

**T.C.**  
**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**BETON DOLGULU ÇİFT CİDARLI OLUKLU ÇELİK KOLONLARIN**  
**EKSENEL VE DÖNGÜSEL YÜKLEME ALTINDAKİ DAVRANIŞININ SONLU**  
**ELEMANLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS**

**GULSHAN SHUKUROVA**

**Temmuz 2026**  
**GÜMÜŞHANE**



**T.C.  
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**BETON DOLGULU ÇİFT CİDARLI OLUKLU ÇELİK KOLONLARIN  
EKSENEL VE DÖNGÜSEL YÜKLEME ALTINDAKİ DAVRANIŞININ SONLU  
ELEMENLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF BEHAVIOR OF CONCRETE-FILLED DOUBLE SKIN  
CORRUGATED STEEL COLUMNS UNDER AXIAL AND CYCLIC LOADING  
USING FINITE ELEMENT METHOD**

**YÜKSEK LİSANS**

**GULSHAN SHUKUROVA**

**Temmuz 2026  
GÜMÜŞHANE**



**GÜMÜŞHANE  
ÜNİVERSİTESİ**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**T.C.**

**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**BETON DOLGULU ÇİFT CİDARLI OLUKLU ÇELİK KOLONLARIN  
EKSENEL VE DÖNGÜSEL YÜKLEME ALTINDAKİ DAVRANIŞININ SONLU  
ELEMENLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF BEHAVIOR OF CONCRETE-FILLED DOUBLE SKIN  
CORRUGATED STEEL COLUMNS UNDER AXIAL AND CYCLIC LOADING  
USING FINITE ELEMENT METHOD**

**YÜKSEK LİSANS**

**GULSHAN SHUKUROVA**

**DANIŞMAN: PROF. DR. EMRE ÖZYURT**

**Temmuz 2026**

**GÜMÜŞHANE**

## KABUL VE ONAY

**Prof. Dr. Emre ÖZYURT** danışmanlığında, **Gulshan SHUKUROVA** tarafından hazırlanan “**Beton Dolgulu Çift Cidarlı Oluklu Çelik Kolonların Eksenel ve Döngüsel Yükleme Altındaki Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi**” isimli bu çalışma, 16/07/2026 tarihinde yapılan lisansüstü tez savunma sınavı sonucunda **Oy Birliği** ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

.....  
**Prof. Dr. Özlem ÇAVDAR (Başkan)**

.....  
**Prof. Dr. Emre ÖZYURT (Danışman)**

.....  
**Doç. Dr. Muhammed ATAR (Üye)**

Lisansüstü tez savunma sınavında başarılı bulunarak kabul edilen bu tezin ciltlenmiş hali, ..... /..... /..... tarihli ve ..... / ..... sayılı Enstitü Yönetim Kurulu toplantısında görüşülmüş ve tez yazım kılavuzuna uygun bulunarak onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Duygu ÖZDEŞ**  
Enstitü Müdürü

## **BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI**

**Yüksek Lisans Tezi** olarak hazırlamış olduğum “**Beton Dolgulu Çift Cidarlı Oluklu Çelik Kolonların Eksenel ve Döngüsel Yükleme Altındaki Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, danışmanımın sorumluluğunda hazırladığımı, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmaları kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi’nin lisanslı kullanıcısı olduğu intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlediği kıstaslara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

**16/07/2026**

.....  
**Gulshan SHUKUROVA**

## **TEŞEKKÜR**

“Oluklu levhalardan oluşan beton dolgulu çift cidarlı kolonların döngüsel yükleme altındaki davranışı” adlı tezimi kaleme aldığım süreç içerisinde bana her türlü destek olan, tez çalışmamın araştırılmasında ve oluşturulmasında yoğun iş temposuna rağmen benden desteğini esirgemeyen, kıymetli tez danışmanım Prof. Dr. Emre ÖZYURT’a sonsuz şükranlarımı sunarım. Tez savunmasındaki değerli katkılarından dolayı Prof. Dr. Özlem ÇAVDAR’a ve Doç. Dr. Muhammed ATAR’a teşekkürlerimi borç bilirim.

**Gulshan SHUKUROVA**  
**GÜMÜŞHANE – 2026**

## ÖZET

Bu tez çalışmasında, beton dolgulu çift cidarlı oluklu çelik kompozit kolonların döngüsel yükler altındaki yapısal davranışı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, oluklu çelik cidar kullanımının kolonların taşıma kapasitesi, süneklik performansı ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır.

Bu kapsamda, farklı kesit geometrilerine sahip üç konfigürasyon ele alınarak kompozit kolon numuneleri modellenmiştir. Bu konfigürasyonlar, iç çelik cidarlı oluklu ve dış çelik cidarlı düz olan kolonlar, dış çelik cidarlı oluklu ve iç çelik cidarlı düz olan kolonlar ve iç ve dış çelik cidarları düz olan referans kolonlardan oluşmaktadır. Ayrıca çelik cidar kalınlığının ve kolon narinliğinin yapısal davranış üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tüm modellerde malzeme özellikleri sabit tutulmuştur.

Analiz sonuçlarına göre oluklu kesit geometrisine sahip kolonların, düz cidarlı kolonlara kıyasla daha yüksek taşıma kapasitesi ve daha kararlı bir yük–deplasman davranışı sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca, dış oluklu tasarımın beton çekirdeğe daha iyi bir sargılama sağladığını, yerel burkulmayı geciktirdiğini ve böylece referans kolona göre ortalama üç kat, içten oluklu kolonlara göre ise bir buçuk kat daha fazla enerji yutma kapasitesi sağladığını göstermiştir. Çelik cidar kalınlığının artırılması hem nihai kapasitede hem de enerji dağıtımında önemli iyileştirmeler sağlamıştır. Genel olarak, bu çalışma, özellikle oluklu dış yüzeye sahip çift cidarlı çelik kesitlerin geometrisinin faydalı olduğunu ve deprem riski yüksek bölgelerdeki yapılar için avantajlı olabileceğini ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Beton dolgulu çift cidarlı oluklu çelik, Döngüsel yük, Enerji yutma kapasitesi, Kompozit kolon, Sonlu elemanlar yöntemi

## ABSTRACT

In this thesis, the structural behavior of concrete-filled double-skin corrugated steel composite columns under cyclic loading was investigated using the finite element method. The main objective of the study is to evaluate the effects of corrugated steel tubes on the load-carrying capacity, ductility, and energy absorption capacity of the columns.

Within this scope, composite column specimens were modelled using three configurations with different cross-sectional geometries. These configurations consist of columns with a corrugated inner steel plate and a flat outer steel plate, columns with a corrugated outer steel plate and a flat inner steel plate, and reference columns with both flat inner and outer steel plates. Moreover, the effects of steel wall thickness and column slenderness on the structural behaviour were investigated. Material properties were kept constant in all models.

According to the analysis results, the columns with a corrugated cross-sectional geometry exhibited higher load-carrying capacity and more stable load-displacement behaviour compared to columns with flat plates. Furthermore, the study indicated that the outer corrugation design provided better confinement to the concrete core, delayed local buckling, and thus achieved an average of three times more energy absorption capacity compared to the reference column and one and a half times more compared to internally corrugated columns. Increasing the steel wall thickness resulted in significant improvements in both ultimate capacity and energy dissipation. Overall, this study reveals that the geometry of double-skin steel sections, especially those with a corrugated outer surface, is beneficial and can be advantageous for structures in high-risk earthquake zones.

**Keywords:** Concrete-filled double-skin corrugated steel, Cyclic load, Energy absorption capacity, Composite columns, Finite element method

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                |      |
|--------------------------------------------------------------------------------|------|
| KABUL VE ONAY .....                                                            | III  |
| BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....                                            | IV   |
| TEŞEKKÜR.....                                                                  | V    |
| ÖZET .....                                                                     | VI   |
| ABSTRACT .....                                                                 | VII  |
| İÇİNDEKİLER .....                                                              | VIII |
| TABLolar DİZİNİ .....                                                          | X    |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                                           | XI   |
| EKLER DİZİNİ.....                                                              | XIII |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....                                            | XIV  |
| 1. GİRİŞ.....                                                                  | 1    |
| 1.1. Çift Cidarlı BDÇT Kompozit Kolon Sistemleri .....                         | 2    |
| 1.2. BDOÇT Kompozit Elemanların Uygulamaları.....                              | 2    |
| 1.3. Araştırma Boşluğu ve Problemin Tanımı .....                               | 4    |
| 1.4. Tezin Amacı ve Kapsamı .....                                              | 5    |
| 1.5. Tezin Organizasyonu .....                                                 | 6    |
| 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....                                                  | 8    |
| 2.1. BDÇT Kolonlar Üzerine Yapılan Çalışmalar.....                             | 9    |
| 2.2. Çift Cidarlı BDÇT Kolonlar Üzerine Yapılan Çalışmalar .....               | 10   |
| 2.3. BDOÇT Kolonlar Üzerine Yapılan Çalışmalar.....                            | 13   |
| 2.4. Döngüsel Yükleme Altındaki Davranış .....                                 | 14   |
| 2.5. Çelik ve Beton Arasındaki Aderans Mekanizması .....                       | 15   |
| 2.6. Malzeme Özellikleri.....                                                  | 16   |
| 2.6.1. Yapı Çeliğinin Özellikleri ve Davranış Modelleri .....                  | 16   |
| 2.6.2. Betonun Mekanik Özellikleri ve Davranış Modelleri.....                  | 17   |
| 2.7. Eşdeğer Kesit Yaklaşımları Ve Mevcut Yönetmelikler (EUROCODE 4, AISC) ... | 19   |
| 2.7.1. Eurocode 4 Yaklaşımı .....                                              | 19   |
| 2.7.2. AISC 360 Yaklaşımı .....                                                | 20   |
| 2.8. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Abaqus Yazılımı .....                          | 21   |
| 3. SAYISAL ANALİZLER VE MODELLEME .....                                        | 24   |
| 3.1. Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması.....                              | 24   |
| 3.1.1. Geometrik Parametreler ve Numune Tanımları .....                        | 25   |

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.2. Eleman Tipi ve Ağ Yapısı.....                           | 27 |
| 3.1.3. Malzeme Modelleri .....                                 | 29 |
| 3.1.3.1. Çelik Malzeme Modeli.....                             | 30 |
| 3.1.3.2. Beton Malzeme Modeli.....                             | 31 |
| 3.1.4. Temas Özelliklerinin Tanımlanması .....                 | 31 |
| 3.1.5. Başlangıç Geometrik Kusurlarının Tanımlanması.....      | 32 |
| 3.1.6. Sınır Şartları ve Yükleme Koşulları.....                | 33 |
| 3.2. Sayısal analizlerin doğrulaması.....                      | 34 |
| 3.2.1. Monotonik Yük Altında Model Doğrulaması .....           | 35 |
| 3.2.2. Döngüsel Yük Altında Model Doğrulaması .....            | 38 |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....                                  | 43 |
| 4.1. Parametrik Çalışmanın Kapsamı.....                        | 43 |
| 4.2. Eksenel Yük–Deplasman Davranışının İncelenmesi .....      | 44 |
| 4.3. Eksenel Yük Taşıma Kapasitelerinin Karşılaştırılması..... | 47 |
| 4.4. Histeretik Davranışın İncelenmesi .....                   | 50 |
| 4.4.1. Oluk Oryantasyonunun Etkisi .....                       | 52 |
| 4.4.2. Narinlik Oranının Etkisi .....                          | 53 |
| 4.4.3. Cidar Kalınlığının Etkisi .....                         | 56 |
| 4.4.4. Oluk Geometrisinin Etkisi.....                          | 57 |
| 4.5. Süneklik Oranlarının İncelenmesi.....                     | 59 |
| 4.6. Enerji Yutma Kapasitesinin İncelenmesi .....              | 61 |
| 4.7. Göçme Modlarının İncelenmesi.....                         | 62 |
| 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....                                  | 65 |
| 5.1. Eksenel Yükleme Sonuçları .....                           | 65 |
| 5.2. Yatay Döngüsel Yükleme ve Sonuçları .....                 | 66 |
| 5.3. Gelecek Çalışmalar .....                                  | 67 |
| KAYNAKÇA.....                                                  | 69 |
| EKLER.....                                                     | 73 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                 | 79 |

## **TABLÖLAR DİZİNİ**

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 1. Kolon numunelerine ait geometrik özellikler ve kesit parametreleri .....                                 | 26 |
| Tablo 2. Beton hasarlı plastisite model parametreleri.....                                                        | 31 |
| Tablo 3. Farahi vd. (2016) çalışmasında kullanılan deney numunelerinin geometrik özellikleri ve dayanımları ..... | 35 |
| Tablo 4. Farklı kolon tiplerine ait maksimum eksenel yük taşıma kapasitesi değerleri .                            | 49 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1. Wushan Yangtze Nehri Köprüsü, Çin. ....                                                                                                       | 3  |
| Şekil 2. Fleet Place House Binası, Birleşik Krallık, Londra .....                                                                                      | 4  |
| Şekil 3. Çift cidarlı BDÇT kesitinin şematik gösterimi .....                                                                                           | 11 |
| Şekil 4. Oluk konfigürasyonu .....                                                                                                                     | 26 |
| Şekil 5. Parametrik çalışmada kullanılan kolon numunelerine ait geometrik konfigürasyonlar (IC ve OC serileri).....                                    | 26 |
| Şekil 6. Ağ yakınsama eğrisi.....                                                                                                                      | 28 |
| Şekil 7. Kolon modellerinde kullanılan tipik mesh düzeni .....                                                                                         | 29 |
| Şekil 8. Kolon uçlarında kullanılan referans noktalarının tanımlanması.....                                                                            | 33 |
| Şekil 9. Farahi vd. (2016) deney sonuçları ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen eksenel şekil değiştirme–yük eğrilerinin karşılaştırılması..... | 36 |
| Şekil 10. Farahi vd. (2016) deney sonuçları ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen göçme modlarının karşılaştırılması .....                       | 37 |
| Şekil 11. BDÇT kolon modelinde kullanılan tipik sınır koşulları ve mesh dağılımı .....                                                                 | 38 |
| Şekil 12. Liao vd. (2017) deney sonuçları ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen yük–deplasman zarf eğrilerinin karşılaştırılması.....            | 39 |
| Şekil 13. Döngüsel yatay yükleme.....                                                                                                                  | 40 |
| Şekil 14. Yük–deplasman eğrilerinde akma ve nihai deplasmanların şematik gösterimi .....                                                               | 40 |
| Şekil 15. Liao vd. (2017) deney sonuçları ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen kompozit kolon göçme modlarının karşılaştırılması .....          | 41 |
| Şekil 16. Yükleme ve mesnet koşulları.....                                                                                                             | 43 |
| Şekil 17. Farklı kesit konfigürasyonlarına sahip çift cidarlı BDÇT kolonlarının yük–deplasman eğrilerinin karşılaştırılması.....                       | 45 |
| Şekil 18. 3 mm çelik cidar kalınlığına sahip numunelerde oluk oryantasyonunun histeretik eğrileri üzerindeki etkisi .....                              | 50 |
| Şekil 19. Kolon tabanından 100 mm mesafedeki enkesitte eksenel gerilme dağılımlarının karşılaştırılması .....                                          | 51 |
| Şekil 20. 3 mm çelik cidar kalınlığına sahip numunelerde oluk oryantasyonunun zarf eğrileri üzerindeki etkisi .....                                    | 52 |
| Şekil 21. Kolon narinliğinin kompozit kolonların zarf eğrileri üzerindeki etkisi.....                                                                  | 54 |

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 22. Çeşitli narinlik oranlarına sahip kompozit elemanların eşdeğer plastik gerinim dağılımlarının mukayesesi .....      | 55 |
| Şekil 23. Cidar kalınlığının kompozit kolonların zarf eğrileri üzerindeki etkisi .....                                        | 57 |
| Şekil 24. Oluk geometrisinin kompozit kolonların zarf eğrileri üzerindeki etkisi.....                                         | 59 |
| Şekil 25. Kompozit kolonların süneklik oranlarının karşılaştırılması .....                                                    | 60 |
| Şekil 26. Kompozit kolonların toplam enerji yutma kapasitelerinin karşılaştırılması....                                       | 61 |
| Şekil 27. OC1 ve IC1 kompozit kolonlarına ait eşdeğer plastik şekil değiştirme (PEMAG) dağılımlarının karşılaştırılması ..... | 63 |

## EKLER DİZİNİ

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ek 1. Döngüsel yatay yükleme sonuçlarına ait $P_{max}$ , $\delta_y$ , $\delta_u$ , $\mu$ and $E_{total}$ değerleri ..... | 73 |
| Ek 2. Kompozit Kolonların Narinlik Oranlarının Hesaplanması.....                                                         | 76 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|                 |                                                      |
|-----------------|------------------------------------------------------|
| $\Delta$        | : Yatay deplasman                                    |
| $A_c$           | : Betonun kesit alanı                                |
| $A_s$           | : Çeliğin kesit alanı                                |
| BDÇT            | : Beton Dolgulu Çelik Tübüler                        |
| BDOÇT           | : Beton Dolgulu Oluklu Çelik Tübüler                 |
| $B_i$           | : Kutu şekilli iç cidarın çapı                       |
| $B_o$           | : Kutu şekilli dış cidarın çapı                      |
| $D_i$           | : Boru şekilli iç cidarın çapı                       |
| $D_o$           | : Boru şekilli dış cidarın çapı                      |
| $E_c$           | : Betonun elastisite modülü                          |
| $E_s$           | : Çeliğin elastisite modülü                          |
| $f_{b0}$        | : Betonun iki eksenli basınç dayanımı                |
| $f_c'$          | : Betonun tek eksenli basınç dayanımı                |
| $f_{cd}$        | : Betonun tasarım basınç dayanımı                    |
| $f_y$           | : Çeliğin akma dayanımı                              |
| $K$             | : Akma yüzeyinin şekil parametresi                   |
| $N_{pl,Rd}$     | : Kompozit kesitin plastik eksenel taşıma kapasitesi |
| $P_{max}$       | : Maksimum eksenel yük taşıma kapasitesi             |
| $P_n$           | : Nominal eksenel yük taşıma kapasitesi              |
| $P_u$           | : Nihai eksenel yük taşıma kapasitesi                |
| SE              | : Sonlu elemanlar                                    |
| $\delta_u$      | : Nihai deplasman                                    |
| $\varepsilon_u$ | : Maksimum birim şekil değiştirme oranı              |
| $\theta$        | : Pik ötelenme açısı                                 |
| $\mu$           | : Sürtünme katsayısı                                 |
| $\nu$           | : Poisson oranı                                      |
| $\psi$          | : Genleşme açısı                                     |

## 1. GİRİŞ

Beton Dolgulu Çelik Tübüler (BDÇT) kolonlar, çelik ve beton malzemelerinin mühendislik özelliklerini bir araya getiren kompozit yapı elemanları olarak son yıllarda yapı mühendisliğinde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu kompozit sistemlerde, çelik tübüler kolonlar yüksek çekme ve basınç dayanımı ile süneklik sağlarken, beton dolgu malzemesi basınç dayanımı ve rijitlik açısından önemli katkılar sunmaktadır. Çelik tüp ile beton çekirdek arasındaki karşılıklı etkileşim sayesinde her iki malzeme birlikte çalışarak, tek başına kullanıldıkları duruma göre daha yüksek taşıma kapasitesi, süneklik ve enerji yutma kapasitesi göstermektedir.

BDÇT kolonlar, özellikle yüksek katlı yapılar, köprü ayakları, endüstriyel yapılar ve deprem etkisinin önemli olduğu bölgelerde tercih edilmektedir. Bu sistemler, yüksek yük taşıma kapasitesinin yanı sıra hızlı imalat, ekonomik malzeme kullanımı ve yapısal güvenlik açısından da önemli avantajlar sunmaktadır. Bununla birlikte, ince cidarlı çelik tübüler elemanda sıklıkla meydana gelen yerel burkulma davranışı ve yüksek eksenel yükler altında oluşan deformasyonlar sistem performansını sınırlandırabilmektedir.

Son yıllarda bu problemlerin azaltılması amacıyla Beton Dolgulu Oluklu Çelik Tübüler (BDOÇT) kompozitler üzerinde kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Oluk geometrisi, çelik cidarın yerel stabilitesini artırarak burkulma davranışını geciktirebilmekte ve kolonların yük taşıma kapasitesi ile deformasyon performansını iyileştirebilmektedir. Özellikle çift cidarlı BDOÇT kompozit kolon sistemlerinde oluklu çelik tübüler elemanların kullanılması hem yapısal performansın geliştirilmesi hem de daha etkin malzeme kullanımı açısından dikkat çekici bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

DeneySEL çalışmalar kompozit kolonların davranışının anlaşılmasında önemli bilgiler sağlamasına rağmen, farklı geometrik parametrelerin ve yükleme koşullarının incelenmesi yüksek maliyet ve zaman gerektirmektedir. Bu nedenle sonlu elemanlar yöntemi, kompozit kolonların davranışının detaylı olarak incelenmesinde yaygın olarak kullanılan güvenilir bir analiz aracı haline gelmiştir. Gelişmiş sayısal modeller ile geometrik parametrelerin gerilme dağılımları, deformasyon mekanizmaları, enerji yutma kapasiteleri üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak değerlendirilebilmektedir.

Bu tez çalışmasında beton dolgulu çift cidarlı oluklu çelik kolonların eksenel ve döngüsel yükler altındaki davranışları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada oluk oryantasyonu, kolon narinliği ve çelik cidar kalınlığı gibi parametrelerin yapısal performans üzerindeki etkileri araştırılmış; elde edilen sonuçlar taşıma kapasitesi, histeretik davranış, enerji yutma kapasitesi, süneklik ve göçme modları açısından değerlendirilmiştir.

### **1.1. Çift Cidarlı BDÇT Kompozit Kolon Sistemleri**

Çift cidarlı BDÇT kolonlar, iç ve dış çelik cidarlar arasında yer alan beton çekirdek sayesinde hem hafif hem de yüksek taşıma kapasitesine sahip kompozit kesitler olarak yapılarda geniş kullanım alanı bulmaktadır (Farahi vd., 2016; Xiong vd., 2017; Han vd., 2001). Dış çelik katman, betonun yanal genleşmesini sınırlandırarak betonun etkin basınç dayanımını artırırken, iç çelik katman ise beton çekirdeğinin stabilitesini sağlayarak gövdenin burkulma riskini azaltır (Liao vd., 2017; Zhou ve Xu, 2016).

Son yıllarda yapılan deneysel ve sayısal araştırmalar, çift cidarlı BDÇT kolonların hem eksenel yük hem de döngüsel yatay yükler altında oldukça kararlı bir yapısal davranış sergilediğini göstermektedir (Fang vd., 2021; Wang vd., 2024). Özellikle yüksek süneklik gerektiren deprem tasarımında BDÇT kolonların tercih edilme nedeni, histeretik çevrimlerde ortaya çıkan yüksek enerji yutma kapasitesidir (Zhang vd., 2023).

Ayrıca çift cidarlı BDÇT sistemlerin, boşluk oranına bağlı olarak geleneksel BDÇT kolonlara göre daha hafif bir kesit sunması, yüksek binalarda ve uzun açıklıklı köprülerin ayaklarında önemli mühendislik avantajları sağlamaktadır (Han vd., 2014; Young ve Ellobody, 2006; Qiu vd., 2017; Han vd., 2020; Fan vd., 2024).

Bu nedenle hem deprem bölgelerinde hem de dinamik yüklerin kontrolünün kritik olduğu yapılarda çift cidarlı BDÇT kolonlara yönelik ilgi artmaya devam etmektedir.

### **1.2. BDOÇT Kompozit Elemanların Uygulamaları**

İnşaat mühendisliği pratikleri geliştikçe, yapıların çok daha uzun açıklıklar, daha yüksek katlar ve daha ağır yükler taşıması ihtiyacı doğmuştur. Beton dolgulu çift cidarlı çelik tübüler sistemler ve bunların gelişmiş bir formu olan oluklu çelik tübüler kompozit elemanlar; yüksek dayanım, üstün süneklik, yüksek yangın direnci ve pratik inşa edilebilirlik gibi geleneksel beton dolgulu çelik boru sistemlerinin tüm avantajlarını sağlamaktadırlar (Nassirnia vd., 2015; Nassirnia vd., 2016; Zou vd., 2023). Bu kompozitler, geleneksel yapılara kıyasla çok yüksek rijitlik/ağırlık oranı gerektiren

viyadük köprü ayaklarında, enerji nakil hatları kulelerinde ve açık deniz platformlarında kullanılmaktadır (Fan vd., 2024; Lu vd., 2025).

Buna ek olarak, modern şehir ulaşım sistemlerinde, tünel ve köprü mühendisliğinde sıklıkla karşılaşılan asimetrik binalar, kavisli köprüler ve düzensiz planlı çok katlı yapılar gibi sistemlerde bu elemanlar kritik bir rol üstlenmektedir (Fang vd., 2024; Yang vd., 2025). Bu uygulamalara örnek olarak Çin'de yer alan Wushan Yangtze Nehri Köprüsü ile Birleşik Krallık'ın Londra kentindeki Fleet Place House binası verilebilir. Söz konusu yapılara ait görseller sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de sunulmuştur. BDOÇT elemanlarının hem iç hem de dış oluklu tübüler cidarları sayesinde karmaşık yükleme koşullarına karşı yüksek dayanım ve rijitlik göstermesi, bu elemanların köprü yapıları, yüksek katlı binalar ve karmaşık altyapı projelerinde ana taşıyıcı sistem olarak kullanılmasını cazip hale getiren başlıca nedenlerden biridir.



Şekil 1. Wushan Yangtze Nehri Köprüsü, Çin.



Şekil 2. Fleet Place House Binası, Birleşik Krallık, Londra

Çift cidarlı BDOÇT kompozit yapıların dış ve iç çelik tübüler katmanları, inşaat aşamasında beton için kalıcı bir kalıp işlevi görerek ek kalıp işçiliğini, malzeme maliyetlerini ve inşaat sürelerini ciddi oranda azaltır. Ayrıca, beton pompalanmadan önce dahi bu çelik tübüler katmanlar kendi başlarına dikkate değer büyüklükte inşaat yüklerini taşıyabilmekte ve bu sayede şantiye verimliliğini üst düzeye çıkarabilmektedir. Servis aşamasında ise, iç çelik cidar onu saran beton tabaka tarafından korunduğu için sistemin genel yangın direnci olağanüstü derecede yükselmektedir. Buna ek olarak, sistemin merkezindeki boşluk, projeye bağlı olarak tesisat hatlarının geçirilmesi veya diğer mimari ve işlevsel kullanım gereksinimleri için verimli bir şekilde değerlendirilebilmektedir.

### 1.3. Araştırma Boşluğu ve Problemin Tanımı

Beton dolgulu çelik tübüler kolonlar üzerine gerçekleştirilen çalışmalar, bu sistemlerin yüksek taşıma kapasitesi, süneklik ve enerji yutma performansı açısından önemli avantajlara sahip olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle beton dolgulu çift cidarlı çelik tübüler kolonlar, iç ve dış çelik tübüler cidarlar ile beton dolgu malzemesinin birlikte çalışması sayesinde geleneksel kompozit kolon sistemlerine kıyasla daha gelişmiş yapısal davranış sergilemektedir. Bu nedenle söz konusu sistemler son yıllarda araştırmacıların yoğun ilgi gösterdiği kompozit yapı elemanları arasında yer almaktadır.

Mevcut literatürde çift cidarlı BDÇT kompozit kolonların eksenel yük, eğilme, kesme, burulma, darbe direnci ve döngüsel yükler altındaki davranışlarını inceleyen çok sayıda deneysel ve sayısal çalışma bulunmaktadır. Bununla birlikte, çift cidarlı BDOÇT kompozit kolonların davranış üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmaların sayısı sınırlıdır. Özellikle oluk oryantasyonu, kolon narinliği ve çelik cidar kalınlığı gibi parametrelerin yapısal performans üzerindeki etkileri henüz yeterince araştırılmamıştır.

Ayrıca, bu tür sistemlerin deneysel olarak incelenmesi yüksek maliyet ve altyapı gerektirdiğinden, farklı parametrelerin etkilerinin kapsamlı şekilde değerlendirilmesinde sonlu elemanlar yöntemi önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Güvenilir şekilde doğrulanmış sayısal modeller kullanılarak farklı geometrik ve malzeme parametrelerinin kolon davranışı üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenebilmektedir.

Bu tez çalışmasında, beton dolgulu çift cidarlı oluklu çelik kolonların eksenel ve döngüsel yükler altındaki davranışları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmada oluk oryantasyonu, kolon narinliği ve çelik cidar kalınlığı gibi temel parametrelerin taşıma kapasitesi, histeretik davranış, enerji yutma kapasitesi, süneklik ve göçme modları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Böylece mevcut literatürde sınırlı olarak incelenen oluklu çift cidarlı kompozit kolon sistemlerine ilişkin bilgi birikimine katkı sağlanması amaçlanmıştır.

#### **1.4. Tezin Amacı ve Kapsamı**

Mevcut literatür incelendiğinde, BDÇT ve çift cidarlı BDÇT kolonların farklı yükleme koşulları altında ele alındığı; ancak özellikle çift cidarlı BDOÇT kolonların döngüsel yatay yükler altındaki davranışının sınırlı sayıda çalışma ile incelendiği görülmektedir (Nassirnia vd., 2015; Farahi vd., 2016; Zou vd., 2023). Oluklu cidar geometrisinin yerel burkulma, rijitlik korunumu ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki olumlu etkileri deneysel çalışmalarla ortaya konmuş olsa da, çift cidarlı BDOÇT kolonların detaylı biçimde modellenmesi ve parametrik etkilerinin sistematik şekilde değerlendirilmesi halen önemli bir araştırma ihtiyacı olarak öne çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasının temel amacı, çift cidarlı BDOÇT kolonların döngüsel yatay yükler altındaki yapısal davranışını sonlu elemanlar yöntemi kullanarak ayrıntılı biçimde incelemektir. Bu kapsamda, oluklu çelik cidar kullanımının kolonların taşıma kapasitesi, süneklik düzeyi, rijitlik azalımı ve enerji yutma performansı üzerindeki etkilerinin ortaya konulması hedeflenmektedir. Çalışmada elde edilecek sonuçların, literatürde rapor edilen deneysel bulgularla karşılaştırılarak mevcut bilgi birikiminin genişletilmesi amaçlanmaktadır.

Tez kapsamında geliştirilen sayısal modellerde, beton malzemesinin mekanik davranışı için Beton Hasarlı Plastisite modeli, çelik malzemesi için ise doğrusal olmayan elastoplastik malzeme tanımları kullanılarak kolonların döngüsel yükleme altındaki davranışları gerçekçi biçimde temsil edilmektedir. Model doğrulaması, literatürde yer alan deneysel çalışmalar esas alınarak gerçekleştirilecek; böylece oluşturulan sonlu eleman modellerinin güvenilirliği değerlendirilecektir.

