıyıcı sistem kullanılmış, ancak dolgu duvar yer almamaktadır. Son olarak, Tasarım 4'te hem çerçevesi hem de perdeli bir taşıyıcı sistem bulunmakta ve ayrıca dolgu duvarlar da yapısal sisteme dahil edilmiştir.



Şekil 2. Deprem yer hareketi düzeyi DD 2 ve yerel zemin sınıfı ZD için elde edilen yatay elastik tasarım spektrumu

Betonarme bina modelleri, 40.772306° enlem ve 30.388386° boylamda bulunan Sakarya ili, Adapazarı ilçesi için tasarlanmış olup, Türkiye deprem tehlike haritalarındaki bu koordinatlara ait tasarım parametreleri göz önüne alınmıştır (AFAD,2020).

## 4. Bulgular ve Tartışma

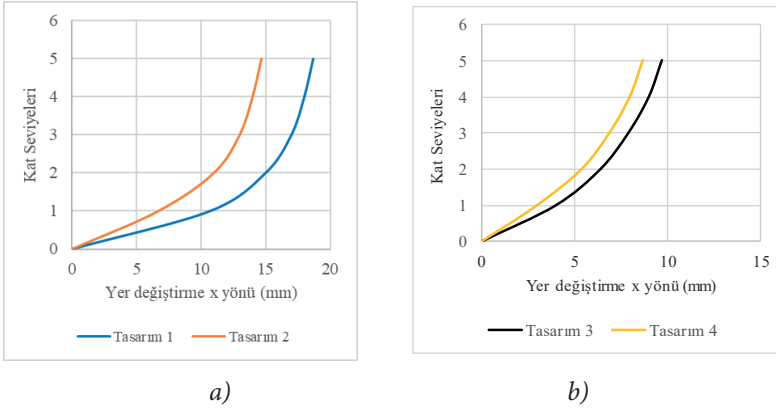
### 4.1. Yer değiştirme değerleri

Şekil 3.a 'da verilen grafik, taşıyıcı sistemi salt çerçevesi sistemlerin yer değiştirme davranışlarını dolgu duvarlı ve dolgu duvarsız olarak karşılaştır-



maktadır. Yatay eksende yer değiştirme miktarı (mm) ve dikey eksende kat seviyeleri gösterilmektedir. Tasarım 1, dolgu duvarsız salt çerçevesi sistemi temsil ederken, Tasarım 2 ise dolgu duvarlı salt çerçevesi sistemi göstermektedir.

Grafikte açıkça görüldüğü üzere, dolgu duvarın varlığı (Tasarım 2) yapının yatay yer değiştirme miktarını önemli ölçüde sınırlamaktadır. Dolgu duvarsız sistem (Tasarım 1) daha fazla yer değiştirme göstermektedir ve bu durum, dolgu duvarların yapıya ek rijitlik kazandırarak öteleme deformasyonlarını sınırladığı anlamına gelir. Özellikle üst katlarda dolgu duvarlı sistemin (Tasarım 2) yer değiştirme miktarlarının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu da dolgu duvarın, sistemin yatay yükler altındaki deformasyon davranışını iyileştirdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 3. X doğrultusundaki meydana gelen yer değiştirme değerleri

Şekil 3.b'de verilen grafik ise, çerçevesi - perdeli sistemlerde dolgu duvarın varlığı ve yokluğunun yatay yer değiştirme üzerindeki etkisini karşılaştırmaktadır. Yatay eksende yer değiştirme miktarı (mm) ve dikey eksende kat seviyeleri gösterilmektedir. Tasarım 3, çerçevesi -perdeli sistemde dolgu duvarsız durumu, Tasarım 4 ise dolgu duvarlı durumu temsil etmektedir.

Grafik incelendiğinde, dolgu duvarın varlığı (Tasarım 4) çerçevesi - perdeli sistem elemanlarının bulunduğu yapıda yer değiştirmeyi kısmen sınırlandırmaktadır. Her iki tasarımın eğrisi de benzer bir davranış sergilese de, dolgu duvarın bulunduğu Tasarım 4'teki yer değiştirme miktarının, özellikle üst katlarda, dolgu duvarsız sisteme (Tasarım 3) göre daha az olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, dolgu duvarların yapıya ek rijitlik sağlayarak yatay yükler altındaki deformasyonları azalttığını göstermektedir.

Bununla birlikte, perde duvarların sağladığı yüksek rijitlik, dolgu duvarların etkisini sınırlamakta ve yer değiştirme miktarlarının genel olarak daha düşük seviyelerde kalmasını sağlamaktadır. Dolgu duvarlı sistemdeki (Tasarım

4) farkın küçük olması, perde duvarların hâkim rijitlik unsuru olduğunu ve dolgu duvarların bu sistemdeki etkisinin nispeten daha sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır.

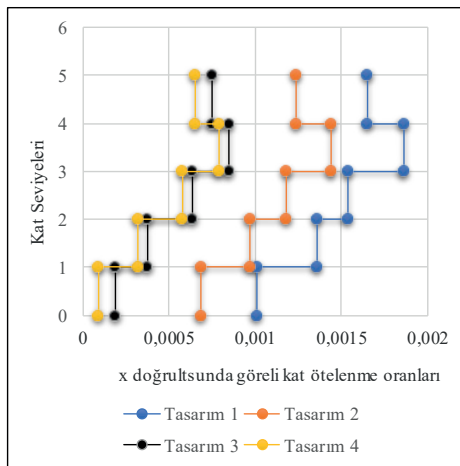
Sonuç olarak, çerçevesi-perdeli sistemlerde dolgu duvarın varlığı, yer değiştirmeyi bir miktar sınırladırsa da, bu etkisi perde duvarların sağladığı rijitliğe kıyasla daha küçük bir ölçekte kalmaktadır.

#### 4.2. Görelî Kat Ötelenme Değerleri

Şekil 4'te verilen grafik, dört farklı yapısal tasarımda x doğrultusunda kat öteleme oranlarını göstermektedir. Dikey ekseninde kat seviyeleri, yatay ekseninde ise x doğrultusunda görelî kat öteleme oranları yer almaktadır. Tasarımlar, dolgu duvarın varlığı ve çerçeve-perde sistemi kombinasyonlarına göre farklılık göstermektedir.

Salt çerçevesi sistemler arasında dolgu duvarlı sistemin (Tasarım 2), dolgu duvarsız sisteme (Tasarım 1) kıyasla daha düşük öteleme oranlarına sahip olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, dolgu duvarlarının yapıya ek bir rijitlik kazandırarak katlar arası görelî yer değiştirmeyi sınırladığını göstermektedir. Özellikle alt katlarda dolgu duvarlı sistemin daha düşük öteleme sergilediği dikkat çekmektedir.

Çerçevesi-perdeli sistemlerde, dolgu duvarının varlığı (Tasarım 4), dolgu duvarsız sisteme (Tasarım 3) göre öteleme oranlarını daha da düşürmüştür. Bu, perde duvarın varlığıyla birlikte dolgu duvarlarının sağladığı ek rijitlik, yatay yer değiştirmeleri daha da sınırlandırmaktadır. Bu sistemlerde dolgu duvarı bulunmadığında (Tasarım 3), kat seviyelerine göre daha yüksek öteleme oranları elde edilmektedir.



