

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETONARME YÜKSEK KİRİŞLERDE KESME
ÇATLAĞININ ARTIK YÜK TAŞIMA KAPASİTESİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Aydın DEMİR

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : YAPI
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Naci ÇAĞLAR

Mayıs 2018

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


**BETONARME YÜKSEK KİRİŞLERDE KESME
ÇATLAĞININ ARTIK YÜK TAŞIMA KAPASİTESİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**


DOKTORA TEZİ

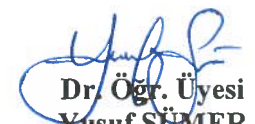
Aydın DEMİR

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez ^{10.10.5}2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
Murat PALA
Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Naci CAĞLAR
Üye


Dr. Öğr. Üyesi
Yusuf SÜMER
Üye


Dr. Öğr. Üyesi
Tamer DİRİKGİL
Üye


Dr. Öğr. Üyesi
Osman KİRTEL
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Aydın DEMİR
10.05.2018

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, değerli danışman hocam Sn. Naci ÇAĞLAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte bilgi ve tecrübesinden istifade ettiğim değerli hocalarım Sn. Adem DOĞANGÜN, Sn. Yusuf Sümer, Sn. Murat PALA, Sn. Tamer DİRİKGİL ve Sn. Yasin FAHJAN'a teşekkür ederim. Çalışmanın her aşamasında yardım ve desteği için Sn. Hakan ÖZTÜRK'e çok teşekkür ederim. Deneysel çalışma sürecindeki yardımları için, Sn. Gökhan DOK, Sn. Cemal YILMAZ, Sn. Kutalmış Recep AKÇA, Sn. Abdülhalim AKKAYA ve İnşaat Mühendisliği Bölümü araştırma görevlilerine teşekkür ederim. Deney düzeneğinin kurulması ve deney numunelerinin üretilmesi aşamasındaki yardımları için, Sn. Mustafa AKDEMİR, Sn. Gürhan DENİZ, Sn. Şamil DEDEOĞLU ve Sakarya Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığına teşekkür ederim. Nümerik çalışma sürecindeki yardımları için Sn. İsa DEMİR'e teşekkür ederim. Ayrıca çalışmanın GeneXproTools analizlerinin gerçekleştirilmesinde her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen Sn. Esra DOBRUCALI'ya teşekkür ederim.

Doktora eğitimim boyunca sabır, anlayış ve desteği için sevgili eşim Havva, çocuklarım Yusuf Sinan, Yüstra ve değerli aileme sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan; Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK) (Proje No:117M854), Yükseköğretim Kurulu (YÖK) Öğretim Üyesi Yetiştirme Programına (ÖYP) ve Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2014-50-02-026 ve Proje No: 2016-01-04-016) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|------|
| TEŞEKKÜR..... | i |
| İÇİNDEKİLER | ii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ..... | v |
| ŞEKİLLER LİSTESİ..... | viii |
| TABLolar LİSTESİ..... | xiii |
| ÖZET..... | xiv |
| SUMMARY..... | xv |
| BÖLÜM 1. | |
| GİRİŞ..... | 1 |
| 1.1. Tez İçerik Planı..... | 3 |
| BÖLÜM 2. | |
| KONU, KAPSAM VE LİTERATÜR ÖZETİ..... | 5 |
| 2.1. Literatür Özeti..... | 11 |
| 2.2. Amaç ve Hedefler..... | 22 |
| 2.3. Özgün Değer..... | 22 |
| BÖLÜM 3. | |
| BETONARME YÜKSEK KİRİŞLERDE KESME HASARI DAVRANIŞI..... | 26 |
| 3.1. Çubuk Analogisi Yöntemi (Strut-and-Tie Model)..... | 29 |
| 3.2. Betonarme Yüksek Kirişlerde Kesme Hasarı..... | 30 |
| BÖLÜM 4. | |
| DOĞRUSAL OLMAYAN SONLU ELEMANLAR METODU..... | 34 |

| | |
|---|----|
| 4.1. Kullanılan Sonlu Elemanlar Programı..... | 35 |
| 4.2. Beton Malzeme Modeli..... | 37 |
| 4.3. Donatı Malzeme Modeli..... | 46 |
| 4.4. Beton ve Donatı Arasındaki Etkileşim..... | 47 |
| 4.5. Nümerik Modelleme, Yük ve Sınır Şartları..... | 47 |
| 4.6. Analiz Yöntemi..... | 49 |
| 4.7. Nümerik Model Üzerinden Çatlak Genişliklerinin Tespit Edilmesi | 50 |

BÖLÜM 5.

| | |
|--|----|
| MATERYAL VE YÖNTEM..... | 54 |
| 5.1. Deneysel Çalışma..... | 54 |
| 5.2. Nümerik Modelleme..... | 65 |
| 5.3. Çatlak Genişliğinin Belirlenmesi..... | 69 |
| 5.4. Parametrik Çalışma..... | 70 |

BÖLÜM 6.

| | |
|---|-----|
| DENEYSEL VE NÜMERİK ÇALIŞMA SONUÇLARI..... | 73 |
| 6.1. Eğik Çatlak Ölçüm Yönteminin Değerlendirmesi ve Nümerik Modeli..... | 77 |
| 6.2. Deneysel Çalışma ve Nümerik Model Doğrulama Çalışması Sonuçları..... | 79 |
| 6.2.1. DB60/1.86-C1 deney numunesi..... | 79 |
| 6.2.2. DB60/1.86-C1/SR deney numunesi..... | 81 |
| 6.2.3. DB60/1.51-C1 deney numunesi..... | 86 |
| 6.2.4. DB55/1.67-C1 deney numunesi..... | 87 |
| 6.2.5. DB50/1.86-C1 deney numunesi..... | 89 |
| 6.2.6. DB50/1.86-C1/SR deney numunesi..... | 91 |
| 6.2.7. DB50/1.63-C1 deney numunesi..... | 95 |
| 6.2.8. DB50/1.40-C1 deney numunesi..... | 97 |
| 6.2.9. DB40/1.86-C1 deney numunesi..... | 99 |
| 6.2.10. DB40/1.86-C2 deney numunesi..... | 101 |

| | |
|--|-----|
| 6.2.11. DB40/1.86-C3 deney numunesi..... | 103 |
| 6.2.12. DB40/1.86-C1/SR deney numunesi..... | 105 |
| 6.3. Betonarme Yüksek Kirişlerde Eğik Kesme Çatlağı Davranışına Etki Eden Parametrelerin Deney Sonuçlarına Göre Değerlendirilmesi..... | 113 |
| 6.4. Parametrik Çalışma Sonuçları..... | 117 |
| 6.5. Literatürde Gerçekleştirilmiş Olan Çalışmaların Sonuçları..... | 119 |

BÖLÜM 7.

| | |
|--|-----|
| ARTIK YÜK TAŞIMA KAPASİTESİNİN HESABI İÇİN ÖNERİLEN FORMÜL..... | 123 |
|--|-----|

BÖLÜM 8.

| | |
|--|-----|
| SONUÇ VE ÖNERİLER..... | 130 |
| 8.1. Gelecekteki Çalışmalar İçin Öneriler..... | 137 |

| | |
|----------------|-----|
| KAYNAKLAR..... | 139 |
|----------------|-----|

| | |
|------------|-----|
| EKLER..... | 145 |
|------------|-----|

| | |
|---------------|-----|
| ÖZGEÇMİŞ..... | 176 |
|---------------|-----|

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

| | |
|-----------|--|
| a | : Kesme açıklığı |
| a/d | : Kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı |
| b_w | : Kiriş genişliği |
| $b_w d$ | : En kesit alanı |
| BHP | : Beton hasar plastisite |
| C | : Concrete (beton) |
| d | : Faydalı yükseklik |
| DB | : Deep beam (yüksek kiriş) |
| d_c | : Betonun aksenal basınç durumundaki hasar parametresi |
| d_t | : Betonun aksenal çekme durumundaki hasar parametresi |
| E_0 | : Başlangıç elastisite modülü |
| f_{ck} | : Karakteristik beton basınç dayanımı |
| f_{ct} | : Betonun maksimum çekme gerilmesi |
| f_{ctk} | : Betonun maksimum çekme gerilmesi |
| f_{ywk} | : Karakteristik kesme donatısı akma dayanımı |
| GEP | : Gen ifadeli programlama |
| G_f | : Çatlama enerjisi |
| h | : Kesit yüksekliği |
| l_{eq} | : Mesh boyutu |
| l_n | : Eleman net açıklığı |
| l_t | : Toplam eleman boyu |
| MSTM | : Modified strut-and-tie modeli |
| N | : Nümerik |
| P | : Potansiyometre |
| PEEQT | : Eşdeğer çekme plastik birim şekildeğiştirme |

| | |
|-------------------|--|
| R^2 | : Tanımlayıcılık katsayısı |
| S | : Strain gauge (gerinim pulu) |
| SE | : Sonlu elemanlar |
| SR | : Shear reinforcement (kesme donatısı) |
| STM | : Strut-and-tie model |
| P_{cr} | : Eğik çatlama dayanımı |
| P_u | : Maksimum yükü taşıma kapasitesi |
| T | : Test |
| u_u | : Maksimum yerdeğiştirme |
| w | : Çatlak genişliği |
| w_0 | : Maksimum çatlak genişliği |
| ρ_h | : Gövde donatısı oranı |
| ρ_l | : Çekme donatısı oranı |
| ρ_v | : Etriye oranı |
| ρ_w | : Kesme donatısı oranı |
| ψ | : Dilasyon açısı |
| ϵ | : Akma yüzeyi eksantrisitesi |
| ϵ | : Birim şekil değiştirme |
| ϵ_c | : Betonun birim şekil değiştirmesi |
| ϵ_c^{in} | : Betonun inelastik birim şekil değiştirmesi |
| ϵ_c^{pl} | : Betonun plastik birim şekil değiştirmesi |
| ϵ_{icr} | : Betonun maksimum çekme gerilmesine karşılık gelen birim şekil değiştirme değeri |
| ϵ'_{icr} | : Maksimum çatlak genişliğine (w_0) karşılık gelen birim şekil değiştirme değeri |
| ϵ_{scr} | : σ_s 'ye karşılık gelen birim şekil değiştirme değeri |
| ϵ_t^{ck} | : Betonun çatlama sonrası inelastik birim şekil değiştirmesi |
| ϵ_s | : Donatı çeliğinin birim şekil değiştirmesi |
| ϵ_t^{pl} | : Betonun asal plastik çekme birim şekil değiştirme değeri |
| ϵ_t | : Betonun çekme birim şekil değiştirmesi |
| ϵ_{t0} | : σ_{t0} değerine karşılık gelen birim şekil değiştirme değeri |