Bunun yanı sıra, oluk geometrisine ait oluk derinliği, oluk genişliği ve geometrik düzeni parametrelerinin kolon davranışı üzerindeki etkileri parametrik analizler aracılığıyla ayrıntılı şekilde değerlendirilecektir. Bu analizler sayesinde, oluklu cidarlı BDOÇT kolonların döngüsel yükler altındaki performansını belirleyen kritik parametrelerin ortaya konulması ve optimum tasarım eğilimlerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

### **1.5. Tezin Organizasyonu**

Bu tez çalışması, araştırma amacına ve izlenen yönteme uygun olarak beş ana bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, beton dolgulu çift cidarlı çelik tübüler kolon sistemleri ve oluklu çelik cidarların yapısal sistemlerde kullanımına ilişkin genel bilgiler sunulmaktadır. Ayrıca araştırma problemi tanımlanmakta, çalışmanın amacı ve kapsamı açıklanmakta ve tezin genel organizasyonu sunulmaktadır.

İkinci bölümde, beton dolgulu çelik tübüler kolonlar, çift cidarlı kompozit sistemler, oluklu çelik cidarlar ve bu sistemlerin eksenel ve döngüsel yükler altındaki davranışlarına ilişkin literatürde yer alan çalışmalar incelenmektedir. Ayrıca mevcut araştırma eğilimleri değerlendirilerek çalışmanın literatürdeki yeri ortaya konulmaktadır.

Üçüncü bölümde, beton dolgulu çift cidarlı oluklu çelik kolonlara ait sonlu elemanlar modellerinin oluşturulma süreci ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Bu kapsamda geometrik özellikler, malzeme modelleri, temas tanımları, sınır koşulları ve ağ yapısı tanıtılmakta; geliştirilen sayısal modellerin deneysel çalışmalar ile doğrulanmasına yer verilmektedir.

Dördüncü bölümde, gerçekleştirilen parametrik analizlerden elde edilen bulgular sunulmakta ve değerlendirilmektedir. Bu bölümde oluk oryantasyonu, kolon narinliği ve çelik cidar kalınlığı gibi parametrelerin taşıma kapasitesi, histeretik davranış, süneklik, enerji yutma kapasitesi ve göçme modları üzerindeki etkileri incelenmektedir.

Beşinci ve son bölümde ise çalışmadan elde edilen temel sonuçlar özetlenmekte ve elde edilen bulgular doğrultusunda gelecekte gerçekleştirilebilecek araştırmalara yönelik öneriler sunulmaktadır.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

BDÇT ve çift cidarlı BDÇT sistemler, son yıllarda deprem mühendisliği ve modern yapı tasarımında önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir (Han vd., 2001; Liao vd., 2017; Zhou ve Xu, 2016). Çelik tübüler katmanların beton ile birlikte kullanılması, her iki malzemenin avantajlarını bir araya getirerek yüksek dayanım, rijitlik ve süneklik sağlayan kompozit bir yapı oluşturmaktadır. Çift cidarlı BDÇT sistemleri, iç ve dış çelik tübüler katmanlar arasında yer alan beton çekirdeği sayesinde hem dayanım hem de hafiflik gerektiren tasarımlar için etkili bir alternatif sunmaktadır (Farahi vd., 2016; Xiong vd., 2017).

Literatürde yapılan çalışmalar, bu kolonların tekrarlı yatay yükler altında yüksek enerji yutma kapasitesi ve kararlı histeretik davranış sergilediğini göstermektedir (Fang vd., 2021; Wang vd., 2024; Huang vd., 2024). Bunun yanı sıra, çift cidarlı BDOÇT sistemlerde kullanılması, yerel burkulma dayanımını artırması ve kesit rijitliğini iyileştirmesi açısından önemli bir geometrik düzenleme olarak değerlendirilmektedir (Nassirnia vd., 2015; Zou vd., 2023; Li Y.D. vd., 2024).

BDÇT kolonların davranışına ilişkin ilk çalışmalar, beton ile çelik tüp arasındaki kompozit etkileşimin taşıma kapasitesini ve sünekliği önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuştur. Han vd. (2001, 2005) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, çelik tüpün beton çekirdeği üç eksenli basınç altında sınırlandırması sayesinde beton dayanımının arttığını göstermiştir. Giakoumelis ve Lam (2004) ile Yang vd. (2008) tarafından yapılan araştırmalarda ise farklı kesit geometrilerine sahip beton dolgulu çelik tüplerin eksenel yük altındaki davranışları incelenmiş ve çelik tüp ile beton arasındaki etkileşimin taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir. Han vd. (2014), beton dolgulu çelik tüp sistemlerin gelişimini kapsamlı şekilde değerlendirerek bu elemanların yüksek dayanım, rijitlik ve süneklik özellikleri nedeniyle modern yapı mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaya başlandığını belirtmiştir.

Çift cidarlı BDÇT sistemler üzerine gerçekleştirilen çalışmalar da benzer şekilde olumlu sonuçlar ortaya koymuştur. Zhao ve Grzebieta (2002), çift cidarlı sistemlerin geleneksel beton dolgulu çelik tüplere kıyasla daha yüksek süneklik ve deformasyon kapasitesi sağlayabildiğini göstermiştir. Uenaka vd. (2008) eğilme etkisi

altındaki çift cidarlı elemanların davranışını incelemiş, iç çelik tüpün kesit stabilitesine önemli katkı sağladığını rapor etmiştir. Daha sonraki çalışmalarda Hassanein vd. (2018), Yan ve Zhao (2020) ile Tiwary (2022), çift cidarlı kompozit kolonların eksenel yük altındaki davranışlarını deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemiş ve bu sistemlerin yüksek taşıma kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Son yıllarda yapılan çalışmalar incelendiğinde, hem düz cidarlı hem de oluklu cidarlı BDÇT kolonların davranışının deneysel ve sayısal yöntemlerle kapsamlı biçimde araştırıldığı görülmektedir. Ji vd. (2023), oluklu kompozit kolonların yanal yükler altındaki döngüsel davranışını incelemiş ve oluk geometrisinin histeretik performansı iyileştirdiğini göstermiştir. Zou vd. (2023), beton dolgulu oluklu çelik tüplerin eksenel basınç davranışını araştırarak oluklu cidar kullanımının yerel burkulmayı geciktirdiğini ortaya koymuştur. Li Y.D. vd. (2024) ve Huang vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda ise oluklu kompozit kolonların döngüsel yükleme altındaki yapısal ve sismik performansları değerlendirilmiş, oluk geometrisinin enerji yutma kapasitesi ve süneklik üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu belirlenmiştir. Ayrıca Fang vd. (2024), oluklu çelik tüplerin döngüsel burulma yükleri altındaki davranışını araştırırken, Yang vd. (2025) oluklu kompozit kolonların yapısal uygulamalarını ve deprem davranışlarını kapsamlı biçimde değerlendirmiştir.

Bununla birlikte, özellikle çift cidarlı BDOÇT sistemlerinin döngüsel yükler altındaki davranışına yönelik çalışmaların halen sınırlı olduğu dikkat çekmektedir. Ayrıca oluk geometrisi, cidar kalınlığı ve kolon narinliği gibi parametrelerin birlikte değerlendirildiği kapsamlı parametrik çalışmaların sayısı da sınırlıdır. Bu tez çalışmasında söz konusu boşluğun giderilmesine katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

## **2.1. BDÇT Kolonlar Üzerine Yapılan Çalışmalar**

BDÇT kolonlar üzerine yapılan çalışmalar, bu sistemlerin çelik ve betonun avantajlarını bir araya getirerek yüksek taşıma kapasitesi ve süneklik sağladığını göstermektedir. Han vd. (2001) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, çelik tüpün beton çekirdeğinin üç eksenli basınç altında tutulduğu ve bunun betonun basınç dayanımını artırdığı ortaya konmuştur. Ayrıca çelik cidar kalınlığının artmasıyla birlikte kolonun hem sünekliğinin hem de yük taşıma kapasitesinin arttığı belirtilmiştir.

Zhou ve Xu (2016) BDÇT kolonların döngüsel yükler altındaki davranışını incelemiş ve bu kolonların kararlı histeretik çevrimler sergilediğini göstermiştir. Çalışmada betonun çelik cidar tarafından sınırlandırılmasının enerji yutma kapasitesini artırdığı ve rijitlik kaybını geciktirdiği ifade edilmiştir. Benzer şekilde, Zhao vd. (2023)

BDÇT kolonların döngüsel yükler altında önemli miktarda enerji sönümleyebildiğini ortaya koymuştur.

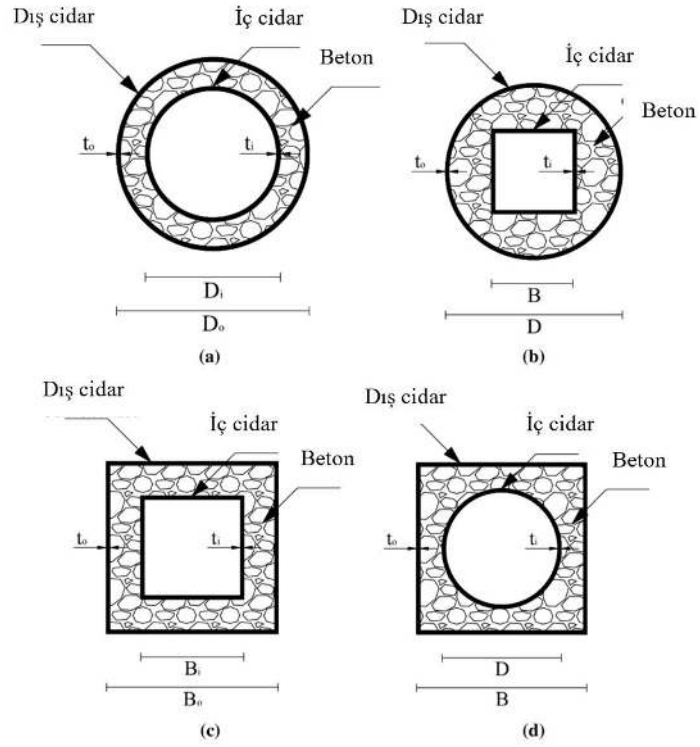
Xiong vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, yüksek dayanımlı malzemeler kullanılarak üretilen BDÇT kolonlarda çelik cidar kalınlığının azalmasıyla yerel burkulmanın daha erken meydana geldiği, ancak beton dolgunun bu etkiyi kısmen dengelediği belirtilmiştir. Ayrıca eksenel yük, eğilme ve birleşik yükleme durumlarının kolon davranışı üzerindeki etkileri farklı çalışmalarla ayrıntılı olarak incelenmiştir (Zhong Tao vd., 2009; Ahmad ve Thambiratnam, 2009; Nassirnia vd., 2015; Nassirnia vd., 2016).

Daha yakın dönemde gerçekleştirilen çalışmalar, BDÇT kolonların yalnızca eksenel yükler altında değil, aynı zamanda deprem etkilerini temsil eden döngüsel yükler altında da başarılı performans sergilediğini ortaya koymuştur. Liao vd. (2017), beton dolgulu paslanmaz çelik tüp kolonların döngüsel yükleme altındaki davranışını deneysel olarak incelemiş ve kolonların yüksek enerji yutma kapasitesi ile kararlı histeretik davranış sergilediğini göstermiştir. Wang vd. (2024) ise yüksek dayanımlı beton dolgulu çift cidarlı çelik tüp kolonların histeretik performansını araştırmış ve beton ile çelik arasındaki kompozit etkileşimin süneklik performansına önemli katkı sağladığını belirtmiştir.

Bu çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde, BDÇT kolonların davranışının kapsamlı biçimde incelendiği, ancak daha karmaşık kesit geometrilerine sahip sistemlerin sınırlı sayıda çalışmada ele alındığı görülmektedir.

## **2.2. Çift Cidarlı BDÇT Kolonlar Üzerine Yapılan Çalışmalar**

Çift cidarlı BDÇT kolonlar, iç ve dış çelik tüpler arasında beton çekirdeğin yer aldığı kompozit kesitlerden oluşmakta olup, geleneksel BDÇT sistemlerinin geliştirilmiş bir formu olarak literatürde önemli bir yer edinmiştir. Bu sistemin tipik kesit düzeni ve farklı konfigürasyonları Şekil 3'te şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3. Çift cidarlı BDÇT kesitinin şematik gösterimi

Bu sistemlerde iç çelik tüp, beton çekirdeğin stabilitesini artırarak burkulma eğilimini sınırlandırırken; dış çelik tüp betonun yanal genişmesini kısıtlayarak betonun etkin basınç dayanımını artırmaktadır (Han vd., 2001; Liao vd., 2017). Bu karşılıklı etkileşim sayesinde çift cidarlı BDÇT kolonlar, yüksek dayanım ve gelişmiş süneklik özellikleri sunan verimli yapısal elemanlar olarak öne çıkmaktadır.

Liao vd. (2017) ve Han vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmalarda, çift cidarlı BDÇT kolonların daha düşük beton hacmine rağmen yüksek enerji yutma kapasitesi sergilediği ve iç cidarın beton çekirdeğinin stabilitesine önemli katkı sağladığı belirtilmiştir. Farahi vd. (2016) ise oluklu ve düz cidarlı çift cidarlı BDÇT kolonları karşılaştırmış ve oluklu cidarın yerel burkulmayı geciktirdiğini, taşıma kapasitesini artırdığını ve döngüsel yükler altında daha kararlı bir davranış sergilediğini göstermiştir.

Son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar, çift cidarlı BDÇT kolonların yüksek eksenel taşıma kapasitesine sahip olduğunu ve beton ile çelik arasındaki etkili sargılama mekanizması sayesinde bu kapasitenin kararlı biçimde arttığını ortaya koymuştur (Zhou ve Xu, 2016; Fan vd., 2024). Ayrıca çift cidarlı yapının sağladığı ek sargılama etkisi, kolonların plastik deformasyon kapasitesini artırmakta ve özellikle sismik tasarım uygulamalarında önemli avantajlar sağlamaktadır (Fang vd., 2021).

Çift cidarlı BDÇT kolonların literatürde öne çıkan bir diğer özelliği, döngüsel yükler altındaki kararlı histeretik davranışlarıdır. Yapılan çalışmalar, bu kolonların tekrarlayan yatay yükleme altında rijitlik kaybını kademeli olarak yaşadığını ve göçme öncesinde geniş histeretik çevrimler geliştirdiğini göstermektedir (Wang vd., 2024). Bu davranış, sistemin deprem enerjisini etkin biçimde sönümleyebilmesine ve genel sismik performansının iyileşmesine katkı sağlamaktadır.

Ayrıca çift cidarlı BDÇT sistemlerin yalnızca eksenel ve yatay yükler altında değil, burulma ve birleşik yükleme koşulları altında da güvenilir performans sergilediği tespit edilmiştir. Lu vd. (2022), çift cidarlı kolonların karmaşık yükleme durumlarında dahi stabil bir taşıma mekanizması geliştirdiğini ve göçme modlarının daha kontrollü biçimde oluştuğunu belirtmiştir.

Çift cidarlı yapı konfigürasyonu, beton hacminin azaltılmasına olanak sağlayarak daha hafif kesitlerin tasarlanmasını mümkün kılmaktadır. Bu durum yapının toplam kütlelerinin azalmasına ve deprem etkileri altında oluşan atalet kuvvetlerinin düşürülmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca iç ve dış tüplerin birlikte çalışması sayesinde yerel burkulma geciktirilmekte ve kolonun genel stabilitesi korunmaktadır.

Bu çalışmalar değerlendirildiğinde, çift cidarlı BDÇT kolonların yüksek taşıma kapasitesi, gelişmiş süneklik, etkili enerji yutma kapasitesi ve güvenilir sismik performans özellikleri sayesinde yapı mühendisliğinde önemli bir araştırma alanı oluşturduğu görülmektedir.

Çift cidarlı BDÇT kolonların mekanik davranışına ilişkin temel çalışmalar, bu sistemlerin geleneksel beton dolgulu çelik tüplere göre önemli avantajlar sunduğunu ortaya koymuştur. Zhao ve Grzebieta (2002), çift cidarlı çelik tüplerin dayanım ve süneklik performanslarını inceleyerek iç ve dış çelik tüpler arasındaki etkileşimin taşıma kapasitesini artırdığını göstermiştir. Uenaka vd. (2008) eğilme etkisi altındaki çift cidarlı tüplü elemanların davranışını araştırmış ve iç tüpün kesit stabilitesine önemli katkı sağladığını belirtmiştir. Huang vd. (2013), saf burulma etkisi altındaki elemanları inceleyerek çift cidarlı sistemlerin yüksek burulma rijitliğine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Hassanein vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinde kısa kompozit kolonların basınç davranışı değerlendirilmiş ve sayısal sonuçların deneysel verilerle uyumlu olduğu belirlenmiştir. Daha yakın dönemde Yan ve Zhao (2020) ile Tiwary (2022) tarafından yapılan çalışmalar, çift cidarlı kompozit kolonların yüksek eksenel yük taşıma kapasitesine sahip olduğunu ve iç çelik tüpün beton çekirdeğin stabilitesini artırarak göçme davranışını olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Ayrıca Eom vd. (2019), çift cidarlı çelik elemanların birleşim

bölgelerindeki eğilme davranışını incelemiş ve sistemin yüksek deformasyon kapasitesine sahip olduğunu rapor etmiştir.

### **2.3. BDOÇT Kolonlar Üzerine Yapılan Çalışmalar**

Oluklu çelik levhaların kolon cidarında kullanımı son yıllarda artan şekilde araştırılmaktadır. Oluk geometrisi, kesit rijitliğini artırması ve yerel burkulma davranışını geciktirmesi nedeniyle çelik yapı elemanlarında yaygın olarak tercih edilmektedir.

Nassirnia vd. (2015, 2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda, oluklu cidar geometrisinin yerel burkulma dayanımını artırdığı ve kesit rijitliğini iyileştirdiği gösterilmiştir. Ayrıca oluklu geometrinin yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırabildiği belirtilmiştir.

Zou vd. (2023), oluklu çelik cidarların beton ile etkileşimini incelemiş ve oluk geometrisinin yük aktarımını daha etkin hale getirdiğini ortaya koymuştur. Fang vd. (2023, 2024) ise oluklu sistemlerin daha geniş plastikleşme bölgeleri oluşturduğunu ve daha yüksek deformasyon kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir.

Son yıllarda gerçekleştirilen araştırmalar, oluklu çelik elemanların yalnızca eksenel yükler altında değil, aynı zamanda döngüsel ve sismik yükler altında da önemli avantajlar sağlayabildiğini göstermektedir. Ji vd. (2023), oluklu kompozit kolonların yanal yükler altındaki davranışını inceleyerek oluk geometrisinin histeretik çevrimlerin kararlılığını artırdığını ve enerji yutma kapasitesini geliştirdiğini belirtmiştir. Li vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise oluklu çelik tüplü kompozit kolonların döngüsel yükleme altındaki yapısal performansı değerlendirilmiş ve oluklu kesit kullanımının süneklik performansını olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir. Huang vd. (2024), oluklu kompozit kolonların sismik davranışını araştırmış ve oluk geometrisinin deprem etkileri altında daha dengeli bir yük aktarım mekanizması sağladığını göstermiştir. Yang vd. (2025) ise oluklu kompozit kolonların yapısal uygulamalarını kapsamlı şekilde incelemiş ve oluklu kesit geometrisinin hem taşıma kapasitesi hem de enerji yutma performansı açısından önemli avantajlar sunduğunu rapor etmiştir.

Oluklu çelik cidarlı kompozit sistemlere yönelik araştırmaların önemli bir bölümü, bu geometrinin sismik performans üzerindeki etkilerine odaklanmıştır. Fang vd. (2021), beton dolgulu oluklu çelik tüp kolonların sabit eksenel yük ve döngüsel yük altındaki davranışını inceleyerek oluklu kesit kullanımının enerji yutma kapasitesini artırdığını göstermiştir. Wang vd. (2024) ve Huang vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar ise oluklu kompozit kolonların deprem etkileri altındaki

performansını değerlendirmiş ve oluklu geometrinin rijitlik kaybını azaltarak daha kararlı histeretik davranış sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca Fan vd. (2024), çift cidarlı kompozit tüp elemanların düşük çevrimli yorulma davranışını incelemiş ve kompozit etkileşimin yapısal dayanıklılık üzerinde olumlu etkileri olduğunu belirtmiştir. Lu vd. (2022), çift cidarlı kompozit tüplerin torsiyon etkisi altındaki davranışını sayısal olarak araştırırken, Li ve Young (2021) kompozit tüp sistemlerinde malzeme etkileşiminin taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Bu çalışmalar, oluklu ve çift cidarlı kompozit sistemlerin yalnızca eksenel yükler altında değil, farklı yükleme koşulları altında da üstün performans sergileyebildiğini göstermektedir.

Oluklu levhaların kullanımı, düz cidarlı sistemlere kıyasla daha yüksek kesit rijitliği ve geliştirilmiş burkulma direnci sağlamaktadır. Bu özellikler sayesinde oluklu sistemler, özellikle yüksek dayanım ve süneklik gerektiren yapısal uygulamalarda önemli avantajlar sunmaktadır. Bununla birlikte, oluk geometrisine ilişkin parametrelerin etkileri hâlen araştırılmaya devam etmekte olup, farklı oluk konfigürasyonlarının yapısal performans üzerindeki etkileri literatürde ilgi gören araştırma konuları arasında yer almaktadır.

#### **2.4. Döngüsel Yükleme Altındaki Davranış**

Döngüsel yükleme altında BDÇT kolonların davranışı inşaat mühendisliği açısından büyük önem taşımaktadır. Yapılan çalışmalar, bu kolonların yüksek enerji yutma kapasitesi, süneklik ve kararlı histeretik davranış sergilediğini göstermektedir. (Fam vd., 2004; Han vd., 2011; Nie vd., 2013; Wang vd., 2018; Ji vd., 2023).

Zhou ve Xu (2016) ve Liao vd. (2017) döngüsel yük altında kolonların yüksek başlangıç rijitliği gösterdiğini ve yük çevrimleri arttıkça rijitliğin azaldığını belirtmiştir. Fang vd. (2021) ise bu kolonların önemli miktarda enerji sönümleyebildiğini ortaya koymuştur.

Oluklu çelik cidar kullanılan sistemlerde, düz cidarlı kolonlara kıyasla daha yüksek enerji yutma kapasitesi ve daha kararlı histeretik davranışın gözlemlendiği tespit edilmiştir (Nassirnia vd., 2016; Zou vd., 2023; Li Y.D. vd., 2024). Ayrıca göçme davranışının daha kontrollü gerçekleştiği belirtilmiştir. Benzer şekilde, Fang vd. (2021) ve Fang vd. (2022) gibi çalışmalar, beton dolgulu oluklu çelik tüplerin çevrimsel eksenel basınç altındaki gerilme-şekil değiştirme tepkilerini ve yük taşıma kapasitesi ile sünekliğini artırma potansiyellerini deneysel olarak araştırmışlardır. Ayrıca, Lu vd. (2025), Yang vd. (2025) ve Fang vd. (2024) gibi araştırmalar, beton dolgulu oluklu

çelik tüp kompozitlerinin birleşik basınç-çevrimsel yatay yükler ve çevrimsel burulma yükleri altındaki davranışlarını incelemişlerdir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, döngüsel yükleme altındaki davranışın kolon performansını belirleyen temel faktörlerden biri olduğu ve özellikle oluklu cidarlı çift cidarlı sistemler üzerine yapılan çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir.

## 2.5. Çelik ve Beton Arasındaki Aderans Mekanizması

Beton dolgulu çelik kolonların yük taşıma kapasitesi, süneklik düzeyi ve enerji sönümleme performansı, çelik cidarlar ile beton çekirdek arasındaki yük aktarım mekanizmasına doğrudan bağlıdır. Bu bağlamda, çelik–beton arayüzünde meydana gelen aderans, sürtünme ve olası kayma davranışlarının sayısal modelde gerçekçi bir şekilde temsil edilmesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle döngüsel yükler altında, arayüz davranışı kolonun histeretik davranışı ve hasar gelişimi üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır.

Bu çalışmada, çelik cidarlar ile beton dolgu arasındaki etkileşim, yüzey–yüzey temas yaklaşımı kullanılarak modellenmiştir. Temas tanımı, normal ve teğetsel doğrultulardaki davranışlar ayrı ayrı dikkate alınarak tanımlanmıştır. Normal doğrultuda, beton ve çelik yüzeyler arasında “hard contact” tanımı kullanılmış olup, bu sayede beton ile çelik arasında fiziksel penetrasyona izin verilmemiş ve basınç altında tam temas koşulu sağlanmıştır. Bu yaklaşım, beton çekirdeğin çelik cidarlar tarafından yanal olarak kısıtlanmasını ve temas bölgelerinde oluşan basınç aktarımını doğru şekilde temsil etmektedir.

Teğetsel doğrultuda ise, çelik–beton arayüzündeki kayma davranışını modellemek amacıyla Coulomb sürtünme modeli tercih edilmiştir. Bu kapsamda sürtünme katsayısı  $\mu = 0,25$  olarak alınmıştır. Seçilen bu değer, beton dolgulu çelik kolonlar üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda rapor edilen aderans davranışlarıyla uyumlu olup, çelik ile beton arasında tam aderans yerine sınırlı kaymaya izin veren kısmi etkileşim koşullarını temsil etmektedir (Farahi vd., 2016; Fang vd., 2021).

Bu temas tanımı sayesinde sayısal model, beton çekirdeğin çelik cidarlara sürtünme yoluyla yük aktarmasını, yerel ezilme ve çelik cidarlarda meydana gelen burkulma sonucunda temas gerilmelerinin yeniden dağılımını ve döngüsel yükleme altında oluşan kayma–yeniden temas mekanizmalarını başarıyla simüle edebilmektedir. Ayrıca, özellikle oluklu cidarlı sistemlerde yüzey geometrisinin neden olduğu yerel temas değişimleri ve sürtünme kaynaklı enerji sönümleme etkileri, seçilen aderans modeli sayesinde dolaylı olarak sayısal sonuçlara yansıtılmaktadır.

Bu yaklaşım, beton ve çelik arasındaki etkileşimi aşırı rijit varsayımlardan kaçınarak tanımlamakta ve çift cidarlı BDÇT kolonların döngüsel yükler altındaki gerçekçi histeretik davranışının elde edilmesine katkı sağlamaktadır.

## **2.6. Malzeme Özellikleri**

BDÇT kolonların doğrusal olmayan davranışının güvenilir biçimde tahmin edilebilmesi, kullanılan malzeme modellerinin mekanik gerçekliği ne ölçüde temsil ettiğine doğrudan bağlıdır. Özellikle döngüsel yükleme altında çelikte plastikleşme, beton çekirdekte ise çatlama ve ezilme gibi karmaşık hasar mekanizmalarının eş zamanlı olarak gelişmesi, malzeme tanımlarının yalnızca elastik sınırlar içerisinde değil, ileri düzey doğrusal olmayan davranışları da kapsamasını gerekli kılmaktadır.

Bu çalışmada, beton ve çelik malzemelerin mekanik özellikleri literatürde yer alan deneysel çalışmalardan elde edilen veriler esas alınarak tanımlanmıştır. Malzemelerin gerilme–şekil değiştirme ilişkileri, plastik deformasyon kapasiteleri ve hasar gelişim süreçleri dikkate alınarak oluşturulan bu tanımlar, sonlu elemanlar modelinin hem aksenal hem de döngüsel yükler altındaki davranışı gerçekçi bir şekilde temsil etmesini amaçlamaktadır.

### **2.6.1. Yapı Çeliğinin Özellikleri ve Davranış Modelleri**

Sayısal modellerde çelik elemanların davranışı, beton dolgulu kompozit kolonların taşıma kapasitesi, süneklik düzeyi ve yerel burkulma karakteristikleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Bu nedenle çelik malzemenin doğrusal olmayan davranışı, elastik sınır sonrası plastikleşme ve pekleşme süreçlerini kapsayacak şekilde tanımlanmıştır. Bu çalışmada çelik levhaların mekanik özellikleri, Farahi vd. (2016) ve Liao vd. (2017) tarafından rapor edilen deneysel veriler esas alınarak belirlenmiş ve ABAQUS ortamında elastoplastik malzeme modeli kullanılarak modellenmiştir.

Çelik malzemenin doğrusal elastik davranışı, elastisite modülü  $E = 200,000$  MPa ve Poisson oranı  $\nu = 0,30$  ile tanımlanmıştır. Elastik sınırın aşılmasının ardından, çeliğin plastik deformasyon süreci izotropik pekleşme varsayımı altında modellenmiştir. Akma dayanımı  $f_y = 280$  MPa olarak alınmış; çekme dayanımı  $f_u = 410$  MPa ve maksimum şekil değiştirme kapasitesi  $\epsilon_u = 0,23$  olacak şekilde tanımlanan gerilme–şekil değiştirme ilişkisi, çeliğin sünek davranışını ve büyük plastik deformasyonları temsil edecek biçimde oluşturulmuştur.

Çeliğin döngüsel yatay yükler altında kolon tabanında ve oluklu levhaların köşe birleşim bölgelerinde aşırı plastik deformasyonlara bağlı olarak gelişen yerel çelik

yırtılmalarını simüle edebilmek amacıyla, ABAQUS/Explicit ortamında çelik malzemesine Sünek Hasar modeli entegre edilmiştir. Malzemenin sünek hasar başlangıç parametreleri tanımlanırken, çeliğin kopma uzaması ( $\epsilon_u = 0,23$ ) ve gerilme üç eksenliliği dikkate alınmıştır. Çelik cidarlar için hasar başlangıç eşdeğer plastik şekil değiştirmesi, yapı çelikleri için literatürde önerilen sınırlar dahilinde 0,20 olarak seçilmiştir (Zhu vd., 2017). Sünek kopmanın temel sürükleyicisi olan gerilme üç eksenliliği, pürüzsüz standart tek eksenli çekme kuponu durumu esasına dayanarak 0,33 ve birim şekil değiştirme oranı 0,0 olarak tanımlanmıştır (Zhu vd., 2017). Hasar evrimi, sonlu eleman ağ boyutuna bağımlılığı ortadan kaldırmak amacıyla Yer Değiştirme esaslı yaklaşım ve doğrusal yumuşama kabulü ile kurgulanmıştır. Bu yöntem, gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, malzemenin hasar başlangıcından tamamen kopmasına kadar geçen süredeki plastik deplasmanı esas alan gerilme - yer değiştirme dönüştürerek kırılma sonrası stabil bir yumuşama davranışı sağlar (Zhu vd., 2017). Literatürde benzer ince cidarlı kompozit çelik tübüler çalışmalarına uyumlu olarak, kopma anındaki maksimum yer değiştirme değeri 9 mm olarak atanmıştır.

Tanımlanan bu malzeme modeli, çelik cidarlarda döngüsel yükleme sırasında gelişen plastik mafsallaşma, yerel burkulma ve ilerleyici hasar mekanizmalarını sayısal modele doğru biçimde aktarabilmektedir. Özellikle oluklu cidarlı sistemlerde, geometrik düzensizliklerin neden olduğu gerilme yığılmaları ve lokal stabilite kayıpları, elastoplastik modelleme sayesinde ayrıntılı olarak izlenebilmektedir.

Sonlu elemanlar modelinde çelik elemanlar, iç ve dış çelik cidarlar ile düz ve oluklu cidar levhalarını kapsayacak şekilde S4R kabuk elemanları kullanılarak modellenmiştir. Bu eleman türü, ince cidarlı çelik elemanların hem membran hem de eğilme davranışını etkin biçimde temsil edebilmesi nedeniyle literatürde beton dolgulu çelik kolonların sayısal analizlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Kullanılan malzeme tanımı ve eleman tipi birlikte değerlendirildiğinde, çelik cidarlarda meydana gelen büyük şekil değiştirmeler ve yerel burkulma oluşumları sayısal modelde tutarlı ve kararlı bir şekilde yakalanabilmektedir.