Şekil 4. X yönünde ortaya çıkan görelî kat ötelenme oranları

Genel olarak, çerçevesiz- perdeli sistemler (Tasarım 3 ve 4), salt çerçevesizli sistemlere (Tasarım 1 ve 2) kıyasla çok daha düşük görece öteleme oranları göstermektedir. Bu da perde duvarların, yapının yatay yükler altındaki davranışını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Ayrıca, perdeli sistemlerde dolgu duvarın eklenmesi, öteleme oranlarını daha da azaltarak yapının yatay yükler altındaki performansını artırmaktadır (Tasarım 4).

## 5. Sonuçlar

Betonarme çerçevesiz ve perdeli sistemlerde dolgu duvarlarının varlığı, yapının yatay yükler altındaki davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Elde edilen verilerin kapsamlı bir değerlendirmesi yapıldığında, yapılan analizler doğrultusunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır. Bu sonuçlar, analizlerin sağlamış olduğu bulguların özetlenmesiyle ortaya konmaktadır ve yapıların güvenliği hakkında önemli bilgiler sunmaktadır.

- Her iki sistemde de yapılan analizler, dolgu duvarlarının, özellikle öteleme deformasyonlarını sınırladığı ve yapıya ek bir rijitlik kazandırarak öteleme miktarını azalttığını göstermektedir. Bununla birlikte, perdeli sistemlerde dolgu duvarlarının bu etkisi sınırlı kalmakta ve perde duvarların sağladığı yüksek rijitliğe kıyasla dolgu duvarlarının katkısı daha az belirgin olmaktadır.

- Dolgu duvarsız yapılan analizlerde, çerçeve elemanlarının ve perde duvarların tek başına yük taşıma kapasiteleri değerlendirilmiş ve dolgu duvarlarının olmadığı durumlarda öteleme miktarının daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Dolgu duvarları, yapının genel stabilitesine ve deprem sel yükler altındaki davranışına katkı sağlamakla birlikte, bu katkı homojen bir dağılım göstermemekte ve yapının yatay rijitliğine etkisi sınırlı kalmaktadır.

- Yapılan çalışmada ortaya çıkan sonuçlara göre, dolgu duvarın bulunduğu durum (Tasarım 2), yapının yatay yer değiştirme miktarını önemli oranda kısıtlamaktadır. Dolgu duvarsız sistem (Tasarım 1) ise daha fazla yer değiştirme sergilemekte; bu durum, dolgu duvarların yapıya sağladığı ek rijitliğin, öteleme deformasyonlarının kontrol altına alınmasında etkili olduğunu göstermektedir.

- Tasarım 1 ile Tasarım 2 arasındaki farklar, dolgu duvarın etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Dolgu duvarın olmadığı Tasarım 1'de, kat öteleme değerlerinde daha büyük değerler ortaya çıkmıştır. Tasarım 2'de dolgu duvar varlığının etkisiyle katlar arasındaki ötelemeler çok daha sınırlıdır, bu da yapının rijitliğinin arttığını ve yanal kuvvetlere karşı daha dayanıklı hale geldiğini göstermektedir.

- Tasarım 3'te, dolgu duvar bulunmamasına rağmen, perdenin varlığı yapının katlar arasında daha düşük ötelemelere sahip olmasını sağlamıştır. Ancak dolgu duvarların eklenmesiyle (Tasarım 4), bu ötelemeler küçük bir oran da olsa azalmış ve yapı daha da rijit hale gelmiştir. Özellikle alt katlarda

Tasarım 4'teki ötelemeler, tüm tasarımlar arasında en düşük seviyededir, bu da hem perde duvarların hem de dolgu duvarların yapıya birlikte önemli bir rijitlik kattığını göstermektedir.

- Perde duvarların sağladığı yüksek rijitlik, dolgu duvarların etkisini sınırlandırarak yer değiştirme miktarlarının düşük kalmasına neden olmaktadır. Tasarım 4'teki farkın küçük olması, perde duvarların sistemin rijitliğinde belirleyici rol oynadığını ve dolgu duvarların bu yapı içinde daha az etkili olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, dolgu duvarların yokluğunun yapısal davranış üzerindeki etkileri göz ardı edilmemeli ve yapısal hesaplamalarda mutlaka dikkate alınmalıdır. Böylece, yapının rijitliği korunarak, deprem gibi yanal yüklere karşı daha güvenli ve dayanıklı bir tasarım elde edilebilir.

## KAYNAKÇA

- AFAD.(2020).T.C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması [Çevrimiçi].Erişim: <https://tdth.afad.gov.tr/>.
- Çolakoğlu, H. E., Öztemel, M.(2024) Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kirişin Üç Noktalı Eğilme Davranışının Sayısal Olarak İncelenmesi. E. İskender (Ed),İnşaat Mühendisliği Alanında Uluslararası Akademik Çalışmalar (s.39-53), Ankara: Serüven Yayınevi
- Çolakoğlu, H. E., Öztemel, M.,& Turan, M. T. (2022) Tek Tıp Bir Betonarme Yapının Tbdy 2018'e Göre Uygun Paket Programlar İle Modellenmesi Analizi ve Sonuçlarının Karşılaştırılması. S. Bardak (Ed),Mühendislikte Güncel Araştırmalar (s.37-57), Ankara: Gece Kitaplığı Yayınevi
- Ertürkmen, D., & Çağatay, İ.H.(2016). Dolgu Duvarlı Yapılarda Yumuşak Kat ve Zayıf Kat Düzensizliklerinin İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi,31(2), 269-278.
- Garip, Z. Ş., & Dibekoğlu, Ş. (2023). Deprem Etkisindeki Betonarme Binalarda Dolgu Duvarların Davranışa Etkilerinin İncelenmesi. International Journal of Engineering Research and Development, 15(2), 344-360. <https://doi.org/10.29137/umagd.1178219>
- İdeCAD v11, ideYAPI Ltd.2023. <https://idecad.com.tr/>
- Korkmaz,A.,& Uçar, T.(2006). Betonarme Binaların Deprem Davranışında Dolgu Duvar Etkisinin İncelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 8(1), 101-108.
- Sancıoğlu, S., Soydoğan, H. F.,& Can, H. (2022). Farklı Dolgu Duvar Malzemelerinin ve Planda Yerleşimlerinin Betonarme Bir Yapının Davranışına Etkisi. International Journal of Engineering Research and Development, 14(2), 457-474
- Öztürkoğlu, O., Uçar, T., & Yeşilce,Y.(2015). Betonarme Yapılarda Dolgu Duvar – Çerçeve Etkileşiminin İncelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 17(51), 109-121.
- Sivri, M., Demir, F., & Kuyucular, A. (2009). Dolgu Duvarlarının Çerçeve Yapının Deprem Davranışına ve Göçme Mekanizmasına Etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10(1).
- Tekin, M., Alsancak, E., & Ay, M.(2007). Betonarme Çerçevelerde Dolgu Duvar Etkisinin İncelenmesi. Celal Bayar University Journal of Science, 3(1), 95-104.