| | |
|------------------------|---|
| K | : Çekme fonksiyonu üzerindeki ikincil sabit gerilme oranı |
| μ | : Vizkozite parametresi |
| σ | : Gerilme |
| σ_c | : Betonun gerilme değeri |
| σ_{b0}/σ_c | : Başlangıç aksenal basınç akma gerilmesinin başlangıç aksenal basınç gerilmesine oranı |
| σ_s | : Donatı gerilmesi |
| σ_s | : İki parçalı (bilinear) davranış modelinin kırılma noktasına karşılık gelen gerilme |
| ϵ_s^{pl} | : Donatı çeliğinin plastik birim şekil değiştirmesi |
| σ_t | : Betonun çekme gerilmesi |
| σ_{to} | : Aksenal çekme gerilmesi |
| σ_{cu} | : Maksimum beton basınç dayanımı |
| \bar{q} | : Eşdeğer mises etkili gerilmesi |
| \bar{p} | : Hidrostatik basınç gerilmesi |
| η | : Artık yük taşıma kapasitesi oranı |
| \emptyset | : Donatı çapı |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Şekil 1.1. Kesme etkisiyle eğik olarak çatlamış mevcut betonarme yüksek kiriş örnekleri..... | 2 |
| Şekil 2.1. Yüksek kirişlerde tek panel strut-and-tie modeli (STM)..... | 6 |
| Şekil 2.2. Betonarme yüksek kirişlerin artık yük taşıma kapasitelerinin tespiti için literatürde Birrcher ve arkadaşları (2009) tarafından önerilen tablo..... | 7 |
| Şekil 3.1. B ve D-bölgelerinde birim şekil değiştirme dağılımı..... | 27 |
| Şekil 3.2. B ve D-bölgelerinde gerilme dağılımı çizgileri..... | 28 |
| Şekil 3.3. Bir binadaki yüksek kiriş örneği..... | 28 |
| Şekil 3.4. Yüksek kirişlerde örnek bir strut-and-tie modeli..... | 29 |
| Şekil 3.5. Betonarme yüksek kirişlerde hasar mekanizmaları..... | 30 |
| Şekil 3.6. Betonarme yüksek kirişlerde oluşan kesme çatlağı tipleri..... | 31 |
| Şekil 3.7. Bir betonarme kiriş üzerindeki eğik çatlak (a) ve etriye uygulaması (b) | 32 |
| Şekil 4.1. ABAQUS kullanıcı ara yüzü..... | 35 |
| Şekil 4.2. Betonun iki eksenli akma yüzeyi..... | 38 |
| Şekil 4.3. Drucker-Prager plastik akma potansiyeli fonksiyonu..... | 40 |
| Şekil 4.4. Betonun basınç davranışı..... | 42 |
| Şekil 4.5. Betonun çekme davranışı..... | 44 |
| Şekil 4.6. Betonun çatlama sonrası çekme davranışı..... | 45 |
| Şekil 4.7. Örnek bir donatı gerilme – plastik birim şekil değiştirme grafiği..... | 47 |
| Şekil 4.8. Betonun çekme etkisi altındaki davranış modeli..... | 53 |
| Şekil 5.1. Numune isimlendirilmesi..... | 55 |
| Şekil 5.2. DB40/1.86-C1, DB40/1.86-C2 ve DB40/1.86-C3 numunelerinin görünüş ve donatı çizimi..... | 56 |
| Şekil 5.3. DB40/1.86-C1/SR numunesinin görünüş ve donatı çizimi..... | 56 |
| Şekil 5.4. DB50/1.40-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi..... | 56 |

| | |
|---|----|
| Şekil 5.5. DB50/1.63-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi..... | 57 |
| Şekil 5.6. DB50/1.86-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi..... | 57 |
| Şekil 5.7. DB50/1.86-C1/SR numunesinin görünüş ve donatı çizimi..... | 57 |
| Şekil 5.8. DB55/1.67-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi..... | 57 |
| Şekil 5.9. DB60/1.51-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi..... | 58 |
| Şekil 5.10. DB60/1.86-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi..... | 58 |
| Şekil 5.11. DB60/1.86-C1/SR numunesinin görünüş ve donatı çizimi..... | 58 |
| Şekil 5.12. Donatıların hazırlanması ve donatılara yapıştırılan gerinim pulları.... | 59 |
| Şekil 5.13. Betonun kalıba yerleştirilmesi..... | 59 |
| Şekil 5.14. Kalıbı sökülmiş deney numuneleri..... | 60 |
| Şekil 5.15. Betondan (a) ve donatılardan (b) alınan malzeme deneyi numuneleri.. | 60 |
| Şekil 5.16. Numunelerin kür havuzunda bekletilmesi..... | 61 |
| Şekil 5.17. Kükürt-grafit başlık uygulaması..... | 61 |
| Şekil 5.18. Malzeme deneyleri..... | 62 |
| Şekil 5.19. Deney düzeneği ve ölçüm cihazları..... | 62 |
| Şekil 5.20. Numunede oluşan düzlem dışı hareket ve mesnet çökmesinin ölçülmesi..... | 63 |
| Şekil 5.21. Çatlak ölçerler ve yerleşimleri..... | 64 |
| Şekil 5.22. Veri toplama cihazı..... | 65 |
| Şekil 5.23. Beton, yük ve mesnet plakaları nümerik modeli..... | 66 |
| Şekil 5.24. Donatıların nümerik modeli..... | 66 |
| Şekil 5.25. Betonun basınç ve çekme etkisindeki davranış grafikleri..... | 68 |
| Şekil 5.26. Betonun basınç ve çekme etkisindeki hasar parametresi grafikleri..... | 68 |
| Şekil 5.27. Donatı çeliği gerçek $\sigma_s - \epsilon_s^{pl}$ davranış grafiği..... | 69 |
| Şekil 5.28. Eşdeğer çekme plastik birim şekildeğiştirme (PEEQT)..... | 70 |
| Şekil 6.1. Deney numunesinden ölçüm yapılan noktalar..... | 74 |
| Şekil 6.2. Yük – düşey yerdeğiştirme davranış grafiği..... | 74 |
| Şekil 6.3. Yük – yatay yerdeğiştirme davranış grafiği..... | 75 |
| Şekil 6.4. Yük – donatı birim şekildeğiştirme davranış grafikleri..... | 76 |
| Şekil 6.5. Yük – mesnet çökmesi davranış grafikleri..... | 76 |
| Şekil 6.6. Yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği..... | 78 |
| Şekil 6.7. Numunenin hasar sonrası göçme mekanizması..... | 78 |

| | |
|---|----|
| Şekil 6.8. Numunenin nümerik PEEQT davranışı..... | 79 |
| Şekil 6.9. DB60/1.86-C1 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları..... | 80 |
| Şekil 6.10. DB60/1.86-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri..... | 81 |
| Şekil 6.11. DB60/1.86-C1/SR numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları..... | 82 |
| Şekil 6.12. DB60/1.86-C1/SR deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri..... | 83 |
| Şekil 6.13. DB60/1.86-C1/SR deney numunesi orta eksenli hizasındaki donatıların birim şekildeğiştirme eğrileri..... | 84 |
| Şekil 6.14. DB60/1.86-C1/SR deney numunesi çatlak eksenli üzerinde bulunan donatıların davranışı..... | 85 |
| Şekil 6.15. DB60/1.51-C1 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları..... | 86 |
| Şekil 6.16. DB60/1.51-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri..... | 87 |
| Şekil 6.17. DB55/1.67-C1 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları..... | 88 |
| Şekil 6.18. DB55/1.67-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri..... | 89 |
| Şekil 6.19. DB50/1.86-C1 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları..... | 90 |
| Şekil 6.20. DB50/1.86-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri..... | 91 |
| Şekil 6.21. DB50/1.86-C1/SR numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları..... | 92 |
| Şekil 6.22. DB50/1.86-C1/SR deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri..... | 93 |
| Şekil 6.23. DB50/1.86-C1/SR deney numunesi orta noktadaki donatıların birim şekildeğiştirme eğrileri..... | 94 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 6.24. DB50/1.86-C1/SR deney numunesi çatlak ekseninde bulunan donatıların davranışı..... | 95 |
| Şekil 6.25. DB50/1.63-C1 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları..... | 96 |
| Şekil 6.26. DB50/1.63-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri..... | 97 |
| Şekil 6.27. DB50/1.40-C1 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları..... | 98 |
| Şekil 6.28. DB50/1.40-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri..... | 99 |
| Şekil 6.29. DB40/1.86-C1 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları..... | 100 |
| Şekil 6.30. DB40/1.86-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri..... | 101 |
| Şekil 6.31. DB40/1.86-C2 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları..... | 102 |
| Şekil 6.32. DB40/1.86-C2 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri..... | 103 |
| Şekil 6.33. DB40/1.86-C3 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları..... | 104 |
| Şekil 6.34. DB40/1.86-C3 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri..... | 105 |
| Şekil 6.35. DB40/1.86-C1/SR numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları..... | 106 |
| Şekil 6.36. DB40/1.86-C1/SR deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri..... | 107 |
| Şekil 6.37. DB40/1.86-C1/SR deney numunesi orta noktadaki donatıların birim şekildeğiştirme eğrileri..... | 108 |
| Şekil 6.38. DB50/1.86-C1/SR deney numunesi çatlak ekseninde bulunan donatıların davranışı..... | 109 |
| Şekil 6.39. Nümerik sonuçların performansı..... | 112 |
| Şekil 6.40. Kesit yüksekliğinin yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkisi... | 114 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 6.41. a/d oranın (a sabit) yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkisi... | 115 |
| Şekil 6.42. a/d oranın (d sabit) yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkisi... | 116 |
| Şekil 6.43. Beton basınç dayanımının yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkisi..... | 117 |
| Şekil 6.44. DB50/1.84-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz sonucu..... | 119 |
| Şekil 6.45. DB50/1.75-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz sonucu..... | 119 |
| Şekil 6.46. S0M ve S1M numunesi yük – yerdeğiştirme davranış grafikleri..... | 120 |
| Şekil 6.47. S0M ve S1M numunesi yük – çatlak genişliği davranış grafikleri..... | 120 |
| Şekil 6.48. B350-1-55, B500-1-55, B700-1-55 ve B1000-1-55 numunesi yük – yerdeğiştirme davranış grafikleri..... | 121 |
| Şekil 6.49. B350-1-55, B500-1-55, B700-1-55 ve B1000-1-55 numunesi yük – çatlak genişliği davranış grafikleri..... | 121 |
| Şekil 6.50. 00_00, 00_02 ve 00_03 numunesi yük – yerdeğiştirme davranış grafikleri..... | 121 |
| Şekil 6.51. 00_00, 00_02 ve 00_03 numunesi yük – çatlak genişliği davranış grafikleri..... | 122 |
| Şekil 7.1. Eğitim verisinin saçılım diyagramı (birim: kN)..... | 128 |
| Şekil 7.2. Doğrulama verisinin saçılım diyagramı (birim: kN)..... | 128 |

TABLULAR LİSTESİ

| | |
|--|-----|
| Tablo 2.1. Yüksek kirişlerin malzeme ve en kesit özellikleri için önerilen sınır değerler..... | 10 |
| Tablo 4.1. ABAQUS programında mevcut tutarlı birim sistemleri..... | 36 |
| Tablo 4.2. BHP modeli akma yüzeyi parametreleri..... | 39 |
| Tablo 5.1. Numunelerin boyut ve malzeme özellikleri..... | 55 |
| Tablo 5.2. Malzeme deneylerinin sonuçları..... | 61 |
| Tablo 5.3. BHP modeli temel parametreleri..... | 67 |
| Tablo 5.4. Betonun sayısal modelinde kullanılan diğer parametreler..... | 67 |
| Tablo 5.5. Parametrik çalışmada kullanılan numunelerin boyut ve malzeme özellikleri..... | 71 |
| Tablo 6.1. Deneysel ve nümerik çalışma sonuçları..... | 110 |
| Tablo 6.2. Deneysel ve nümerik çalışma sonuçlarının performansı..... | 110 |
| Tablo 6.3. Numunelerin deney ve hesap sonucu bulunan maksimum yük taşıma kapasiteleri..... | 112 |
| Tablo 6.4. İncelenecek parametreler için numune matrisi..... | 113 |
| Tablo 6.5. Parametrik çalışma sonuçları..... | 118 |
| Tablo 6.6. Literatürdeki çalışmalardan alınan numunelerin boyut ve malzeme özellikleri..... | 120 |
| Tablo 7.1. GEP çözüm mimarisini oluşturan parametreler ve seçilen değerleri.... | 124 |
| Tablo 7.2. Analizlerde kullanılan verinin sınır değerleri..... | 125 |
| Tablo 7.3. Önerilen formülün performansı..... | 127 |

ÖZET

Anahtar kelimeler: Betonarme yüksek kiriş, kesme çatlağı, artık yük taşıma kapasitesi, deneysel çalışma, sonlu elemanlar yöntemi