### **2.6.2. Betonun Mekanik Özellikleri ve Davranış Modelleri**

Beton malzeme, basınç ve çekme etkileri altında doğrusal olmayan, gerilme yoluna bağımlı ve hasar gelişimi içeren karmaşık bir mekanik davranış sergilemektedir. Özellikle beton dolgulu çelik kolonlarda, çelik cidarların beton çekirdeğini yanal olarak sınırlaması sonucunda beton çok eksenli gerilme durumuna maruz kalmakta; bu durum betonun dayanım, süneklik ve rijitlik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu

nedenle, betonun hem çatlama hem de ezilme davranışını aynı çerçevede temsil edebilen gelişmiş bir malzeme modelinin kullanılması gerekmektedir.

Bu çalışmada betonun doğrusal olmayan davranışı, ABAQUS yazılımında yer alan Beton Hasarlı Plastisite modeli kullanılarak modellenmiştir. Bu model, betonun basınç altında ezilme ve çekme altında çatlama davranışını hasar değişkenleri aracılığıyla temsil eden, döngüsel yükleme koşulları için uygunluğu literatürde yaygın olarak kabul görmüş bir plastiklik modelidir. Özellikle BDÇT kolonların döngüsel yükler altındaki davranışını inceleyen çalışmalarda bu modelin güvenilir sonuçlar verdiği birçok araştırma tarafından tespit edilmiştir (Farahi vd., 2016; Zhou ve Xu, 2016; Ji vd., 2023).

Bu tez kapsamında kullanılan betonun mekanik özellikleri, Farahi vd. (2016) çalışmasında rapor edilen deneysel verilere uygun şekilde belirlenmiştir. Betonun tek eksenli basınç dayanımı  $f_c' = 40$  MPa, elastisite modülü  $E_c = 37.250$  MPa ve Poisson oranı  $\nu = 0,20$  olarak alınmıştır. Bu değerler, betonun elastik davranışının yanı sıra doğrusal olmayan bölgedeki gerilme–şekil değiştirme ilişkilerinin gerçekçi biçimde tanımlanmasına olanak sağlamaktadır.

Bu modele ait plastiklik parametreleri, literatürde beton dolgulu çelik kolonlar için önerilen aralıklar dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, genleşme açısı,  $\psi = 10^\circ$ , eksantriklik parametresi 0,1, iki eksenli ve tek eksenli basınç dayanımı oranı  $f_{b0}/f_c = 1,137$ , akma yüzeyinin şekil parametresi  $K = 0,87$  ve sayısal kararlılığı artırmak amacıyla viskozite parametresi 0,008 olarak tanımlanmıştır. Bu parametreler, betonun çok eksenli gerilme durumlarındaki plastiklik davranışını, yanal kısıtlamaya bağlı dayanım artışını ve hasar gelişimini güvenilir biçimde temsil etmektedir.

Betonun çekme davranışı, çatlak oluşumu ve ilerlemesi dikkate alınacak şekilde tanımlanan bir yumuşama eğrisiyle modellenmiştir; basınç bölgesinde ise ezilme sonrası rijitlik kaybı ve hasar gelişimi, bu modelin basınç-hasar değişkenleri aracılığıyla dahil edilmiştir. Bu yaklaşım, beton çekirdekte döngüsel yükleme sırasında meydana gelen çatlama–ezilme etkilerinin ve ilerleyici hasarın sayısal modele yansıtılmasını sağlamaktadır.

Sonlu elemanlar modelinde beton çekirdeği, C3D8R katı elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Çelik cidarlar tarafından sağlanan yanal kısıtlama etkisi, beton–çelik etkileşimi aracılığıyla beton elemanlara aktarılmakta ve bu modelin çok eksenli gerilme yaklaşımı sayesinde beton dayanımındaki artış dikkate alınmaktadır. Bu sayede, beton dolgulu ve oluklu çift cidarlı BDÇT kolonların döngüsel yükler altındaki davranışı,

malzeme seviyesinden yapısal seviyeye kadar tutarlı bir biçimde temsil edilebilmektedir.

## **2.7. Eşdeğer Kesit Yaklaşımları ve Mevcut Yönetmelikler (Eurocode 4, AISC)**

BDÇT ve çift cidarlı BDÇT kolonların analitik tasarımı için uluslararası yönetmeliklerde çeşitli eşdeğer kesit yaklaşımları tanımlanmıştır. Bu yaklaşımlar, çelik ve betonun birlikte çalışmasını idealize eden süperpozisyon temelli yöntemlere dayanmakta olup, kolonların eksenel ve eğilme altındaki taşıma kapasitesinin pratik bir şekilde belirlenmesini amaçlamaktadır. Bu bölümde Eurocode 4, AISC 360 ve literatürde çift cidarlı BDÇT sistemler için önerilen eşdeğer kesit yöntemleri özetlenmektedir.

### **2.7.1. Eurocode 4 Yaklaşımı**

Eurocode 4 (EN 1994-1-1), BDÇT kolonların taşıma kapasitesini belirlerken çelik tüp ile beton çekirdeğin birlikte çalışmasını esas alan eşdeğer kesit yaklaşımını benimsemektedir. Bu yaklaşımda, beton ve çelik bileşenlerin katkıları süperpozisyon prensibine dayalı olarak dikkate alınmakta ve kompozit davranış basitleştirilmiş varsayımlar altında temsil edilmektedir.

Yönetmeliğe göre beton dolgulu çelik tüp kolonların eksenel basınç taşıma kapasitesi, çelik tüpün akma dayanımı ile beton çekirdeğin basınç dayanımının toplamından elde edilir.

$$N_{pl,Rd} = A_s f_y + A_c f_{cd} \quad (1)$$

Burada;

$N_{pl,Rd}$ -kompozit kesitin plastik eksenel taşıma kapasitesi,

$A_s$ -çelik kesit alanı,

$f_y$ -çeliğin akma dayanımı,

$A_c$ -beton kesit alanı,

$f_{cd}$ -betonun tasarım basınç dayanımıdır.

Bu hesaplamalarda betonun dayanımı, çelik tüp tarafından sağlanan sargı etkisi dikkate alınarak belirli sınırlar dâhilinde artırılabilir. Ayrıca Eurocode 4, kolonun narinliğine bağlı olarak burkulma etkilerini de göz önünde bulundurmakta ve azaltma katsayıları aracılığıyla stabilite etkilerini tasarıma dâhil etmektedir.

Eğilme etkisi altındaki taşıma kapasitesinin belirlenmesinde ise çelik ve beton bileşenlerinin moment katkıları ayrı ayrı hesaplanmakta ve eşdeğer kesit varsayımı kullanılarak birleşik bir moment kapasitesi elde edilmektedir. Bu kapsamda, çeliğin elastoplastik davranışı ve betonun basınç bölgesindeki katkısı esas alınmakta, betonun çekme dayanımı ihmal edilmektedir. Eurocode 4 yaklaşımı, düz cidarlı ve tek cidarlı beton dolgulu çelik kolonlar için pratik ve güvenilir sonuçlar sunan bir yöntem olarak literatürde yaygın biçimde kullanılmaktadır.

### 2.7.2. AISC 360 Yaklaşımı

AISC 360 tasarım standardı, beton dolgulu çelik tüp kolonların taşıma kapasitesinin belirlenmesinde çelik esaslı bir yaklaşım benimsemektedir. Bu kapsamda, betonun katkısı çeliğin taşıma kapasitesini artıran bir unsur olarak değerlendirilmekte, ancak hesaplamalar büyük ölçüde çelik elemanın davranışına dayandırılmaktadır. AISC yaklaşımı, kompozit kolonların eksenel ve birleşik yükleme altındaki davranışını basitleştirilmiş varsayımlar altında ele almayı amaçlamaktadır.

AISC 360'a göre beton dolgulu çelik kolonların eksenel basınç taşıma kapasitesi, çelik kesitin nominal basınç kapasitesi esas alınarak hesaplanmakta, beton dolgunun katkısı ise belirli katsayılar aracılığıyla bu kapasiteye dâhil edilmektedir.

$$P_n = A_s F_y + 0,85 f_c' A_c \quad (2)$$

$P_n$ -nominal eksenel taşıma kapasitesi,

$A_s$ -çelik kesit alanı,

$f_y$ -çeliğin akma dayanımı,

$A_c$ -beton kesit alanı,

$f_c'$ -betonun silindir basınç dayanımıdır.

Bu yaklaşımda betonun sargılanmış davranışı dolaylı olarak hesaba katılmakta olup, beton çekirdeğin yerel gerilme-şekil değiştirme ilişkisi doğrudan modellenmemektedir. Kolon narinliği ve burkulma etkileri, çelik kolonlar için tanımlanan burkulma eğrileri kullanılarak değerlendirilmekte ve stabilite etkileri tasarıma yansıtılmaktadır.

Bu denklemler, çelik kesitinin elastoplastik davranışını esas almakta ve betonun katkısını sınırlı ölçüde temsil etmektedir. AISC yaklaşımı, özellikle çelik esaslı tasarım felsefesinin benimsendiği uygulamalarda pratik bir yöntem sunmakla birlikte, karmaşık

kesit geometrilerine sahip kompozit kolon sistemlerinin davranışını tam olarak yansıtmakta yetersiz kalabilmektedir.

Mevcut tasarım yönetmeliklerinde kullanılan eşdeğer kesit yaklaşımları, beton ve çelik bileşenlerin birlikte çalışmasını basitleştirilmiş varsayımlar altında ele almaktadır. Bu yaklaşımlar, düz cidarlı ve tek cidarlı beton dolgulu çelik kolon sistemleri için yeterli doğrulukta sonuçlar vermektedir. Ayrıca, Eurocode 4 ve AISC 360 gibi yaygın olarak kullanılan yönetmelikler, çift cidarlı beton dolgulu çelik kolon sistemlerini açık ve kapsamlı bir şekilde ele almamaktadır. Oluklu cidar geometrisinin kesit rijitliği, yerel burkulma davranışı ve beton-çelik etkileşimi üzerindeki etkileri, eşdeğer kesit yaklaşımı içinde doğrudan tanımlanamamaktadır. Bu nedenle, bu tür gelişmiş kesit geometrilerine sahip kolonların davranışının yönetmelik temelli yaklaşımlar ile doğru bir şekilde öngörülmesi güçleşmektedir.

Bunun yanı sıra, söz konusu yönetmeliklerde beton dolgulu çelik kolonların döngüsel yükleme altındaki davranışına ilişkin doğrudan bir değerlendirme yer almamaktadır. Histeretik davranış, rijitlik azalması ve enerji yutma kapasitesi gibi sismik performans göstergeleri, çoğunlukla deneysel ve sayısal çalışmalar aracılığıyla incelenmektedir. Bu bağlamda, oluklu ve çift cidarlı beton dolgulu çelik kolon sistemlerinin döngüsel davranışının doğrulanmış sayısal modeller kullanılarak değerlendirilmesi, mevcut yönetmeliklerin ötesinde bir yaklaşıma ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

## **2.8. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Abaqus Yazılımı**

Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık mühendislik problemlerinin sayısal olarak çözümünde yaygın olarak kullanılan güçlü bir analiz tekniğidir. Bu yöntem, sürekli ortamın küçük ve sonlu sayıda elemanlara bölünmesine dayanmakta olup, her bir elemanın davranışı matematiksel denklemler aracılığıyla tanımlanmaktadır. Böylece, malzemelerin doğrusal olmayan davranışları, karmaşık geometriye sahip sistemler ve farklı yükleme koşulları altında oluşan gerilme-şekil değiştirme dağılımları yüksek doğrulukla incelenebilmektedir.

Yapı mühendisliği uygulamalarında sonlu elemanlar yöntemi; kompozit kolonlar, çelik-beton birleşik sistemler ve döngüsel yükleme altındaki davranışların incelenmesinde önemli avantajlar sağlamaktadır. Özellikle deneysel çalışmaların maliyetli ve zaman alıcı olması nedeniyle, sayısal analizler yapı elemanlarının davranışının anlaşılması ve parametrik çalışmaların yürütülmesi açısından etkin bir araştırma aracıdır. Beton dolgulu çelik tüp kolonlar gibi kompozit sistemlerde

malzemelerin doğrusal olmayan davranışlarının eşzamanlı olarak gelişmesi, sonlu elemanlar yönteminin kullanımını gerektirir.

Sonlu elemanlar analizlerinde doğruluğu belirleyen temel unsurlar; uygun eleman tipinin seçimi, malzeme modellerinin doğru tanımlanması, temas etkileşimlerinin gerçekçi şekilde modellenmesi ve sınır koşullarının deneysel sistemi temsil edecek biçimde oluşturulmasıdır. Özellikle beton ve çelik malzemelerin birlikte çalıştığı kompozit sistemlerde aderans, sürtünme ve yük aktarım mekanizmalarının doğru şekilde modellenmesi, analiz sonuçlarının güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen sayısal analizlerde, sonlu elemanlar modellemeleri ABAQUS yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. ABAQUS, doğrusal olmayan malzeme davranışlarını, temas problemlerini ve büyük şekil değişimlerini başarıyla simüle edebilen gelişmiş bir sonlu elemanlar analiz programıdır. Program, özellikle beton hasar modelleri, elastoplastik çelik tanımları ve yüzey temas algoritmaları sayesinde kompozit yapı elemanlarının davranışının modellenmesinde yaygın olarak tercih edilmektedir.

ABAQUS ortamında beton dolgulu çift cidarlı oluklu çelik kolonların modellenmesinde, beton malzeme için Beton Hasarlı Plastisite modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Bu model, betonun basınç altında ezilme ve çekme altında çatlama davranışlarını hasar parametreleri aracılığıyla temsil edebilmekte ve döngüsel yükleme koşullarında güvenilir sonuçlar sunmaktadır. Çelik malzeme, elastoplastik davranış modeli kullanılarak tanımlanmış olup, akma sonrası plastik deformasyon ve pekleşme etkileri dikkate alınmıştır.

Sayısal modelde çelik elemanlar kabuk elemanlar kullanılarak modellenirken, beton çekirdek katı elemanlar ile temsil edilmiştir. Çelik ve beton arasındaki etkileşim, yüzey-yüzey temas tanımları kullanılarak modellenmiş; temas davranışı normal doğrultuda sert temas, teğetsel doğrultuda ise Coulomb sürtünme modeli ile tanımlanmıştır. Bu yaklaşım, kompozit sistemlerde yük aktarım mekanizmasının gerçekçi bir şekilde temsil edilmesine olanak sağlamaktadır.

Doğrusal olmayan analizlerde yerel burkulma, beton ezilmesi ve temas kaynaklı stabilite problemleri oluşabilmektedir. Bu tür problemlerin güvenilir bir şekilde çözülebilmesi amacıyla analizlerde ABAQUS/Explicit çözüm algoritması tercih edilmiştir. Explicit analiz yöntemi, özellikle yüksek doğrusal olmayanlık içeren problemlerde sayısal yakınsama problemlerini azaltarak ilerleyici hasar mekanizmalarının doğru şekilde izlenmesini sağlamaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulan modeller, deneysel çalışmalarla karşılaştırılarak doğrulanmakta ve böylece sayısal modelin güvenilirliği değerlendirilmektedir. Bu doğrulama sürecinin ardından, farklı geometrik ve malzeme parametrelerinin kolon davranışı üzerindeki etkileri parametrik analizler aracılığıyla incelenmektedir. Bu yaklaşım, beton dolgulu çift cidarlı oluklu çelik kolonların döngüsel yükler altındaki yapısal performansının kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

### 3. SAYISAL ANALİZLER VE MODELLEME

Bu bölümde, çift cidarlı BDOÇT kolonların davranışını incelemek amacıyla oluşturulan sonlu elemanlar modelleri ve gerçekleştirilen sayısal analizler sunulmaktadır. Öncelikle, sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında kullanılan geometrik özellikler, eleman tipleri, ağ yapısı, malzeme modelleri, temas tanımları ve sınır koşulları açıklanmaktadır. Daha sonra, geliştirilen modellerin güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla literatürde yer alan deneysel çalışmalar kullanılarak doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmektedir.

Doğrulama sürecinin ardından, farklı oluk oryantasyonları, kolon narinlik oranları ve çelik cidar kalınlıkları dikkate alınarak parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar taşıma kapasitesi, yük–deplasman davranışı, histeretik performans, süneklik, enerji yutma kapasitesi ve göçme modları açısından değerlendirilmiştir.

#### 3.1. Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Bu çalışmada, beton dolgulu çift cidarlı oluklu çelik kolonların eksenel ve döngüsel yükler altındaki yapısal davranışını incelemek amacıyla üç boyutlu sonlu elemanlar modelleri ABAQUS/CAE 2024 yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Sayısal modelleme sürecinde kolonların geometrik özellikleri, malzeme davranışları, çelik–beton arayüz etkileşimleri, sınır şartları ve yükleme koşulları ayrıntılı olarak tanımlanmıştır. Modeller oluşturulurken hem malzemenin doğrusal olmayan davranışları hem de geometrik doğrusal olmayan etkiler dikkate alınmış ve analizler bu kabuller doğrultusunda gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında referans düz cidarlı kolon (S1), dış cidarı oluklu kolonlar (OC) ve iç cidarı oluklu kolonlar (IC) olmak üzere üç farklı kolon tipi modellenmiştir. Her bir kolon tipi için 1000, 1500 ve 2000 mm kolon boylarıyla 3, 5 ve 7 mm çelik cidar kalınlıkları dikkate alınarak parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Böylece oluk geometrisinin, kolon boyunun ve cidar kalınlığının kompozit kolonların taşıma kapasitesi, rijitliği, sünekliği ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkileri sistematik olarak araştırılmıştır.

Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması sürecinde öncelikle kolon geometrileri modellenmiş, ardından çelik ve beton malzemelerine ait mekanik özellikler tanımlanmıştır. Daha sonra model bileşenleri montaj ortamında birleştirilmiş, çelik ve beton yüzeyler arasındaki temas özellikleri tanımlanmış, uygun sınır şartları ve yükleme

koşulları uygulanmıştır. Analizlerde elde edilen sonuçların doğruluğunu artırmak amacıyla uygun eleman tipleri ve ağ yapısı belirlenmiş; ayrıca geometrik kusurların yapısal davranış üzerindeki etkisini dikkate alabilmek için doğrusal burkulma analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen burkulma modu, doğrusal olmayan analizlere başlangıç geometrik kusuru olarak aktarılmıştır.

Sayısal analizlerde ABAQUS/Explicit çözüm yöntemi kullanılmış olup, yükleme adımları, temas algoritmaları, malzeme modelleri ve analiz parametreleri doğrusal olmayan davranışı doğru şekilde temsil edecek şekilde tanımlanmıştır. Analizlerden; reaksiyon kuvveti, yer değiştirme, Von Mises gerilmeleri, eşdeğer plastik şekil değiştirme, temas gerilmeleri ve enerji bileşenleri gibi sonuçlar elde edilerek kolonların yapısal performansı değerlendirilmiştir.

Geliştirilen sonlu elemanlar modelleri, parametrik analizlerde kullanılmadan önce literatürde yer alan deneysel çalışmalar esas alınarak doğrulanmıştır. Sonlu elemanlar modeli oluşturulurken kullanılan eleman tipleri, temas tanımları, yükleme yöntemi, sınır şartları ve malzeme modelleri, daha önce benzer kompozit kolonlar üzerinde gerçekleştirilen çalışmalardan yararlanılarak oluşturulmuştur (Ozyurt ve Wang, 2018; Ozyurt ve Günaydın, 2024; Oztürk vd., 2025).

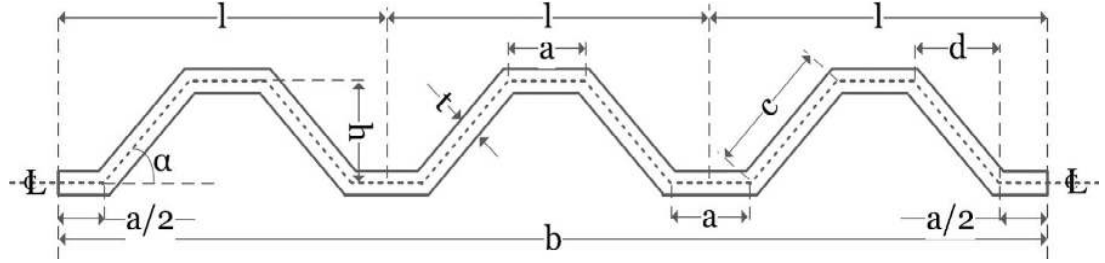
### **3.1.1. Geometrik Parametreler ve Numune Tanımları**

Bu tez kapsamında beton dolgulu çift cidarlı oluklu çelik kolonların yapısal davranışını incelemek amacıyla farklı kesit geometrilerine ve kolon uzunluklarına sahip numuneler modellenmiştir. Kolon numunelerinin geometrik özellikleri literatürde yer alan deneysel çalışmalar referans alınarak belirlenmiş ve parametrik analizler kapsamında farklı narinlik oranları dikkate alınmıştır.

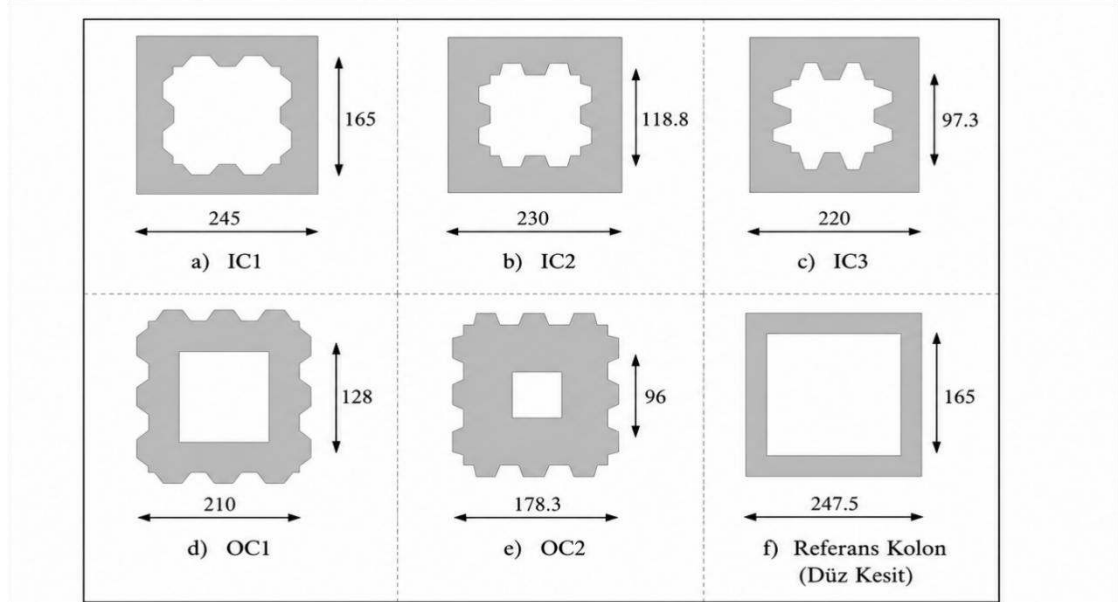
Çalışmada incelenen kolon numuneleri, iç oluklu çelik tüp (IC) ve dış oluklu çelik tüp (OC) konfigürasyonlarına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Oluk geometrisinin kolon davranışı üzerindeki etkisini inceleyebilmek amacıyla üç farklı kesit tipi oluşturulmuştur. Tip 1 kesit düzenine sahip kolonlar IC1 ve OC1 numunelerini, Tip 2 kesit düzenine sahip kolonlar IC2 ve OC2 numunelerini, Tip 3 kesit düzenine sahip kolonlar ise IC3 ve OC3 numunelerini kapsamaktadır. Bu kesit tipleri, oluk geometrisi, tüp çapları ve kesit düzeni açısından birbirinden farklı özellikler göstermektedir. Bu numunelere ait oluk konfigürasyonu Şekil 4'te, kolon numunelerine ait geometrik konfigürasyonlar Şekil 5'te, geometrik özellikler ve oluk konfigürasyonu, Tablo 1'de ise oluk türlerine ait parametreler sunulmuştur.

Tablo 1. Kolon numunelerine ait geometrik özellikler ve kesit parametreleri

| Kesit Tipi | $\alpha(^{\circ})$ | a (mm) | h (mm) | t (mm) | l (mm) | d (mm) | c (mm) | b (mm) |
|------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Tip 1      | 45                 | 20,00  | 15,00  | 3,00   | 70,00  | 15,00  | 21,21  | 210,00 |
| Tip 2      | 75                 | 25,70  | 15,00  | 3,00   | 59,42  | 4,01   | 15,53  | 178,26 |
| Tip 3      | 75                 | 18,44  | 22,00  | 3,00   | 48,67  | 5,89   | 22,78  | 145,98 |



Şekil 4. Oluk konfigürasyonu



Şekil 5. Parametrik çalışmada kullanılan kolon numunelerine ait geometrik konfigürasyonlar (IC ve OC serileri)

Şekilde görüldüğü üzere, IC serisi kolonlarda oluklu çelik tüp iç bölgede yer alırken, OC serisi kolonlarda oluklu tüp dış bölgede konumlandırılmıştır. Referans kolonlarda ise iç ve dış çelik tüpler düz cidarlı olarak modellenmiştir. Bu farklı kesit düzenleri sayesinde oluk geometrisinin ve konumunun kolon davranışı üzerindeki etkileri parametrik olarak incelenmiştir.

Oluklu kolon numunelerine ek olarak, oluk geometrisinin kolon davranışına olan katkısını değerlendirebilmek amacıyla referans kolon numuneleri de modele dahil edilmiştir. Bu referans kolonlar, iç ve dış çelik tüplerin düz levhalardan oluşturulduğu S1 serisi kolonlar olarak tanımlanmıştır. S1 kolonları, oluk geometrisinin yapısal

performans üzerindeki etkisinin karşılaştırmalı olarak incelenmesine olanak sağlamaktadır.

Bu bağlamda, oluklu ve düz cidarlı kolonların davranışları karşılaştırılarak, oluk geometrisinin taşıma kapasitesi, süneklik ve enerji yutma performansı üzerindeki etkileri daha açık bir şekilde ortaya konulmuştur. Parametrik çalışma kapsamında her kolon tipi üç farklı uzunluk değeri için modellenmiştir. Kolon uzunlukları 1000 mm, 1500 mm ve 2000 mm olarak seçilmiştir. Bu uzunluk değerlerinin seçilmesindeki temel amaç, kolonların narinlik oranındaki değişimin taşıma kapasitesi, burkulma davranışı ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkisinin incelenmesidir. Kolon uzunluğunun artmasıyla birlikte global burkulma etkilerinin daha belirgin hale gelmesi beklenmektedir.

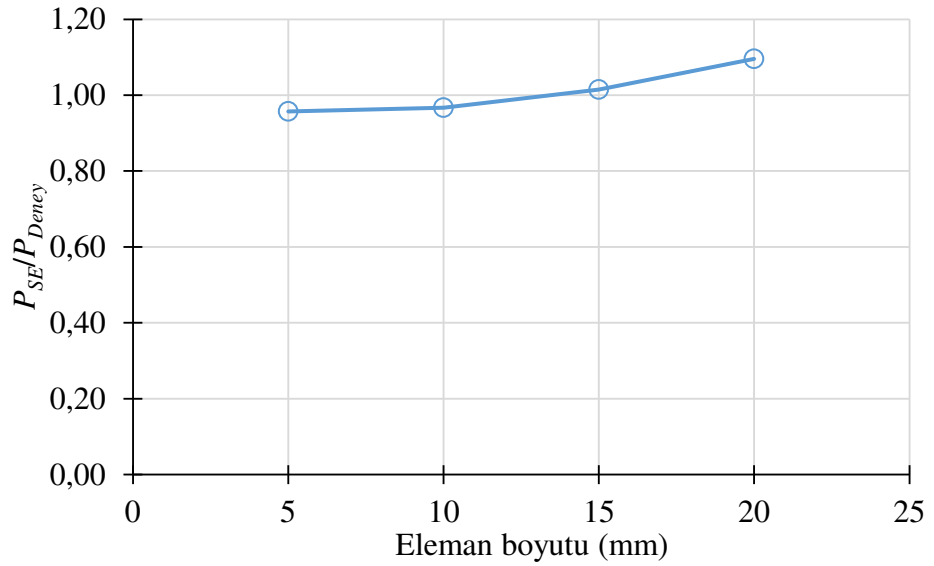
Tüm kolon numunelerinde çelik levha kalınlığı 10 mm olarak alınmıştır. Beton dolgu malzemesi, iç ve dış çelik tüpler arasındaki boşluğu tamamen dolduracak şekilde modellenmiştir. Kesit geometrileri oluşturulurken oluk derinliği, oluk aralığı ve tüp çapları, deneysel çalışmalarda kullanılan değerler esas alınarak sayısal modele aktarılmıştır.

### **3.1.2. Eleman Tipi ve Ağ Yapısı**

Sonlu Elemanlar modelinde çelik tüpler kabuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Kabuk elemanların kullanılması, ince cidarlı çelik levhaların yerel burkulma davranışının doğru şekilde temsil edilmesini sağlamaktadır. Beton çekirdek ise üç boyutlu katı elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Bu yaklaşım, beton malzemenin hacimsel davranışının ve hasar gelişiminin doğru şekilde temsil edilmesine olanak tanımaktadır. Temas yüzeyleri ise, çelik levhalar ve beton çekirdek arasındaki etkileşim, kompozit kolonlarda kritik bir faktördür. Sonlu Elemanlar modellerinde bu etkileşim, yüzeyden yüzeye temas kullanılarak simüle edilmiştir. Penetrasyonu önlemek ve basınç yükünü çelikten beton çekirdeğe aktarmak için normal yönde sert bir temas kullanılmıştır. Teğetsel davranış, 0,25 sürtünme katsayısına sahip bir Coulomb sürtünme modeli kullanılarak modellenmiştir (Farahi vd., 2016; Tao vd., 2017).