## *Bölüm 5*

### **AŞAMALI GÖÇME TASARIM PROSEDÜRÜ: BAĞ KUVVETLERİ METODU**

*Saffet KILIÇER<sup>1</sup>*

## 1. Introduction

Aşamalı göçme, bir yapının küçük bir bölümünde meydana gelen hasarın, yapının diğer kısımlarını da etkileyerek zincirleme ve kontrolsüz bir şekilde yerel ya da tümünden çökmesine neden olduğu bir çöküş mekanizmasıdır. Bu durumda, başlangıçtaki hasar genellikle patlama gibi olağan üstü ya da beklenmedik etkiler sonucunda ortaya çıkar ve yapının tasarımındaki hatalar nedeniyle hızla yayılır.

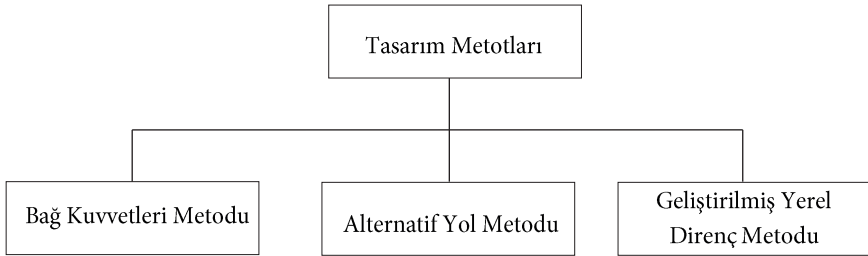
Amerikan İnşaat Mühendisleri Derneği'nin (ASCE) "Binalar ve Diğer Yapılar İçin Asgari Tasarım Yükleri" Standardı 7'nin (ASCE 7, 2016) açıklamalarında aşamalı göçme, "ilk yerel hasarın, elemandan elemana yayılması ve sonunda tüm yapının veya orantısız derecede büyük bir bölümünün çökmesi" olarak tanımlanmıştır. Standart, binaların "yerel hasar meydana geldiğinde yapısal sistemin bir bütün olarak kararlı kalacak ve ilk yerel hasara orantısız derecede zarar görmeyecek şekilde" tasarlanması gerektiğini de belirtir (UFC 4-023-03, 2009).

1968 yılında Londra'daki Ronan Point apartmanının doğalgaz patlaması sonucu çökmesi gibi beklenmedik olaylarla aşamalı göçme literatüre girmiştir. Sonraki yıllarda aşamalı göçme kavramını tanımlayan ANSI (1972), BOCA (1972), NRCC (1975), SBCCI (1994) ve ICBO (1997) kodları yayınlanmıştır. İlerleyen yıllarda nadirde olsa çeşitli nedenlerden ötürü aşamalı göçme olayları meydana gelmişse de konu hakkında farkındalık olmamıştır. 2001 yılına geldiği Dünya Ticaret Merkezi'ne (WTC) yapılan terör saldırıları ile aşamalı göçme kavramı gündeme gelmiştir. Tüm Dünyada geniş yankı uyandıran ve sosyo-ekonomik etkilerinin yanı sıra siyasi sonuçları da olan bu terör saldırısı sonrası araştırmacılar yapılarda aşamalı göçmeye problemlerine dikkat çekmeye başlamıştır. Daha sonraki yıllarda yaşanan bombalı saldırılar ve olağan dışı yüklemelere neticesinde birçok aşamalı göçme örnekleri görülmüştür. Gelişmiş ülkeler bu tür zincirleme çöküş mekanizmasını engelleyebilmek için yönetmeliklerinde aşamalı göçme kavramından bahsetmeye başlamışlardır. Bu kapsamda, böyle bir göçmeyi önlemek amacıyla günümüz yapı tasarım standartları, yapıların başlangıç hasarlara karşı dayanıklılığını artırmayı ve yüklerin kolonlar vasıtasıyla farklı yollarla zemine aktarılmasını sağlamayı amaçlarlar.



Aşmalı göçme kavramının anlaşılması ve vakaların artmasıyla araştırmacılar, son yıllarda çalışmalarını hızlandırmışlardır. Vasilieva (2013), aşamalı göçme kavramını Rus yönetmeliklerine göre tanımlamıştır. Kılıçer (2024), Geliştirilmiş Vlasov Zemin modeli kullanarak betonarme ve çelik yapılara zemin etkisini incelemiştir. Elsayed vd. (2016), Mısır deprem yönetmeliğini dikkate alarak betonarme bir yapının aşamalı göçmeye karşı direncini artırmak için deneysel çalışma yapmışlardır. Yine Amerika Birleşik Devletleri'ne ait GSA (2016) Alternatif Yol analizi tasarım rehberi, UFC 4-023-03 ile oldukça benzerlik göstermektedir.

Amerika Savunma Bakanlığı'na ait UFC 4-023-03 gibi aşamalı göçme rehberleri bazı yaklaşımlar sunar. Bunlar; Alternatif Yol metodu, Bağ Kuvvetleri metodu ve Gelişmiş Yerel Direnç metodudur. Her ne kadar Alternatif Yol metodu araştırmacılar tarafından daha sıklıkla kullanılsa da diğer yaklaşımları da incelemekte fayda vardır. Bu yaklaşımlardan ilki bağ kuvveti metodudur. Yapının mekanik (ek donatılar vb.) olarak birbirine bağlanarak aşamalı göçme risklerini en aza indirmeyi amaçlar. Şekil 1'de UFC rehberinde yer alan aşamalı göçme tasarım kriterleri verilmektedir.



**Şekil 1.** Aşamalı göçme tasarım metotları

Şekil 1'de UFC 4-023-03 aşamalı göçme dizayn rehberinde yer alan tasarım metotları gösterilmektedir. Bu tasarım metotları, bağ kuvvetleri, alternatif yol ve geliştirilmiş yerel direnç metodundan oluşmaktadır. Bu metotlar, yapının mekanik olarak birbirine bağlanarak aşamalı göçme risklerini yok etmeye ya da en aza indirmeyi amaçlar. İlk aşamalı göçme metodu olan Bağ Kuvvetleri Metodu, yapısal elemanların birbirine mekanik olarak bağlanarak göçmenin yayılmasını önlemeye odaklanır. İkinci metot, Alternatif Yol Metodu, hasar gören bir elemanın taşıdığı yüklerin alternatif yollarla diğer taşıyıcı elemanlara aktarılmasını sağlar, böylece yapı, bölgesel hasarlara karşı dayanıklılık göstermesi beklenir. Araştırmacılar sayısal

analizler de daha çok SAP2000 programını kullanırlar. Yaptıkları analizlerde atadıkları mafsallar yardımıyla modelin Alternative Yol metoduna göre aşamalı göçme direncini belirleyebilirler. Son metot ise Geliştirilmiş Yerel Dayanım Metodu olup, kritik elemanların bölgesel dayanımının artırılmasıyla, bu elemanların hasar görme olasılığı azaltılarak aşamalı göçme riski en aza indirilmeye çalışılır. Tüm bu tasarım yaklaşımları, yapının aşamalı göçme güvenliğini artırmayı ve bölgesel hasarların büyük çaplı yapısal çöküşe yol açmasını engellemeyi amaçlar. Bu kitap bölümü UFC 4-023-03 rehberindeki bilgiler ve örnek çözümlerin işlem adımları takip edilerek hazırlanmıştır.