Bu tez çalışmasının amacı; eğik olarak çatlamış mevcut betonarme yüksek kirişlerin, artık yük taşıma kapasitelerinin gerçekçi olarak belirlenebilmesi ve bu sayede acil müdahale gerektirecek kritik elemanların önceden tespit edilerek oluşabilecek can ve mal kaybı riskinin azaltılmasıdır. Betonarme yüksek kirişlerde, klasik kirişler (kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı, $a/d > 2$) için yapılan doğrusal gerilme yayılımı kabulü geçerliliğini yitirmekte ve ayrıca kesme etkisi ön plana çıkmaktadır. Bu elemanlarda asal çekme gerilmelerinden dolayı oluşan eğik çatlaklar, ani ve gevrek kırılmaya neden olabilmektedir. Eğik olarak çatlamış mevcut betonarme yüksek kirişlerde artık yük taşıma kapasitesinin gerçekçi bir şekilde belirlenebilmesi, acil müdahale gerektirecek kritik elemanların önceden tespitine imkân sağlayacaktır. Bu bilgi de can ve mal kaybının engellenmesi açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle, uygulamada eğik olarak çatlamış betonarme yüksek kirişlerin artık yük taşıma kapasitesinin tespit edilmesine yönelik yaklaşımlara ihtiyaç bulunmaktadır. Literatürde, eğik olarak çatlamış betonarme yüksek kirişlerin artık yük taşıma kapasitesinin tespit edilmesine yönelik bir tablo önerilmekle birlikte, bu tablonun önemli eksiklikleri bulunmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, betonarme yüksek kirişlerin kesme etkisi altındaki eğik çatlak davranışı 3 aşamalı bir çalışma ile incelenmiştir. İlk aşamada deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiş olup, betonarme yüksek kirişlerin eğik kesme çatlağı davranışına; kesit yüksekliği, a/d ve karakteristik beton basınç dayanımı parametrelerinin etkisi incelenmiştir. İkinci aşamada, deneysel çalışma sonuçları kullanılarak nümerik bir çalışma gerçekleştirilmiş ve doğrusal olmayan sonlu elemanlar metodu kullanılarak oluşturulmuş nümerik modeller, deney sonuçları kullanılarak doğrulanmıştır. Daha sonra, deneysel çalışmada kullanılan numuneler ile boyut ve malzeme özellikleri tamamen aynı fakat farklı kesme donatısı oranına sahip yeni betonarme yüksek kirişler tasarlanmıştır. Tasarlanan yeni elemanlar ile deneysel çalışmayla doğrulanmış nümerik modeller kullanılarak parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasının son aşamasında ise, gerçekleştirmiş olan deneysel ve parametrik çalışmalar ile literatürde verilen çalışma sonuçları birlikte kullanılarak, eğik olarak çatlamış betonarme yüksek kirişlerin çatlak genişliğinden, eleman artık yük taşıma kapasitesinin hesaplanabileceği yeni, etkin ve basit bir formül önerilmiştir. Önerilen bu formül ile, literatürde bulunan hesap tablosunun eksiklikleri giderilmiş olup, böylece uygulamadaki ihtiyacı karşılayan özgün bir çalışma ortaya konulmuştur.

INVESTIGATION OF EFFECT OF SHEAR CRACKS ON RESIDUAL LOAD CARRYING CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE DEEP BEAMS

SUMMARY

Keywords: Reinforced concrete deep beam, shear crack, residual load carrying capacity, experimental study, finite element method

Aim of the study is accurate determination of residual load carrying capacity of existing diagonally cracked reinforced concrete (RC) deep beams and by this means to reduce the risk of loss of life and property by determining in advance the critical members needing urgent response. Linear stress distribution assumption of classical beams (the ratio of shear zone to effective depth, $a/d > 2$) is not valid for reinforced concrete deep beams and shear effect comes into prominence as well. Diagonal cracks of that members stemming from principal tensile stresses may cause sudden and brittle failure. An accurate determination of residual load carrying capacity of diagonally cracked reinforced concrete deep beams will enable to determine the critical members needing urgent response in advance. This information is very important in terms of preventing loss of life and property. Therefore, new approaches are needed in practice to determine residual load carrying capacity of existing diagonally cracked reinforced concrete deep beams. In literature, a chart was proposed to determine residual load carrying capacity of existing diagonally cracked reinforced concrete deep beams. However it has some important deficiencies.

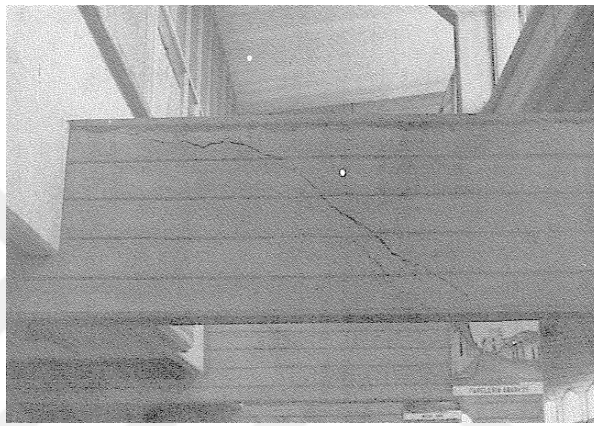
In the scope of the study, diagonal cracking behavior of RC deep beams under shear effect is investigated via a 3-phase study. In the first phase, an experimental study is conducted to investigate diagonal cracking behavior of deep beams in terms of section depth, a/d and characteristic compressive strength of concrete. In the second step, a numerical study is performed by creating nonlinear finite element models which are sufficiently verified considering experimental study results. Later on, new RC deep beams are designed by taking into account similar dimensional and material properties, and different shear reinforcement ratio with the specimens used in the experimental study. A parametric study is performed via newly designed members and numerical models verified by experimental study results. In the last phase of the study, a new, effective and simple formulae is proposed to calculate load carrying capacity of existing diagonally cracked RC deep beams by using results of the studies given in literature together with the experimental and numerical study results of this research. The proposed formulae diminishes deficiencies of the chart proposed in literature. Thus a unique study is revealed fulfilling the requirement in practice.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde yüksek kirişler; köprülerde kolon üstü başlık kirişi, yüksek yapılarda transfer kirişi ve temel kazıklarında kazık bağ kirişi olarak kullanılmaktadırlar. Ayrıca bu elemanlar silo benzeri yapılarda ve açık deniz yapılarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d) 2 veya daha az olan betonarme kirişler, yüksek kiriş davranışı sergilemektedir. Yüksek kirişlerde, klasik kirişler ($a/d > 2$) için yapılan doğrusal gerilme yayılımı kabulü geçerliliğini yitirmekte ve ayrıca kesme etkisi ön plana çıkmaktadır. Bu elemanlarda kesme etkisi nedeniyle asal çekme gerilmelerinden oluşan eğik çatlaklar ani ve gevrek kırılmaya neden olabilmektedir (Doğangün, 2012; Celep, 2013). Betonarme elemanlarda çatlak tamamen önlemek mümkün olmadığı gibi, mevcut betonarme yüksek kirişler üzerinde de bu tür eğik çatlaklarla uygulamada sıklıkla karşılaşmaktadır (Şekil 1.1.). Yüksek kirişler; eğik çatlak oluşumu sonrasında, elemandaki inelastik gerilme dağılışı ve oluşan kemer etkisi nedeniyle önemli ölçüde artık yük taşıma kapasitesine sahiptirler (Wight, 2016). Mevcut eğik çatlak genişliklerinin artması ile birlikte elemandaki bu artık kapasite giderek azalacak ve elemanda ani ve gevrek kırılma meydana gelebilecektir (Yılmaz, 2016). Bu nedenle eğik olarak çatlamış mevcut betonarme yüksek kiriş elemanları üzerindeki artık yük kapasitenin bilinmesi, acil müdahale gerektirecek elemanların önceden tespitine olanak sağlayacaktır. Artık yük taşıma kapasitesi azalmış elemanların zamanında tespiti, muhtemel can ve mal kaybı riskini azaltacaktır. Bu sebeplerden dolayı uygulamada, çatlamış mevcut betonarme yüksek kirişlerin artık yük taşıma kapasitelerinin tespit edilebilmesine yardımcı olacak yaklaşımlara ihtiyaç bulunmaktadır. Literatürde, eğik olarak çatlamış betonarme yüksek kirişlerin artık yük taşıma kapasitesinin tespit edilmesine yönelik bir tablo (Bircher ve ark., 2009) önerilmekle birlikte, bu tablonun önemli eksiklikleri bulunmaktadır.



(a) Köprü başlık kirişi (Young ve ark., 2002)



(b) Bir otobüs terminalindeki yüksek kiriş elemanı (EERI, 2018)

Şekil 1.1. Kesme etkisiyle eğik olarak çatlamış mevcut betonarme yüksek kiriş örnekleri.

Bu tez çalışmasının amacı; eğik olarak çatlamış mevcut betonarme yüksek kirişlerin, artık yük taşıma kapasitelerinin gerçekçi olarak belirlenebilmesi ve bu sayede acil müdahale gerektirecek kritik elemanların önceden tespit edilerek oluşabilecek can ve mal kaybı riskinin azaltılmasıdır. Bu amaçla, betonarme yüksek kirişlerin kesme etkisi altındaki eğik çatlak davranışı 3 aşamalı bir çalışma ile incelenmiştir. İlk aşamada deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiş olup betonarme yüksek kirişlerin eğik kesme çatlak davranışına; kesit yüksekliği (h), kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d) ve karakteristik beton basınç dayanımı (f_{ck}) parametrelerinin etkisi incelenmiştir. İkinci aşamada, deneysel çalışma sonuçları kullanılarak nümerik bir çalışma gerçekleştirilmiş ve doğrusal olmayan sonlu elemanlar metodu kullanılarak oluşturulmuş nümerik modeller deney sonuçları kullanılarak doğrulanmıştır. Daha sonra, deneysel çalışmada kullanılan numuneler ile boyut ve malzeme özellikleri tamamen aynı fakat farklı kesme donatısı oranına sahip yeni betonarme yüksek kirişler

tasarlanmıştır. Tasarlanan yeni elemanlar ile deneysel çalışmayla doğrulanmış nümerik modeller kullanılarak parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Parametrik çalışma sonucunda yüksek kirişlerin “yük – yerdeğiştirme” ve “yük – çatlak genişliği” davranış grafikleri elde edilmiştir. Tez çalışmasının son aşamasında ise, gerçekleştirmiş olan deneysel ve parametrik çalışmalar ile literatürde verilen çalışma sonuçları birlikte kullanılarak, eğik olarak çatlamış betonarme yüksek kirişlerin çatlak genişliğinden, eleman artık yük taşıma kapasitesinin hesaplanabileceği ve literatürde bulunan tablonun eksikliklerini gideren yeni, etkin ve basit bir formül önerilmiştir.

1.1. Tez İçerik Planı

Bu tez çalışması 8 bölümden oluşmakta olup her bir bölüme ait içerik aşağıda açıklanmıştır.

Bölüm 1’de; tez kapsamında incelenen problemin tanımı, çalışmanın hangi aşamalardan oluştuğu ve bu aşamalarda gerçekleştirilen çalışmaların içeriği ile ilgili kısa bilgiler verilmiştir.

Bölüm 2’de; tezin konusu, kapsamı, amaç ve hedefleri anlatılmıştır. Bu bölümde ayrıca konu ile ilgili ayrıntılı bir literatür özeti verilmiştir. Son kısımda ise çalışmanın özgün değerleri maddeler halinde sıralanarak açıklanmıştır.

Bölüm 3’te; betonarme yüksek kirişlerin genel ve kesme hasar davranışı ile ilgili bilgiler sunulmuştur.