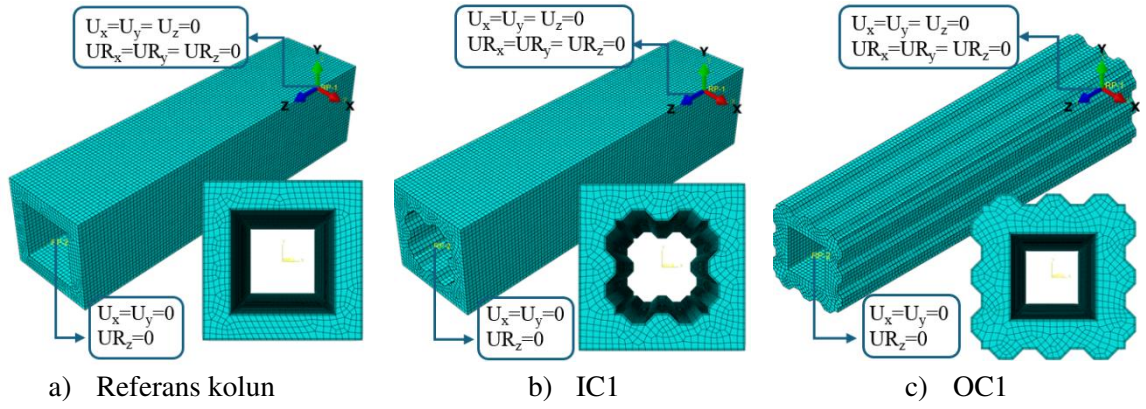
Sonlu Elemanlar (FE) modellerinde ayrıştırma için azaltılmış entegrasyonlu elemanlar kullanılmıştır. Çelik plakalar dört düğümlü kabuk elemanları (S4R) ile, beton çekirdek ise sekiz düğümlü katı elemanları (C3D8R) ile simüle edilmiştir. Modelde kullanılan ağ yapısı, çözüm doğruluğunu artırmak amacıyla kritik bölgelerde daha sık olacak şekilde oluşturulmuştur. Özellikle oluk bölgeleri ve yük aktarımının yoğun olduğu alanlarda daha ince ağ yapısı tercih edilmiştir. Ağ yapısının belirlenmesi

sırasında çözüm doğruluğu ile hesaplama maliyeti arasında uygun dengeyi sağlayan eleman boyutunun belirlenmesi amacıyla ağ yakınsama çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, oluklu geometrilerden OC1 kolonu seçildi ve 20 mm, 15 mm, 10 mm ve 5 mm'lik dört farklı eleman boyutu dikkate alınarak sayısal modelleme gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da, SE sonuçlarından elde edilen aksenal yük taşıma kapasitesinin ( $P_{SE}$ ) deney sonuçlarından elde edilen kapasiteye ( $P_{Deney}$ ) oranının eleman ağ boyutu ile karşılaştırma eğrisi görülmektedir. Şekil 5'ten de görüleceği üzere, eleman ağ boyutunun 20 mm'den 10 mm'ye düşürülmesiyle dayanım oranlarında %13'lük belirgin bir düşüş meydana gelmiştir. Ağ boyutunun 10 mm'den 5 mm'ye düşürüldüğünde, analiz süresi ve depolama alanı yaklaşık 8 kat artmıştır, ancak dayanım oranındaki değişim sadece %1 seviyesinde kalmıştır.



Şekil 6. Ağ yakınsama eğrisi

Ağ yakınsama çalışma sonucuna göre, 10 mm maksimum eleman boyutunun, daha ince ağ yapılarıyla elde edilen sonuçlara oldukça yakın sonuçlar verdiği, buna karşılık hem analiz süresini hem de depolama alanını önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir. Bu nedenle, çalışmanın tamamında maksimum eleman boyutu 10 mm olarak seçilmiş ve tüm modellerde aynı ağ yapısı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Kolon modellerinde kullanılan tipik ağ yapısı ve mesh düzeni Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7. Kolon modellerinde kullanılan tipik mesh düzeni

### 3.1.3. Malzeme Modelleri

Sonlu elemanlar modelinde kullanılan çelik ve beton malzemeler, kompozit kolonların doğrusal olmayan davranışını gerçekçi bir şekilde temsil edebilmek amacıyla ABAQUS/CAE ortamında ayrı ayrı tanımlanmıştır. Malzeme özellikleri oluşturulurken literatürde önerilen mekanik özellikler esas alınmış ve analizlerde hem malzeme doğrusal olmayan davranışı hem de geometrik doğrusal olmayan etkiler dikkate alınmıştır. Çelik tübüler için elastoplastik malzeme modeli tercih edilirken, beton çekirdeğin basınç ve çekme altındaki doğrusal olmayan davranışını temsil edebilmek amacıyla Beton Hasarlı Plastisite (BHP) modeli kullanılmıştır.

Kompozit kolonlarda yük taşıma mekanizması, çelik tüpler ile beton çekirdeğin birlikte çalışmasına dayanır. Bu nedenle, her iki malzemenin mekanik özelliklerinin doğru şekilde tanımlanması, sonlu elemanlar analizlerinin güvenilirliği açısından büyük önem taşır. Çelik tüpler aksenal yük altında önce elastik davranış sergiler, akma gerilmesine ulaşıldıktan sonra ise plastik deformasyonlar meydana gelir. Beton çekirdek ise basınç altında doğrusal olmayan bir gerilme–şekil değiştirme davranışı gösterir; yüksek basınç seviyelerinde ezilme, çekme gerilmeleri altında ise çatlama ve rijitlik kaybı oluşur. Bu nedenle, analizlerde çelik ve beton için farklı malzeme modelleri kullanılarak her iki malzemenin davranışı ayrı ayrı tanımlanır.

ABAQUS ortamında malzeme tanımlamaları oluşturulurken öncelikle yoğunluk ve elastik özellikler tanımlanmış; daha sonra çelik malzeme için plastik davranış, beton malzeme için ise Beton Hasarlı Plastisite modeline ait parametreler sisteme girilmiştir. Beton modelinde basınç pekleşmesi, basınç hasarı, çekme rijitleşmesi ve çekme hasarı tanımlanarak betonun doğrusal olmayan davranışı ayrıntılı şekilde modellenmiştir. Böylece analizlerde hem çelik tübüler elemanların akma ve plastik şekil değiştirme davranışı hem de beton çekirdeğin ezilme, çatlama ve hasar gelişimi dikkate alınmıştır.

Sonlu elemanlar modelinde kullanılan malzeme özellikleri, doğrulama analizlerinde deneysel sonuçlarla uyum sağlayacak şekilde belirlenmiş olup, daha sonra gerçekleştirilen tüm parametrik analizlerde aynı modelleme yaklaşımı korunmuştur.

### **3.1.3.1. Çelik Malzeme Modeli**

Kompozit kolonların yük taşıma kapasitesinin önemli bir kısmı çelik tübüler kesitler tarafından karşılandığından, sonlu elemanlar modelinde çelik malzemenin mekanik özelliklerinin doğru şekilde tanımlanması büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada çelik tüpler ABAQUS/CAE ortamında elastoplastik malzeme modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Elastoplastik model sayesinde çeliğin hem elastik bölgedeki doğrusal davranışı hem de akma gerilmesinden sonraki plastik deformasyon ve pekleşme davranışı sayısal modele dahil edilmiştir. Böylece analizler sırasında çelik tübüler elemanlarda meydana gelebilecek akma, plastik şekil değiştirme ve gerilme dağılımları gerçek davranışa yakın şekilde temsil edilmiştir.

Çelik malzemenin elastik davranışı, izotropik doğrusal elastik malzeme kabulü esas alınarak tanımlanmıştır. Elastisite modülü 200,000 MPa, Poisson oranı ise 0,30 olarak alınmıştır. Ayrıca, çeliğin yoğunluğu 7850 kg/m<sup>3</sup> olarak tanımlanmıştır. Bu değerler, yapısal çelik için literatürde yaygın olarak kullanılan mekanik özelliklerle uyumludur ve analizlerde tüm çelik bileşenleri için aynı malzeme özellikleri kullanılmıştır.

Elastik davranışın ardından çeliğin plastik bölgedeki davranışı ABAQUS'un plastik malzeme tanımı kullanılarak oluşturulmuştur. Bu aşamada akma gerilmesinden sonraki gerilme-plastik şekil değiştirme ilişkisi programa girilmiş ve malzemenin pekleşme davranışı tanımlanmıştır. Gerçek gerilme-plastik şekil değiştirme verilerinin kullanılması sayesinde yükleme sırasında oluşan plastik deformasyonlar ve gerilme yeniden dağılımları daha doğru şekilde hesaplanabilmektedir. Böylece özellikle yüksek yük seviyelerinde meydana gelen yerel plastikleşmeler ile yük taşıma kapasitesindeki değişimler sonlu elemanlar analizlerine yansıtılmıştır.

Çelik malzemenin elastoplastik olarak modellenmesi, kompozit kolonların eksenel ve döngüsel yükler altındaki davranışının doğru tahmin edilmesi açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Özellikle oluklu çelik elemanlarda meydana gelen yerel burkulmalar, plastik mafsall oluşumu ve gerilme yığılmaları, doğrusal elastik bir model ile yeterli doğrulukta temsil edilememektedir. Bu nedenle elastoplastik malzeme modeli tercih edilerek çeliğin yükleme süresince göstereceği doğrusal olmayan davranış analizlere dahil edilmiştir.

Bu çalışmada ABAQUS ortamında tanımlanan çelik malzemeye ait plastik davranış parametreleri olan akma gerilmesi, çekme gerilmesi ve çekme dayanımına karşılık gelen birim şekil değiştirme sırasıyla, 265 MPa, 376 MPa ve %23'tür. Bu parametreler doğrulama çalışmasında kullanılan malzeme özelliklerinden alınmıştır. Tanımlanan malzeme modeli, tüm referans (S1), iç oluklu (IC) ve dış oluklu (OC) kolon modellerinde ortak olarak kullanılmıştır.

### 3.1.3.2. Beton Malzeme Modeli

Beton malzeme, ABAQUS içerisinde yer alan Beton Hasarlı Plastisite (BHP) modeli kullanılarak tanımlanmıştır. BHP modeli, betonun doğrusal olmayan mekanik davranışını, özellikle basınç altında meydana gelen ezilme ile çekme altında oluşan çatlama ve hasar gelişimini başarılı bir şekilde temsil edebilen gelişmiş bir malzeme modelidir. Bu model sayesinde betonun yükleme süresince rijitlik kaybı, plastik deformasyonları ve hasar mekanizması sonlu elemanlar analizlerine dahil edilebilmektedir.

Betonun elastik davranışı tanımlanırken elastisite modülü 37.250 MPa, Poisson oranı ise 0,20 olarak alınmıştır. Ayrıca betonun yoğunluğu 2400 kg/m<sup>3</sup> ABAQUS ortamında tanımlanarak analizlerde kütle etkileri de dikkate alınmıştır. Elastik özelliklerin tanımlanmasının ardından betonun doğrusal olmayan davranışını temsil edebilmek amacıyla doğrulama çalışmasında temin edilen BHP modeline ait parametreler Tablo 2'de sunulmuştur. Ayrıca, BHP modeli kapsamında betonun basınç altındaki davranışı basınç pekleşmesi ve basınç hasarı, çekme altındaki davranışı ise çekme pekleşmesi ve çekme hasarı tanımlamaları kullanılarak oluşturulmuştur.

Tablo 2. Beton hasarlı plastisite model parametreleri

| Genleşme açısı | Eksantrisite | $f_{b0}/f_c$ | K    | Viskozite Parametresi |
|----------------|--------------|--------------|------|-----------------------|
| 10             | 0,1          | 1,137        | 0,87 | 0,008                 |

### 3.1.4. Temas Özelliklerinin Tanımlanması

Sonlu elemanlar modelinde çelik tübüler ile beton çekirdeği arasındaki yük aktarımının doğru şekilde temsil edilebilmesi amacıyla temas özellikleri ABAQUS ortamında tanımlanmıştır. Temas tanımlamaları, çelik ve beton elemanlar arasında meydana gelen normal ve teğetsel doğrultudaki etkileşimleri dikkate alacak şekilde oluşturulmuştur. Bu sayede, yükleme süresince iki malzeme arasında oluşan temas davranışı ve yük transferi gerçeğe yakın şekilde modellenmiştir.

Modelde normal doğrultudaki temas davranışı Sert Temas olarak tanımlanmıştır. Bu tanımlama sayesinde temas eden yüzeylerin birbirlerinin içine geçmesi engellenmiş, ancak temasın kesilmesine izin verilmiştir. Teğetsel doğrultuda ise sürtünme davranışı Ceza Temas algoritması kullanılarak modellenmiş ve sürtünme katsayısı 0,25 olarak tanımlanmıştır (Farahi, vd. 2016). Bu yaklaşım, çelik tübüler ile beton çekirdeği arasındaki kayma davranışının gerçekçi bir şekilde temsil edilmesini sağlamaktadır.

Beton çekirdeği ile temas eden iç ve dış çelik katmanların yüzeyleri ana yüzey olarak, beton çekirdeğinin çelik katmanlar ile temas eden yüzeyleri ise bağımlı yüzeyler olarak tanımlanır. Örneğin, dış çelik katman ile beton çekirdek temas yüzeylerinde, çelik katmanın iç yüzeyi ana yüzey, beton çekirdeğin yüzeyi ise bağımlı yüzey olarak tanımlanarak temas özellikleri atanır. Tanımlanan temas modeli sayesinde yükleme süresince çelik ve beton elemanlar arasında meydana gelen kuvvet aktarımı, ayrılma ve temas davranışları doğrusal olmayan analiz kapsamında dikkate alınmıştır.

### **3.1.5. Başlangıç Geometrik Kusurlarının Tanımlanması**

Gerçek yapı elemanlarında üretim, montaj ve malzeme kaynaklı nedenlerden dolayı tam geometrik doğruluğun sağlanması mümkün değildir. Bu nedenle, sonlu elemanlar modelinde gerçek davranışın daha doğru temsil edilebilmesi amacıyla başlangıç geometrik kusurları dikkate alınmıştır. Başlangıç geometrik kusurlarının modele dahil edilmesi, özellikle basınç etkisi altındaki kompozit kolonların burkulma davranışının ve yük taşıma kapasitesinin daha gerçekçi bir şekilde belirlenmesine katkı sağlamaktadır.

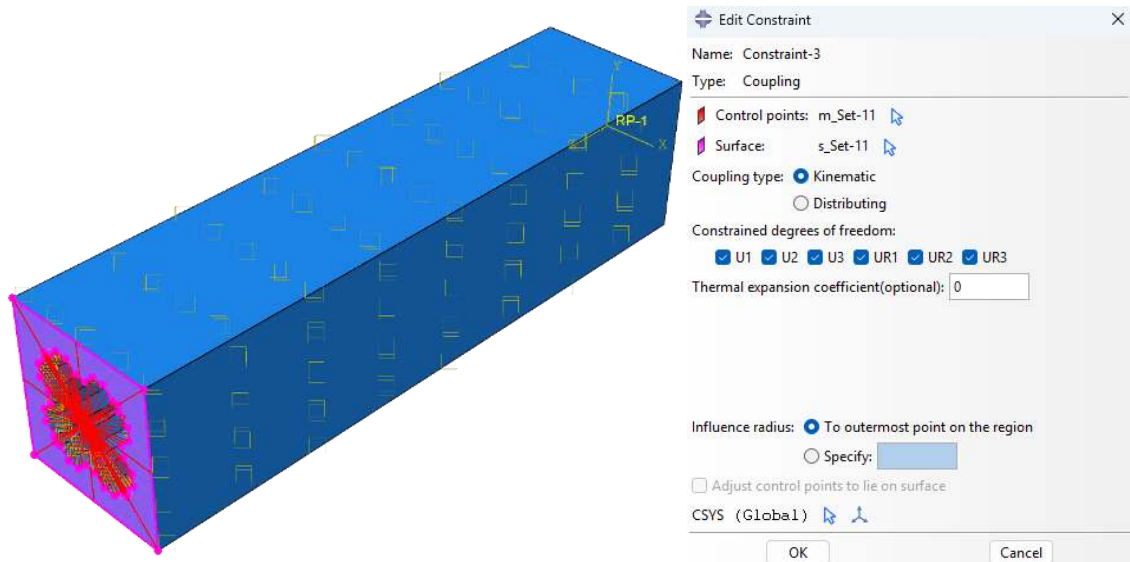
Başlangıç geometrik kusurlarının elde edilebilmesi amacıyla ilk olarak burkulma analizi adımı kullanılarak doğrusal burkulma analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen burkulma modu, Geometrik Kusur tanımlaması kullanılarak sonlu elemanlar modeline aktarılmıştır. Böylece başlangıçtaki geometrik kusurlar doğrusal olmayan analizlere dahil edilmiş ve kolonların yükleme altındaki davranışının gerçeğe daha yakın şekilde modellenmesi sağlanmıştır.

Öncelikle, ABAQUS ortamında gerçekleştirilen doğrusal burkulma analizinden elde edilen ilk burkulma modu şekli gerilme analizine aktarılmıştır. Kompozit kolonlar için literatürde ve yönetmeliklerde, geometrik kusur olarak kolon uzunluğunun binde biri alınması önerilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında, geometrik kusur miktarı  $L/1000$  olarak gerilme analizlerinde tanımlanmıştır. Başlangıç geometrik kusurlarını dikkate almak, sayısal analiz sonuçlarının deneysel davranışa daha yakın elde edilmesine katkı sağlayan önemli modelleme aşamalarından biridir.

### 3.1.6. Sınır Şartları ve Yükleme Koşulları

Sonlu elemanlar modelinde sınır şartları ve yükleme koşulları, deneysel çalışma esas alınarak ABAQUS ortamında tanımlanmıştır. Kolonun alt ve üst uçlarındaki yüzeyler, Şekil 8’de gösterildiği gibi Kinematik Bağlama yöntemi kullanılarak referans noktalarına bağlanmıştır. Böylece referans noktalarına uygulanan sınır şartları ve yükleme koşulları, ilgili yüzeylere düzgün bir şekilde aktarılmıştır.

Modelin alt ucunda bulunan referans noktası üç doğrultuda (U1, U2 ve U3) sabitlenerek tam mesnet koşulu oluşturulmuştur. Üst uçta bulunan referans noktasında ise yatay doğrultudaki yer değiştirmeler (U1 ve U2) sınırlandırılmış, eksenel doğrultudaki hareket serbest bırakılmıştır. Yükleme, üst referans noktasına eksenel doğrultuda tanımlanan yer değiştirme sınır şartı uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Böylece kolon numunesinin eksenel yük altındaki davranışı yer değiştirme kontrollü olarak incelenmiştir.



Şekil 8. Kolon uçlarında kullanılan referans noktalarının tanımlanması

Referans noktaları ile kolon uç yüzeyleri arasında tanımlanan kinematik bağlama sayesinde yük ve sınır şartlarının modele düzgün bir şekilde aktarılması sağlanmıştır. Ayrıca yer değiştirme kontrollü yükleme yöntemi kullanılarak kolonların eksenel yük altındaki davranışı doğrusal olmayan analiz kapsamında incelenmiştir. Tanımlanan sınır şartları ve yükleme koşulları, deneysel çalışma ile uyumlu olacak şekilde oluşturularak sayısal modelin güvenilirliğinin artırılması amaçlanmıştır.

### 3.2. Sayısal Analizlerin Doğrulaması

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak geliştirilen sayısal modellerin güvenilir sonuçlar verebilmesi için, oluşturulan modellerin deneysel çalışmalarla doğrulanması büyük önem taşımaktadır. Özellikle beton dolgulu çelik tüp kolonlar gibi kompozit yapı elemanlarında, çelik ve beton malzemelerin doğrusal olmayan davranışlarının eşzamanlı olarak gelişmesi, temas etkileşimlerinin karmaşıklığı ve yerel stabilite problemleri sayısal modellemenin doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, parametrik analizlere geçmeden önce geliştirilen sonlu elemanlar modelinin literatürde yer alan deneysel çalışmalar ile karşılaştırılarak doğrulanması gerekmektedir.

Bu bölümde, geliştirilen sonlu elemanlar modelinin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen doğrulama çalışmaları sunulmaktadır. Doğrulama kapsamında literatürde yer alan deneysel çalışmalar referans alınmış ve sayısal modelin yük–deplasman ilişkileri, taşıma kapasitesi, göçme davranışları ve genel yapısal performansı açısından güvenilirliği değerlendirilmiştir. Bu doğrulama süreci, geliştirilen modelin parametrik analizlerde kullanılabilirliğinin ve güvenilirliğinin ortaya konulmasını amaçlamaktadır.

Bu tez çalışmasında sonlu elemanlar modelinin doğrulanması amacıyla iki farklı deneysel çalışma referans alınmıştır. İlk olarak, beton dolgulu oluklu çift cidarlı çelik kolonların aksenal basınç davranışını inceleyen Farahi vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma kullanılmıştır. Bu çalışma, farklı oluk geometrilerine sahip kolon numunelerinin taşıma kapasitesi ve göçme davranışını ortaya koyması açısından önemli bir referans oluşturmaktadır.

Buna ek olarak, döngüsel yükleme altındaki kompozit kolon davranışının doğrulanabilmesi amacıyla Liao vd. tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma da değerlendirilmiştir. Bu çalışma, beton dolgulu çelik kolonların döngüsel yükleme altındaki histeretik davranışlarının ve göçme modlarının sayısal model ile karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır.

Bu doğrulama çalışmalarının ardından, oluşturulan sonlu elemanlar modelinin doğruluğu değerlendirilmiş ve modelin parametrik analizlerde kullanılabilir olduğu gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen modelin beton dolgulu çift cidarlı oluklu çelik kolonların yapısal davranışını güvenilir şekilde temsil edebildiğini ortaya koymaktadır.

### 3.2.1. Monotonik Yük Altında Model Doğrulaması

Bu tez kapsamında geliştirilen sonlu elemanlar modelinin doğrulanması amacıyla literatürde yer alan deneysel çalışmalar incelenmiş ve beton dolgulu çift cidarlı oluklu çelik kolonların davranışını inceleyen Farahi vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma referans alınmıştır. Söz konusu çalışma, farklı kesit geometrilerine sahip beton dolgulu oluklu çelik kolonların eksenel basınç altındaki taşıma kapasitesini ve göçme davranışını kapsamlı bir şekilde incelemesi açısından önemli bir kaynak niteliğindedir.

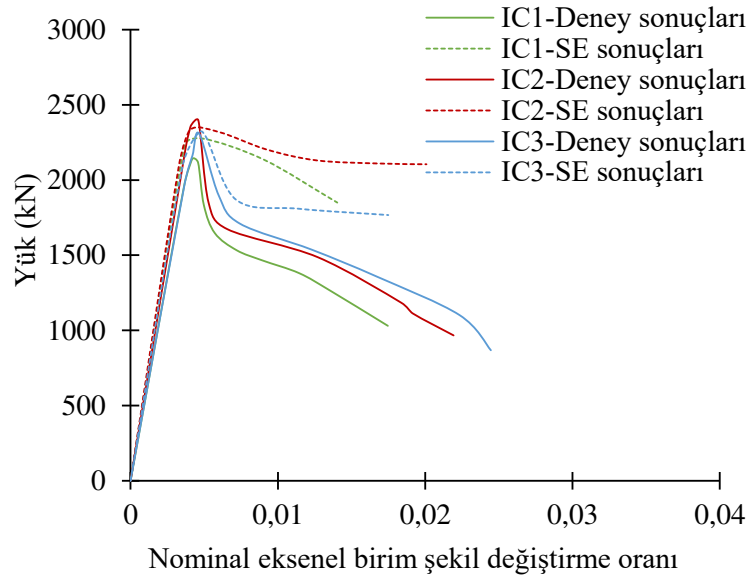
Farahi vd. tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, iç ve dış çelik tüplerden oluşan çift cidarlı oluklu kolonlar test edilmiştir. Kolon numuneleri farklı oluk geometrilerine sahip olacak şekilde tasarlanmış ve beton dolgu ile güçlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan numunelere ait kesit tipleri ve konfigürasyonlar Şekil 5'te gösterilmektedir. Bu kesit tipleri, iç ve dış cidar düzenine bağlı olarak referans (düz cidarlı), iç oluklu (IC) ve dış oluklu (OC) konfigürasyonlarını içermekte olup, oluk geometrisinin kolon davranışı üzerindeki etkisinin sistematik biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Çalışmada kullanılan numuneler, IC ve OC olmak üzere farklı konfigürasyonlarda üretilmiştir. Bu numune tipleri, oluk geometrisinin kolon davranışı üzerindeki etkisinin değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Farahi vd. (2016) çalışmasında kullanılan kolon numunelerinin geometrik ve mekanik özellikleri Tablo 3'te sunulmuştur. Numunelerin geometrik ve mekanik özellikleri, sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında doğrudan referans alınmış olup, sayısal model ile deneysel sistem arasında birebir uyum sağlanması hedeflenmiştir.

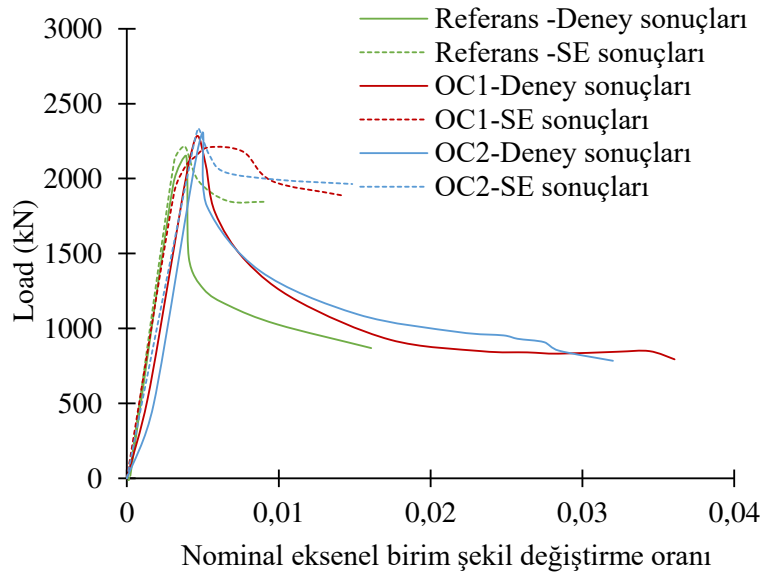
Tablo 3. Farahi vd. (2016) çalışmasında kullanılan deney numunelerinin geometrik özellikleri ve dayanımları

| Numune | Dış Çelik Alanı (mm <sup>2</sup> ) | İç Çelik Alanı (mm <sup>2</sup> ) | Beton Alanı (mm <sup>2</sup> ) | Toplam Alan (mm <sup>2</sup> ) | P <sub>max</sub> Deney (kN) | P <sub>max</sub> SE (kN) |
|--------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| S1     | 2934                               | 1944                              | 31097                          | 61256                          | 2150,1                      | 2217,8                   |
| IC1    | 2904                               | 1978                              | 33321                          | 60025                          | 2141,0                      | 2275,4                   |
| IC2    | 2724                               | 1979                              | 32488                          | 52900                          | 2396,0                      | 2333,6                   |
| IC3    | 2604                               | 1375                              | 32043                          | 48400                          | 2307,7                      | 2323,3                   |
| OC1    | 2966                               | 1500                              | 34016                          | 50400                          | 2284,6                      | 2209,2                   |
| OC2    | 2969                               | 635                               | 33643                          | 37124                          | 2257,3                      | 2217,8                   |

Deneysel program kapsamında kolon numuneleri eksenel basınç yükü altında test edilmiş; numunelerin yük-deplasman ilişkileri, taşıma kapasiteleri ve göçme modları ayrıntılı biçimde incelenmiştir.



a)



b)

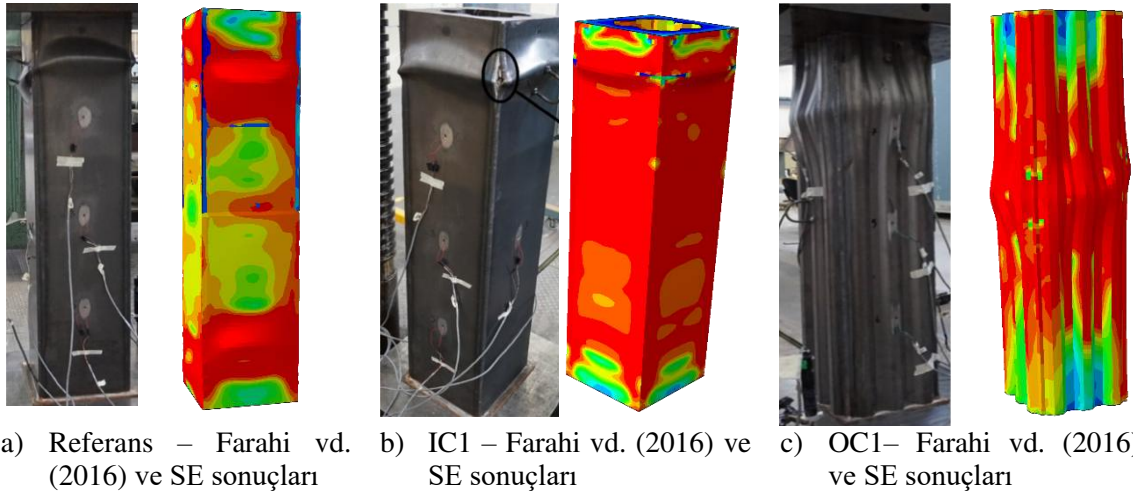
Şekil 9. Farahi vd. (2016) deney sonuçları ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen eksenel şekil değiştirme-yük eğrilerinin karşılaştırılması

Testler sırasında kolonların yerel burkulma davranışı, beton çekirdeğin ezilme mekanizmaları ve çelik tüpler ile beton dolgu arasındaki etkileşim gözlemlenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, kompozit kolonların yapısal performansının değerlendirilmesi açısından kapsamlı veri sağlamaktadır. Deneysel çalışma ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen eksenel şekil değiştirme-yük eğrilerinin karşılaştırılması Şekil 9'da sunulmuştur. Tablo 3'te ise, Şekil'deki eğrilerden elde edilen maksimum yüklemeye karşılık gelen taşıma kapasiteleri ( $P_{max}$ ) karşılaştırılmıştır. Sayısal analiz sonuçları, deney sonuçlarına yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Farahi vd. (2016) çalışmasında kullanılan kolon numunelerinin geometrik özellikleri, malzeme özellikleri ve sınır koşulları bu tez kapsamında oluşturulan sonlu elemanlar modelinden referans alınmıştır. Numunelerin uzunlukları, çelik levha kalınlıkları, oluk geometrileri ve beton malzeme özellikleri deneysel çalışmaya uygun şekilde modellenmiştir. Ayrıca, deneysel düzeneği temsil edebilmek amacıyla sınır koşulları ve yükleme düzeni sayısal modele uyarlanmıştır.

Sonlu elemanlar modelinin doğrulanması sürecinde, sayısal analiz sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar kapsamında yük–deplasman eğrileri, maksimum taşıma kapasitesi, şekil değiştirme davranışları ve göçme modları değerlendirilmiştir.

Deneysel çalışma ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen göçme modlarının karşılaştırılması Şekil 10’da sunulmuştur. Böylece geliştirilen sayısal modelin, beton dolgulu çift cidarlı oluklu çelik kolonların yapısal davranışını gerçekçi şekilde temsil edebilme yeteneği incelenmiştir.

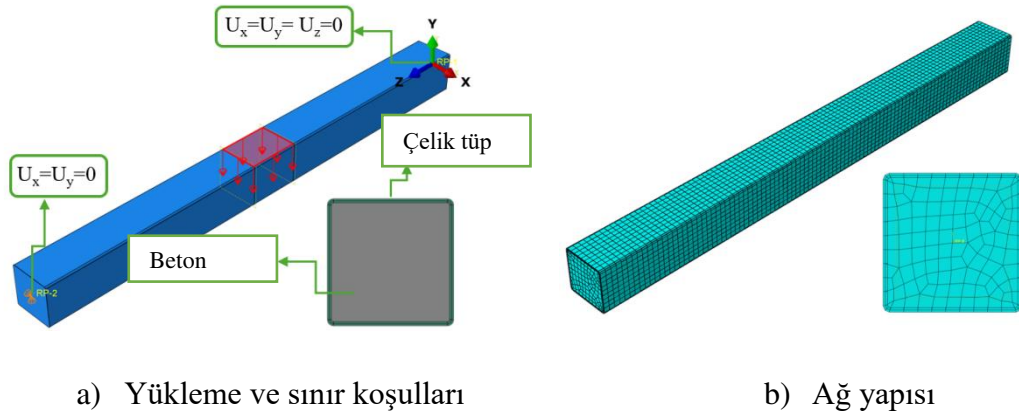


Şekil 10. Farahi vd. (2016) deney sonuçları ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen göçme modlarının karşılaştırılması

Farahi vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma, kapsamlı veri seti ve farklı kesit geometrilerini içermesi nedeniyle sonlu elemanlar modelinin doğrulanması için güvenilir bir referans oluşturmıştır. Bu doğrulama çalışması sonucunda elde edilen bulgular, modelin parametrik analizlerde kullanılabilirliğinin değerlendirilmesine temel oluşturmıştır. Bu doğrulama sonuçları, geliştirilen sonlu elemanlar modelinin güvenilir olduğunu göstermektedir.