## 2. Bağ Kuvvetleri Metodu

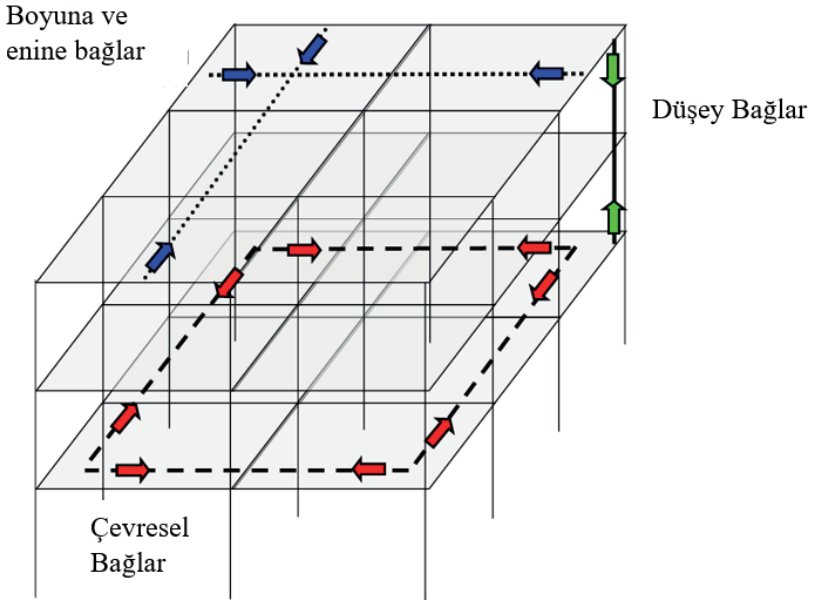
Yapıların aşamalı göçmeye karşı dayanıklılığını (direncini) artırmak amacıyla kullanılan bir tasarım metodudur. Aşamalı göçme, bir yapının küçük bölümünde başlayan hasarın, yapı taşıyıcı sisteminde yeterli yük aktarımı sağlanamadığında, tüm yapıya yayılması sonucu oluşan bölgesel ya da tümünden çökmedir. Bu durumu engellemek için kullanılan bağ kuvvetleri metodu, yapının kritik elemanlarının mekanik olarak birbirine bağlanarak, yüklerin farklı yollardan taşınmasını sağlayan mekanik bir çözüm sunar.

2005 yılında yayımlanan UFC 4-023-03'teki Bağ Kuvveti gereksinimleri İngiliz Bina Standartları'na dayanıyordu. Önceki Bağ Kuvveti gereksinimleri, malzeme bazında spesifik ve farklı malzemeler arasında konum, dağılım, büyüklük ve diğer ayrıntılar açısından sınırlı benzerlikler gösteriyordu. Önceki Bağ Kuvveti yaklaşımına yönelik yaygın ve haklı eleştirilerden biri, çelik bağlantıların büyük çoğunluğunun ve bazı donatılı beton bağlantılarının, genellikle belirtilen küçük Bağ Kuvvetlerini geliştirmek için gerekli dönme miktarlarını sağlayamamasıdır.

Bağ Kuvveti yaklaşımı genel olarak yapısal bütünlüğü artırmayı ve sürekliliği de amaçlar. Bu yaklaşım, Alternative Yol metodunda olduğu gibi bir yapının belirli elemanlarının veya bağlantılarının hasar görmesi durumunda, yapının diğer kısmında ki elemanların birbirine bağlı kalmasını ve yapının tamamen ya da bölgesel çökmesini önlemek için tasarlanmıştır (UFC 4-023-03). Bağ kuvvetleri, elemanlar arasında sürekli bir çekme kuvveti sağlamayı hedefleyerek, yapısal sistemin stabilitesini

korur ve yükleri hasar görmeyen elemanlara güvenli bir şekilde aktarır. Bunu da gerekli bölgelerde ek donatılar sayesinde ihtiyaç duyulan süreklilik ve bağlılık sağlanmış olacaktır.

Bağ kuvvetleri metodu düşey, içsel (boyuna ve enine) ve çevresel bağ kuvvetlerinden oluşur (Şekil 2). Rehber, yükleme yapılan kirişin 0.20 radyana kadar dönmesine izin verir. Maksimum sınırları aşan elemanın bağ kuvvetlerini başarısız kabul eder. Bu “bağ kuvvetleri”, ACI 318 Yapısal beton için Bina Kodu'nda tanımlanan “takviye bağları”ndan farklıdır (UFC 4-023-03, 2009).



Şekil 2. Çerçeve yapıda bağ kuvvetleri (UFC 4-023-03, 2009)

Şekildeki gibi bir yapıda bağ kuvvetleri temsil edilebilir. Ancak her yapıya bağ kuvvetleri metodu uygulanamaz. Yapıya bağ kuvvetleri metodunu uygulayabilmek için bazı asgari şartlar vardır. Tek ve iki yönde yük taşıyan duvarlar ve çerçeve yapıların aks aralık sayısı 4 veya daha büyük olmalıdır. Yük taşıyan duvarların uzunluğu en az temiz kat yüksekliğinin 4 katı olmalıdır. Akslar düz ve sürekli olmalı eğik akslar bu kurala uymamaktadır. Eğer giriş katı halka erişim sınırlandırılmış (herkese açık olmayan), yapılar daha az riskli kabul edilmesi nedeniyle bu bağların kullanılmasına gerek duyulmayacağını belirtebilir. Bir başka unsur ise düşey bağların (binanın

dikey eksenini boyunca destek sağlayan yapısal elemanlar) temele kadar uzatılmasının gerekmediğidir. Ayrıca, bu düşey bağların düz olması gereklidir. Bu bağların doğrudan temele kadar uzanması zorunlu değildir. Belirli bir noktada temelin üstünde sona erebilirler. Yani, düşey bağların sadece düz olması yeterlidir ve binanın en altındaki temel ile bağlantılı olmaları gerekmemektedir.

## 2.1. Bağ Kuvvetleri için Yük ve Dayanım Katsayısı Tasarımı

Yük ve Dayanım Katsayısı Tasarımı (LRFD) yaklaşımı dikkate alınarak tasarım bağ kuvveti, dayanım azaltma faktörü ( $\phi$ ) ile malzemeye özgü geçerli kodların gerekleri ve varsayımlarına göre hesaplanan nominal bağ kuvveti ( $R_n$ )'nin çarpımı olarak alınır. Sonuç olarak, tasarım bağ kuvveti, gereken bağ kuvvetine eşit veya ondan büyük olmalıdır.

$$\phi R_n \geq R_u \quad (1)$$

burada  $\phi R_n$ , tasarım bağ kuvveti,  $\phi$ , dayanım azaltma faktörü,  $R_n$ , Nominal bağ kuvvetini ifade eder. Malzeme özellikleri UFC 4-023-03 rehberinde çelik yapılar için Tablo 9-3, betonarme yapılar için Tablo 10-4 ve yığma yapılar için Tablo 11-2'de verilmektedir.