Bölüm 4’te; tezin nümerik çalışması kapsamında gerçekleştirilen doğrusal olmayan sonlu elemanlar (SE) analiz yöntemi ile ilgili bilgiler verilmiştir. SE analizlerinde kullanılan program ve özellikleri, betonun ve donatı çeliğinin sayısal malzeme modeli, nümerik modelleme tekniği, yük ve sınır şartları, analiz yöntemi ve nümerik model üzerinden çatlak genişliklerinin tespit edilmesi ile ilgili hususlar bu bölümde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Bölüm 5’de; tezin deneysel ve nümerik çalışmaları ile formül oluşturulması aşamalarında kullanılan materyal ve yöntem ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Bölüm 6’da; deneysel ve nümerik çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar verilmiştir. Deneysel ve parametrik çalışmalar ile elde edilen bulgular ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

Bölüm 7’de; eğik olarak çatlamış betonarme yüksek kirişlerin çatlak genişliğinden, eleman artık yük taşıma kapasitesinin hesaplanabilmesi için bir formül önerilmiştir. Önerilen formülün sınırları, performansı ve etkinliği bu bölümde ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Bölüm 8’de; bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel, nümerik ve formül oluşturulması aşamaları sonucunda elde edilen bulgular neticesinde, tez çalışmasının genel bir değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar anlatılmıştır. Gelecekteki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

BÖLÜM 2. KONU, KAPSAM VE LİTERATÜR ÖZETİ

Günümüzde betonarme yüksek kirişlerin tasarımı, deneysel çalışma sonuçları kullanılarak elde edilmiş ampirik tasarım metotları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu tasarım yöntemlerinden en yaygın olarak kullanılanı; kafes kiriş analojisi (strut-and-tie) metodu olup yapısal bir elemandaki karmaşık gerilme akışı bir kafes kiriş sisteminin aksenal elemanları gibi idealize edilmektedir. Bu metot basınç bölgelerindeki gerilmelerin “basınç çubukları (strut)”, çekme bölgelerindeki gerilmelerin ise “çekme çubukları (tie)” tarafından taşınması prensibine dayanmaktadır. Strut ve tie birleşim noktalarına “düğüm noktası (node)” denilmektedir. Strut, tie ve node’lar birleşerek strut-and-tie modelini (STM) oluşturmaktadır (Şekil 2.1.). STM; denge ve uygunluk denklemlerini dikkate alarak güvenli bir tasarım sunmasına rağmen, elemanda oluşan sehim ve yapısal hasar davranışını gösteren “kullanılabilirlik sınır durumları” ile ilgili bilgi içermemektedir. Bu nedenlerden dolayı, STM ve STM’nin yaygın olarak kullanıldığı mevcut tasarım yöntemleri ile mevcut bir yüksek kiriş elemanı üzerinde oluşmuş çatlakların davranışlarının değerlendirilebilmesi mümkün değildir (Bircher ve ark., 2009). Betonarme yüksek kirişlerde, klasik kirişler ($a/d > 2$) için yapılan doğrusal gerilme yayılımı kabulü geçerliliğini yitirmekte ve ayrıca kesme etkisi ön plana çıkmaktadır (Doğangün, 2012; Celep, 2013). Bu elemanlarda kesme etkisi nedeniyle asal çekme gerilmelerinden oluşan eğik çatlaklarla uygulamada sıklıkla karşılaşmaktadır (Young ve ark., 2002). Yüksek kirişler; eğik çatlağın oluşumu sonrasında elemandaki inelastik gerilme dağılışı ve oluşan kemer etkisi nedeniyle önemli ölçüde artık yük taşıma kapasitesine sahiptirler (Wight, 2016). Mevcut eğik çatlak genişliklerinin artması ile birlikte elemandaki bu artık kapasite giderek azalacak ve elemanda ani ve gevrek kırılma meydana gelebilecektir (Yılmaz, 2016). Bu nedenle eğik olarak çatlamış mevcut betonarme yüksek kiriş elemanları üzerindeki artık yük kapasitenin bilinmesi, acil müdahale gerektirecek elemanların önceden tespitine olanak sağlayacaktır. Artık

| Eleman üzerindeki yük, ortalama maksimum yük taşıma kapasite yüzdesi olarak hesaplanmaktadır (\pm saçılım) | | | | | | | |
|---|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Donatı | w_{max} (mm) | 0.254 | 0.508 | 0.762 | 1.016 | 1.27 | 1.524 |
| $\rho_v = 0.002$ $\rho_h = 0.002$ | | 20 (± 10) | 30 (± 10) | 40 (± 10) | 50 (± 10) | 60 (± 15) | 70 (± 15) |
| $\rho_v = 0.003$ $\rho_h = 0.003$ | | 25 (± 10) | 40 (± 10) | 55 (± 10) | 70 (± 10) | 80 (± 10) | 90 (± 10) |
| $\rho_v > 0.003$ $\rho_h > 0.003$ | | 30 (± 10) | 50 (± 10) | 70 (± 10) | 85 (± 10) | ~maksimum | ~maksimum |

Notasyon:
 w_{max} = ölçülen maksimum çatlak genişliği (in.)
 ρ_v = düşey doğrultudaki donatı oranı ($\rho_v = A_v / bs_v$)
 ρ_h = yatay doğrultudaki donatı oranı ($\rho_h = A_h / bs_h$)
 A_v & A_h = bir aralıktaki etriye & yatay donatıların toplam alanı
 s_v & s_h = etriye ve yatay donatı aralığı
 b = gövde genişliği

Yönergeler:
1) ρ_v ve ρ_h belirle
2) Maksimum eğik çatlak genişliğini ölç, w_{max}
3) Kapasite %'si tahmini için w_{max} , ρ_v ve ρ_h ile tabloyu kullan

Önemli Açıklamalar:
Bu tabloda, kesme kritik elemanların maksimum eğik çatlak genişlikleri, maksimum kapasite yüzdesi olarak hesaplanarak eleman üzerindeki yük ile ilişkilendirilmiştir. Bu tablonun amacı, tekil yükleme altında a/d oranı 1,0 ile 2,0 arasında olan eğik olarak çatlama betonarme köprü başlık kirişlerinin artık yük kapasitelerinin değerlendirilmesinde saha mühendislerine yardımcı olmaktır. Bu tablo, yüksekliği 106 ve 190 cm arasında değişen, basit mesnetli 21 adet betonarme yüksek kiriş deneyinden elde edilen veri ile oluşturulmuştur. Deney numunelerinin a/d oranı 1,85 olarak tasarlanmıştır. Deney sonuçları a/d oranı azaldıkça çatlak genişliklerinin azaldığını göstermiştir. Bu sebeple, a/d oranı daha küçük olan elemanlardaki aynı çatlak genişliği, yukarıda tabloda belirtilen kapasitelerden daha büyük yüzdelere ulaşıldığını göstermektedir.

Bu tablo, aşağıda belirtilen sınırlar dikkate alınarak mühendislik tecrübesi ile birlikte kullanılmalıdır.
- genel olarak çatlak genişliklerinin değişkenliği (\pm saçılım) - saha ve laboratuvar koşullarındaki farklılıklar
- a/d < 1.85 olan elemanlarda daha fazla kapasite %'si - kapasitenin güvenli olarak hesaplanması yaklaşımı

Bu tablo ters-T şekilli başlık kirişleri için kullanılmamalıdır.

Şekil 2.2. Betonarme yüksek kirişlerin artık yük taşıma kapasitelerinin tespiti için literatürde Birrcher ve arkadaşları (2009) tarafından önerilen tablo.

Birrcher ve arkadaşları (2009) tarafından önerilen bu tablo; uygulamadaki ihtiyacı karşılamak amacıyla hazırlanmış ve mevcut bir betonarme yüksek kirişte oluşmuş maksimum eğik çatlak genişliğinden, elemandaki artık yük taşıma kapasitesinin hesaplanabileceği pratik bir hesap yöntemi olmakla birlikte bazı önemli kısıtları bulunmaktadır. Öncelikle çalışmada a/d oranı sadece 1,85 olan deney numuneleri kullanılmış fakat tablonun a/d oranı 1 ~ 2 arasında olan tüm betonarme yüksek kirişler için kullanılabilirliği belirtilmiştir. Ancak a/d oranının betonarme yüksek kirişlerin kesme ve eğik çatlak davranışına olan etkisi ihmal edilmiştir. Farklı a/d oranlarında yüksek kiriş numunelerinin de çalışmaya dâhil edilmesinin, önerilen tablo ile daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesi açısından önemlidir. Çalışmada; yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etki eden en önemli parametrenin, elemana enine ve boyuna doğrultuda konulan kesme donatısı (etriye ve gövde donatısı) olduğu belirtilmiş ve tablonun oluşturulmasında sadece kesme donatısı oranları dikkate alınmıştır. Ancak, en kesit alanı ($b_w d$), karakteristik beton basınç dayanımı (f_{ck}), kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d) ve çekme donatısı oranı (ρ_1) gibi klasik kirişlerin (a/d > 2) kesme davranışına etkisi önemli olan parametrelerin, yüksek kirişlerin

kesme davranışına olabilecek etkileri göz ardı edilmiştir. Ayrıca önerilen tablo, sadece eşit kesme donatısı oranlarına sahip yüksek kirişler için oluşturulmuştur. Ancak tasarım yönetmelikleri incelendiğinde, yüksek kirişlere konulması zorunlu olan etriye ve gövde donatısı oranlarının eşit olma zorunluluğu bulunmamaktadır. Uygulamada etriye ve gövde donatısı oranları farklı olan betonarme yüksek kiriş elemanlarına rahatlıkla rastlanacağı açıktır. Çalışmada ayrıca farklı kesme donatısı oranlarına sahip yüksek kiriş elemanların nasıl değerlendirileceği hususunda bilgi verilmemiştir. Bunlarla birlikte, önerilen hesap tablosunun oluşturulduğu deney ve kullanılan veri sayısı oldukça sınırlı sayıdadır. Çalışmada sadece 21 adet deney numunesi test sonucu kullanılmış olup, veri sayısının az olması nedeniyle yazarlar tabloda verilen değerleri çok güvenli tarafta tutmak zorunda kaldıklarını belirtmişlerdir. Sonuç olarak; literatürde Bircher ve arkadaşları (2009) tarafından önerilen tablonun, yukarıda belirtilen eksiklikleri ve kısıtları nedeniyle uygulamadaki ihtiyacı tam anlamıyla karşılayamayacağı değerlendirilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında uygulamadaki ihtiyacı gidermek amacıyla, eğik olarak çatlama betonarme yüksek kirişlerin artık yük taşıma kapasitelerinin tespit edilmesi için literatürde önerilen hesap tablosunun eksikliklerini giderebilecek ve daha gerçekçi sonuçlar verecek alternatif bir formül önerilmiştir. Önerilen formül kullanılarak mevcut bir betonarme yüksek kiriş üzerinde oluşmuş eğik çatlakların, uygulamadaki mühendisler tarafından gerçekçi bir şekilde değerlendirilmesi ile acil müdahale gerektirecek kritik elemanların önceden tespitine ve bu sayede de ani ve gevrek kırılma nedeniyle oluşabilecek can ve mal kaybı riskinin azaltılmasına olanak sağlanması amaçlanmaktadır.

Önerilecek formülün gerçekçi sonuçlar verebilmesi için, öncelikle formülün oluşturulmasında kullanılacak parametrelerin doğru olarak seçilmesi hususu oldukça önemlidir. Bu nedenle, yüksek kirişlerin eğik kesme çatlak davranışına etkisi önemli olan parametrelerin gerçekçi olarak tespit edilmesi gerekmektedir. Kesme kuvveti etkisindeki betonarme klasik kirişlerin ($a/d > 2$) davranışı ve kırılma biçimi; yüklemeye, yükün mesnede olan uzaklığına, kiriş derinliğine, beton basınç dayanımına, çekme ve kesme donatı miktar ve düzenine bağlı olarak değişmektedir (Doğangün, 2012; Ersoy ve ark., 2012). Klasik kirişlerin eğik çatlak davranışına etkisi olduğu bilinen bu parametrelerin, yüksek kirişler içinde geçerliliğinin araştırılması

gerekmektedir. Bu parametrelere ilave olarak başka önemli parametrelerin de olabileceği göz ardı edilmemelidir.