### 3.2.2. Döngüsel Yük Altında Model Doğrulaması

Bu tez kapsamında geliştirilen sonlu elemanlar modelinin döngüsel yükleme altındaki davranışını doğrulayabilmek amacıyla literatürde yer alan deneysel çalışmalar incelenmiştir. Bu doğrultuda, beton dolgulu çelik kolonların döngüsel yükler altındaki davranışını inceleyen Liao vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma referans alınmıştır. Liao vd. (2017) gerçekleştirilen deneysel çalışmada kullanılan yükleme düzeni ve sınır koşulları Şekil 11’de gösterilmektedir.



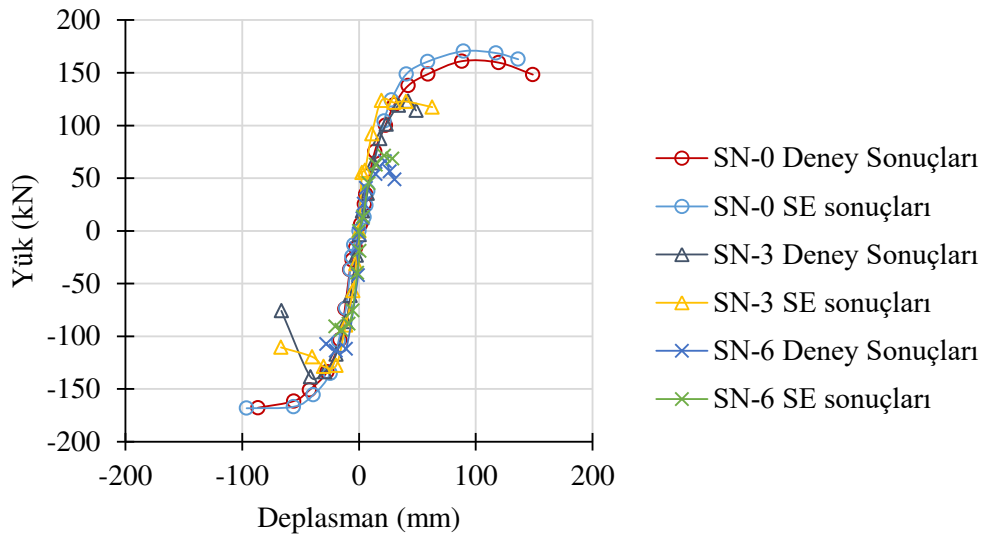
Şekil 11. BDÇT kolon modelinde kullanılan tipik sınır koşulları ve mesh dağılımı

Söz konusu çalışma, beton dolgulu çelik kolonların histeretik davranışlarının, enerji yutma kapasitesinin ve süneklik performansının değerlendirilmesi açısından önemli veri sağlamaktadır.

Liao vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, beton dolgulu çelik kolon numuneleri döngüsel yatay yükleme altında test edilmiştir. Deneysel program kapsamında numunelerin yük–deplasman ilişkileri, histerezis eğrileri, rijitlik bozulması ve enerji yutma kapasitesi incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, kolonların sismik yükler altındaki davranışının değerlendirilmesi açısından kapsamlı veri sunmaktadır.

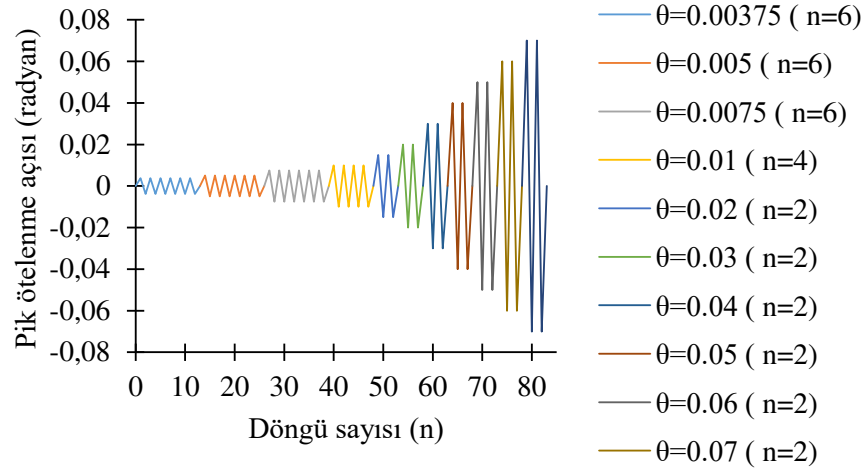
Döngüsel davranışın değerlendirilmesi amacıyla yatay yük–yatay deplasman zarf eğrileri karşılaştırılmış ve Şekil 12’de gösterildiği üzere sonlu elemanlar (SE) modellerinin döngüsel davranışın temel özelliklerini başarılı bir şekilde temsil ettiği belirlenmiştir. Sayısal analizler, numunelerin hem başlangıç elastik rijitliğini hem de akma sonrası doğrusal olmayan davranışını doğru şekilde yansıtmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen zarf eğrileri, doğrulaması yapılan tüm kare kesitli numunelerde ve farklı aksenal yük seviyelerinde ( $n = 0,02, 0,3$  ve  $0,6$ ) deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu bulunmuştur.

Sonlu elemanlar analizleri ile elde edilen nihai yük taşıma kapasitesi değerleri deneysel sonuçlarla yakın bir uyum göstermiştir. Deneysel çalışmada SN-0, SN-3 ve SN-6 numuneleri için ölçülen maksimum yatay yük değerleri sırasıyla 140,1 kN, 130,7 kN ve 88,4 kN olarak belirlenirken, sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen karşılık gelen değerler sırasıyla 157,1 kN, 128,6 kN ve 93,9 kN olmuştur. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen sonlu elemanlar modelinin deneysel davranışı başarılı bir şekilde temsil ettiğini ve güvenilir sonuçlar üretebildiğini göstermektedir. Bu durum, modelin oluklu geometriye sahip kompozit kolonlar üzerinde gerçekleştirilecek parametrik analizlerde kullanılabileceğini doğrulamaktadır.



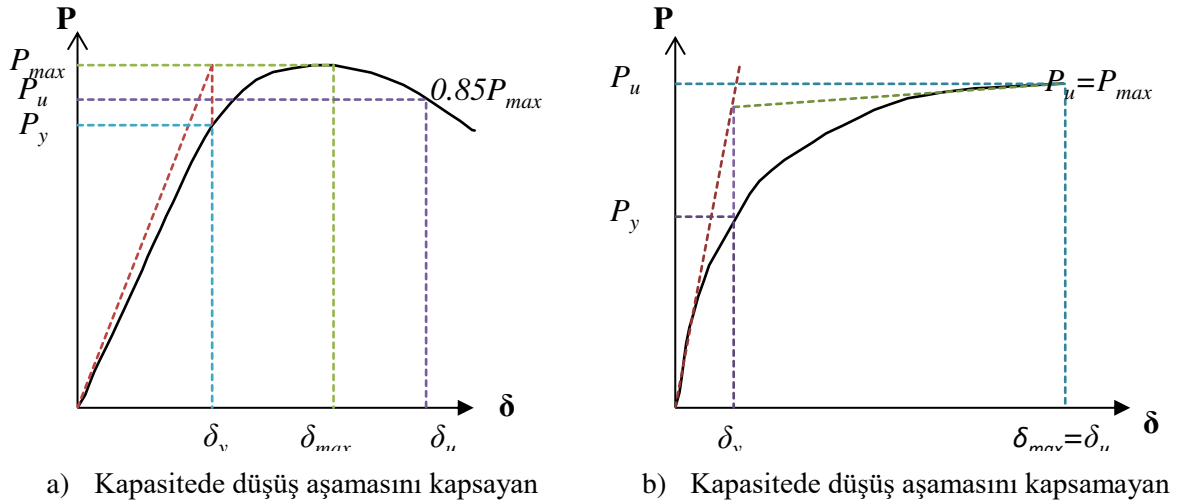
Şekil 12. Liao vd. (2017) deney sonuçları ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen yük-deplasman zarf eğrilerinin karşılaştırılması

Bu tez kapsamında oluşturulan sonlu elemanlar modeli, Liao vd. (2017) deneysel çalışmasında kullanılan numunelerin geometrik özellikleri, malzeme parametreleri ve sınır koşulları dikkate alınarak oluşturulmuştur. Döngüsel yükleme protokolü sayısal modele deplasman kontrollü olarak uygulanmış ve yükleme-boşaltma döngüleri deneysel çalışmaya uygun şekilde tanımlanmıştır.



Şekil 13. Döngüsel yatay yükleme

Analizlerde kullanılan döngüsel yatay yükleme protokolü Şekil 13’de gösterilmektedir. Histeretik davranışın değerlendirilmesi amacıyla, yük–deplasman zarf eğrilerinden elde edilen önemli parametreler sistematik olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerin tanımlanması Şekil 13’de şematik olarak gösterilmektedir. Tepe yükünden sonra azalan bir bölgeye sahip eğriler için nihai yük ( $P_u$ ), maksimum yükün ( $P_{max}$ ) %85’i olarak kabul edilmiş ve bu noktaya karşılık gelen deplasman değeri nihai deplasman ( $\delta_u$ ) olarak tanımlanmıştır (Şekil 14a). Buna karşılık, tepe yükünden sonra azalan bir bölge bulunmayan eğrilerde ise nihai yük ve nihai deplasman, maksimum yükün elde edildiği noktadaki değerler olarak alınmıştır (Şekil 14b).



Şekil 14. Yük–deplasman eğrilerinde akma ve nihai deplasmanların şematik gösterimi

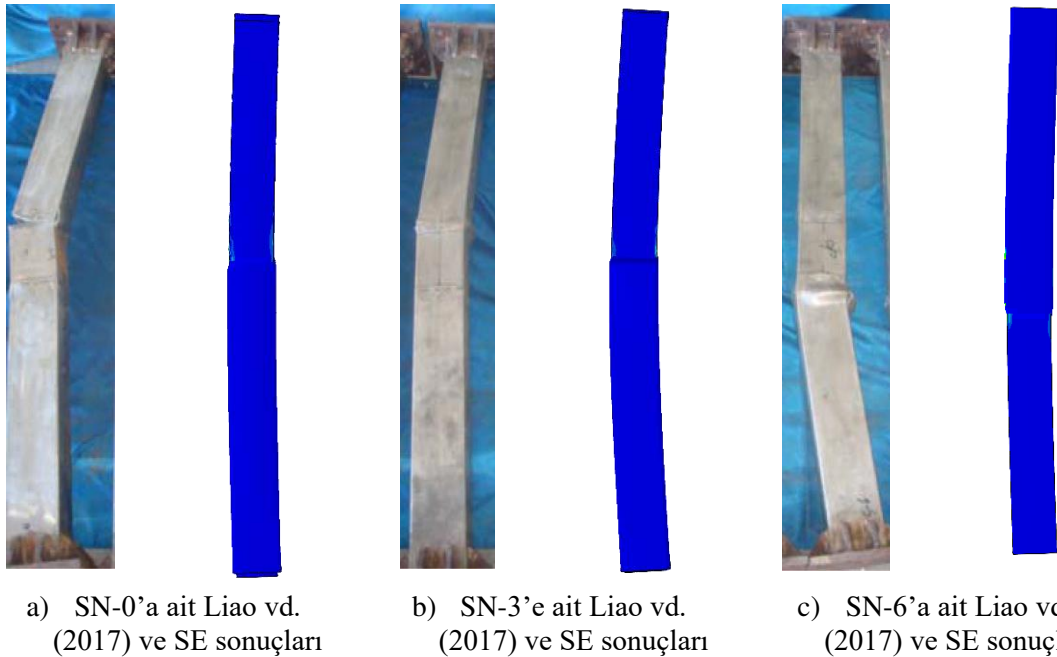
Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen zarf eğrileri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda sayısal modelin kolonların döngüsel yükleme altındaki genel davranışını başarılı bir şekilde temsil ettiği

görülmüştür. Sayısal analizlerden elde edilen histerezis eğrilerinin deneysel eğriler ile genel olarak benzer karakteristik özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle yükleme ve boşaltma döngüleri sırasında rijitlik azalımı ve plastik deformasyon davranışının sayısal model tarafından gerçekçi bir şekilde temsil edildiği gözlemlenmiştir.

Enerji yutma kapasitesi açısından yapılan değerlendirmelerde, sonlu elemanlar modelinin döngüsel yükleme süresince oluşan enerji dağılımını deneysel sonuçlara yakın şekilde tahmin edebildiği belirlenmiştir. Ayrıca kolon numunelerinde gözlemlenen süneklik davranışının sayısal model ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Şekil 15'te görüldüğü üzere, sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen göçme modları deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu bulunmuştur. Deneysel çalışmada SN-0, SN-3 ve SN-6 numunelerinin temel olarak genel burkulma davranışı sergilediği, ayrıca yatay yükün uygulandığı orta bölge yakınlarında belirgin yerel burkulmaların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Nihai göçme modu, orta açıklık bölgesine yakın köşelerde oluşan çelik yırtılması ve buna eşlik eden dışa doğru yerel burkulmalar ile karakterize edilmiştir.

Sonlu elemanlar analizleri, numunelerin davranışını başarılı bir şekilde temsil etmiş ve özellikle orta bölge civarında meydana gelen belirgin dışa doğru yerel burkulmaları doğru şekilde yeniden üretebilmiştir. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen sayısal modelin göçme mekanizmasını ve deformasyon davranışını güvenilir bir şekilde yansıttığını göstermektedir.



Şekil 15. Liao vd. (2017) deney sonuçları ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen kompozit kolon göçme modlarının karşılaştırılması

Sayısal analizlerde elde edilen hasar dağılımları incelendiğinde, kolon numunelerinde çelik tüplerde yerel burkulma ve beton çekirdekte ezilme davranışlarının deneysel gözlemler ile benzer şekilde geliştiği belirlenmiştir. Bu durum, sonlu elemanlar modelinde kullanılan malzeme modellerinin ve temas tanımlarının döngüsel yükleme koşulları altında da güvenilir sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Elde edilen tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, geliştirilen sonlu elemanlar modelinin beton dolgulu çift cidarlı çelik kolonların döngüsel yükler altındaki yapısal davranışını güvenilir bir şekilde temsil edebildiği sonucuna varılmıştır. Böylece modelin parametrik analizlerde kullanılabilirliği doğrulanmıştır.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

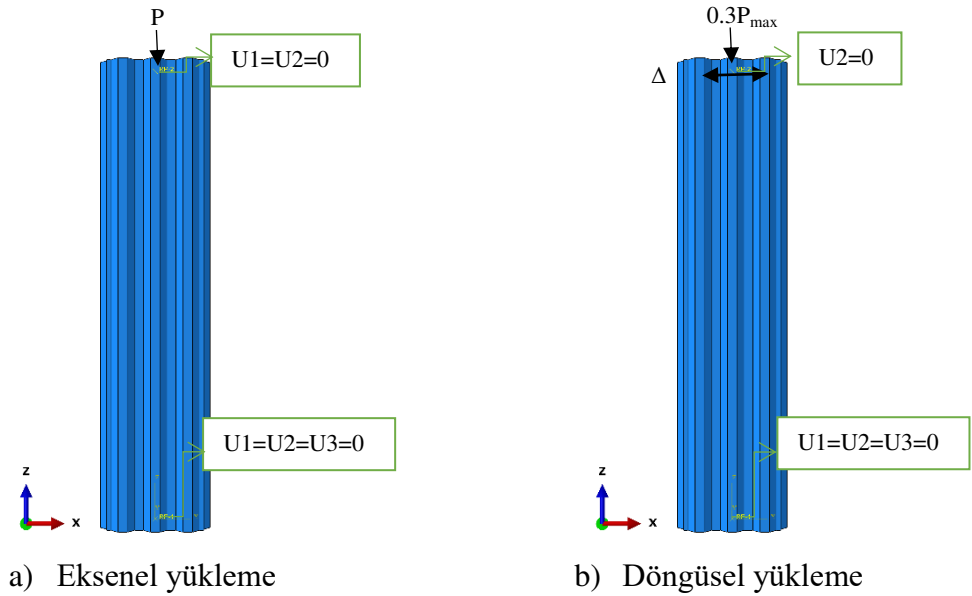
### 4.1. Parametrik Çalışmanın Kapsamı

Bu tez kapsamında beton dolgulu çift cidarlı oluklu çelik kolonların yapısal davranışını incelemek amacıyla parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Parametrik çalışma kapsamında kolon kesit geometrisi, oluk oryantasyonu, kolon uzunluğu ve çelik cidar kalınlığının kolon davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Bu çalışma için bir matris oluşturmak amacıyla Abaqus/Explicit'te 63 farklı modelden oluşan kapsamlı bir SE modeli oluşturuldu. Üç seriye ayrılan yedi temel geometrik konfigürasyon dikkate alındı: iç oluklu çelik tübüler (IC1, IC2, IC3), ve dış oluklu çelik tübüler (OC1, OC2, OC3) ve referans kolon olarak adlandırılan iç ve dış kutu çelik kolonlar (S1).

Her kolon tipi için farklı kesit konfigürasyonları oluşturulmuş ve kolon uzunlukları 1000 mm, 1500 mm ve 2000 mm olarak seçilmiştir. Ayrıca çelik cidar kalınlığı parametresi 3 mm, 5 mm ve 7 mm değerleri için incelenmiştir.

Parametrik analizlerde diğer malzeme özellikleri sabit tutulmuş, yalnızca seçilen geometrik parametrelerin etkileri değerlendirilmiştir. Böylece kolon davranışındaki değişimlerin doğrudan incelenen parametrelere bağlı olarak ortaya konulması amaçlanmıştır. Şekil 16'da hem eksenel yük davranışına ait hem de döngüsel yükleme davranışına ait kompozit sistemlerin yükleme ve mesnet koşullarını göstermektedir.



Şekil 16. Yükleme ve mesnet koşulları

Analiz sonuçları aşağıdaki performans kriterleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir:

- Eksenel yük–deplasman davranışı
- Maksimum taşıma kapasitesi
- Histeretik davranış
- Süneklik performansı
- Enerji yutma kapasitesi
- Göçme mekanizmaları

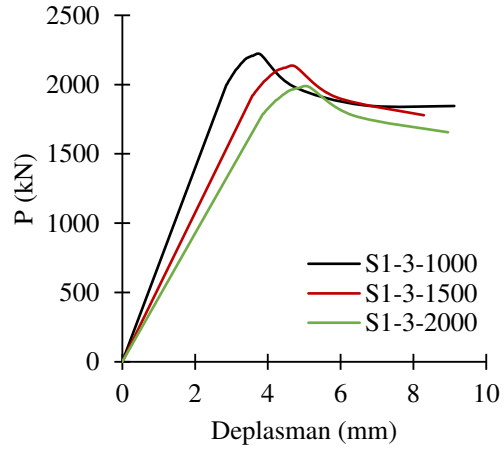
#### **4.2. Eksenel Yük–Deplasman Davranışının İncelenmesi**

Bu bölümde parametrik analizler sonucunda elde edilen yük–deplasman eğrileri incelenmiş ve farklı kesit tiplerine sahip kolonların yapısal davranışları karşılaştırılmıştır. Yük–deplasman eğrileri, kolonların elastik davranış bölgesi, akma sonrası davranışı ve nihai taşıma kapasitesi açısından değerlendirilmiştir.

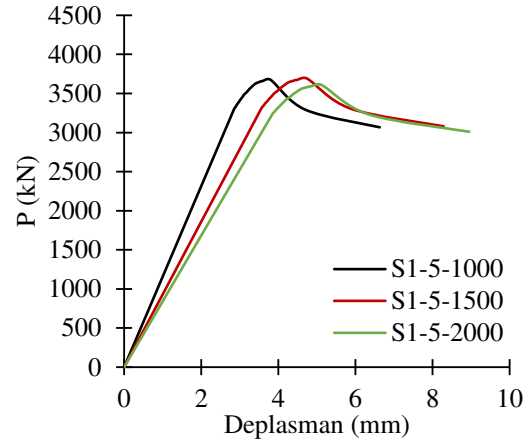
Yük–deplasman eğrileri incelendiğinde, tüm kolon numunelerinde başlangıçta doğrusal elastik davranışın hâkim olduğu, yük seviyesinin artmasıyla birlikte doğrusal olmayan davranışın ortaya çıktığı görülmüştür. Kolon tipleri arasında hem başlangıç rijitliği hem de maksimum taşıma kapasitesi açısından farklılıklar gözlemlenmiştir.

Kesit tipleri karşılaştırıldığında, oluklu cidara sahip kolonların yükleme süreci boyunca daha kararlı bir davranış sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca oluk geometrisinin yerel stabiliteyi artırarak kolon davranışını olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir.

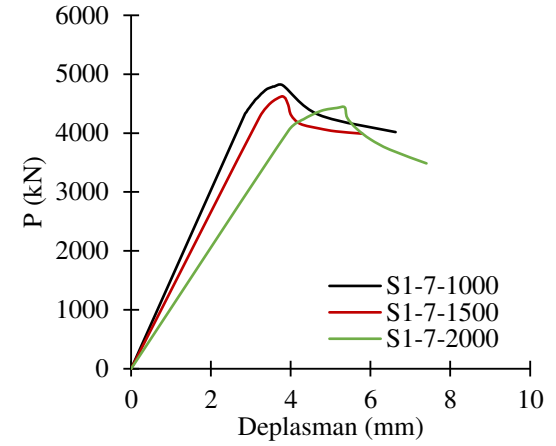
Kolon uzunluğunun etkisi incelendiğinde, kolon uzunluğunun artmasıyla birlikte maksimum taşıma kapasitesinin azaldığı görülmüştür. Özellikle 1000 mm uzunluğa sahip kolonlar daha yüksek taşıma kapasitesi sergilerken, kolon uzunluğunun artmasıyla global burkulma etkilerinin daha belirgin hâle geldiği belirlenmiştir. Tipik kolon konfigürasyonlarına ait yük–deplasman eğrileri Şekil 17’de sunulmuştur. Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, tüm numunelerin başlangıçta doğrusal elastik davranış gösterdiği, daha sonra akma bölgesine geçtiği ve nihai taşıma kapasitesine ( $P_u$ ) ulaşmaya kadar şekil değiştirme pekleşmesi sergilediği görülmüştür. Kolonlar nihai taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra, çelik cidarlarda meydana gelen yerel burkulma nedeniyle taşıma kapasitesinde ani bir azalma gözlemlenmiştir. Ancak bu ilk dayanım kaybını takiben kapasitedeki düşüş daha yavaş gerçekleşmiş ve kolonlar belirli düzeyde artık taşıma kapasitesini koruyarak yük taşımaya devam etmiştir.



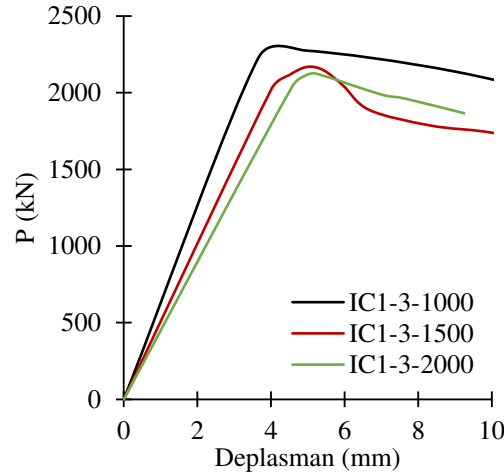
a)



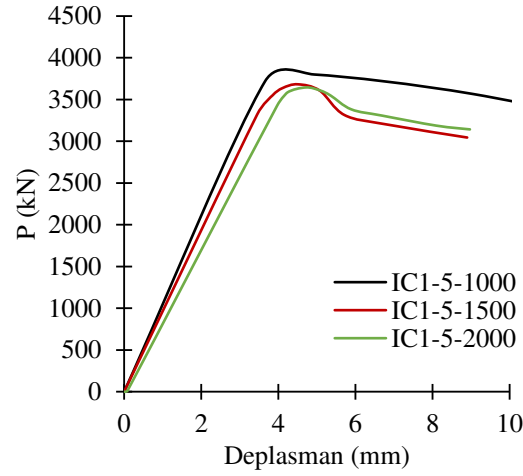
b)



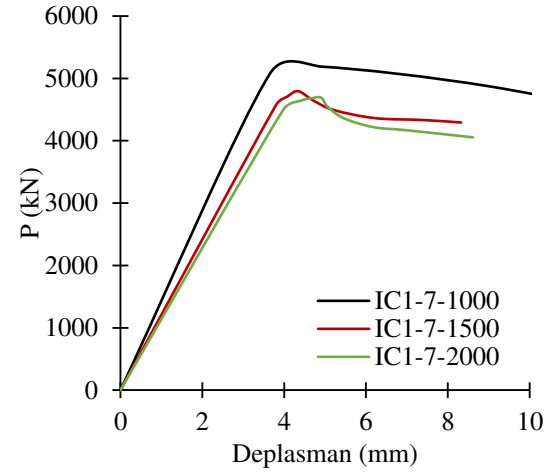
c)



d)

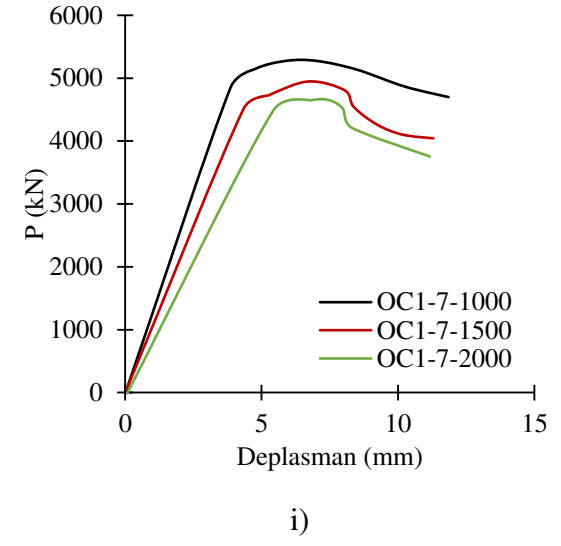
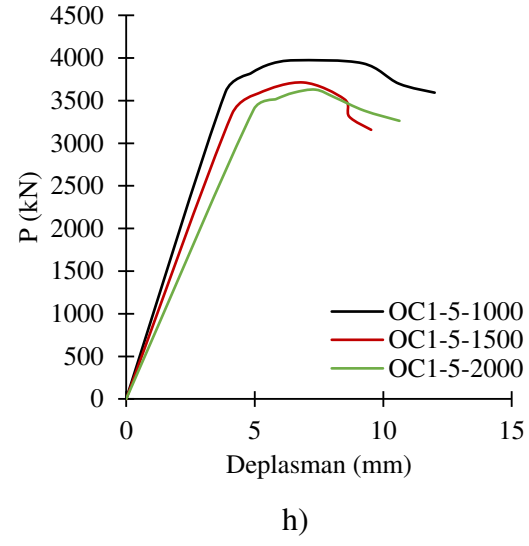
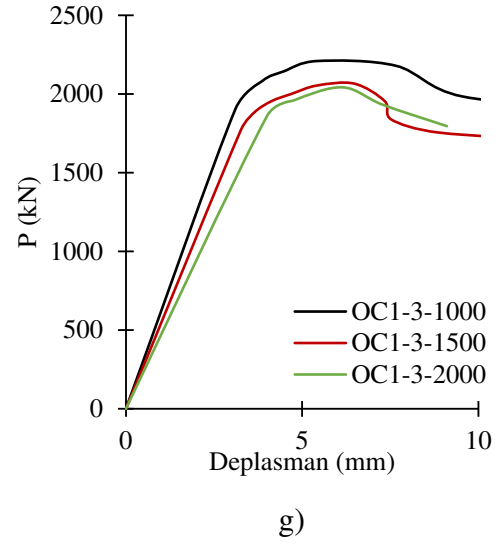


e)



f)

Şekil 17. Farklı kesit konfigürasyonlarına sahip çift cidarlı BDÇT kolonlarının yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 17. (Devamı)

Genel olarak değerlendirildiğinde, kesit geometrisi ve kolon uzunluğunun yük–deplasman davranışı üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmektedir. Bu parametrelerin maksimum taşıma kapasitesi ve deformasyon performansı üzerinde belirleyici rol oynadığı anlaşılmaktadır.

#### 4.3. Eksenel Yük Taşıma Kapasitelerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde parametrik analizler sonucunda elde edilen maksimum taşıma kapasitesi değerleri incelenmiş ve farklı kesit tiplerine sahip kolonların performansları karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen nihai eksenel yük taşıma kapasitesi değerleri Tablo 3’te, Eşitlik (3)’te verilen süperpozisyon yöntemine dayalı analitik tahminlerle birlikte sunulmuştur. Sonlu elemanlar analiz sonuçları ile ACI 318 (2011) komitesi tarafından önerilen hesaplama yönteminden elde edilen sonuçların karşılaştırılması, özellikle 5 mm ve 7 mm çelik cidar kalınlığına sahip numunelerde olmak üzere, çoğu konfigürasyonda oldukça iyi bir uyum göstermiştir. Bu durum, basit süperpozisyon yönteminin malzemelerin dayanım katkılarını ve kompozit kesitin temel taşıma mekanizmasını başarılı bir şekilde temsil edebildiğini doğrulamaktadır.

$$P = F_y A_i + 0.85 F_c A_c + F_y A_o \quad (3)$$

Burada  $F_y$  çeliğin akma dayanımını,  $f_c$  ve  $A_c$  sırasıyla beton dolgunun basınç dayanımını ve kesit alanını,  $A_i$  ve  $A_o$  ise sırasıyla iç ve dış çelik katmanların kesit alanlarını ifade etmektedir.

ACI 318 bağıntısının, en ince çelik cidara sahip modeller (3 mm) için daha düşük doğrulukta sonuçlar verdiği görülmüştür. Özellikle 3 mm cidar kalınlığına sahip bazı numunelerde (örneğin IC1-3-1000 ve OC1-3-1000), sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen taşıma kapasitesi değerleri ACI 318 komitesi tarafından öngörülen değerlerden belirgin şekilde daha düşük kalmıştır. Bunun temel nedenlerinden biri, ince çelik cidarlarda malzeme tam dayanımına ulaşmadan önce yerel burkulmanın meydana gelmesidir.