Bağ kuvvetleri metodu kullanırken dikkate alınacak bazı yüklemeler vardır. Bunlardan ilki uniform kat yüküdür. Bağ kuvveti hesaplamalarına başlarken ilk adım olarak kat yükü hesaplanmalıdır. Üniform kat yükü eşitlik 2'deki gibidir.

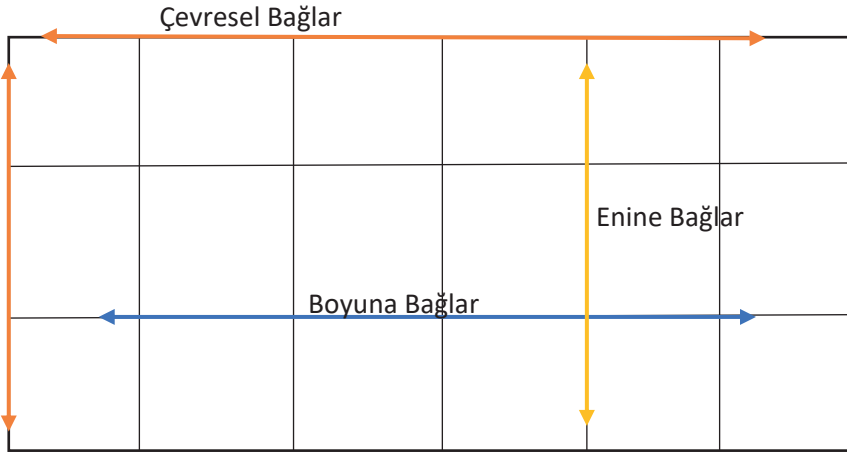
$$W_F = 1.2D + 0.5L \quad (2)$$

$W_F$ , kat yükü (lb/ft<sup>2</sup> ya da kN/m<sup>2</sup>),  $D$ , ölü yük (lb/ft<sup>2</sup> ya da kN/m<sup>2</sup>),  $L$ , hareketli yük (lb/ft<sup>2</sup> ya da kN/m<sup>2</sup>) olarak ifade edilir. Yükler kat boyunca eşit dağılmıyorsa ya da belirli bölgelerde yığılmalar oluyorsa tasarım mühendisi tarafından yüklerin dağıtılması yetkisine sahiptir. Dış cephe yükleri is sadece çevresel ve düşey bağların hesabında kullanılır.

## 2.2. Boyuna ve Enine (İçsel) Bağlar

Boyuna ve enine bağlar yapıda çatı sisteminden temele kadar olan ana, ara kirişler ve taşıyıcı elemanları ifade eder. Bu içsel bağlar, teorik olarak kirişlerin 0.20 rad (11.3 derece) dönebilmeyi taşıyabilmesi gereklidir. Örneğin, gerekli uzunlamasına bağ kuvveti 10 k/ft (146 kN/m) ise ve kirişler 10-ft (3.05 m) aralıklarla yer alıyorsa, tasarımcının kirişin 0.20 rad (11.3 derece) dönütle 100 k (445 kN) çekme kuvvetini taşıyabileceğini göstermesi gerekir (UFC 4-023-03, 2009).

UFC 4-023-03 ile başlayan yeni bir yaklaşım önerilmiş ve rehberde uygulanmıştır. Bu yeni yaklaşımda, iç Bağ Kuvvetleri zemin sistemine aktarılır, böylece bu Bağ Kuvvetleri kirişlerden, ana kirişlerden ve dış duvar aktarılır. Önceki UFC'den yapılan ek değişiklikler şunları içerir, gereksinimler artık malzemeden bağımsızdır, kat sistemindeki açıklıklar (merdiven boşlukları, asansörler, atriumlar) ile ilgili düzenlemeler eklenmiştir, buna göre bu tür boşlukların etrafına çevresel bağlar eklenmelidir. Kat plan geometrisi üzerindeki büyük yük değişikliklerine göre düzenlemeler eklenmiştir.



Şekil 3. Kat yükleri için çevresel ve içsel bağlar

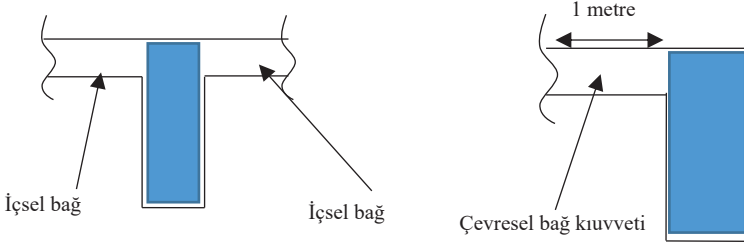
Enine ya da boyuna bağlar için bağ kuvveti;

$$F_i = 3w_F L_1 \quad (3)$$

Çevresel bağlar için bağ kuvveti;

$$F_i = 6W_F L_1 L_p + 3W_C \quad (4)$$

şeklinde hesaplanır. Burada,  $F_i$ , bağ kuvvetini,  $w_F$ , kat yükü,  $L_1$ , taşıyıcı elemanlar (kolon, taşıyıcı duvar, çerçeve system) arası mesafeyi,  $w_C$ , cephe yükünü,  $L_p$ , 3.3ft (1.0m) ifade etmektedir. İç ve çevresel bağ kuvvetlerinin betonarme kirişler üzerinde gösterimi şekil 4’de verilmektedir.



**Şekil 4.** İç ve çevresel bağ kuvvetlerinin betonarme kirişler üzerinde gösterimi

Şekil 4’de kirişlerin 0.20 radyan dönme kabiliyeti olmadıkça taralı alanlarda bağlara izin verilmez. Sadece kiriş yüzünden 1 metre (yaklaşık 3ft) uzaklıkta gerekli mukavemeti sağlayacak bağlar yerleştirilmelidir. Bu bölgeye yerleştirilecek ek donatılar ek kancalar ile çevresel bağlara mesnetlenebilir. Benzer durum çelik yapılar içinde geçerlidir.

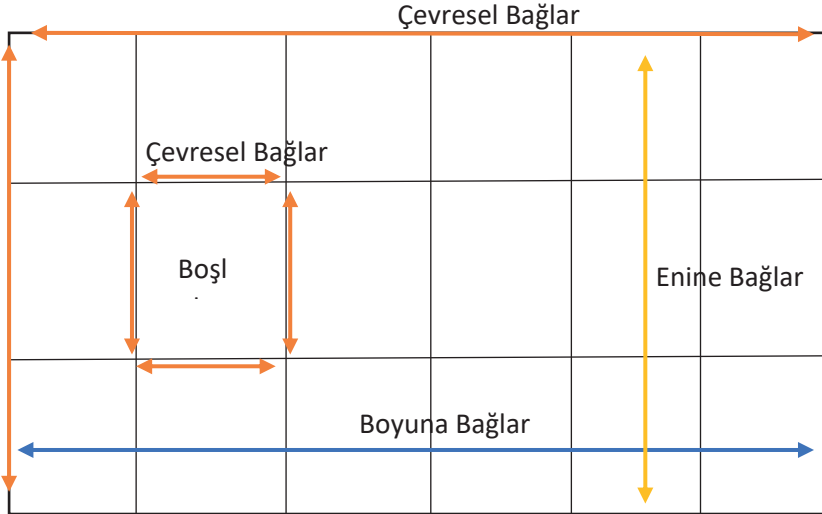
### 2.3. Düşey Bağlar

Gerekli düşey bağlantı için mukavemeti sağlamak önemlidir. Bunu yapmak için kolonlar ve yük taşıyan duvarlar kullanılmalıdır. Her bir kolon ve yük taşıyan duvar (her iki yönde ya da tek yönde), yapının çatı seviyesinden başlayarak temelin üzerindeki ilk kolon veya duvar destekli kata kadar aralıksız olarak bağlanmalıdır, yani düşey bağlantılar düz ve kesintisiz olmalıdır. Bunun yanı sıra düşey bağlantının çekme dayanımı, kolon ya da duvarın herhangi bir kattan aldığı en büyük düşey yüke eşit olmalıdır. Bu yük, bağlı olduğu alan ve 3-1.3 bölümünde belirlenen zemin yükü kullanılarak hesaplanmalıdır (UFC 4-023-03, 2009).