Bu tez kapsamında, betonarme yüksek kirişlerin kesme etkisi altındaki hasar davranışının incelenmesi amacıyla literatürde gerçekleştirilen çalışmalar kapsamlı olarak araştırılmıştır. Literatür araştırması sonucunda yüksek kirişlerin eğik kesme hasarı davranışına etkisi olduğu düşünülen parametreler tespit edilmiştir. Ayrıca bu davranışa etkisi önemli olduğu düşünülen ve literatürde hakkında yeterli çalışma bulunmayan diğer parametreler için ise deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaya ilave olarak, deney matrisinde yer alan bazı numunelerin analizi doğrusal olmayan sonlu elemanlar (SE) metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen SE çalışması ile, araştırmacılara betonarme yüksek kiriş davranışının nümerik olarak gerçekçi bir şekilde modellenebilmesi için gerekli modelleme tekniği ve malzeme modellerinin oluşturulması gösterilmiştir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması kapsamında literatürde gerçekleştirilen çalışmalar ve bu tez çalışması kapsamında yapılan deneysel ve nümerik çalışma sonuçları bir bütün olarak değerlendirilerek, betonarme yüksek kirişlerin kesme etkisi altındaki eğik çatlak davranışına etki eden temel parametreler belirlenmiştir. Daha sonra, bu parametreler ile eğik kesme hasarı arasındaki ilişkinin matematiksel olarak ortaya konulması amacıyla bir formül önerilmiştir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin boyut, malzeme vb. özellikleri ile gerçek eleman davranışının doğru olarak temsil edilmesi oldukça önemlidir. Literatürde, yüksek kirişlerin kesme davranışının deneysel olarak incelendiği çalışmalarda birbirinden farklı boyut, donatı ve malzeme özelliklerine sahip numuneler kullanıldığı tespit edilmiştir. Bu numuneler ile uygulamada karşılaşılan yüksek kiriş özelliklerinin gerçekçi olarak temsil edilip edilmediğinin belirlenmesi oldukça önemli bir husustur. Bu kapsamda literatürde, Bircher ve arkadaşlarının (2009) hazırladıkları deneysel çalışma raporunda; betonarme yüksek kirişlerin uygulamada sıklıkla karşılaşılan boyut ve malzeme özellikleri dikkate alınarak, bu elemanlar için minimum malzeme ve en kesit özellikleri tanımlanmıştır (Tablo 2.1.).

Önerilen bu tablo; mevcut çalışmalarda kullanılan ve gelecekte gerçekleştirilecek olan çalışmalarda kullanılacak numunelerin boyut ve malzeme özelliklerinin seçiminde ve değerlendirilmesinde oldukça yol göstericidir. Bu tez kapsamındaki deneysel ve nümerik çalışmalarda kullanılan numunelerin kesit ve malzeme özellikleri de bu tabloda verilen sınır değerler dikkate alınarak belirlenmiştir. Ayrıca literatürde gerçekleştirilmiş çalışmalarda kullanılan numune boyut ve malzeme özellikleri de bu tabloya göre değerlendirilmiştir.

Tablo 2.1. Yüksek kirişlerin malzeme ve en kesit özellikleri için önerilen sınır değerler (Birrcer ve ark., 2009).

| Yüksek kiriş özelliği | Sınır değer |
|---|-----------------------|
| Karakteristik beton basınç dayanımı, f_{ck} | > 14 MPa |
| Kiriş genişliği, b_w | > 12 cm |
| Faydalı yükseklik, d | > 31 cm |
| En kesit alanı, $b_w d$ | > 645 cm ² |

Bununla birlikte, literatür araştırması sonucunda tespit edilen çalışmalar öncelikle kapsamlarına göre değerlendirilmiş ve bu tez çalışması kapsamına girmeyen çalışmalar inceleme dışı bırakılmıştır. Bu bağlamda, bu tez çalışması kapsamında; tek açıklıklı, basit mesnetli, 3 veya 4 nokta yükleme deney düzeneklerinde yükün monotonik olarak uygulandığı deneysel çalışma sonuçları çalışma kapsamına dâhil edilmiştir. Ülkemizdeki uygulamalar dikkate alındığında yüksek dayanımlı ($f_{ck} > 50$ MPa) betonarme yüksek kirişler ve ayrıca sürekli açıklıklı ve çevrimsel yük uygulanmış yüksek kirişler kapsam dışında bırakılmıştır. Betonarme yüksek kirişlerde kesme etkisinin kritik olması nedeniyle, sadece kesme etkisinden oluşan eğik çatlak hasarı dikkate alınmış olup, diğer hasar türleri çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır.

Literatürde ayrıca, yüksek kirişlere düşey ve yatay doğrultuda konulan kesme donatıları bir bütün olarak “gövde donatısı (web reinforcement)” olarak adlandırılmaktadır. Ancak ülkemizde gövde donatısı denilince sadece kesit gövdesine boyuna doğrultuda yerleştirilen donatılar anlaşılmaktadır. Bu karışıklığı gidermek amacıyla bu tez çalışması kapsamında, kiriş kesitine düşey doğrultuda yerleştirilen kesme donatısı “etriye”, yatay doğrultuda yerleştirilen kesme donatısı ise “gövde donatısı” olarak isimlendirilmiştir. Etriye oranı; ρ_v ve gövde donatısı oranı; ρ_h ile

gösterilmiş olup, her ikisine birden “kesme donatısı (kesme donatısı oranı: ρ_w)” denilmiştir.

2.1. Literatür Özeti

Literatürde gerçekleştirilmiş olan çalışmaların çoğunluğunda betonarme yüksek kirişlerin kesme davranışlarının; elemanın kesme etkisi altındaki eğik çatlama dayanımı (P_{cr}), maksimum yük taşıma kapasitesi (P_u) ve maksimum yük altında oluşan hasar şekilleri açısından incelendiği görülmüştür. Ancak, kesme etkisi nedeniyle oluşan eğik çatlakların davranışına etki eden parametrelerin, eğik çatlak genişlikleri ölçülerek incelendiği çalışma sayısının oldukça sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Literatürde betonarme yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışlarının incelendiği ve bu tez çalışması kapsamına giren çalışmalar ayrıntılı olarak aşağıda anlatılmıştır.

Kong ve arkadaşları (1970) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada; kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d), 0,35; 0,54; 1,18 arasında değişen 35 adet betonarme yüksek kiriş numunesi test edilmiştir. Numuneler üzerinde 7 farklı kesme donatısı konfigürasyonunun (kesme donatısı içermeyen, sadece etriye, sadece gövde donatısı ve iki doğrultuda da kesme donatısı içeren) yüksek kirişlerin eğik çatlak genişliği ve hasar şekilleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Basit mesnetli olarak yerleştirilen numuneler 4 noktalı deney düzeneği ile test edilmiş olup deney esnasında çatlak genişliği ölçümleri de yapılmıştır. Eleman boyu ve genişliği sırasıyla 76,20 cm ve 7,60 cm olarak sabit tutulmuş, yükseklikler ise 25,40 ~ 76,20 cm arasında değişmektedir. Numunelerin ortalama beton basınç dayanımı, f_{ck} ; 22,60 MPa olarak verilmiştir. Çalışma sonucunda; yüksek kirişlerde oluşan çatlak genişliklerinin kontrol edilmesi ve sınırlandırılması için tercih edilecek kesme donatısı konfigürasyonunun, a/d oranına bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Düşük a/d oranlarında, çekme donatısına yakın konulan gövde donatılarının, çatlak genişliğinin sınırlandırmasında en etkili kesme donatısı olduğu belirtilmiştir. Gövde donatısının etkinliği a/d oranı arttıkça azalmakta, etriyelerin etkinliği ise giderek artmaktadır. Elde edilen deney sonuçlarına göre, a/d oranı artarken ortalama ve maksimum eğik çatlak genişliklerinin arttığı gözlenmiştir. Bu durum, yüksek kirişlerde a/d oranı ile eğik çatlak davranışı

arasında önemli bir ilişkinin var olduğu şeklinde yorumlanmıştır. Bununla birlikte, numunelerin kesit özellikleri; $b_w=7,60$ cm ve maksimum $b_w d=580$ cm² olduğu için Tablo 2.1.'de verilen sınır değerler ile karşılaştırıldığında; deneysel çalışmada kullanılan numune boyutlarının, uygulamada karşılaşılan minimum yüksek kiriş boyutlarından daha az olduğu tespit edilmiştir.

Smith ve Vantsiotis (1982) sabit genişlik (10 cm) ve sabit yüksekliğe (35 cm) sahip toplam 52 adet betonarme yüksek kiriş numunesi üzerinde deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada kesme donatısı ve a/d oranının yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkisi araştırılmıştır. Numuneler basit mesnetli bir deney düzeneği üzerinde, a/d oranları 0,77; 1,01; 1,34; 2,01 olacak şekilde test edilmiş olup deney esnasında her bir yükleme adımında maksimum çatlak genişlikleri ölçülerek kaydedilmiştir. Numunelerin ortalama karakteristik beton basınç dayanımı 25 ~ 30 MPa arasında değişmektedir. Çalışma sonucunda; a/d > 1 olan yüksek kirişlerde etriye ve gövde donatısının beraber kesme donatısı olarak kullanılmasının, tüm yük seviyelerinde çatlak genişliğinin azaltılmasında etkili yöntem olduğu tespit edilmiştir. Yazarlar, çatlak genişliğini sınırlandırmak için elemana yerleştirilmesi gereken minimum etriye ve gövde donatısı oranlarını sırasıyla 0,0018 ve 0,0023 olarak önermişlerdir. Ayrıca numunelerin güç tükenmesi sınırındaki çatlak genişlikleri karşılaştırdığında ilginç bir sonuca ulaşılmıştır; minimum donatı oranlarına ilave olarak konulan kesme donatılarının, çatlak genişliğinin sınırlandırılmasına olan katkısı oldukça sınırlı seviye kalmıştır. Kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d) 1'den küçük olan numunelerde gövde donatısı daha etkin çalışırken, a/d oranı arttıkça etriyelerin etkinliği giderek artmaktadır. Bununla birlikte, a/d oranları değiştikçe numuneler üzerindeki eğik çatlak genişliklerinde ihmal edilebilir seviyede farklılıklar oluşmuştur. Yazarlar bu durumu, Kong ve arkadaşlarının (1970) aksine, betonarme yüksek kirişlerde eğik çatlak genişliği ile a/d oranı arasında herhangi bir ilişki olmadığı şeklinde değerlendirmiştir. Numunelerinin kesit özellikleri; $b_w=10$ cm ve maksimum $b_w d=350$ cm² olduğu için Tablo 2.1.'de verilen sınır değerler ile karşılaştırıldığında; deneysel çalışmada kullanılan numune boyutlarının, uygulamada karşılaşılan minimum yüksek kiriş boyutlarından daha az olduğu tespit edilmiştir.

Mihaylov ve arkadaşları (2010) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada; 8 adet betonarme yüksek kiriş numunesi 3 noktalı deney düzeneğinde monotonik ve çevrimsel yüklemeye tabi tutulmuştur. Numune en kesitleri 40x112 cm olarak sabit tutulmuş ve eleman boyları a/d oranı 1,55 ve 2,29 olacak şekilde seçilmiştir. Numunelerin ortalama beton basınç dayanımı, $f_{ck}=33$ MPa olup, kesme donatısı olarak % 0 ve % 0,10 oranlarında sadece etriye konulmuştur. Deney esnasında eğik çatlak genişlikleri ölçülerek kaydedilmiştir. Çalışma ile monotonik ve çevrimsel yüklemeye altında etriye ve a/d oranının eleman eğik çatlak davranışına etkisi araştırılmıştır. Deneylerde, etriyelerin eğik çatlak genişliklerini sınırlandırdığı ve eleman yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde arttırdığı gözlenmiştir. Çalışmada, numunelere sadece etriyeler kesme donatısı olarak konulmuştur. Ancak uygulamada ve yönetmeliklerde yüksek kirişlere etriyelerle birlikte gövde donatısı da konulduğu göz ardı edilmiştir.