Narinlik etkisi açısından değerlendirildiğinde, sonlu elemanlar analiz sonuçları, kolon uzunluğunun 1000 mm’den 2000 mm’ye artmasıyla birlikte nihai taşıma kapasitesinde sınırlı bir azalma olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, göçme davranışının esas olarak kesit taşıma kapasitesi tarafından kontrol edildiği belirlenmiştir. Ancak, yalnızca kesit kapasitesini esas alan ACI 318 bağıntısı, taşıma kapasitesindeki bu sınırlı azalmayı dikkate almamaktadır. Buna rağmen, sonlu

elemanlar analizlerinde gözlenen küçük kapasite kaybı, bu kolonların esasen kısa kolon davranışı sergilediğini ve taşıma kapasitesinin temel olarak kesit dayanımı tarafından belirlendiğini ortaya koymaktadır.

Oluklu ve düz cidarlı kolonlar karşılaştırıldığında, oluklu kolonların daha yüksek taşıma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Özellikle dış oluklu tüpe sahip OC serisi kolonlarda elde edilen maksimum taşıma kapasitesi değerlerinin, referans kolonlara göre yaklaşık %5–16 arasında değişen oranlarda arttığı görülmüştür. Benzer şekilde, iç oluklu tüpe sahip IC serisi kolonlarda da referans kolonlara göre kapasite artışları elde edilmiştir.

Kesit tipleri arasındaki karşılaştırmalar, oluk geometrisinin kesit stabilitesini artırarak yerel burkulma davranışını geciktirdiğini ve bunun taşıma kapasitesine olumlu katkı sağladığını göstermektedir. Ayrıca, çelik cidar kalınlığının artırılmasıyla birlikte tüm kolon tiplerinde taşıma kapasitesinin belirgin şekilde arttığı belirlenmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, oluk geometrisinin ve kesit düzeninin beton dolgulu çift cidarlı çelik kolonların taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, özellikle dış oluklu tüpe sahip kolonların taşıma kapasitesi açısından avantaj sağladığını göstermektedir.

Tablo 4. Farklı kolon tiplerine ait maksimum eksenel yük taşıma kapasitesi değerleri

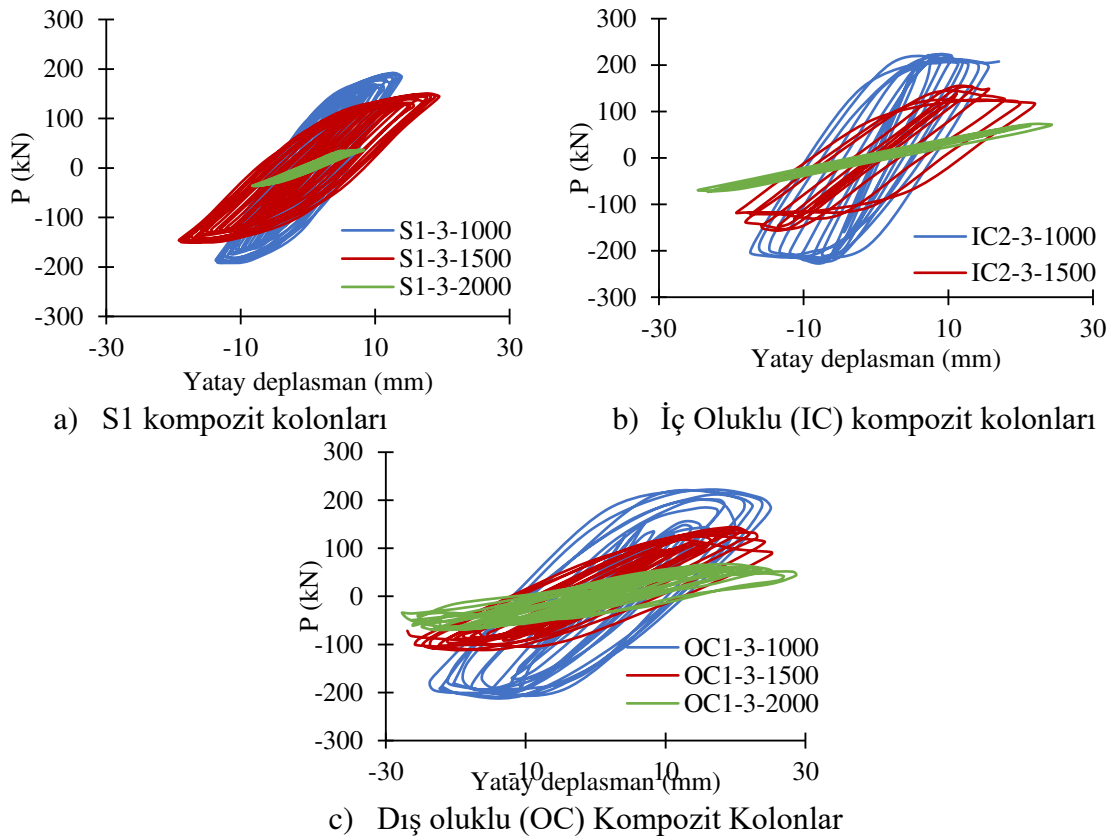
| ID No. | ACI 318 (2011) (kN) |      |      | Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları (kN) |      |      |           |      |      |           |      |      |
|--------|---------------------|------|------|----------------------------------------|------|------|-----------|------|------|-----------|------|------|
|        | L=1000 mm           |      |      | L=1000 mm                              |      |      | L=1500 mm |      |      | L=2000 mm |      |      |
|        | 3 mm                | 5 mm | 7 mm | 3 mm                                   | 5 mm | 7 mm | 3 mm      | 5 mm | 7 mm | 3 mm      | 5 mm | 7 mm |
| S1     | 2518                | 3425 | 4333 | 2217                                   | 3674 | 4793 | 2135      | 3692 | 4706 | 1986      | 3608 | 4643 |
| IC1    | 2583                | 3485 | 4386 | 2275                                   | 3792 | 5200 | 2157      | 3682 | 4739 | 2103      | 3642 | 4697 |
| IC2    | 2499                | 3368 | 4236 | 2333                                   | 3989 | 5402 | 2400      | 3657 | 4683 | 2200      | 3168 | 4469 |
| IC3    | 2448                | 3296 | 4143 | 2323                                   | 3861 | 5380 | 2429      | 3649 | 4699 | 2298      | 3559 | 4508 |
| OC1    | 2394                | 3220 | 4045 | 2209                                   | 3972 | 5274 | 2275      | 3711 | 4942 | 2069      | 3628 | 4646 |
| OC2    | 2156                | 2824 | 3491 | 2336                                   | 3993 | 5445 | 2316      | 3778 | 4920 | 2289      | 3691 | 4415 |
| OC3    | 1829                | 2516 | 3203 | 2423                                   | 4038 | 5563 | 2365      | 3750 | 4813 | 2316      | 3639 | 4646 |

#### 4.4. Histeretik Davranışın İncelenmesi

Bu bölümde beton dolgulu çift cidarlı oluklu çelik kolonların döngüsel yatay yükler altındaki histeretik davranışları incelenmiştir. Histeretik davranış, yapısal elemanların deprem etkileri altındaki performansının değerlendirilmesinde önemli bir gösterge olup, enerji yutma kapasitesi, rijitlik kaybı ve süneklik özellikleri hakkında bilgi vermektedir.

Yükleme işlemi, Şekil 16'da gösterildiği gibi iki aşamada gerçekleştirildi. İlk olarak, kolonun üst ucundan aksel yük oranı  $P_{\max} = 0,3$ 'e karşılık gelen aksel bir basınç yükü uygulandı ve analiz boyunca bu yük sabit tutuldu. İkinci aşamada ise, kolonun üst ucundan döngüsel bir yanal yer değiştirme ( $\Delta$ ) uygulandı. Bu yer değiştirme miktarı, Şekil 12'de gösterildiği gibi Krawinkler ve arkadaşları (2000) tarafından belirtilen yönteme göre belirlendi.

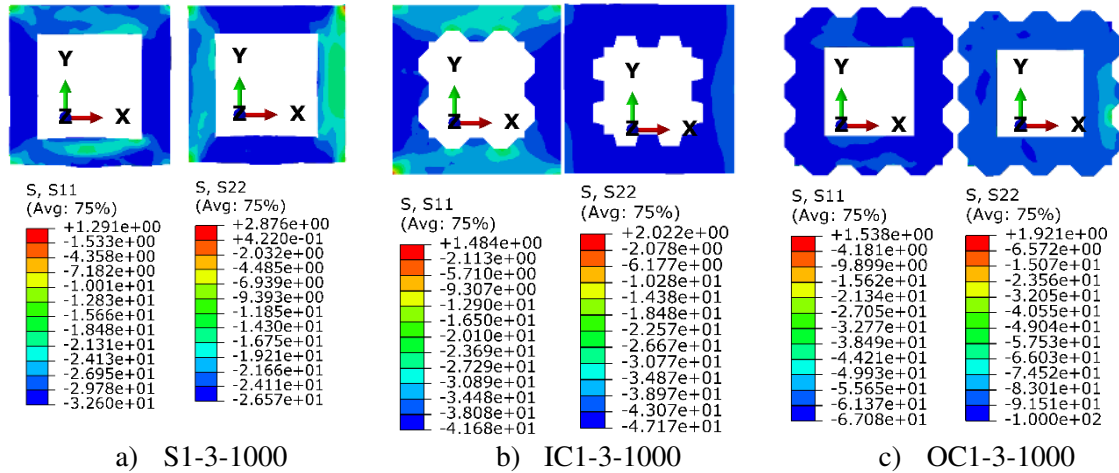
Parametrik analizler sonucunda elde edilen histeretik eğriler değerlendirilerek oluk oryantasyonu, kolon narinliği ve çelik cidar kalınlığı gibi parametrelerin kolon davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Histeretik eğrilerin şekli, genişliği ve kararlılığı dikkate alınarak farklı kolon tiplerinin döngüsel yükler altındaki performansları karşılaştırılmıştır.



Şekil 18. 3 mm çelik cidar kalınlığına sahip numunelerde oluk oryantasyonunun histeretik eğrileri üzerindeki etkisi

Şekil 18’de, 3 mm çelik cidar kalınlığına sahip kompozit kolonların histeretik eğrilerinin karşılaştırması sunulmaktadır. Sonuçlar, oluklu kesit konfigürasyonunun ve kolon uzunluğunun kolon davranışı üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir. Öncelikle, dış oluklu tüpe sahip OC serisi numunelerin histeretik çevrimlerinin, dış oluklu cidarın sağladığı ilave sınırlandırma etkisi sayesinde, referans S1 ve iç oluklu IC serisi numunelere göre daha geniş olduğu görülmektedir. Buna karşılık, düz dış yüzeye sahip S1 ve IC serilerinde tepe yüküne ulaşıldıktan sonra dayanım kaybı daha hızlı gerçekleşmiş ve histeretik çevrimler nispeten daha dar kalmıştır.

Şekil 19’da, kolon tabanından 100 mm uzaklıktaki bir kesitte beton çekirdeğe ait gerilme dağılımları gösterilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, OC serisi numunelerde beton çekirdeğinde oluşan yanal basınç gerilmelerinin IC ve S1 serisi numunelere kıyasla önemli ölçüde daha yüksek olduğu görülmektedir. Eksenel yük etkisi altında beton çekirdeğin yanal yönde genişlemesi sırasında, dış yüzeyde bulunan oluklu çelik levhanın trapez geometrisi bu genişlemeyi fiziksel olarak sınırlandırmaktadır.



Şekil 19. Kolon tabanından 100 mm mesafedeki enkesitte eksenel gerilme dağılımlarının karşılaştırılması

IC serisi numuneler belirli bir rijitlik artışı sağlamasına rağmen, sargılama etkisi açısından OC serisi kadar etkin bir performans göstermemiştir. Bunun sonucunda, özellikle olukların iç köşelerine karşılık gelen bölgelerde beton içerisinde yüksek yanal basınç gerilmeleri oluşmuştur. Buna karşılık, S1 serisi numunelerin gerilme dağılımları incelendiğinde sargılama etkisinin yalnızca kesit köşelerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Düz çelik cidarların, IC ve OC serilerine kıyasla betonun yanal genişlemesine karşı daha düşük direnç göstermesi ve dışa doğru burkulmaya daha yatkın olması nedeniyle beton ile çelik arasındaki kompozit etkileşim daha erken

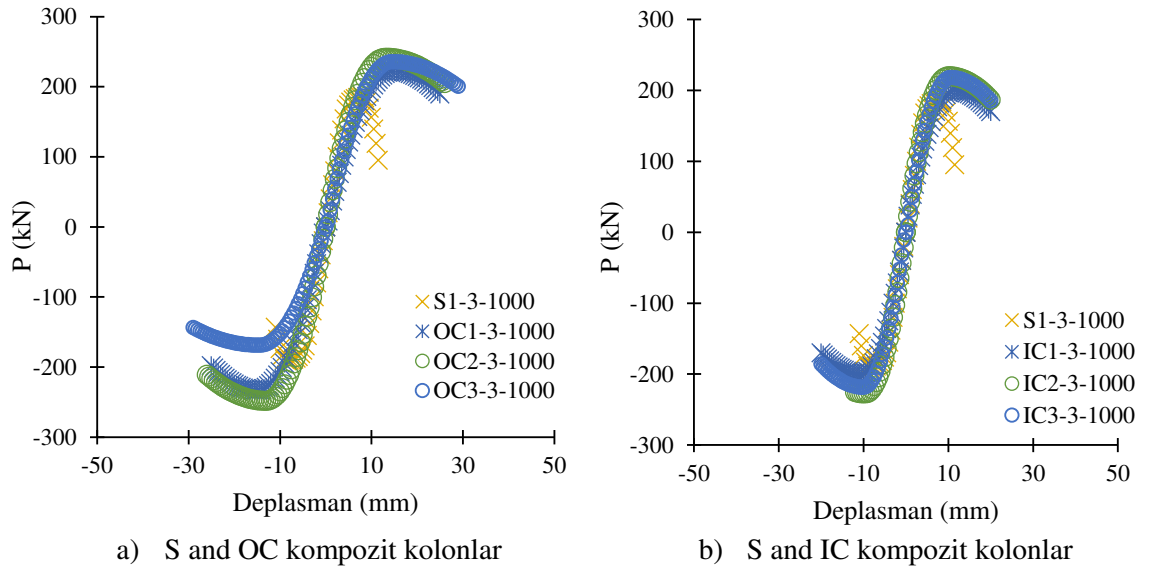
zayıflamaktadır. Bu durum, taşıma kapasitesinin ve kesit stabilitesinin daha erken azalmasına neden olmaktadır.

Narinlik etkisi değerlendirildiğinde ise, kolon uzunluğunun artmasıyla birlikte ikinci mertebe etkiler nedeniyle yatay yük taşıma kapasitesinde ve başlangıç rijitliğinde azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, narin kolonlarda göçme mekanizmasının kolon tabanında ani ezilmeden kolon boyunca daha sünek eğilme davranışına dönüşmesi nedeniyle, özellikle OC konfigürasyonuna sahip numunelerin yüksek enerji yutma kapasitesini ve histeretik kararlılığını koruduğu belirlenmiştir.

Bu kapsamda elde edilen sonuçlar, kolonların enerji yutma kapasitesi, rijitlik korunumu ve deformasyon performansı açısından değerlendirilmiş olup, ilgili sonuçlar aşağıdaki alt bölümlerde ayrıntılı olarak sunulmuştur.

#### 4.4.1. Oluk Oryantasyonunun Etkisi

Oluk oryantasyonunun kompozit kolonların yatay döngüsel davranışı üzerindeki etkisi, IC ve OC serisi numunelerin histeretik davranışlarının referans seri olan S1 ile karşılaştırılması yoluyla değerlendirilmiştir. Şekil 20’de verilen yük–deplasman zarf eğrilerinden görüldüğü üzere, oluklu çelik levhaların yerleşim yönü kolonların sismik performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.



Şekil 20. 3 mm çelik cidar kalınlığına sahip numunelerde oluk oryantasyonunun zarf eğrileri üzerindeki etkisi

Sonuçlar, tüm durumlarda OC serisi numunelerin IC ve S1 serilerine kıyasla daha üstün döngüsel davranışlar sergilediğini göstermiştir. Bunun temel nedeni, OC serisi numunelerin histeretik çevrimlerinin daha belirgin ve kararlı olmasıdır. Bu durum, daha

yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olduklarını ve rijitlik kaybının daha yavaş gerçekleştiğini göstermektedir. Örneğin, yanal yük taşıma kapasitesi OC2-3 kolonunda 241,1 kN iken, referans kolonunda ise 156,2 kN'de kalarak, %50'nin üzerinde bir artışla daha üstün bir yanal yük performansı sergilemiştir. Söz konusu davranış, dış yüzeyde yer alan oluklu çelik levhaların sağladığı etkin sınırlandırma etkisine bağlanmaktadır. Dış oluklu çelik tüp, beton çekirdek üzerinde daha etkili bir sargılama etkisi oluşturarak yerel burkulmanın gecikmesini sağlamıştır. Tüm numunelere ait yanal yük değerleri, tezin EK1 bölümündeki tabloda sunulmuştur.

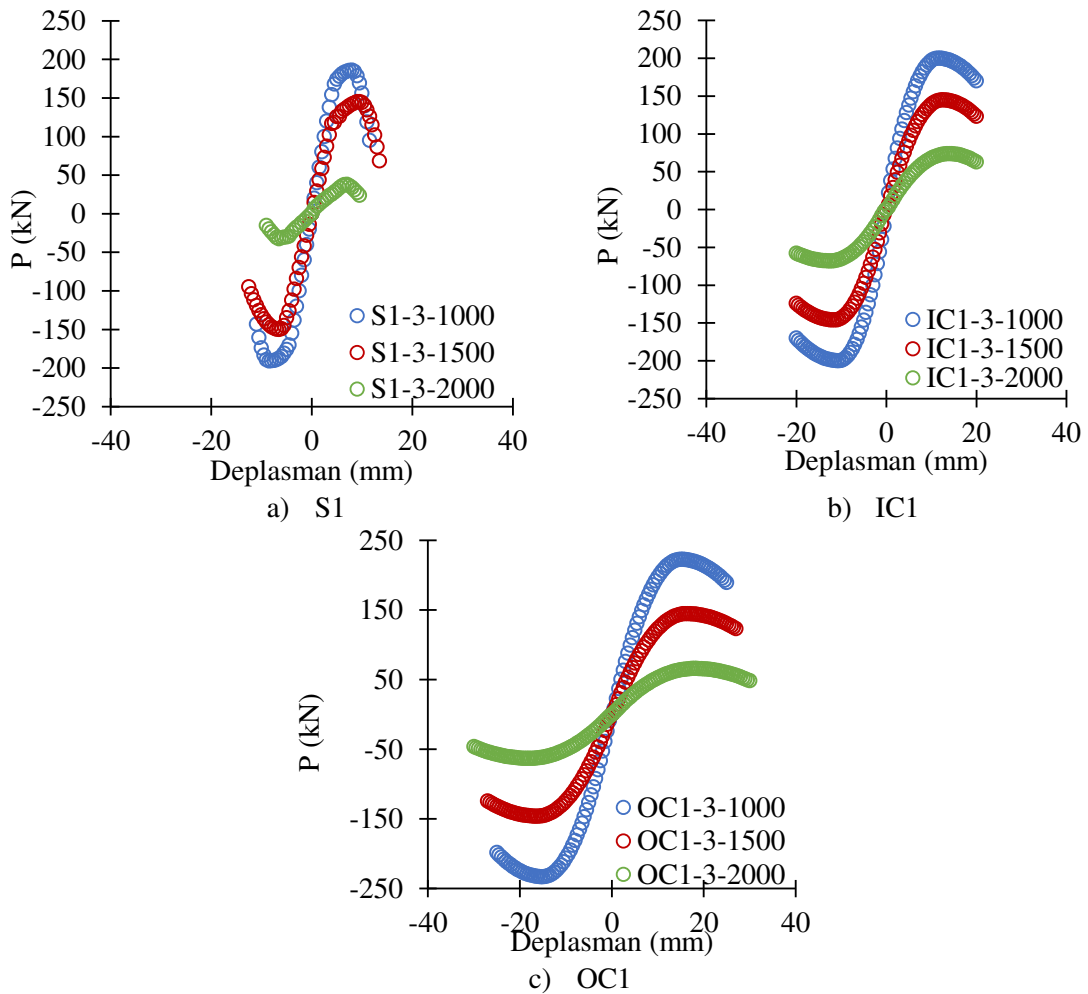
Buna karşılık, oluk içermeyen referans S1 serisinde histeretik çevrimlerin daha dar olduğu ve tepe yükünden sonra dayanım kaybının daha hızlı gerçekleştiği gözlemlenmiştir. IC serisi numuneler ise ara düzeyde bir performans sergilemiştir. Örneğin, referans kolonlarınkine kıyasla IC2-3'ün yanal yük taşıma kapasitesi %41'lik bir artış göstererek 219,9 kN ulaşmıştır. İç oluklu yapı sayesinde S1 serisine göre daha yüksek süneklik elde edilmesine rağmen, sargılama etkinliği ve tepe yük kapasitesi açısından OC serisinin gerisinde kalmıştır. Ayrıca OC konfigürasyonlarının daha yüksek ötelenme oranlarında dahi yatay yük taşıma kapasitelerini koruyabildiği ve daha uzun akma plato bölgeleri oluşturduğu belirlenmiştir. Bu özellik, deprem etkileri altında yapısal performans açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, dış oluklu kesit kullanımının çift cidarlı çelik tüplü kompozit kolonların kararlılığını ve sismik performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini açıkça göstermektedir.

#### 4.4.2. Narinlik Oranının Etkisi

Kolon narinliği, beton dolgulu çift cidarlı oluklu çelik kolonların yatay döngüsel yükler altındaki davranışını belirleyen önemli parametrelerden biridir. Bu kapsamda farklı uzunluklara sahip kolon numunelerinin davranışları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu tez çalışmasında incelenen 63 adet numunenin narinlik oranı ve hesaplama yöntemi Ek 1 ve Ek 2'de sunulmuştur. Kolon narinliğinin davranış üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla elde edilen zarf eğrileri Şekil 21'de sunulmuştur.

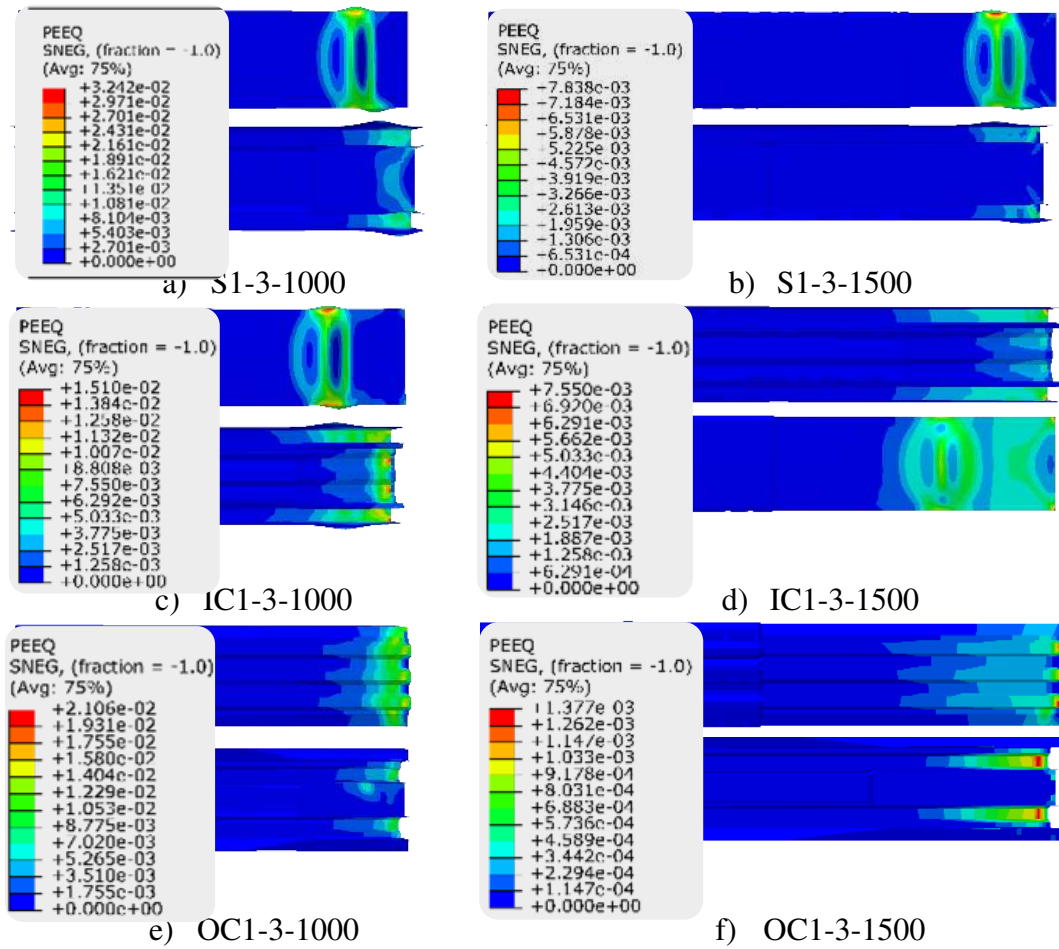
Zarf eğrileri incelendiğinde, kolon uzunluğunun artmasıyla birlikte maksimum yatay yük kapasitesinin azaldığı görülmektedir. Düşük narinliğe sahip kısa kolonlar daha yüksek yatay yük seviyelerine ulaşırken, kolon uzunluğunun artmasıyla birlikte yanal yük taşıma kapasitesindeki düşüş daha erken gerçekleşmektedir. Referans kolonlarda, narinlik oranı  $\lambda = 11,66$  seviyesinden  $\lambda = 17,49$  seviyesine çıktığında yanal kapasite 156,2 kN'den 145,4 kN'a sınırlı ölçüde gerilemiştir. Ancak, narinlik oranının  $\lambda$

= 23,32 sınırına ulaşmasıyla birlikte ikinci mertbe etkileri ve genel burulma eğilimi kritik hale gelmiş ve yanal yük taşıma kapasitesi 156,2 kN'dan 37,8 kN'a düşerek dört kattan fazla azalmıştır. Bu durum OC1-3 dıştan oluklu kompozit kolonunda, narinlik oranının  $\lambda = 13,62$ 'den  $\lambda = 20,43$ 'e yükselmesiyle kapasite 222,9 kN'dan 119,6 kN'a düşmüştür. Narinlik oranının  $\lambda = 27,24$ 'e yükselmesi durumunda ise yanal taşıma kapasitesi 66,1 kN olarak kaydedilmiştir. Düz cidarlı referans serisinde narinliğe bağlı kapasite sönümlleme oranı %75,80 iken, dıştan oluklu trapez profile sahip OC1-3 numunelerinde bu oran %70,34 seviyesinde sınırlandırılmıştır. İçten oluklu numunelerde narinlik oranı  $\lambda = 11,57$ 'den sırasıyla  $\lambda = 17,36$  ve  $\lambda = 23,15$  değerlerine yükselmiştir. Bu artış karşısında yanal yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 200,1 kN, 144,8 kN ve 73,5 kN olarak belirlenmiştir. Narinlik kaynaklı kapasite kaybı IC1-3 serisinde %63,26 seviyesinde kalarak narinlik artışına karşı en kararlı dayanım koruma performansını göstermiştir.

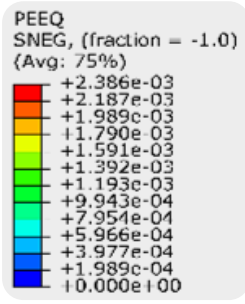


Şekil 21. Kolon narinliğinin kompozit kolonların zarf eğrileri üzerindeki etkisi

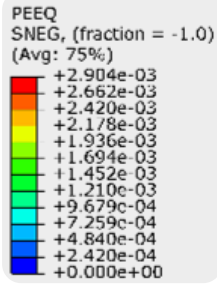
Şekil 22, kolon narinliğinin eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımı üzerindeki etkisini göstermektedir. Bu dağılımların mekanizmalarında önemli farklılıklar vardır. İlk olarak, her narinlik seviyesi için maksimum momentin olduğu kolon tabanında benzer plastik deformasyon ve yerel burkulmalar meydana gelir. Bir yandan, bu plastik deformasyonlar ve dışı doğru burkulma, daha kısa kolonların tabanında dar ve yoğun bir alana sınırlıdır. Öte yandan, narinlik arttıkça, artan yanal yer değiştirmeler ve ikinci dereceden etkiler nedeniyle eğilme momenti kolon boyunca daha etkili hale gelir. Bu, tabandan yukarı doğru uzanan daha geniş bir plastikleşme bölgesine ve göçmenin daha erken gerçekleşmesine neden olur.



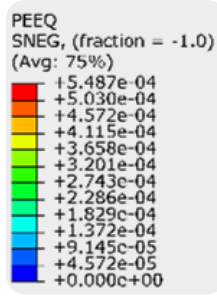
Şekil 22. Çeşitli narinlik oranlarına sahip kompozit elemanların eşdeğer plastik gerinim dağılımlarının mukayesesi



g) S1-3-2000



h) IC1-3-2000



i) OC1-3-2000

Şekil 22. (Devamı)

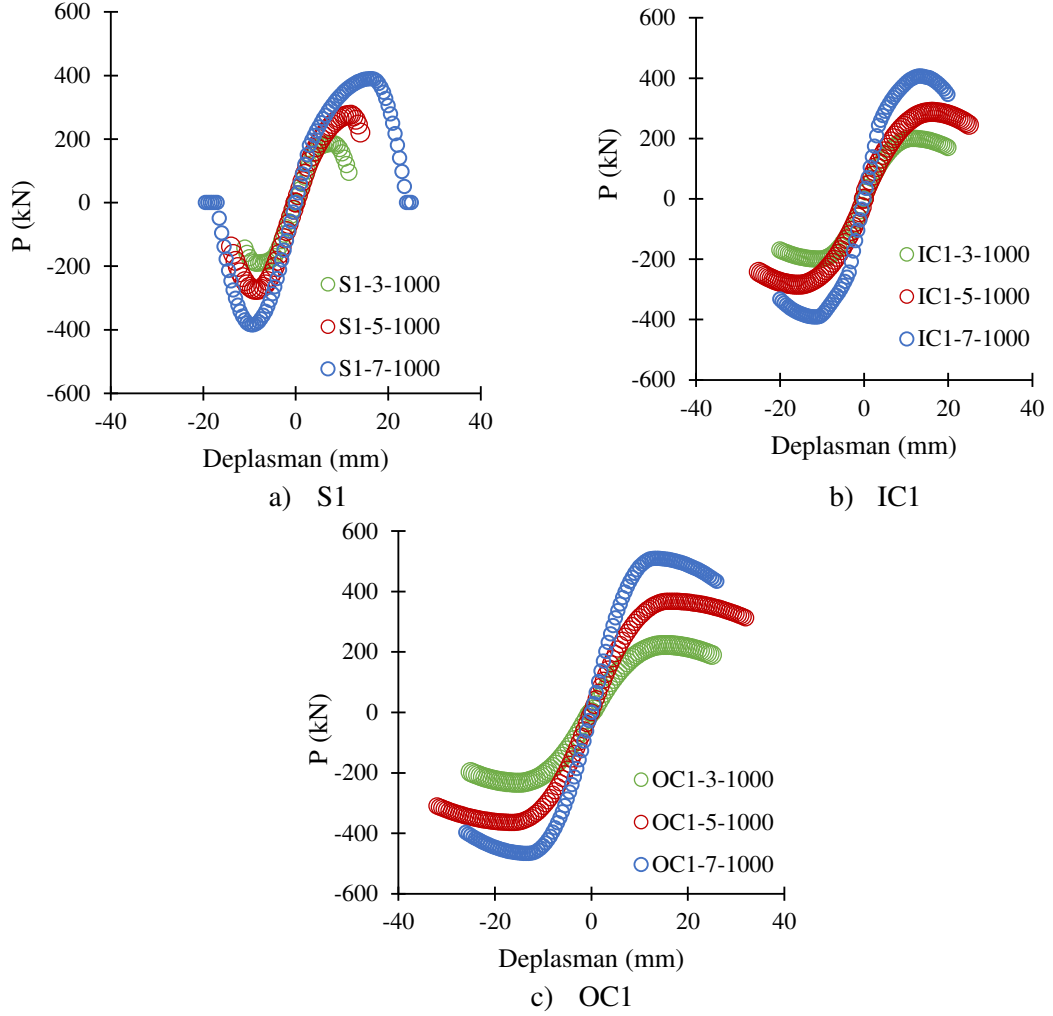
#### 4.4.3. Cidar Kalınlığının Etkisi

Kompozit kolonların döngüsel yatay yükler altındaki performansına çelik cidar kalınlığının etkisi, tüm konfigürasyonlarda 3 mm, 5 mm ve 7 mm cidar kalınlıkları için araştırılmıştır. Şekil 23, S1, IC1 ve OC1 serileri için yük-deplasman zarf eğrilerinin karşılaştırmasını göstermektedir.