## 2.4. Bağların Sürekliliği

Yapılarda genel olarak aksların sürekli ve olabildiğince düzenli ve düz olması bağ sürekliliği için çok önemlidir. Çevresel bağların dış kenar boyunca (yaklaşık kirişten 1 metre mesafe içersinde) kesintisiz ve yeterli mukavemette yerleştirilmesi gerekir. İç kısımlar da ise mimari zorunluluklar nedeniyle planda olacak boşlukların (asansör, havalandırma vb.) etrafı bağlar ile çevrelenir. Diğer küçük boşluklar için bağ gerekmez. Bağların ekleri ise döşemenin kenarların döşeme genişliğinin %20'si kadarından uzak olmalıdır. Genellikle döşemenin ortasına denk gelmelidir (bknz .UFC- Table 3-6). Bağ kuvvetlerinin boşluklu bir planda gösterimi şekil 5'deki gibidir.

Boyuna, enine ve çevresel bağlar, ACI 318'deki bazı sismik kancalar (üzerine takılacak kanca, en az 135 derece bükülmüş bir etriye, çember veya çapraz bağ üzerinde olmalıdır, ancak dairesel çemberler için bükülme en az 90 derece olmalıdır (ACI318, 2019)) ile yapısal sistemde bağlar sağlanabilir. Yeterli ankraj boyları (aderans) ACI 318 Bölüm 12'de yer almaktadır. Standart kancalar, sismik kancalar ve çirozlar ACI 318 Table 25.3.1'de verilmektedir.



Şekil 5. Bağ kuvvetleri konumları

Her durumda bağ kuvvetleri her zaman çekme kuvvetini sağlayamayabilir. Bu durumlarda tasarım mühendisleri farklı analiz yöntemlerini denemelidirler. Bu gibi durumlar için Amerika Savunma Bakanlığı'na ait UFC 4-023-03 rehberi mühendislere iki seçenek sunmaktadır. Bunlardan ilki tasarımı, bağ kuvveti gereksinimlerini karşılayacak şekilde revize etmelidir ya da Alternatif Yol yöntemini kullanarak gerekli analizleri yapmalıdır. Alternatif Yol metodu, gerekli boyuna, enine veya çevresel bağ dayanımını sağlayamayan yapısal elemanlar veya bağlantılara uygulanmamalıdır; bu durumda, tasarımcı elemanı ve bağlantıyı yeniden tasarlamalı veya takviye etmelidir ki yeterli tasarım bağ dayanımı sağlansın (UFC 4-023-03, 2009).

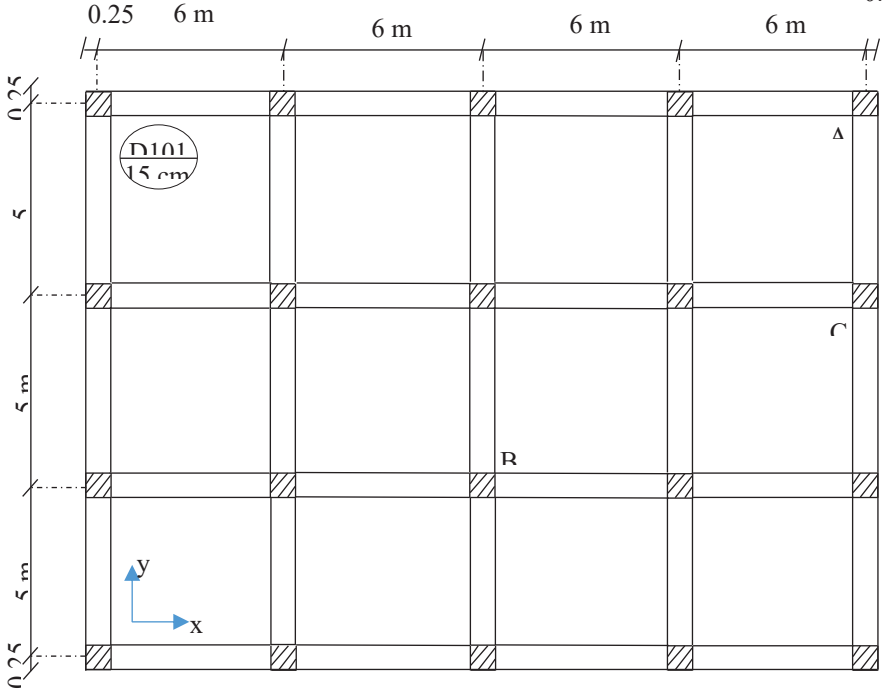
Not: ACI 318 ve bu UFC arasında bir örtüşme olduğunda, en büyük veya en katı gereksinim kullanılmalıdır.

### 3. Sayısal Örnek

6 katlı betonarme yapı örneği, ticari bir yapıdır. Yapı örneği Yozgat ili Sorgun ilçesinde konumlanmıştır ( $35^{\circ}48'07.75''K$ ,  $35^{\circ}12'05.61''D$ ). UFC 3-301-01 'Structural Engineering' rehberine göre model risk kategorisi II olarak sınıflandırılmıştır. Risk kategorisi II, UFC 3-301-01 Tablo 2-2'de I, III, IV ve V'deki yapıların dışındaki binaları kapsamaktadır. Örnek modelle ilgili ön tasarım yapılmamıştır. Modelin tüm katında ölü yükler aynı ve  $4.5 \text{ kN/m}^2$ 'dir. Hareketli yük ise  $2 \text{ kN/m}^2$  olarak dikkate alınmıştır. Yapının cephe yükü yoktur.

Yapı yüzeysel radye temel olup temel yüksekliği  $60 \text{ cm}$ 'dir. Kolonlar, kirişler, döşemeler ve temellerde beton sınıfı C25, donatı çeliği S420, kirişler  $40 \times 60 \text{ cm}^2$ , kolonların tümü  $50 \times 50 \text{ cm}^2$ , döşeme kalınlığı ise  $15 \text{ cm}$  olup tüm döşemelerde kalınlık aynıdır. Yapı kalıp planı Şekil 6'daki gibidir. Yapı için gerekli çevresel, düşey ile enine ve boyuna bağ kuvvetleri, gerekli donatılar hesaplanacaktır.