El-Sayed ve Shuraim (2015) yaptıkları deneysel çalışmada; betonarme yüksek kirişlerde boyut etkisinin eleman kesme davranışına etkisini incelemiştir. Kesme donatısı içermeyen, 15 cm sabit genişlikli, yüksekliği 35 ~ 100 cm arasında değişen 12 adet yüksek kiriş numunesi 4 noktalı deney düzeneğinde test edilmiştir. Numunelerin karakteristik beton basınç dayanımları 26,10; 53,90; 70,10 MPa olarak 3 gruba ayrılmış olup, tüm numuneler için a/d oranı 1 olarak verilmiştir. Ayrıca deney esnasında çatlak genişlikleri ölçülerek kaydedilmiştir. Deneylerde, kiriş yüksekliği arttıkça eleman kesme dayanımının arttığı görülmüş ve boyut etkisinin yüksek dayanımlı betonarme yüksek kirişlerde daha fazla ön plana çıktığı tespit edilmiştir. Çalışmada sadece $f_{ck}=53,90$ MPa olan yüksek kiriş numunelerinin “yük – eğik çatlak genişliği” grafiği verilmiş olup, diğer grup numunelerdeki eğik çatlak davranışı gösterilmemiştir. Ayrıca deney sonuçları boyut etkisinin eğik çatlak davranışı üzerine olan etkisi açısından irdelenmemiştir. Çalışmada kullanılan numune özellikleri Tablo 2.1.’de verilen sınır değerlere uymaktadır. Ancak $f_{ck}=26,10$ MPa olan numunelerin “yük – eğik çatlak genişliği” sonuçları verilmemiş olup sadece $f_{ck}=53,90$ MPa olan numuneler için verilmiştir.

Bircher ve arkadaşları (2009; 2013; 2014) kesme donatısı oranı (etriye ve gövde donatısı), a/d oranı ve kesit yüksekliği parametrelerinin betonarme yüksek kirişlerin

eğik çatlak davranışına etkilerinin araştırılması amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma kapsamında; kesme donatısı oranları % 0 ~ 0,30 arasında değişen ve a/d oranları 1,20; 1,85; 2,50 olan 12 adet yüksek kiriş numunesi 3 noktalı deney düzeneğinde test edilmiştir. Numunelerin karakteristik beton basınç dayanımları 22~34 MPa arasındadır. Numuneler; 53,50 cm sabit genişliğe sahip olup, yükseklikleri 58,50; 106,50; 190,50 cm olarak verilmiştir. Ayrıca deney esnasında elemanların eğik çatlama yükü, eğik çatlak genişlikleri ve maksimum kesme kuvveti taşıma kapasiteleri kaydedilmiştir. Çalışma sonucunda; yüksek kirişlerde eğik çatlak genişliğinin sınırlandırılmasında, etriye ve gövde donatılarının beraber kullanılarak oluşturulan kesme donatısının en etkin parametre olduğu tespit edilmiştir. Yüksek kirişlerde yeterli kesme dayanımının sağlanması ve eğik çatlak genişliklerinin kontrol altına alınabilmesi için tasarım yönetmeliklerinde (ACI 318-14, 2014; AASHTO LRFD, 2008; FIB MC2010, 2013) konulması istenilen minimum kesme donatısı oranlarının yetersiz olduğu belirtilmiştir. Bu elemanlara her iki doğrultuda minimum % 0,30 oranında etriye ve düşey gövde donatısı konulması tavsiye edilmiştir. Smith ve Vantsiotis (1982) tarafından elde edilen bulgulara benzer şekilde, numune üzerindeki kesme donatısı oranlarının belirli bir seviyenin üzerinde arttırılması, çatlak genişliğinin sınırlandırılmasında beklenen olumlu etkiyi göstermemiştir. Çalışma sonuçları a/d oranı açısından değerlendirildiğinde; etriye ve gövde donatısı oranları % 0,30 olan numunelerde, a/d oranı ile maksimum eğik çatlak genişliği arasında bir ilişki olduğu gözlenmiştir. Bu numunelerde a/d oranı arttıka eğik çatlak genişlikleri artmıştır. Bununla birlikte, kesme donatısı oranları % 0,20 olan aynı özellikteki numunelerde, a/d oranı ile eğik çatlak genişliği arasında herhangi bir ilişki gözlenmemiştir. Çalışma sonucunda; a/d oranı ile eğik çatlak genişliği arasında belirli bir seviyeye kadar ilişki olduğu ancak bu ilişkinin oldukça küçük kaldığı ve a/d oranının eğik çatlak genişliğini etkileyen önemli parametrelerden birisi sayılmaması gerektiği belirtilmiştir. Deney sonuçları kesit yüksekliği açısından değerlendirildiğinde, numunelerde yüksekliğin artışıyla birlikte yük taşıma kapasitesinde artış gözlenmiştir. Deneylerde a/d oranı 1,85 ve 2,50 olan numunelerde eğik çatlama yükü, yüksekliğin artışı ile birlikte sabit kalmıştır. Ancak a/d oranı 1,20 olan kirişlerde yüksekliğin artışı ile birlikte eğik çatlama yükünde artış gözlenmiştir. Yazarlar bu durumu; yüksekliğin eğik çatlama yükü üzerindeki etkisinin oldukça

sınırlı seviyede kaldığı şeklinde değerlendirmiştir. Bununla birlikte, deney sonuçları maksimum eğik çatlak genişlikleri açısından değerlendirildiğinde, kiriş yüksekliği 58,50 cm den 106,50 cm ye arttırıldığında uygulanan maksimum yüke karşılık gelen maksimum eğik çatlak genişliklerinde artış olduğu gözlenmiştir. Fakat yükseklik 106,50 den 190,50 cm ye arttırıldığında, maksimum eğik çatlak genişliklerinde artış oluşmamıştır. Bu durum yazarlar tarafından boyut etkisinin küçük numuneler üzerinde var olduğu şeklinde değerlendirilmiştir.

Suter ve Manuel (1971) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, 12 adet betonarme yüksek kiriş numunesi üzerinde çekme (boyuna) donatısı oranının eğik çatlak davranışına etkisi incelenmiştir. Numunelerin a/d oranı 1,50 ve 2,00 olup çekme donatısı oranı % 0,96 ve % 2,44 olarak verilmiştir. 4 adet numuneye kesme donatısı konulmamış olup diğerlerine kiriş açıklığının orta noktasına 1 adet etriye yerleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre; düşük oranda (% 0,96) çekme donatı içeren numunelerde eğilme davranışı hakim olmuş ve eğilme çatlakları ile birlikte kesme çatlakları da oluşmuştur. Bununla birlikte fazla çekme donatısı (% 2,44) içeren numunelerde ise kesme davranışı daha kritik hale gelmiştir. Bu elemanlarda ani ve gevrek kesme hasarı gözlenmiştir. Sonuç olarak çekme donatısının, betonarme yüksek kirişlerde davranış mekanizmasını değiştirerek eğik çatlak genişlikleri üzerinde etkisi olduğu belirtilmiştir.

Tuchscherer ve arkadaşları (2010; 2011) yaptıkları deneysel çalışmada; etriye kol sayısının ve basınç ve çekme çubuklarının birleştiği noklardaki düğüm noktası (node) sargı etkisinin betonarme yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkilerini araştırmıştır. Bu amaçla 8 adet 53x107 cm ve 2 adet 91x122 cm boyutlarında betonarme yüksek kiriş numunesi üretilmiş olup, yük ve mesnet plakalarının farklı boyutları parametrik olarak incelenmiştir. Ayrıca 2 ve 4 kollu etriyelere sahip numuneler üzerinde, etriye kol sayısının etkinliğinin incelenmesi için 4 adet 53,30x111,70 cm ve 2 adet 91,40x1220 cm boyutlarında yüksek kiriş numunesi test edilmiştir. Tüm numunelerin a/d oranı 1,85 olup, numunelere etriye ve gövde donatısı oranları eşit olacak şekilde iki farklı oranda kesme donatısı yerleştirilmiştir. Bu oranlar % 0,20 ve % 0,30 olarak verilmiştir. Numuneler 3 noktalı deney düzeneğinde test

edilmiş ve deney esnasında eğik çatlak genişlikleri de ölçülmüştür. Çalışma sonuçları düğüm noktası sargı etkisi açısından değerlendirildiğinde; plaka genişliklerinin artışı ile birlikte düğüm noktalarının sargı etkisinin arttığı ve bu sayede de bu noktalarının yük taşıma kapasitelerinin arttığı görülmüştür. Ayrıca düğüm noktalarındaki beton basınç gerilmelerinin, numunenin normal beton basınç gerilmesi değerini aştığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, etriye kol sayısındaki artışın, yüksek kirişlerin kesme kapasitesine katkısının oldukça az olduğu görülmüştür. Ancak deney sonuçları eğik çatlak genişlikleri açısından değerlendirildiğinde, kiriş gövde genişliğine yerleştirilen etriye kolları, numunede % 0,30 oranında eşit etriye ve gövde donatısı kullanıldığı durumlarda, 91,40 cm eleman genişliğine kadar eğik çatlak genişliğini etkilememiştir. Ancak % 0,20 oranında kesme donatısına sahip numunelerde, etriye kol sayısındaki artış çatlak genişliklerini azaltmıştır.

Sonuç olarak; literatürdeki çalışmaların sonuçları bir bütün olarak değerlendirildiğinde; yüksek kirişlerin eğik kesme çatlak davranışına etki eden en önemli parametrelerden birisinin, etriye ve gövde donatılarının birlikte kullanıldığı kesme donatısı oranı olduğu görülmektedir. Yatay ve düşeyde konulan kesme donatısı oranlarının eğik çatlak davranışına olan etkisi, a/d oranına göre değişmektedir. Düşük a/d oranlarında (< 1) eğik çatlak genişliklerinin sınırlandırılmasında, elemana boyuna doğrultuda konulan gövde donatısı daha etkin çalışır iken, a/d oranı arttıkça etriyelerin etkinliği giderek artmaktadır. Ancak yüksek kirişlerde eğik çatlak genişliklerinin sınırlandırılması için mutlaka etriye ve gövde donatısının birlikte kullanılması gerekmektedir. Ayrıca eleman üzerindeki çatlak genişliklerinin daha fazla sınırlandırılması için kesme donatısı oranlarının artırılması beklenen etkiyi göstermemektedir. Diğer bir ifadeyle, yüksek kirişlerde belirli bir etriye ve gövde donatısı oranının üzerinde, çatlak genişliklerinin sınırlandırılması için elemandaki kesme donatısının artırılması istenilen verimde etki oluşturmamaktadır. Literatürde yüksek kirişlerin kesme davranışı üzerine gerçekleştirilen çalışmaların çoğunluğu kesme donatıları üzerine yoğunlaşmıştır. Dolayısıyla kesme donatısının betonarme yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışını etkileyen önemli bir parametre olduğu literatürde açıkça ortaya konulmuştur. Bu nedenle, bu konuda yeni bilimsel çalışmaların gerçekleştirilmesine ihtiyaç bulunmadığı düşünüldüğünden, kesme

donatılarının yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına olan etkileri bu tez kapsamı dışında tutularak, literatürdeki mevcut çalışma sonuçları dikkate alınmıştır.

Literatürdeki çalışmalarda, çekme donatılarının betonarme yüksek kirişlerin eğik çatlak genişliklerinin sınırlandırılmasında doğrudan etkisi olmasa bile eleman davranışını değiştirmesi nedeniyle eğik çatlak davranışına etkisinin olduğu belirtilmiştir. Bu sebeple çekme donatısı oranı, bu tez çalışması kapsamında önerilen formülün oluşturulmasında kullanılan parametrelerden birisi olarak dikkate alınmıştır.