Cidar kalınlığı ile nihai yanal yük kapasitesi arasında orantılı bir ilişki mevcuttur. Kalınlığın 3 mm'den 7 mm'ye artırılması hem ilk elastik rijitliği hem de maksimum yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırmıştır. Örneğin, OC1 serisinde (Şekil 23c), 7 mm cidar kalınlığına sahip numune, 3 mm cidar kalınlığına sahip numuneye göre 222,9 kN'dan 509,6 kN'a çıkarak 2,28 kat daha yüksek yanal yük taşıma kapasitesine sahiptir. IC1 kolonunun yanal yük taşıma kapasitesi ise, 200,1 kN'dan 407,1 kN'a yükselerek iki katın üzerinde artış göstermektedir.

Bu, iki ana nedenden kaynaklanmaktadır: Bir yandan, artan çelik kesit alanı doğrudan kolonun yerel burkulma kapasitesini iyileştirir; diğer yandan, artan çelik

kaplama kalınlığı beton çekirdeğin daha iyi sargılanmasına izin verir. Bu iyileştirilmiş sargılama, kolonun dışa doğru burkulmasını geciktirerek kesitin daha yüksek yanal yüklere dayanmasını ve daha fazla enerjiye karşı koymasını sağlar. Bu nedenle, çelik duvar kalınlığının artırılmasının çift cidarlı kompozit kolonların sismik dayanımını iyileştirmek için etkili bir yaklaşım olduğu söylenebilir.



Şekil 23. Cidar kalınlığının kompozit kolonların zarf eğrileri üzerindeki etkisi

#### 4.4.4. Oluk Geometrisinin Etkisi

Tez kapsamında dikkate alınan üç farklı oluk geometrisinin etkisini incelemek için uzunluğu 1000 mm olan kolonlar dikkate alınmış ve narınlığın etkisinden bağımsız olarak incelenmiştir. Şekil 20 ve Şekil 24'te, hem aynı kolon uzunluğuna hem de aynı cidar et kalınlığına sahip kolonların yatay döngüsel yüklemelerden elde edilen zarf eğrileri sunulmuştur. Genel olarak davranışları ele alındığında, referans kolona kıyasla tüm oluk tiplerinin başlangıç rijitliklerinin hafifçe daha yüksek olduğu ve yatay yük taşıma kapasitelerinin ise belirgin şekilde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca,

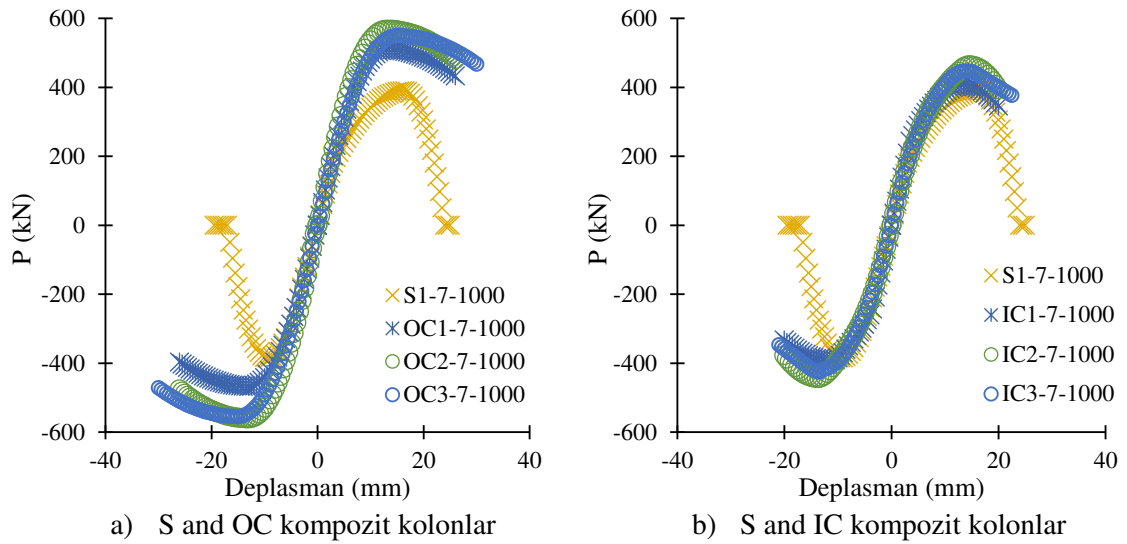
tezin EK-1 bölümündeki Tablo'da tüm numunelere ait yanal yük taşıma kapasiteleri verilmiştir.

3 mm cidar et kalınlığına sahip OC serisi kompozit kolonların dayanımları incelendiğinde, oluk açısının ( $\alpha$ ) ve oluklar arası genişliğin (l) artmasıyla orantılı olarak kolon dayanımlarında %30'lara kadar bir artış gözlemlenmiştir. Yanal yük taşıma kapasiteleri  $OC2 > OC1 > OC3$  şeklinde değişmektedir. Bu durum, 7 mm cidar et kalınlığına sahip dışı oluklu kolonlarda ise  $OC2 > OC3 > OC1$  değişerek oluk açısının etkili olduğu, %11'ye kadar artış sağladığı, ancak oluk genişliği etkisinin kaybolduğu gözlemlenmiştir.

IC serisi kompozit kolonların yanal yük taşıma kapasitelerine baktığımızda, oluk tipinden kaynaklı artış, 3 mm ve 7 mm cidar et kalınlıklarında sırasıyla maksimum %11 ve %14 seviyelerinde kalmaktadır. Yanal yük taşıma kapasiteleri  $IC2 \approx IC3 > IC1$  şeklinde değişmektedir. IC2 ve IC3'ün oluk açısı  $75^\circ$  iken IC1'in oluk açısı  $45^\circ$ 'dir. IC serisi için en önemli oluk geometrisi parametresi oluk açısıdır ve diğer parametrelerin yanal yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi önemsizlenecek kadar azdır.

Ayrıca, oluklu kompozit kolonların zarf eğrilerindeki tepe noktasından sonraki davranıştan görüleceği üzere, referans kolonlara göre daha kararlı ve geniş bir deformasyon alanına sahip olmuştur. Bunun asıl sebebi, oluk geometrisinin kutu kesitlerinkine göre kolonların burkulmasını geciktirmesinden kaynaklanmaktadır. Bir başka deyişle, trapez oluklar, betonun sargılama etkisini maksimum seviyeye çıkararak, kompozit kolonların yerel eğilme rijitliğinin çelik tübüler kutu kesite göre daha yüksek olmasını sağlar.

Oluk geometrisini optimize etmek için, özellikle oluk açısının ve ayrıca oluk genişliğinin artırılmasıyla hem yanal yük taşıma kapasiteleri %30'lara kadar artırılabilir hem de tepe noktasının sonraki davranışının daha büyük deformasyonlara izin vermesi, ani göçmeyi önleyebilmektedir.



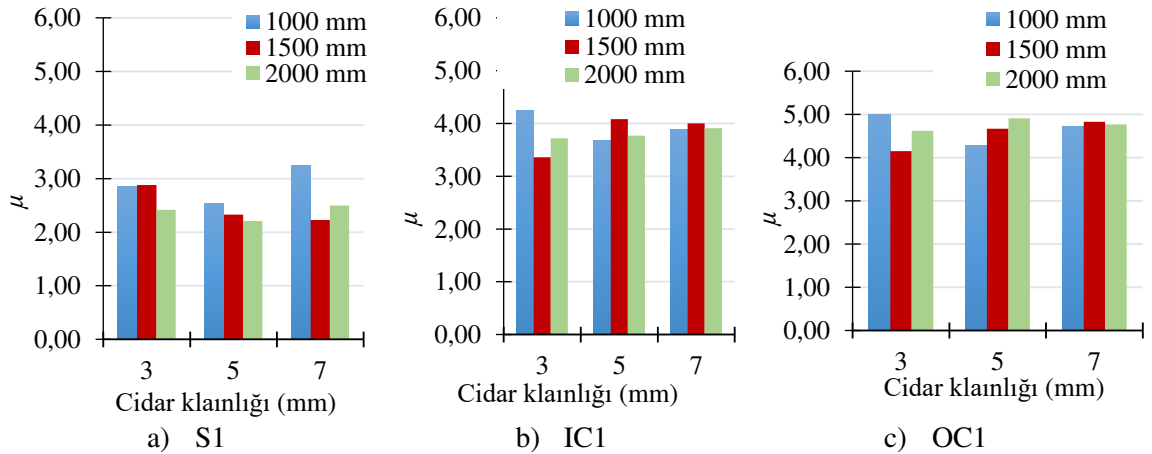
Şekil 24. Oluk geometrisinin kompozit kolonların zarf eğrileri üzerindeki etkisi

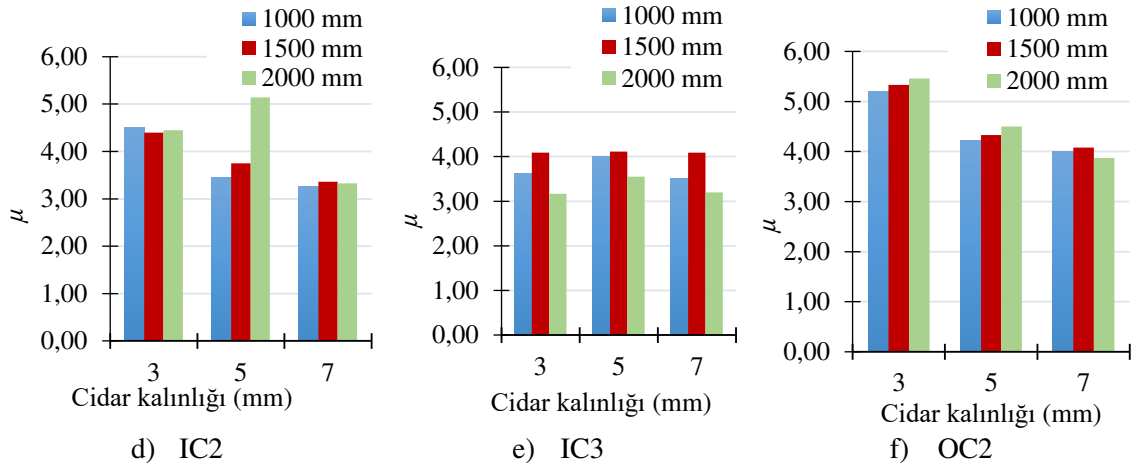
#### 4.5. Süneklik Oranlarının İncelenmesi

Bu bölümde beton dolgulu çift cidarlı oluklu çelik kolonların süneklik performansları değerlendirilmiştir. Süneklik, yapısal elemanların göçme öncesinde plastik deformasyon yapabilme kapasitesini ifade eden önemli bir parametredir ve özellikle deprem etkileri altındaki performansın belirlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır.

Parametrik analizler sonucunda elde edilen yük–deplasman eğrileri kullanılarak kolonların süneklik oranları hesaplanmıştır. Süneklik oranı, maksimum deplasmanın akma deplasmanına oranı olarak tanımlanır. Akma deplasmanı ve nihai deplasmanın yük–deplasman eğrisi üzerindeki şematik gösterimi Şekil 25’te sunulmuştur.

Kesit tipleri karşılaştırıldığında, dış oluklu tüpe sahip kolonların (OC serisi) daha yüksek süneklik oranlarına ulaştığı belirlenmiştir.





Şekil 25. Kompozit kolonların süneklik oranlarının karşılaştırılması

Bu durum, dış yüzey stabilitesinin artması ve kesitin daha kontrollü bir plastik davranış sergilemesi ile ilişkilendirilmektedir. Şekil 24 incelendiğinde, dış oluklu kolonların (OC serisi) genel olarak en yüksek süneklik oranlarına sahip olduğu görülmektedir. Özellikle OC2 numunesi yüksek süneklik performansı sergilemiş olup, oluklu geometrinin plastik deformasyon kapasitesini artırdığı anlaşılmaktadır. Buna karşılık düz cidarlı referans kolonlar (S1 serisi) daha düşük süneklik oranları göstermiştir. Sonuçlar, oluk geometrisinin kolonların sünek davranış geliştirmesinde önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Narinlik oranının süneklik üzerindeki etkisi incelendiğinde, narinlik oranındaki artış, elemanların plastik deformasyon kapasitesini kısıtlayarak süneklik oranının etkisini doğrudan azaltmaktadır. Düz cidarlı referans serisinde cidar kalınlığı 3 mm iken, narinlik oranının  $\lambda = 11,66$ 'dan  $\lambda = 23,32$ 'ye çıkmasıyla süneklik katsayısı  $\mu = 2,85$ 'ten  $\mu = 2,42$ 'ye gerilemiştir. Kalın cidarlı S1-7 serisinde ise, narinlik oranı  $\lambda = 11,74$ 'ten  $\lambda = 23,49$ 'a çıktığında, süneklik katsayısı  $\mu = 3,25$ 'ten  $\mu = 2,50$ 'ye ani bir düşüş göstermiştir. Oluklu modellerde ise, trapez olukların sağladığı ek burkulma direnci sayesinde, narinlik artışına rağmen yüksek süneklik değerleri korunabilmiştir. Örneğin, OC2-3 serisinde, narinlik oranı  $\lambda = 16,05$  durumunda, süneklik oranı  $\mu = 5,20$  iken, narinlik oranı iki katına çıkarak  $\lambda = 32,09$  seviyesine ulaştığında, süneklik oranı  $\mu = 5,46$  olarak mükemmel bir düzeyde kalmıştır. Bu sayısal veri, oluk geometrisinin narin elemanlarda sismik sünekliği korumadaki mutlak geometrik başarısını açıkça kanıtlamaktadır.

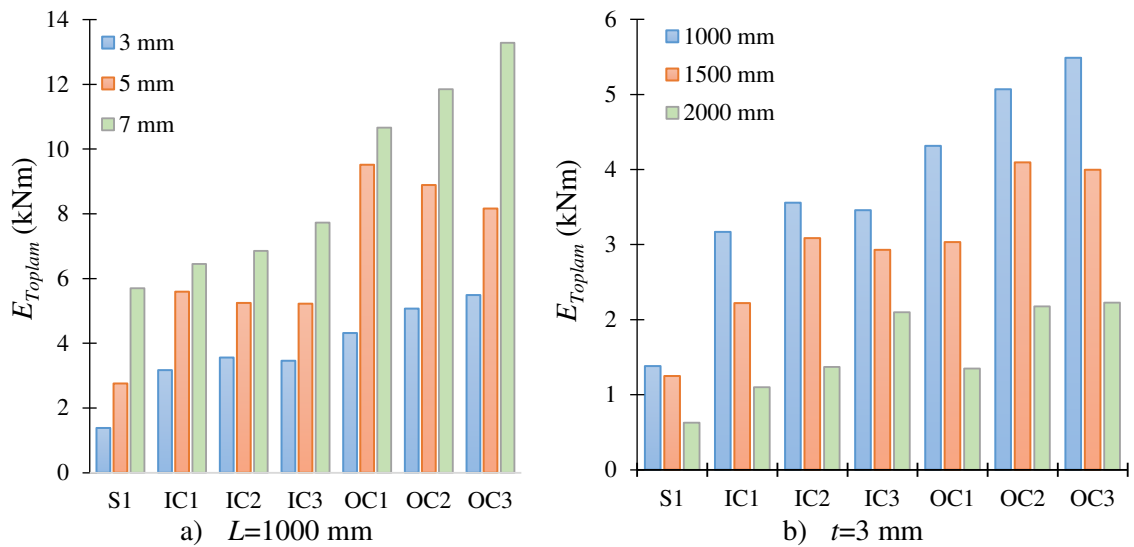
Elde edilen bulgular, oluk geometrisinin ve düşük narinlik oranının beton dolgulu çift cidarlı çelik kolonların süneklik performansını artıran önemli parametreler olduğunu göstermektedir.

#### 4.6. Enerji Yutma Kapasitesinin İncelenmesi

Bu bölümde, parametrik analizler sonucunda elde edilen döngüsel yük–deplasman eğrileri kullanılarak kolon numunelerinin enerji yutma kapasiteleri değerlendirilmiştir. Enerji yutma kapasitesi, yapısal elemanların döngüsel yükler altında sismik performansını belirleyen önemli bir parametre olup, histerezis eğrilerinin çevrelediği alanın hesaplanmasıyla belirlenmektedir.

Parametrik analiz sonuçları incelendiğinde, oluklu kesit geometrisine sahip kolonların düz levhalı referans kolonlara kıyasla daha yüksek enerji yutma kapasitesi sergilediği belirlenmiştir. Oluk geometrisinin çelik tüplerin yerel stabilitesini artırarak plastik deformasyon kapasitesini geliştirdiği ve bu durumun enerji yutma performansını olumlu yönde etkilediği görülmüştür.

Farklı kesit tipleri karşılaştırıldığında, IC ve OC konfigürasyonlarının enerji yutma kapasitesi üzerinde farklı etkiler gösterdiği belirlenmiştir. Dış oluklu tüpe sahip kolonların yükleme ve boşaltma döngüleri sırasında daha stabil histeretik eğriler oluşturduğu ve bu nedenle daha yüksek enerji yutma kapasitesi sergilediği gözlemlenmiştir.



Şekil 26. Kompozit kolonların toplam enerji yutma kapasitelerinin karşılaştırılması

Şekil 26’da toplam enerji yutma kapasitesi değerlerinin karşılaştırılması sunulmaktadır. Sonuçlar, OC serisi numunelerin IC ve S1 serilerine kıyasla daha yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Örneğin, OC3-3-1000 numunesi 5,49 kNm enerji yutarken, IC3-3-1000 ve S1-3-1000 numuneleri sırasıyla 3,45 kNm ve 1,38 kNm enerji yutmuştur. Bu durum, OC serisinin enerji sönmüleme performansında önemli bir iyileşme sağladığını göstermektedir. Söz konusu iyileşme,

dış yüzeyde yer alan oluklu çelik cidarın sağladığı etkin sargılama etkisine bağlanmaktadır. Buna karşılık, S1 serisi numunelerde rijitlik kaybı daha erken meydana gelmiş ve bu nedenle toplam enerji yutma kapasitesi ( $E_{toplam}$ ) daha düşük seviyelerde kalmıştır.

Çelik cidar kalınlığının artmasıyla birlikte rijitlik kaybının önemli ölçüde geciktiği ve kolonların daha yüksek yük seviyelerini taşıyabildiği belirlenmiştir. Örneğin, IC1 serisinde ( $L = 1000$  mm) cidar kalınlığının 3 mm'den 7 mm'ye çıkarılmasıyla toplam enerji yutma kapasitesi 3,16 kNm'den 6,45 kNm'ye yükselmiştir. Bununla birlikte, kolon narinliğinin artması toplam enerji yutma kapasitesini önemli ölçüde azaltmıştır. Ancak OC serisi numuneler, bu olumsuz etkiyi kısmen azaltarak narin kolonlarda dahi diğer konfigürasyonlara kıyasla daha yüksek enerji yutma kapasitesi göstermiştir.

Düz cidarlı referans seride narinlik oranının  $\lambda = 11,66$ 'dan  $\lambda = 23,32$ 'ye çıkması toplam sönümlenen enerjiyi 1,381 kNm değerinden 0,629 kNm değerine düşürerek %54,45 oranında azaltmıştır. Benzer şekilde, dıştan oluklu OC2-3 serisinde narinlik oranının  $\lambda = 16,05$ 'den  $\lambda = 32,09$ 'a çıkmasıyla toplam sönümlenen enerji 5,068 kNm'dan 2,177 kNm'a düşerek, %57,04 gerilemiştir. Narinliğe bağlı bu kaçınılmaz enerji sönümlenmesi kaybına rağmen, narin oluklu numuneler, muadilleri olan narin düz cidarlı numunelere kıyasla olağanüstü yüksek enerji yutma performansı göstermeye devam etmiştir. Örneğin, narinlik oranı  $\lambda = 32,09$  olan OC2-3-2000 modeli, düz cidarlı referans muadili S1-3-2000 ( $E_{total} = 0,629$  kNm) modeline kıyasla 3,46 kat daha fazla sismik enerjiyi sönümlemeyi başarmıştır. Bu durum, deprem riski yüksek bölgelerde narin kolon tasarımlarının kaçınılmaz olduğunda, oluklu kompozit kesitlerin kullanılmasının hayati bir güvenlik avantajı sunacağını sayısal olarak doğrulamaktadır.

#### 4.7. Göçme Modlarının İncelenmesi

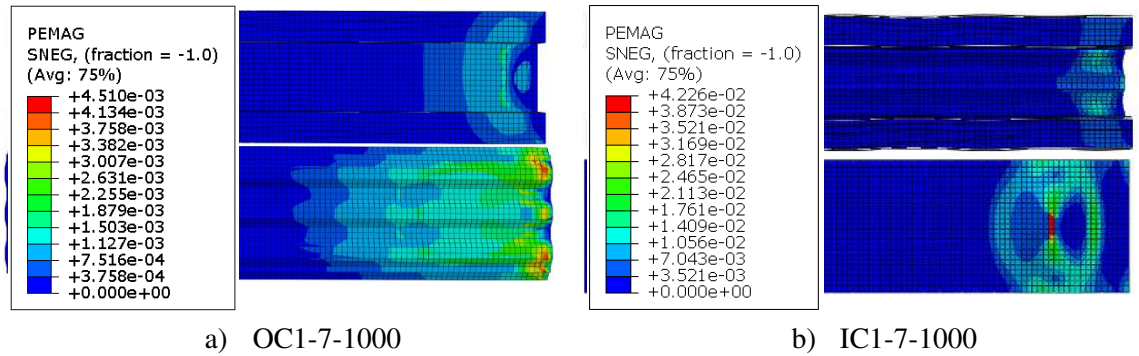
Bu bölümde parametrik analizler sonucunda elde edilen sonlu elemanlar analiz sonuçları kullanılarak beton dolgulu çift cidarlı oluklu çelik kolonların göçme davranışları incelenmiştir. Analizlerde elde edilen eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımları ve deformasyon şekilleri kullanılarak kolon numunelerinin göçme mekanizmaları değerlendirilmiştir.

Analiz sonuçları incelendiğinde, beton dolgulu çift cidarlı kolonlarda göçme davranışının temel olarak çelik tüplerde meydana gelen yerel burkulma ve beton çekirdekte oluşan ezilme mekanizmalarının birleşimi ile gerçekleştiği görülmüştür. Çelik tüplerin yerel stabilitesi, kolonların genel göçme davranışı üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır.

Oluklu kesit geometrisine sahip kolonlarda, oluk formunun çelik tüplerin yerel burkulma direncini artırdığı gözlemlenmiştir. Oluk geometrisi sayesinde çelik levhaların rijitliği artmakta ve yerel burkulma oluşumu gecikmektedir. Bu durum kolonların daha yüksek yük seviyelerine ulaşabilmesine ve plastik deformasyonların daha geniş bir bölgeye yayılmasına olanak sağlamaktadır.

IC ve OC konfigürasyonları karşılaştırıldığında, dış oluklu tüpe sahip kolonların göçme davranışı açısından daha stabil bir performans sergilediği belirlenmiştir. Dış yüzeyde yer alan oluklu tüp, kesitin dış stabilitesini artırarak yerel burkulmanın gecikmesine katkı sağlamaktadır. Buna karşılık, iç oluklu tüpe sahip kolonlarda bazı durumlarda iç tüpte lokal deformasyonların daha erken oluşabildiği gözlemlenmiştir.

Şekil 27’de OC1-7-1000 ve IC1-7-1000 numunelerine ait eşdeğer plastik şekil değiştirme (PEMAG) dağılımları sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, oluklu levhanın yerleşim konumunun plastikleşme davranışı üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. İç oluklu numunelerde plastik şekil değiştirmeler belirli bölgelerde yoğunlaşırken, dış oluklu numunelerde plastikleşmenin daha geniş bir alana yayıldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, dış oluklu levhanın beton çekirdek ile daha etkin bir etkileşim sağlayarak enerji yutma kapasitesini artırması ve kesit boyunca daha homojen bir gerilme dağılımı oluşturmasıyla açıklanabilir.



Şekil 27. OC1 ve IC1 kompozit kolonlarına ait eşdeğer plastik şekil değiştirme (PEMAG) dağılımlarının karşılaştırılması

Kolon uzunluğunun göçme mekanizması üzerindeki etkisi incelendiğinde, kısa kolonlarda göçmenin daha çok yerel burkulma ve plastik deformasyon gelişimi ile gerçekleştiği görülmüştür. Kolon uzunluğu arttıkça global burkulma etkilerinin daha belirgin hale geldiği ve kolon stabilitesinin azaldığı belirlenmiştir. Özellikle 2000 mm uzunluğa sahip kolonlarda global stabilite problemlerinin daha baskın olduğu gözlemlenmiştir.

Beton dolgu malzemesi göçme davranışı üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Beton çekirdek, çelik tüplerin içe doğru burkulmasını sınırlandırarak kesitin stabilitesini artırmakta ve kompozit davranışın gelişmesine katkı sağlamaktadır. Bu durum, kolonların yük taşıma kapasitesinin artmasına ve plastik deformasyonların daha kontrollü bir şekilde gelişmesine olanak tanımaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, oluk geometrisinin beton dolgulu çift cidarlı çelik kolonların göçme davranışını olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Oluklu tüpler, yerel burkulma direncini artırarak kolonların taşıma kapasitesini ve süneklik performansını iyileştirir. Ayrıca kolon narinlik oranının artmasıyla birlikte global stabilite problemlerinin daha belirgin hale geldiği belirlenmiştir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında beton dolgulu çift cidarlı oluklu çelik kolonların eksenel ve döngüsel yatay yükler altındaki yapısal davranışı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında ABAQUS yazılımı kullanılarak doğrusal olmayan sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve geliştirilen modeller, literatürde yer alan deneysel çalışmalar yardımıyla doğrulanmıştır. Doğrulama sonuçları, oluşturulan sayısal modellerin yük–deplasman davranışını, taşıma kapasitesini ve göçme mekanizmalarını güvenilir bir şekilde temsil edebildiğini göstermiştir. Doğrulan modeller kullanılarak farklı oluk geometrilerine (tip 1, tip 2 ve tip 3), kolon uzunluklarına (1000 mm, 1500 mm ve 2000 mm) ve çelik cidar kalınlıklarına (3 mm, 5 mm ve 7 mm) sahip beton dolgulu çift cidarlı kolonlar üzerinde parametrik analizler gerçekleştirilmiştir.

### 5.1. Eksenel Yükleme Sonuçları

Eksenel yükleme çalışması kapsamında elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Eksenel yük–deplasman eğrileri incelendiğinde, oluklu kesit geometrisine sahip kolonların düz cidarlı referans kolonlara kıyasla daha yüksek rijitlik ve daha kararlı bir davranış sergilediği belirlenmiştir. Oluk geometrisinin çelik tüplerin yerel burkulma direncini artırarak kolon performansını olumlu yönde etkilediği görülmüştür.
- Maksimum eksenel yük taşıma kapasitesi sonuçları, oluklu kolonların referans kolonlara göre daha yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Özellikle dış oluklu tüpe sahip OC serisi kolonlarda taşıma kapasitesinde belirgin artışlar elde edilmiştir. Örneğin, 7 mm cidar kalınlığına sahip OC3 kolonunun maksimum eksenel yük taşıma kapasitesi 5563 kN olarak elde edilirken, aynı parametrelere sahip referans kolonun eksenel yük taşıma kapasitesi 4793 kN olarak belirlenmiştir. Bu sonuç eksenel yük taşıma kapasitesinde yaklaşık %16 oranında artış meydana geldiğini göstermektedir.
- 3 mm cidar kalınlığı ve 1000 mm uzunluğa sahip referans kolonu için ACI nominal kapasitesini 2518 kN öngörerek, sonlu elemanlardan hesaplanan kapasitenin %12 fazlası 2217 kN'dur. Aynı durum oluklu kolonlarda da tespit edilmiştir. Örneğin, OC1 kolonunun ACI'ye göre dayanımı 2394 kN iken sonlu elemanlardan elde edilen

dayanım 2209 kN'dir. Bunun sebebi, ince cidarlı kesitlerde kolonların akma dayanımına erişmeden yerel burkulmadan ötürü geçmesidir.

- Kalın cidarlı kolonların ACI nominal yük dayanımları, sonlu elemanlar analizden elde edilen dayanımlara göre oldukça düşüktür. Bunun sebebi ise, kalın cidarlı kompozit oluklu kolanlarda sargılama etkisi en üst seviyeye çıkmış ve eksenel yük taşıma kapasitesinde önemli artış gerçekleşmiştir. Ancak ACI bu ek sargılama etkisini dikkate almamaktadır.

## 5.2. Yatay Döngüsel Yükleme ve Sonuçları

Sabit eksenel yük ve yatay döngüsel yükleme çalışması kapsamında elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- İç oluklu (IC) ve dış oluklu (OC) kolonların karşılaştırılması sonucunda, dış oluklu yüzeye sahip kolonların genel olarak daha yüksek yanal yük taşıma kapasitesi ve daha kararlı davranış sergilediği belirlenmiştir. Dış yüzeyde yer alan oluklu çelik cidarın kesit stabilitesini artırarak yerel burkulmayı geciktirdiği görülmüştür.

- Kolon narinlik oranının artmasıyla, örneğin S1-3 serisinde narinliğin  $\lambda = 11,66$ 'dan  $\lambda = 23,32$ 'ye yükselmesi durumunda, ikinci mertebe etkilerinin ve genel burkulma eğiliminin baskın hale gelmesiyle maksimum yanal yük taşıma kapasitelerinde dramatik azalmalar kaydedilmiştir. Düz referans numunelerinde narinlik artışı yanal yük kapasitesini 156,2 kN'dan 37,8 kN'a düşürerek %75,80 oranında ani bir kayba yol açmıştır. Buna karşın, OC1-3 numunesinde narinlik oranının  $\lambda = 13,62$ 'den  $\lambda = 27,24$ 'e çıkmasıyla oluşan kapasite kaybı %70,34 seviyesinde, IC1-3 numunesinde ise %63,26 seviyesinde sınırlandırılmıştır. Bu durum, oluk geometrisinin narin elemanlarda sismik taşıma kapasitesi ve rijitlik kararlılığını korumada düz levhalara kıyasla çok daha üstün olduğunu sayısal olarak kanıtlamaktadır.