**Şekil 6.** Yapı kalıp planı

Şekilde verilen kalıp planına sahip 6 katlı bir ticari betonarme yapının bağ kuvvetlerinin hesabı aşağıdaki işlem adımları takip edilerek yapılabilir. Unutulmamalıdır ki düşey bağlar sadece kolonlarda hesaplanacaktır. Diğer bağlar ise çevresel ve boyuna bağlardır.

1. İlk işlem adımı kat yükünün hesabıdır. Eşitlik 2’de verilen kat yükü kullanılmadığı;

$$W_F = 1.2D + 0.5L = (1.2 \times 4.5) + (0.5 \times 2) = 6.4 \text{ kN/m}^2^*$$

\*Bu aşamada yapı kat alanına göre kat yükü tekrar hesaplanmalıdır. Bu örnekte mahal farklılıkları bulunmadığı için kat alanına göre kat yükü yeniden hesaplanmamıştır. Cephe yükü ( $W_C$ ) sıfırdır. Modelin sonraki işlem adımlarında kat yükü  $6.4 \text{ kN/m}^2$  olarak dikkate alınacaktır.

2. Sıradaki adım bağ kuvvetleri hesaplaması;

Örnek olarak modelin X doğrultusundaki çevresel bağ kuvveti ( $F_p$ ) Eşitlik 4 kullanılarak yapılan hesabı verilmiştir. Herbir bağ çeşiti ve yönü için ilgili formülasyonlar kullanılarak hesaplama yapılması gereklidir.

$$F_p = 6W_F L_1 L_p + 3W_C = 6 \times 6.4 \times 6 \times 0.9144 = 210.68 \text{ kN}$$

Burada çevresel bağ kuvveti donatısının yerleştirileceği uzunluk 3ft olarak (0.9144 m) dikkate alınmıştır. Bazı örneklerde 1 m olarak da hesaplamalarda kullanılabilir. X doğrultusundaki en büyük açıklık ise 6 metredir. Burada 6 metre yerine net açıklık da alınabilir. Kat yükü ise bir önceki eşilikte hesaplanan  $6.4 \text{ kN/m}^2$  değeri kullanılmıştır. Hem X hem de Y doğrultusu için hesaplanacak çevresel bağ kuvveti eşitliğinde de aynı kat yükleri kullanılır. Bu hesaplamadan sonra Eşitlik 1 kullanılarak gerekli donatı alanı hesaplanmalıdır. Donatı alanı hesaplanırken LRFD azaltma faktörü 0.75 olarak dikkate alınmıştır.

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_i \theta_i$$

$$0.75 \times (1.25 \times 0.42) A_s \geq 210.68$$

$$A_s = 535.06 \text{ mm}^2$$

### 3. Diğer tüm bağların tablolaştırılarak verilmesi

Çevresel bağ kuvvetlerinin her iki yöndeki gerekli donatı alanı hesabı Tablo.1'de verilmektedir.

**Tablo.1** Çevresel Bağ Kuvvetleri

Bağ	Konum	Uzunluk (m)	$W_F$ (kN/m <sup>2</sup> )	$W_C$ (kN/m <sup>2</sup> )	F (kN)	Gerekli Donatı Alanı (mm <sup>2</sup> )
Çevresel	Boyuna (X)	6	6.4	0	210.68	535.06
Çevresel	Enine (Y)	5	6.4	0	175.56	445.87

Tablo'da çevresel bağ kuvvetlerinin boyuna (X) ve enine (Y) yönlerdeki hesaplamaları ve elde edilen verileri göstermektedir. Boyuna (X) yönünde 6 metre ve enine (Y) yönünde 5 metre uzunluk yapı kalıp planındaki en büyük açıklıklardır. Her iki konumda da bağ kuvveti kat ağırlığı ( $W_F$ ) 6.4

kN/mm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır, bu da yapı elemanlarının her iki yönde benzer kat yüküne sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, yapıda cephe yükü olmadığından  $W_C$  değeri her iki eksen için de 0 kN/mm<sup>2</sup> olarak dikkate alınmıştır. Boyuna (X) yönünde toplam bağ kuvveti 210.68 kN olarak hesaplanmışken, enine (Y) yönündeki bağ kuvveti 175.56 kN'dir. Bu eksenler doğrultusunda, boyuna (X) yönünde gerekli olan donatı alanı 535.06 mm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir; enine (Y) yönünde ise bu değer 445.87 mm<sup>2</sup>'dir. Bu durumda boyuna ve enine yönünde 3Ø16 ek donatı çevresel bağ kuvvetleri için yeterli olacaktır.

Sıradaki bağ kuvvetleri, boyuna ve enine bağ kuvvetleridir. Bu bağ kuvvetleri için yapılan hesaplamalar aşağıdaki gibidir;

Kat yükü;

$$W_F = 1.2D + 0.5L = (1.2 \times 4.5) + (0.5 \times 2) = 6.4 \text{ kN/m}^2$$

Bağ dayanımı;

$$F_p = 3W_FL_1 = 3 \times 6.4 \times 5 = 96 \text{ kN/m}$$

Gerekli donatı alanı;

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_i \theta_i$$

$$0.75 \times (1.25 \times 0.42) A_s \geq 96$$

$$A_s = 243.81 \text{ mm}^2$$

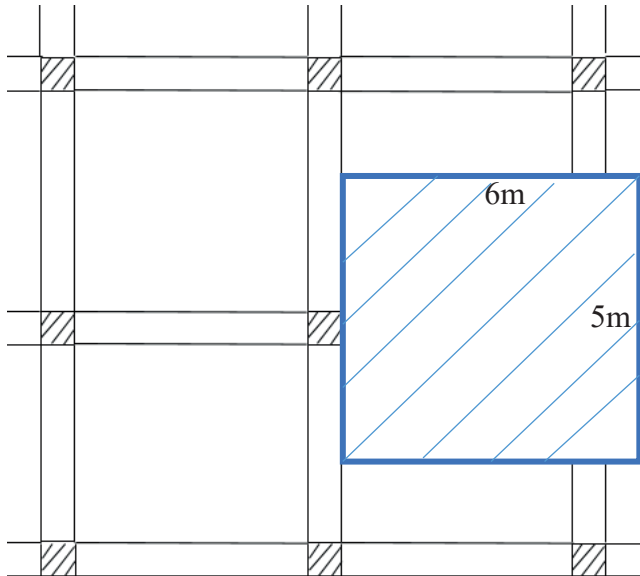
Döşemelere yerleştirilecek enine ve boyuna bağ kuvveti için elde edilen bağ kuvveti değerleri Tablo 2'de verilmektedir.