Literatürdeki çalışmaların sonuçları a/d oranı ve kesit yüksekliği açısından değerlendirildiğinde; gerçekleştirilen çalışmalarda birbirinden farklı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Kong ve arkadaşları (1970) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, betonarme yüksek kirişlerde a/d oranı artarken, ortalama ve maksimum eğik çatlak genişliklerinin arttığı gözlenmiş ve böylece a/d oranının yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışını etkileyen önemli parametrelerden birisi olduğu belirtilmiştir. Ancak Birrcher ve arkadaşları (2009) tarafından yapılan deneysel çalışmada, yüksek kirişlerde a/d oranı ile eğik çatlak genişliği arasında belirli bir seviyeye kadar ilişki olduğu ancak bu ilişkinin oldukça düşük seviyede kaldığı belirtilmiştir. Bu nedenle araştırmacılar a/d oranının yüksek kirişlerin eğik çatlak genişliğine olan etkisinin ihmal edilebilir seviyede az olduğunu ve eğik çatlak davranışına etkileyen önemli parametrelerden birisi sayılmaması gerektiğini belirtilmiştir. Bununla birlikte literatürde, kesit yüksekliği arttıkça eğik çatlak genişliklerinin arttığı ancak belirli yüksekliklerden sonra boyut etkisinin ortadan kalktığı ileri sürülmüştür. Görüldüğü gibi literatürde betonarme yüksek kirişlerde a/d oranının ve kesit yüksekliğinin eğik çatlak davranışına etkisi hakkında farklı sonuçlar öne sürülmüş olup, bu konuda açık bir ilişki ortaya konulamamıştır. Betonarme kirişlerde a/d oranı iki şekilde parametrik olarak değiştirilebilmektedir. İlk olarak eleman kesme açıklığı (a) sabit tutulup, eleman faydalı yüksekliği (d) değiştirilerek, ikinci olarak da faydalı yükseklik sabit tutulup, kesme açıklığı değiştirilerek farklı a/d oranları elde edilebilmektedir. Bu sebeple a/d oranı ile kesit yüksekliği arasında bir ilişki bulunmakta olup, sonuçların hangi parametrenin değiştirildiğine göre farklılaşacağı düşünülmektedir. Bu nedenlerden dolayı, yüksek kirişlerde kesit yüksekliği ve a/d oranının; eğik çatlak

davranışı, hasar durumu ve artık kapasiteye olan etkilerinin daha gerçekçi olarak tespit edilmesi amacıyla yeni çalışmalar yapılmasına ihtiyaç bulunduğu açıktır. Literatürdeki bu ihtiyacı gidermek amacıyla bu tez çalışması kapsamında, betonarme yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına; kesit yüksekliği ve a/d oranının etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Davranışta oluşabilecek farklılığı görebilmek amacıyla numunelerin a/d oranı parametrik olarak “a” ve “d” ayrı ayrı değiştirilerek belirlenmiştir.

Literatürdeki çalışmaların sonuçları düğüm noktası sargı etkisi açısından değerlendirildiğinde; plaka genişliklerinin artışı ile birlikte eleman yük ve mesnet plakalarının oluşturduğu düğüm noktalarındaki sargı etkisinin arttığı ve bu sayede düğüm noktalarının yük taşıma kapasitelerinin yükseldiği görülmektedir. Ayrıca bu noktalardaki beton basınç gerilmelerinin, numunenin normal beton basınç gerilmesi değerini aşacağı literatürde gösterilmiştir. Bundan dolayı, düğüm noktalarındaki sargı etkisi, bu noktalarda oluşacak hasarın engellenmesi açısından önemlidir. STM perspektifinden bakıldığında; yeterli boyutlarda mesnet ve yük plakasına sahip yüksek kirişlerde, sargı etkisinden dolayı bu noktalarda hasar oluşması beklenmemektedir. Şayet basınç çubuklarının (strut) kapasitesi düğüm noktalarından az ise, elemandaki hasarın basınç çubukları üzerinde yoğunlaşması ve eğik çatlakların ilerlemesi ve genişliklerinin artması beklenmektedir. Bu sebeplerden dolayı, düğüm noktalarındaki sargı etkisinin, eğik çatlak davranışına direkt etkisi olmayıp eleman üzerindeki hasar davranışını değiştirmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, yüksek kirişlerin sadece kesme etkisi altındaki eğik çatlak davranışı dikkate alındığı için, yük ve mesnet plakalarının oluşturduğu düğüm noktalarındaki sargı etkisi çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır. Bu amaçla yeterli boyutlarda mesnet ve yük plakaları seçilerek numuneler, üzerindeki kritik hasar davranışı eğik çatlak davranışı olacak şekilde tasarlanmıştır.

Literatürdeki çalışmaların sonuçları etriye kol sayısı açısından değerlendirildiğinde; kol sayısındaki artış ile birlikte az oranda kesme donatısı (etriye ve gövde donatısı) içeren ($< \% 0,20$) yüksek kirişlerde çatlak genişliklerinin azaldığı tespit edilmiştir. Ancak yeterli miktarda kesme donatısı içeren yüksek kirişlerde etriye kol sayısındaki

artış, eğik çatlak genişliklerini etkilememektedir. Tasarım yönetmeliklerinde (ACI 318-14, 2014; AASHTO LRFD, 2008) yüksek kirişlere kesme donatısı olarak minimum % 0,25 oranında etriye ve gövde donatısı konulması istenildiğinden, bu yönetmeliklere göre tasarlanmış yüksek kirişlerde etriye kol sayısının, eğik çatlak davranışını etkilemeyeceği düşünülmektedir. Bu tez çalışma kapsamında üretilen yüksek kiriş numuneleri ACI 318-14 (2014) yönetmeliğine göre tasarlandığı için, elemanlara yeterli oranda 2 kollu kesme donatısı konulmuştur.

Klasik kirişlerin kesme davranışına etkisi olduğu bilinen, karakteristik beton basınç dayanımı (f_{ck}) parametresinin, yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına olan etkisinin incelendiği bir çalışmaya literatürde pek rastlanmamıştır. Bu sebeple bu tez kapsamında f_{ck} 'nın, yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkisinin inceleneceği deneysel ve nümerik bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Özet olarak; bu tez çalışmasında, eğik olarak çatlama betonarme yüksek kirişlerin artık yük taşıma kapasitelerinin tespit edilebilmesi için önerilecek olan formülün oluşturulmasında kullanılacak olan parametrelerin doğru olarak seçilmesi oldukça önemlidir. Ancak literatürde yukarıda verilen sınırlı sayıdaki çalışma ve bu çalışmalardaki kısıtlar dikkate alındığında, betonarme yüksek kirişlerin kesme etkisi altındaki eğik çatlak davranışına etki eden parametrelerin gerçekçi olarak tespit edilmesi hususunda değerlendirme yapmak oldukça güçtür. Bundan dolayı bu konuda yeni bilimsel çalışmalara ihtiyaç bulunduğu açıktır. Bu nedenle bu tez çalışması kapsamında, klasik kirişlerin kesme davranışına önemli etkisi olduğu bilinen kesit yüksekliği (h), kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d) ve karakteristik beton basınç dayanımı (f_{ck}) parametrelerinin betonarme yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkilerinin deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir.

Literatürde, SE metodu kullanılarak betonarme yüksek kirişlerin davranışlarının incelendiği pek çok çalışma bulunmakla birlikte, eğik çatlak davranışının nümerik olarak modellendiği ve çatlak genişliklerinin nümerik model üzerinden ölçülerek incelendiği bir çalışmaya pek rastlanmamıştır. Bu nedenle bu tez çalışmasının özgün değerlerinden birisi de betonarme yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışının nümerik

olarak modellenmesi ve çatlak genişliklerinin nümerik model üzerinde ölçülmesidir. Bununla birlikte, betonarme yüksek kirişlerin nümerik olarak modellenerek genel davranışlarının incelendiği çalışmaların önemli olanlarından bazıları aşağıda verilmiştir.

Zhang ve Tan (2007) tarafından betonarme yüksek kirişlerde boyut etkisinin incelenmesi amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yük ve mesnet plakalarının kiriş kesme dayanımına etkisinin incelenmesi için nümerik bir çalışma yapılmıştır. Numunelerin nümerik olarak modellenmesinde Tokyo Üniversitesi tarafından geliştirilen WCOMD isimli sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Betonun sayısal olarak malzeme davranış modelinde betonun çekme ve kesme yumuşaması davranışı dikkate alınmıştır. Donatı ile beton arasındaki aderans nümerik olarak modellenmiştir. Nümerik modeller yük – yerdeğiştirme davranışı açısından deney sonuçları ile iyi bir uyum göstermiştir.

Islam ve Khennane (2012) doğrusal olmayan SE metodu kullanarak betonarme yüksek kirişlerin davranışını incelemek amacıyla otomatik tasarım tekniği üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu amaçla oluşturulan SE modeli, gerçekleştirilen deneysel bir çalışma ile doğrulamışlardır. Çalışmada ABAQUS yazılımı kullanılmış olup beton, beton hasar plastisite (BHP) malzeme modeli kullanılarak modellenmiştir. Başlangıçta, yüksek kiriş elemanlarına kesme donatısı konulmamış ve kesme çatlaklarının oluştuğu bölge tespit edilmiştir. Daha sonra kesme donatısı aşamalı olarak artırılarak donatının eleman davranışına olan etkisi incelenmiştir.

Mohamed ve arkadaşları (2014) tarafından, gövdesinde boşluk bulunan ve bulunmayan betonarme yüksek kirişlerin davranışlarının ve boşluk etrafına yerleştirilen donatı dağılımının eleman kapasitesine olan etkilerinin incelenmesi amacıyla nümerik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Nümerik modeller; literatürden alınan basit veya sürekli mesnetli, 3 ya da 4 nokta yüklemesi altında gerçekleştirilen deney sonuçları ile doğrulanmıştır. Malzeme davranışı BHP malzeme modeli ile modellenmiştir. Nümerik model sonuçlarının deney sonuçları ile uyum gösterdiği belirtilmiştir.

Riveros (2005) gerçekleştirdiği doktora çalışması kapsamında doğrusal olmayan hasar mekaniği kullanarak betonarme yüksek kirişlerin SE analizini araştırmıştır. Çalışmada nümerik bir modelin oluşturulması için gerekli olan betonun basınç ve çekme yumuşaması davranışı, donatı ve beton arasındaki aderans, boyuna donatının akması parametreleri incelenmiş ve tartışılmıştır. Ayrıca nümerik modellemede ayırık çatlak yaklaşımı kullanılarak otomatik çözüm ağı güncellemesine olanak veren Delaunay yenileme algoritmasının etkinliği incelenmiştir. Oluşturulan nümerik modeller ile betonarme yüksek kirişlerin davranışına beton dayanımı ve kiriş boyutunun etkisi incelenmiştir.

Bu tez çalışmasında, betonarme yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etki eden parametreler ile eğik çatlak davranışı arasındaki ilişkiyi gösteren yeni, etkin ve basit bir formül önerilmiştir. Formülün oluşturulmasında, gen ifadeli programlama (GEP) optimizasyon tekniği kullanılmıştır. GEP pek çok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılmakta olup etkinliği literatürde gerçekleştirilen pek çok bilimsel çalışma ile de kanıtlanmıştır (Ashour ve ark., 2003; Cevik ve ark., 2010; Chen ve ark., 2012; Gandomi ve ark., 2013). Ayrıca bu tez yazarı ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiş bilimsel bir çalışmada da (Caglar ve ark., 2015) GEP, betonarme kolonların etkin eğilme rijitliklerinin hesaplanmasında kullanılmış ve oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Bununla birlikte literatürde, Kaya (2001) tarafından gerçekleştirilen çalışmada betonarme yüksek kirişlerin tasarımında farklı bir optimizasyon yöntemi olan genetik algoritma tekniği kullanılmıştır. Çalışmada, yüksek kirişlere etkileyen yükleri emniyetle taşıyabilecek yatay ve düşey optimum donatı çapları genetik algoritma ile tespit edilmiştir. Ancak literatürde GEP tekniği kullanılarak betonarme yüksek kirişlerin hasar davranışlarının incelendiği bir çalışmaya pek rastlanmamıştır. Bu sebeple bu tez çalışmasının özgün değerlerinden bir diğeri de yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışının araştırılmasında GEP'in kullanılmasıdır.

2.2. Amaç ve Hedefler

Bu tez çalışmasının amacı; eğik olarak çatlamış mevcut betonarme yüksek kirişlerin, artık yük taşıma kapasitelerinin gerçekçi olarak belirlenebilmesi ve bu sayede acil müdahale gerektirecek kritik elemanların önceden tespit edilerek oluşabilecek can ve mal kaybı riskinin azaltılmasıdır.