- 3 mm cidar kalınlığı ve 1000 mm uzunluğundaki kompozit kolonlarda, referans kolonun yanal yük taşıma kapasitesi 156.2 kN iken, tip 2 oluk geometrisine sahip IC ve OC kolonlarda 219,9 kN ve 241,1 kN' yükselmiştir. Bu artış OC için % 40,78, IC için ise % 41'dir.

- Cidar kalınlığının artırılması ile kesit alanı ve eğilme rijitliği artırılarak sismik performans doğrusal olarak iyileştirilmiştir. Örneğin, OC1'in cidar kalınlığı 3 mm'den 7 mm'e yükseltildiğinde, yanal yük taşıma kapasitesi 222,9 kN'den 509,6 kN'e yükselerek 2,28 kat artış göstermiştir.

- Süneklik oranlarının değerlendirilmesi sonucunda, süneklik oranı en yüksek olan oluk tipi 2'dir. Referans kolonda bu oran ince cidarlı kesitlere sahip kolonlarda 2,85

iken, dış oluklu kolonlarda 5,20 seviyelerine çıkarak %82,5 oranında bir artış sağlamıştır. Kalın cidarlı kompozitlerde ise, tip 1 geometrisine sahip kolonlarda süneklik oranı en fazla OC'de 4,73 ile elde edilmiştir. Bu durum, kalın cidarlı kesitlerde, daha düşük oluk açısına sahip geometrilerin kesit köşelerindeki gerilme yığılmalarını dağıtarak yerel burkulmayı geciktirmesinden kaynaklanmıştır.

- Döngüsel yükleme analizleri sonucunda oluklu kolonların daha geniş ve kararlı histerezis eğrileri geliştirdiği belirlenmiştir. Bu durum oluklu kolonların deprem etkileri altında daha yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.

- Enerji yutma kapasitesi sonuçları incelendiğinde, dış oluklu kolonların en yüksek enerji yutma performansını sergilediği belirlenmiştir. Oluk geometrisinin plastik deformasyonların daha geniş bölgelere yayılmasına katkı sağladığı ve böylece enerji yutma performansını artırdığı görülmüştür.

- 3 mm cidar kalınlığı ve 1000 mm uzunluğundaki kompozit kolonlarda, referans numunelerine ait enerji yutma kapasitesi yalnızca 1,381 kNm iken dış oluklularda 5,487 kNm enerji yutma miktarına ulaşarak yaklaşık 4 kat daha fazla sismik sönümleme kapasitesine ulaşmıştır. 7 mm cidar kalınlığına sahip kompozitlerdeki durum ise, OC3 kolonunda 13,281 kNm toplam enerji yutarak tüm numuneler arasında sismik açıdan en başarılı olmuştur. Bu kapasite, referans kolonlarda 5,703 kNm ve IC kolonlarda ise 7,724 kNm'ye karşılık gelmektedir.

- Göçme modları incelendiğinde, beton dolgu malzemesinin çelik tüplerin içe doğru burkulmasını sınırlandırdığı ve kompozit davranışın gelişmesine katkı sağladığı belirlenmiştir. Oluk geometrisinin yerel burkulmayı geciktirdiği ve plastik şekil değiştirmelerin daha kontrollü biçimde gelişmesine olanak tanıdığı görülmüştür.

- Elde edilen sonuçlar, oluk geometrisinin beton dolgulu çift cidarlı çelik kolonların taşıma kapasitesi, sünekliği, enerji yutma kapasitesi ve genel yapısal performansı üzerinde önemli bir tasarım parametresi olduğunu ortaya koymuştur.

### 5.3. Gelecek Çalışmalar

Bu tez çalışması beton dolgulu çift cidarlı oluklu çelik kolonlarda oluk geometrisinin yapısal performansı önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, oluklu kompozit kolonların özellikle deprem etkilerinin kritik olduğu yapılarda güvenilir ve etkili bir alternatif taşıyıcı sistem olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Bu çalışma sonucunda aşağıdaki gelecek çalışma önerileri sunulabilir:

- Farklı beton dayanımları, farklı çelik sınıfları, farklı oluk geometrileri ve farklı yükleme koşulları dikkate alınarak kapsamlı parametrik çalışmalar yapılabilir.

- Kolon–kiriş birleşim bölgelerinin davranışı incelenerek oluklu çift cidarlı sistemlerin gerçek yapı davranışına etkileri araştırılabilir.

- Sayısal analiz sonuçlarının daha kapsamlı deneysel çalışmalarla desteklenmesi, bu sistemlerin davranışlarının daha ayrıntılı biçimde anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.

- Gelecek çalışmalarda, oluk profillerine yönelik doğrudan sıyırma testleri gerçekleştirilmelidir; oluk dalgalarının kayma aderansına katkısı nicel olarak belirlenmeli ve sayısal modellerdeki kayma-aderans ilişkileri bu deneysel veriler ışığında güncellenmelidir.

Dış oluklu cidarların yanal rijitlik avantajı göz önünde bulundurularak, araç çarpması, kaya düşmesi gibi yüksek deformasyonlu hızlı darbe veya patlama yükleri altındaki dinamik sınır durumları incelenmelidir.

## KAYNAKÇA

- ACI 318. (2011). Building code requirements for structural concrete. *American Concrete Institute*, Farmington Hills, 519–800.
- Ahmad, M. ve Thambiratnam, D. P. (2009). Numerical analysis of composite steel–concrete beam-columns with external steel confinement. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(7), 1496–1506.
- Eom, S.S., Vu, Q.V., Choi, J.H., Park, H.H. ve Kim, S.E. (2019). Flexural behavior of concrete-filled double skin steel tubes with a joint. *Journal of Constructional Steel Research*, 155, 260–272.
- Fan, J.H., Wang, W.D., Shi, Y.L. ve Zheng, L. (2024). Low-cycle fatigue behaviour of concrete-filled double-skin steel tubular (CFDST) members for wind turbine towers. *Thin-Walled Structures*, 205, 112384.
- Fang, Y., Wang, Y., Elchalakani, M. ve Yang, H. (2021). Experimental investigation on concrete-filled corrugated steel tubular columns under constant axial load and cyclic load. *Engineering Structures*, 248, 113245.
- Fang, Y., Wang, Y., Yang, H., ve Lin, X. (2022). Experimental behavior of concrete-filled thin-walled corrugated steel tubes with large helical angles under monotonic and cyclic axial compression. *Thin-Walled Structures*, 173, 109043.
- Fang, Y., Yang, H., Chan, T. ve Wang, Y. (2024). Experimental investigation on seismic behaviour of concrete-filled corrugated steel tubes under cyclic torsional loads. *Engineering Structures*, 309, 118062.
- Farahi, M., Heidarpour, A., Zhao, X.L. ve Al-Mahaidi, R. (2016). Compressive behaviour of concrete-filled double-skin sections consisting of corrugated plates. *Engineering Structures*, 111, 467–477.
- Feng, R. ve Young, B. (2009). Behaviour of concrete-filled stainless steel tubular X-joints subjected to compression. *Thin-Walled Structures*, 47(4), 365–374.
- Giakoumelis, G. ve Lam, D. (2004). Axial capacity of circular concrete-filled tube columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 60(7), 1049–1068.
- Han, L.H. (2002). Tests on stub columns of concrete-filled RHS sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 58(3), 353–372.
- Han, L.H., Li, W. ve Bjorhovde, R. (2014). Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members. *Journal of Constructional Steel Research*, 100, 211–228.

- Han, L.H., Yao, G.H. ve Zhao, X.L. (2005). Tests and calculations for hollow structural steel (HSS) stub columns filled with self-consolidating concrete (SCC). *Journal of Constructional Steel Research*, 61(9), 1241–1269.
- Han, L.H., Zhao, X.L. ve Tao, Z. (2001). Tests and mechanics model for concrete-filled SHS stub columns, columns and beam-columns. *Steel and Composite Structures*, 1(1), 51–74.
- Han L.H, Hou C, Hua Y-X (2020). Concrete-filled steel tubes subjected to axial compression: Life-cycle based performance. *J Constr Steel Res* 2020;170:106-123. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106063>.
- Hassanein, M., Elchalakani, M., Karrech, A., Patel, V. ve Yang, B. (2018). Behaviour of concrete-filled double-skin short columns under compression through finite element modelling: SHS outer and SHS inner tubes. *Structures*, 15, 358–375.
- Huang, H., Han, L.H. ve Zhao, X.L. (2013). Investigation on concrete filled double skin steel tubes (CFDSTs) under pure torsion. *Journal of Constructional Steel Research*, 90, 221–234.
- Huang, X., Li, Y., Wang, Z. ve Chen, H. (2024). Seismic performance evaluation of corrugated steel tubular composite columns under cyclic loading. *Engineering Structures*, 315, 118421.
- Krawinkler, H., Gupta, A., Medina, R. ve Luco, N. (2000). Development of loading histories for testing of steel beam-to-column assemblies. Stanford University, Richmond, California, 94305-4020.
- Ji, Y., Zhang, Q., Wang, L. ve Zhao, H. (2023). Experimental study on cyclic behaviour of corrugated steel composite columns subjected to lateral loading. *Thin-Walled Structures*, 188, 110921.
- Li, H.T. ve Young, B. (2021). Behaviour of concrete-filled ferritic stainless steel tubular joints: Experimental investigation, numerical modelling and design. *Engineering Structures*, 247, 113109.
- Li, J., Wang, Y., Zhang, Z. ve Mou, B. (2023). Seismic behavior of steel frames with different joints: Shaking table test and finite element analysis. *Journal of Building Engineering*, 70, 106377.
- Li, Y.D., Zhang, H., Wang, Q. ve Chen, Z. (2024). Structural performance of corrugated steel tubular composite columns under cyclic loading. *Thin-Walled Structures*, 197, 111245.

- Liao, F.Y., Han, L.H., Tao, Z. ve Rasmussen, K. J. (2017). Experimental behavior of concrete-filled stainless steel tubular columns under cyclic lateral loading. *Journal of Structural Engineering*, 143(4), 04016219.
- Lu, G.B., Zhou, X.H., Wang, Y.H., Deng, X.W., Bai, Y.T. ve Zhu, R.H. (2022). Numerical investigation on circular concrete-filled double-skin steel tube columns under torsion. *Structures*, 37, 17–31.,
- Lu, B., Fang, Y., & Yang, H. (2025). Experimental investigation on slender concrete-filled double-skin corrugated steel tubes under eccentric compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 229, 109499.
- Nassirnia, M., Heidarpour, A., Zhao, X.-L. ve Minkinen, J. (2015). Innovative hollow corrugated columns: A fundamental study. *Engineering Structures*, 94, 43–53.
- Nassirnia, M., Heidarpour, A., Zhao, X.-L. ve Minkinen, J. (2016). Innovative hollow columns comprising corrugated plates and ultra-high-strength steel tubes. *Thin-Walled Structures*, 101, 14–25.
- Ozturk, K. F., Ozyurt, E., Araz, O., ve Cakir, T. (2025). Assessment of seismic responses of Square-Hollow-Section joints in a lattice girder with Soil-Structure interaction. *International Journal of Steel Structures*, 25(3), 659-672.
- Ozyurt, E., ve Gunaydin, M. (2024). Hysteretic behaviour of square-hollow-section T- and X-joints with in-plane bending moment. *Journal of Constructional Steel Research*, 220, 108813.
- Ozyurt, E., ve Wang, Y. C. (2018). Resistance of axially loaded T-and X-joints of elliptical hollow sections at elevated temperatures—a finite element study. *Structures*, 14, 15-31.
- Tao, Z., Li, W., Shi, B. L., ve Han, L. H. (2017). Behaviour of bolted end-plate connections to concrete-filled steel columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 134, 194-208.
- Tiwary, A. K. (2022). Experimental investigation into mild steel circular concrete-filled double skin steel tube columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 198, 107527.
- Tong, J.Z., Zhang, J.B., Tong, G.S., Chen, M., Zhang, L., Yu, C.Q. ve Zhou, S.M. (2022). Flexural tests and behavior of multi-celled corrugated-plate CFST members. *Journal of Building Engineering*, 49, 104051.
- Uenaka, K., Kitoh, H. ve Sonoda, K. (2008). Concrete filled double skin tubular members subjected to bending. *Steel and Composite Structures*, 8(4), 297–312.

- Wang, J.T., Sun, Q., Li, Y.W. ve Liu, X.H. (2024). Hysteretic performance of circular high-strength concrete-filled double-skin steel tubular columns: Experiment. *Marine Structures*, 93, 103519.
- Xiong, M.X., Xiong, D.X. ve Liew, J. Y. R. (2017). Axial performance of short concrete-filled steel tubes with high- and ultra-high-strength materials. *Engineering Structures*, 136, 494–510.
- Yan, X.F. ve Zhao, Y.G. (2020). Compressive strength of axially loaded circular concrete-filled double-skin steel tubular short columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 170, 106114.
- Yang, H., Fang, Y. ve Yang, X. (2025). Structural applications and seismic behaviour of corrugated steel composite columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 229, 109499.
- Yang, H., Lam, D. ve Gardner, L. (2008). Testing and analysis of concrete-filled elliptical hollow sections. *Engineering Structures*, 30(12), 3771–3781.
- Yu, C.Q., Tong, G.S., Tong, J.Z., Zhang, J.W., Li, X.G., & Xu, S.L. (2024). Experimental and numerical study on seismic performance of L-shaped multi-cellular CFST frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 213, 108360.
- Zhao, X.L. ve Grzebieta, R. (2002). Strength and ductility of concrete filled double skin (SHS inner and SHS outer) tubes. *Thin-Walled Structures*, 40(2), 199–213.
- Zhong, T., Han, L.H. ve Zhao, X.L. (2009). Behaviour of concrete-filled steel tubular members under combined loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(8–9), 1585–1597.
- Zhou, F. ve Xu, W. (2016). Cyclic loading tests on concrete-filled double-skin (SHS outer and CHS inner) stainless steel tubular beam-columns. *Engineering Structures*, 127, 304–318.
- Zou, Y., Wang, L., Sun, Z., Pan, J., Chen, M. ve Wu, Y. (2023). Experimental and numerical studies of concrete-filled corrugated steel tubular columns under axial compression. *Engineering Structures*, 276, 114813.
- Zhu, H., Stephens, M. T., Roeder, C. W. ve Lehman, D. E. (2017). Inelastic response prediction of CFST columns and connections subjected to lateral loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 132, 130-140.

## EKLER

Ek 1. Döngüsel yatay yükleme sonuçlarına ait  $P_{max}$ ,  $\delta_y$ ,  $\delta_u$ ,  $\mu$  and  $E_{total}$  değerleri

| Numune     | $P_{max}$<br>(kN) | $i$<br>(mm) | $\lambda$<br>( $L_e/i$ ) | $\delta_y$<br>(mm) | $\delta_u$<br>(mm) | $\mu$ | $E_{total}$<br>(kNm) |
|------------|-------------------|-------------|--------------------------|--------------------|--------------------|-------|----------------------|
| S1-3-1000  | 156,2             | 85,76       | 11,66                    | 3,5                | 10,0               | 2,85  | 1,381                |
| S1-3-1500  | 145,4             | 85,76       | 17,49                    | 4,0                | 11,5               | 2,88  | 1,249                |
| S1-3-2000  | 37,8              | 85,76       | 23,32                    | 3,5                | 8,5                | 2,42  | 0,629                |
| S1-5-1000  | 276,7             | 85,68       | 11,67                    | 5,5                | 14,0               | 2,54  | 2,756                |
| S1-5-1500  | 154,9             | 85,68       | 17,51                    | 6,0                | 14,0               | 2,33  | 0,169                |
| S1-5-2000  | 60,7              | 85,68       | 23,34                    | 7,0                | 15,5               | 2,21  | 0,527                |
| S1-7-1000  | 390,8             | 85,16       | 11,74                    | 6,0                | 19,5               | 3,25  | 5,703                |
| S1-7-1500  | 234,2             | 85,16       | 17,61                    | 6,5                | 14,5               | 2,23  | 2,107                |
| S1-7-2000  | 96,2              | 85,16       | 23,49                    | 8,0                | 20,0               | 2,50  | 0,703                |
| IC1-3-1000 | 200,1             | 86,41       | 11,57                    | 4,0                | 17,0               | 4,25  | 3,168                |
| IC1-3-1500 | 144,8             | 86,41       | 17,36                    | 5,5                | 18,5               | 3,36  | 2,220                |
| IC1-3-2000 | 73,5              | 86,41       | 23,15                    | 5,5                | 20,5               | 3,72  | 1,099                |
| IC1-5-1000 | 288,4             | 86,25       | 11,60                    | 6,0                | 22,0               | 3,67  | 5,591                |
| IC1-5-1500 | 135,2             | 86,25       | 17,39                    | 6,0                | 24,5               | 4,08  | 2,498                |
| IC1-5-2000 | 51,3              | 86,25       | 23,19                    | 6,5                | 26,0               | 3,77  | 1,167                |
| IC1-7-1000 | 407,1             | 86,00       | 11,63                    | 4,5                | 17,5               | 3,89  | 6,448                |
| IC1-7-1500 | 189,1             | 86,00       | 17,44                    | 5,0                | 20,0               | 4,00  | 3,054                |
| IC1-7-2000 | 71,8              | 86,00       | 23,26                    | 5,5                | 21,5               | 3,91  | 1,106                |
| IC2-3-1000 | 219,9             | 78,21       | 12,79                    | 4,0                | 18,0               | 4,50  | 3,557                |
| IC2-3-1500 | 153,3             | 78,21       | 19,18                    | 5,0                | 22,0               | 4,40  | 3,085                |
| IC2-3-2000 | 71,0              | 78,21       | 25,57                    | 5,5                | 24,5               | 4,45  | 1,371                |
| IC2-5-1000 | 331,5             | 78,00       | 12,82                    | 5,5                | 19,0               | 3,45  | 5,243                |

## Ek 1. (Devamı)

|            |       |       |       |     |      |      |        |
|------------|-------|-------|-------|-----|------|------|--------|
| IC2-5-1500 | 174,5 | 78,00 | 19,23 | 6,0 | 22,5 | 3,75 | 3,456  |
| IC2-5-2000 | 96,5  | 78,00 | 25,64 | 4,5 | 18,0 | 4,14 | 1,59   |
| IC2-7-1000 | 464,1 | 77,80 | 12,85 | 5,5 | 18,0 | 3,27 | 6,857  |
| IC2-7-1500 | 208,9 | 77,80 | 19,28 | 5,5 | 18,5 | 3,36 | 3,166  |
| IC2-7-2000 | 81,3  | 77,80 | 25,71 | 6,0 | 20   | 3,33 | 1,297  |
| IC3-3-1000 | 218,0 | 74,61 | 13,40 | 5,5 | 20,0 | 3,63 | 3,457  |
| IC3-3-1500 | 147,4 | 74,61 | 20,10 | 5,0 | 22,5 | 4,09 | 2,929  |
| IC3-3-2000 | 91,6  | 74,61 | 26,80 | 8,5 | 27,0 | 3,17 | 2,099  |
| IC3-5-1000 | 324,6 | 74,45 | 13,43 | 4,5 | 18,0 | 4,00 | 5,220  |
| IC3-5-1500 | 226,4 | 74,45 | 20,15 | 4,5 | 18,5 | 4,11 | 3,604  |
| IC3-5-2000 | 78,1  | 74,45 | 26,86 | 4,5 | 16,0 | 3,55 | 1,247  |
| IC3-7-1000 | 446,9 | 74,20 | 13,48 | 6,0 | 21,0 | 3,50 | 7,724  |
| IC3-7-1500 | 200,0 | 74,20 | 20,22 | 5,5 | 22,5 | 4,09 | 3,260  |
| IC3-7-2000 | 82,4  | 74,20 | 26,95 | 5,0 | 16,0 | 3,20 | 0,928  |
| OC1-3-1000 | 222,9 | 73,41 | 13,62 | 5,0 | 25,0 | 5,00 | 4,314  |
| OC1-3-1500 | 119,6 | 73,41 | 20,43 | 6,5 | 27,0 | 4,15 | 3,033  |
| OC1-3-2000 | 66,1  | 73,41 | 27,24 | 6,5 | 30,0 | 4,62 | 1,351  |
| OC1-5-1000 | 367,7 | 73,26 | 13,65 | 7,5 | 32,0 | 4,27 | 9,512  |
| OC1-5-1500 | 200,5 | 73,26 | 20,48 | 7,5 | 35,0 | 4,67 | 6,766  |
| OC1-5-2000 | 105,8 | 73,26 | 27,30 | 7,5 | 38,0 | 4,91 | 3,236  |
| OC1-7-1000 | 509,6 | 73,01 | 13,70 | 5,5 | 26,0 | 4,73 | 10,662 |
| OC1-7-1500 | 267,4 | 73,01 | 20,55 | 6,0 | 29,0 | 4,83 | 6,221  |
| OC1-7-2000 | 117,3 | 73,01 | 27,40 | 6,5 | 31,0 | 4,77 | 2,918  |
| OC2-3-1000 | 241,1 | 62,32 | 16,05 | 5,0 | 26,0 | 5,20 | 5,068  |
| OC2-3-1500 | 139,6 | 62,32 | 24,07 | 6,0 | 32,0 | 5,33 | 4,094  |
| OC2-3-2000 | 76,2  | 62,32 | 32,09 | 6,5 | 35,5 | 5,46 | 2,177  |
| OC2-5-1000 | 400,6 | 62,17 | 16,08 | 6,5 | 27,5 | 4,23 | 8,886  |
| OC2-5-1500 | 310,3 | 62,17 | 24,13 | 7,5 | 32,5 | 4,33 | 8,126  |

Ek 1. (Devamı)

|            |       |       |       |      |      |      |        |
|------------|-------|-------|-------|------|------|------|--------|
| OC2-5-2000 | 113,1 | 62,17 | 32,17 | 6,0  | 26,0 | 4,50 | 2,854  |
| OC2-7-1000 | 567,1 | 61,92 | 16,15 | 6,5  | 26,0 | 4,00 | 11,846 |
| OC2-7-1500 | 301,4 | 61,92 | 24,22 | 6,5  | 26,5 | 4,08 | 6,431  |
| OC2-7-2000 | 130,5 | 61,92 | 32,30 | 7,5  | 29,0 | 3,87 | 3,040  |
| OC3-3-1000 | 183,9 | 54,43 | 18,37 | 6,5  | 28,0 | 4,46 | 5,487  |
| OC3-3-1500 | 152,5 | 54,43 | 27,56 | 6,0  | 32,5 | 5,42 | 3,996  |
| OC3-3-2000 | 69,9  | 54,43 | 36,74 | 10,5 | 39,5 | 3,76 | 2,226  |
| OC3-5-1000 | 392,6 | 54,28 | 18,42 | 5,5  | 26,0 | 4,73 | 8,160  |
| OC3-5-1500 | 256,5 | 54,28 | 27,63 | 5,5  | 26,0 | 4,73 | 5,332  |
| OC3-5-2000 | 71,3  | 54,28 | 36,85 | 5,5  | 23,0 | 4,18 | 1,574  |
| OC3-7-1000 | 549,7 | 54,03 | 18,51 | 7,5  | 30,0 | 4,00 | 13,281 |
| OC3-7-1500 | 320,5 | 54,03 | 27,76 | 6,5  | 31,5 | 4,85 | 9,189  |
| OC3-7-2000 | 167,6 | 54,03 | 37,02 | 6,0  | 23,0 | 3,83 | 3,442  |

## Ek 2. Kompozit Kolonların Narinlik Oranlarının Hesaplanması

### NARİNLİK ORANLARININ HESAPLAMA ÖRNEKLERİ

Bu bölümde, tez kapsamında incelenen beton dolgulu çift cidarlı çelik kolonların narinlik oran ( $\lambda$ ) değerlerinin adım adım hesaplanması gösterilmiştir. Her bir kolon türü için birer örnek olarak S1-3-1000 referans kolonu, OC1-3-1000 ve IC1-3-1000 oluklu kolonları seçilmiştir. Narinlik oranı, kolon etkin uzunluğunun ( $L_e$ ) atalet yarıçapına ( $r$ ) oranıdır. Kompozit kesitin atalet yarıçapı, dönüştürülmüş kesit prensibi kullanılarak; iç ve dış çelik cidarların elastisite modüllerinin beton çekirdeğinin elastisite modülüne oranı ile eşdeğer atalet momentinin ( $I_{toplaml}$ ), toplam eşdeğer enkesit alanına ( $A_{toplaml}$ ) oranının karekökü alınarak hesaplanmıştır.

Çelik ve beton malzemelerinin elastisite modüllerinin oranı;

$$n_{eş} = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{37250} = 5,369$$

Eşdeğer enkesit alan hesabı;

$$A_{toplaml} = A_i + A_o + \frac{A_c}{n_{eş}}$$

Eşdeğer atalet momenti hesabı;

$$I_{toplaml} = I_i + I_o + \frac{I_c}{n_{eş}}$$

Eşdeğer atalet yarıçapı hesabı;

$$i = \sqrt{\frac{I_{toplaml}}{A_{toplaml}}}$$

Narinlik oranının hesabı;

$$\lambda = \frac{L_e}{i}$$

#### 1. ÖRNEK: Referans Düz Cidarlı Kolon (S1-3-1000)

Adım 1: Kesit Alanı ve Eşdeğer Atalet Momentinin Belirlenmesi

$$A_{toplaml} = A_i + A_o + \frac{A_c}{n_{eş}} = 1980 + 2970 + \frac{31097,2}{5,369} = 10741,9 \text{ mm}^2$$

$$I_{toplaml} = I_i + I_o + \frac{I_c}{n_{eş}} = \frac{165^4 - 159^4}{12} + \frac{247,5^4 - 241,5^4}{12} + \frac{241,5^4 - 165^4}{12 \times 5,369}$$

$$I_{toplaml} = 7,90 \times 10^7 \text{ mm}^4$$

Adım 2: Atalet Yarıçapının Hesaplanması

$$i = \sqrt{\frac{I_{toplaml}}{A_{toplaml}}} = 85,76 \text{ mm}$$

Adım 3: Narinlik Oranının Belirlenmesi

$$\lambda = \frac{L_e}{i} = \frac{1000}{85,76} = 11,66$$

## Ek 2. (Devamı)

### 2. ÖRNEK: Dış Cıdarı Oluklu Kolon (OC1-3-1000)

Adım 1: Kesit Alanı ve Eşdeğer Atalet Momentinin Belirlenmesi

$$A_{toplam} = A_i + A_o + \frac{A_c}{n_{eş}} = 1500 + 2966 + \frac{34016}{5,369} = 10801,63 \text{ mm}^2$$

$$I_i = \frac{128^4 - 122^4}{12} = 3,91 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Dış oluklu cıdarın atalet momenti, plakanın toplam açınım uzunluğuna dayanan eşdeğer efektif kalınlık yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır. OC1 enkesitinin toplam genişliği  $b=210$  mm olup, her bir yüzeyde yatay izdüşümü 70 mm olan 3 adet oluk modülünden oluşmaktadır.

Bir yüzeyin toplam açınım uzunluğu,

$$l_{açınım} = 3x(a + 2c + a) = 3x(20 + 2x21,21 + 20) = 247,26 \text{ mm}$$

Toplam açınım uzunluğu 247,26 mm, izdüşüm uzunluğuna  $b = 210$  mm oranlanarak eşdeğer kalınlık yaklaşımı ile hesaplanır:

$$t_{eş} = 3 \times \frac{247,26}{210} = 3,532 \text{ mm}$$

$$I_o = \frac{210^4 - (210 - 2x3,532)^4}{12} = 2,1 \times 10^7 \text{ mm}^4$$

$$I_{toplam} = I_i + I_o + \frac{I_c}{n_{eş}} = 3,91 \times 10^6 + 2,1 \times 10^7 + \frac{1,78 \times 10^8}{5,369}$$

$$I_{toplam} = 5,82 \times 10^7 \text{ mm}^4$$

Adım 2: Atalet Yarıçapının Hesaplanması

$$i = \sqrt{\frac{I_{toplam}}{A_{toplam}}} = 73,41 \text{ mm}$$

Adım 3: Narinlik Oranının Belirlenmesi

$$\lambda = \frac{L_e}{i} = \frac{1000}{73,41} = 13,62$$

### 3. ÖRNEK: İç Cıdarı Oluklu Kolon (IC1-3-1000)

Adım 1: Kesit Alanı ve Eşdeğer Atalet Momentinin Belirlenmesi

$$A_{toplam} = 1978 + 2904 + \frac{33321}{5,369} = 11088,18 \text{ mm}^2$$

$$I_o = \frac{245^4 - 239^4}{12} = 2,83 \times 10^7 \text{ mm}^4$$

## Ek 2. (Devamı)

İç oluklu cidarın atalet momenti, plakanın toplam açınım uzunluğuna dayanan eşdeğer efektif kalınlık yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır. IC1 enkesitinin toplam genişliği  $b=140$  mm olup, her bir yüzeyde yatay izdüşümü 70 mm olan 2 adet oluk modülünden oluşmaktadır.

Bir yüzeyin toplam açınım uzunluğu,

$$l_{açınım} = 2x(a + 2c + a) = 2x(20 + 2x21,21 + 20) = 164,84 \text{ mm}$$

Toplam açınım uzunluğu 164,84 mm, izdüşüm uzunluğuna  $b= 140$  mm oranlanarak eşdeğer kalınlık yaklaşımı ile hesaplanır:

$$t_{eş} = 3 \times \frac{164,84}{140} = 3,532 \text{ mm}$$

$$I_i = \frac{140^4 - (140 - 2x3,532)^4}{12} = 5,98 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_c = 2,6 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$I_{toplam} = I_i + I_o + \frac{I_c}{n_{eş}} = 5,98 \times 10^6 + 2,83 \times 10^7 + \frac{2,6 \times 10^8}{5,369}$$

$$I_{toplam} = 8,28 \times 10^7 \text{ mm}^4$$

Adım 2: Atalet Yarıçapının Hesaplanması

$$i = \sqrt{\frac{I_{toplam}}{A_{toplam}}} = 86,41 \text{ mm}$$

Adım 3: Narinlik Oranının Belirlenmesi

$$\lambda = \frac{L_e}{i} = \frac{1000}{86,41} = 11,57$$

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı :Gulshan SHUKUROVA

### Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi :Azerbaycan Mimarlık ve İnşaat Üniversitesi

Yüksek Lisans Öğrenimi :Gümüşhane Üniversitesi

Bildiği Yabancı Diller :İngilizce, Rusca ve Türkçe

Bilimsel Faaliyetler ve Yayınlar :Shukurova, G., ve Özyurt, E. (2025). Numerical investigation of concrete-filled double-skin corrugated steel composite columns under cyclic loading, 4th International Civil Engineering & Architecture Conference, Trabzon.

### İş Deneyimi

Çalıştığı Kurumlar :Azerbaycan Cumhuriyeti Ekoloji ve Orman Bakanlığı, Ata Sigorta Şirketi ve Günay Sigorta Şirketi

Tarih :16.07.2026