**Tablo.2** Boyuna ve Enine Bağ Kuvvetleri

Bağ	Konum	Uzunluk (m)	$W_F$ (kN/m <sup>2</sup> )	F (kN/m)	Gerekli Donatı Alanı (mm <sup>2</sup> )
Enine	Çizgisel	5	6.4	96	243.81
Boyuna	Çizgisel	6	6.4	115.2	292.57

Tablo 2, örnek bir yapı elemanının boyuna ve enine bağ kuvvetlerini, bu kuvvetler sonucunda oluşan yükleri ve gerekli olan donatı alanlarını göstermektedir. Enine bağ için 5 metre uzunluğunda döşeme bir eleman üzerinde  $6.4 \text{ kN/m}^2$  lik bir yük etkimektedir ve bu yük,  $96 \text{ kN/m}$  lik bir bağ kuvveti oluşturmaktadır. Bu kuvvetin karşılanabilmesi için gerekli donatı alanı  $243.81 \text{ mm}^2$  olarak hesaplanmıştır. Boyuna bağda ise 6 metre uzunluğunda bir döşeme eleman üzerinde aynı yük yoğunluğu olan  $6.4 \text{ kN/m}^2$  lik bir yük bulunmaktadır. Ancak boyuna yönde oluşan gerekli bağ kuvveti daha yüksek olup,  $115.2 \text{ kN/m}$  ye ulaşmaktadır. Bu nedenle boyuna bağ için gerekli donatı alanı da daha fazladır ve  $292.57 \text{ mm}^2$  olarak belirlenmiştir. Genel olarak, boyuna bağdaki kuvvet enine bağa göre daha büyüktür ve buna paralel olarak, boyuna yönde daha fazla donatı alanına ihtiyaç duyulmaktadır. Elde edilen bu bilgiler ışığında 1 metreye düşen gerekli donatı alanı da hesaplanabilir. Tablo 2’de toplam gerekli donatı alanı hesaplanmıştır.

Son olarak kolonlardaki düşey bağ kuvveti hesaplanacaktır. Kalıp planında verilen A, B ve C kolonlarının düşey bağ kuvvetleri hesaplamasında ilk olarak etki alanı hesaplanmalıdır. Örnek B kolonun etki alanı hesaplaması aşağıdaki gibidir (Şekil.7).



**Şekil.7** B kolonu etki alanı gösterimi

$$A_A = 2.75 \times 3.25 = 8.94 \text{ m}^2$$

$$A_B = 5 \times 6 = 30 \text{ m}^2$$

$$A_C = 5 \times 3.25 = 16.25 \text{ m}^2$$

Kat yükü ise Eşitlik 2 kullanılarak diğer bağ kuvvetleri gibi hesaplanabilir. Cephe yükü olmadığından kenar ve iç kolonlar arasında fark olmamaktadır. Bu nedenle tüm kolonlar için kat yükü  $6.4 \text{ kN/m}^2$  olarak dikkate alınmıştır.

Bir diğer işlem adımı Bağ kuvvetinin hesaplanmasıdır. A, B ve C kolonların bağ kuvvetleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

$$F = W_F \times \text{Alan}$$

$$F_A = 6.4 \times 8.94 = 57.22 \text{ kN}$$

$$F_B = 6.4 \times 30 = 192 \text{ kN}$$

$$F_C = 6.4 \times 16.25 = 104 \text{ kN}$$

Gerekli donatı alanı;

$$\emptyset R_n \geq \sum \gamma_i \theta_i$$

$$0.75 \times (1.25 \times 0.42) A_s \geq 57.22$$

$$A_s = 145.32 \text{ mm}^2$$

Yukarıda hesaplanan kolon etki alanları, kat yükleri, bağ kuvvetleri ve gerekli donatı alanları A, B ve C kolonları için Tablo 3'de verilmektedir.

**Tablo.3** Düşey Bağ Kuvvetleri

Bağ	Konum	Alan (m <sup>2</sup> )	$W_F$ (kN/m <sup>2</sup> )	F (kN)	Gerekli Donatı Alanı (mm <sup>2</sup> )
Düşey	A	8.94	6.4	57.22	145.32
Düşey	B	30	6.4	192	487.62
Düşey	C	16.25	6.4	104	264.13

Tablo 3, Düşey Bağ Kuvvetleri başlığı altında, üç farklı kolon elemanın alan, bağ kuvveti ve donatı alanı hesaplarını sunmaktadır. Tabloya göre, A, B ve C olarak adlandırılan kolonların taşıyıcı alanları sırasıyla 8.94 m<sup>2</sup>, 30 m<sup>2</sup> ve 16.25 m<sup>2</sup>'dir. Elemanlara etki eden yük yoğunluğu ( $W_F$ ) her biri için sabit olup 6.4 kN/m<sup>2</sup> olarak verilmiştir. Bu yük yoğunluklarına göre hesaplanan toplam kuvvetler ise A kolonu için 57.22 kN, B kolonu için 192 kN ve C kolonu için 104 kN'dur. Son olarak her bir kolon için gerekli olan donatı alanları da belirlenmiştir. A kolonu için 145.32 mm<sup>2</sup>, B kolonu için 487.62 mm<sup>2</sup> ve C kolonu için 264.13 mm<sup>2</sup> donatı alanı gerekmektedir.

Genel olarak incelendiğinde, B kolonu en büyük etki alanına ve en yüksek toplam bağ kuvvetine sahip olduğu için en fazla donatı gerektiren elemandır. A kolonu ise en küçük alana ve en düşük bağ kuvvetine sahip olup en az donatı alanına ihtiyaç duymaktadır. Kat yükü tüm elemanlar için aynı olduğundan, alan büyüdükçe toplam bağ kuvveti ve buna bağlı olarak gerekli donatı alanı da artmaktadır. Sonuç olarak, her elemanın taşıyacağı bağ kuvvetlerine göre uygun donatı alanlarının belirlendiği, böylece yapı elemanlarının güvenliği ve dayanıklılığı açısından gerekli önlemlerin alındığı anlaşılmaktadır.

## References

- ACI. (2019). American Concrete Institute: Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- ACI (American Concrete Institute). (2019). ACI 318-19: Building code requirements for structural concrete and commentary. American Concrete Institute.
- ANSI-72. (1972). Safety Code for the Use, Care and Protection of abrasive Wheels. ANSI-72. New York: American National Standards Institute.
- ASCE 7-16. (2016). Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-16). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- BOCA. (1972). The BOCA Basic Building Code Accumulative Supplement 1972: Containing Approved Changes for the Basic Building Code. Building Officials & Code Administrators International, Englewood, USA.
- Elsayed, W. M., Moaty, M. A. N. A., & Issa, M. E. (2016). Effect of Reinforcing Steel Debonding on RC Frame Performance in Resisting Progressive Collapse. HBRC Journal, 12, 242-254.
- General Services Administration. (2016). Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. Erişim adresi: [https://www.gsa.gov/system/files/Progressive\\_Collapse\\_2016.pdf](https://www.gsa.gov/system/files/Progressive_Collapse_2016.pdf)
- ICBO. (1997). International Conference of Building Officials. California, USA, 1997.
- Kılıçer, S. (2024). Zemin-yapı etkileşimi dikkate alınarak yapıların aşamalı göçme riskinin belirlenmesi. Doktora tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- NRCC. (1975). Associate Committee on the National Building Code. NRCC-1975. Canada: National Research Council of Canada.
- SBCCI. (1994). Standard Building Code. SBCCI. Englewood: Southern Building Code Congress International.

UFC 4-023-03 (2016). Design of buildings to resist progressive collapse. United States Department of Defense, Unified Facilities Criteria.

Vasilieva, A. (2013). Progressive Collapse and Methods of Prevention. Saimaa University of Applied Sciences, The Faculty of Technology, Bachelor's Thesis, Saimaa.