Bu tez çalışmasının, yukarıda belirtilen amaca ulaşabilmek için, ilki araştırmacılara ikincisi ise uygulayıcılara yönelik olmak üzere 2 temel hedefi bulunmaktadır;

- Betonarme klasik kirişlerin ($a/d > 2$) kesme davranışına etkisi olduğu bilinen parametrelerin, yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkileri literatürde yeteri kadar incelenmemiştir. Bu parametrelerin yüksek kirişlerde oluşan eğik çatlak davranışına etkileri deneysel ve nümerik olarak belirlenmiştir. Bu parametreler; kesit yüksekliği (h), kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d) ve karakteristik beton basınç dayanımı (f_{ck}) olarak tespit edilmiştir.
- Eğik olarak çatlamış betonarme yüksek kirişlerin artık yük taşıma kapasitesinin tespit edilmesi için literatürde önerilen hesap tablosunun eksikliklerini giderebilecek ve daha gerçekçi sonuçlar verecek yeni, etkin ve basit bir formül önerilmiştir.

2.3. Özgün Değer

Bu tez çalışmasının özgün değeri ise 4 başlık altında toplanabilir:

- Alternatif bir formül önerilmesi: Betonarme yüksek kirişlerde kesme etkisi nedeniyle asal çekme gerilmelerinden oluşan eğik çatlaklar, ani ve gevrek kırılmaya neden olabilmektedir. Eğik olarak çatlamış mevcut yüksek kirişlerin artık yük taşıma kapasitesinin gerçekçi bir şekilde belirlenebilmesi can ve mal kaybının engellenmesi açısından oldukça önemlidir. Bu ihtiyacı karşılamak amacıyla artık yük taşıma kapasitesinin belirlenebilmesi için literatürde bir

tablo önerilmiştir. Bu tabloda eğik olarak çatlamış mevcut bir betonarme yüksek kirişin sadece kesme donatısı oranı (etriye ve gövde donatısı oranları) dikkate alınmıştır. Ancak tabloda, betonarme klasik kirişlerin ($a/d > 2$) kesme davranışına etkisi olan; en kesit alanı ($b_w d$), karakteristik beton basınç dayanımı (f_{ck}), kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d), çekme donatısı oranı (ρ_l) gibi parametrelerin etkisi dikkate alınmamıştır. Ayrıca önerilen tablo sadece etriye ve gövde donatısı oranları eşit olan yüksek kirişler için kullanılabilen, farklı kesme donatısı oranlarına sahip elemanlar için kullanılamamaktadır. Bu sebeplerden dolayı önerilen tablonun uygulama sahasındaki ihtiyacı tam olarak karşılayamadığı düşünülmektedir. Bu tez çalışması literatürde önerilen bu hesap tablosunun eksikliklerini giderebilecek ve uygulamadaki ihtiyacı karşılamak amacıyla yeni, etkin ve basit bir formülün önerildiği özgün bir çalışmadır.

- Eğik çatlak davranışına etki eden parametrelerin belirlenmesi: Bu tez çalışmasında yüksek kirişlerde eğik çatlak davranışı ile artık yük taşıma kapasitesi arasındaki ilişkinin matematiksel olarak gerçekçi bir şekilde belirlenmesi hedeflenmektedir. Dolayısıyla, bu davranışa etki eden önemli parametrelerin doğru olarak tespit edilmesi önceliklidir. Kesme kuvveti etkisindeki betonarme klasik kirişlerin davranışı ve kırılma biçimi; yüklemeye, yükün mesnede olan uzaklığına, kiriş derinliğine, beton basınç dayanımına, çekme ve kesme donatı miktar ve düzenine bağlı olarak değişmektedir. Ancak betonarme klasik kirişlerin kesme davranışına etkisi olduğu bilinen bu parametrelerin yüksek kirişlerin kesme etkisi altındaki eğik çatlak davranışına etkilerinin incelendiği deneysel ve nümerik çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Bu nedenle yapılacak olan bu çalışma literatürdeki bu eksikliğin giderilmesine önemli katkılar sağlayacak özgün bir çalışmadır. Bu tez çalışmasında, kesit yüksekliği (h), kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d) ve beton basınç dayanımı (f_{ck}) parametrelerinin, yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkileri deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir.

- SE modeli üzerinden çatlak genişliğinin belirlenmesi: Sonlu elemanlar metodu; zorluk, zaman, iş gücü ve maliyet açısından değerlendirildiğinde deneysel çalışmalara göre oldukça avantajları olan, güvenilirliği gerçekleştirilen pek çok bilimsel çalışma ile ispatlanmış ve bilim insanları tarafından sıklıkla kullanılan alternatif bir bilimsel çalışma tekniğidir. Betonarme yüksek kirişler ise uygulamadaki büyük boyutları nedeniyle deneysel çalışma yapmanın oldukça zor olduğu, yüksek maliyet, zaman ve iş gücü gerektiren elemanlardır. Yüksek kirişlerin davranışının SE metodu ile incelenmesinin araştırmacılara büyük kolaylık sağlayacağı açıktır. SE analizlerinde gerçekçi sonuçların elde edilebilmesi, doğru nümerik modelleme tekniği ve gerçekçi malzeme modellerinin kullanılmasına bağlıdır. Ayrıca betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışlarının nümerik olarak modellenerek, model üzerinden çatlak genişliklerinin ölçülebilmesi oldukça güçtür. Bu tez çalışmasında; betonarme yüksek kirişlerin doğrusal olmayan davranışlarının gerçekçi bir şekilde modellenebilmesi için gerekli sayısal malzeme ve SE modelleri oluşturulmuştur. Ayrıca betonarme elemanlarda oluşan çatlak genişliklerinin, SE modeli üzerinden belirlenmesi için literatürde birim şekildeğiştirme ve kırılma enerjisi tabanlı bir yöntem önerilmektedir. Bu yöntemde, çatlak genişlikleri oluşturulmuş yeni bir formül ile beton birim şekildeğiştirmesi ve çatlama enerjisi dikkate alınarak hesaplanabilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, SE modeli üzerinden çatlak genişliklerinin ölçülebilmesi için literatürde önerilen formüle alternatif yeni bir bağıntı önerilmiştir. Önerilen bu yeni bağıntıya ve literatürde önerilen yöntemin betonarme yüksek kirişlere uygulanmasına literatürde pek rastlanmamıştır. Bu sebeple, önerilen yeni bağıntı ve bu bağıntı kullanılarak SE modeli üzerinden çatlak genişliklerinin belirlenmesi için literatürde önerilen yöntemin betonarme yüksek kirişler üzerinde ilk defa uygulanmış olması bu çalışmanın özgün taraflarından birisidir.
- Literatürde bulunan eksikliğin giderilmesi: Ülkemizde betonarme yüksek kirişler üzerinde gerçekleştirilen sadece 2 adet yüksek lisans tez çalışması ve 1 adet TÜBİTAK destekli bilimsel çalışma ile karşılaşmıştır. Fakat çatlama

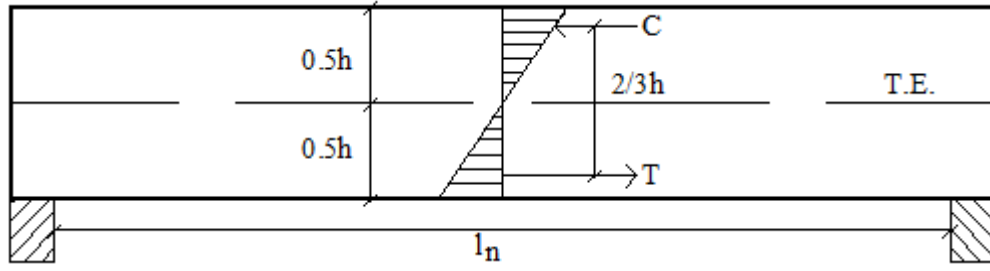
mevcut betonarme yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışı ve artık yük taşıma kapasitesi üzerinde bir çalışmaya da pek rastlanmamıştır. Ülkemizde de yaygın olarak kullanılan ve kesme etkisi kritik olan betonarme yüksek kirişlerin davranışının belirlenmesi üzerine daha fazla çalışma yapılmasına ihtiyaç olduğu açıktır. Bu tez çalışmasının bu yönüyle de ülkemiz açısından önemli bir eksikliği giderecek özgün çalışmalardan birisi olması beklenmektedir.



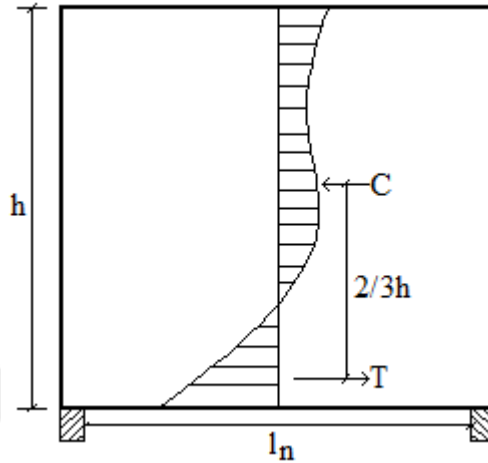
BÖLÜM 3. BETONARME YÜKSEK KİRİŞLERDE KESME HASARI DAVRANIŞI

Betonarme elemanlar genellikle birim deformasyon dağılımının kesit üzerinde lineer dağıldığı kabulü ile kesme ve eğilme kuvvetlerine göre tasarlanır. Bir kirişin mekanik davranışı Bernoulli hipotezi ya da klasik kiriş teorisi diye adlandırılan, “düzlem kesitler eğilme ile düzlem kalır (plane sections remain plane)” kabulü ile tarif edilmektedir (Şekil 3.1.). Bundan dolayı bir yapı elemanı üzerinde Bernoulli hipotezinin geçerli olduğu bölgeye B-bölgesi (Bernoulli region) denilmektedir. B-bölgelerinde iç gerilmeler beton çatlaklarının oluşumunun öncesi ve sonrasındaki kesit kuvvetlerinden elde edilir. Bu bölgelerin tasarımı sıklıkla “klasik kesit tasarımı (sectional design)” olarak isimlendirilmektedir (Ersoy ve ark., 2012).

Bir elemanda; kesit geometrisinde ya da yüklerde ani değişimin olduğu bölgelerde doğrusal olmayan birim şekil değiştirme dağılımları (nonlinear strain distributions) oluşmaktadır. Süreksizliğin olduğu bu bölgelere D-bölgesi (discontinuity region) denilmektedir. St. Venant prensibine göre kesit geometrisi ve yükteki süreksizliğin etkisinin lokal olarak, bir kesit yüksekliği mesafeden sonra azaldığı kabul edilmektedir. Bundan dolayı D-bölgesi genişliğinin; yük ve süreksizlik noktasından “bir kesit yüksekliği kadar uzaklıkta (kesit faydalı yüksekliği; d)” olduğu kabul edilir (Şekil 3.2.). D-bölgelerinin birim deformasyon davranışı, B-bölgelerindeki davranıştan farklı olduğundan, artık klasik kesit tasarımında kullanılan teoriler bu bölgelerde geçerli olamayacaktır (Şekil 3.1.). Bundan dolayı D-bölgelerinin tasarımı B-bölgelerinin tasarımından farklı olmak zorundadır (Wight, 2016).



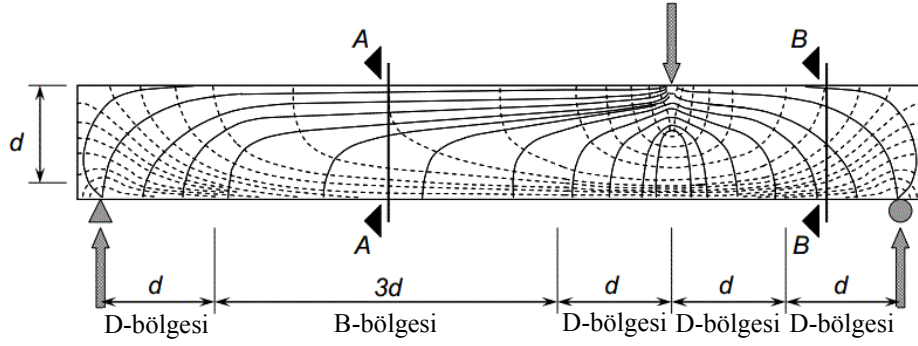
(a) Klasik kiriş B-bölgesi



(b) Yüksek kiriş D-bölgesi

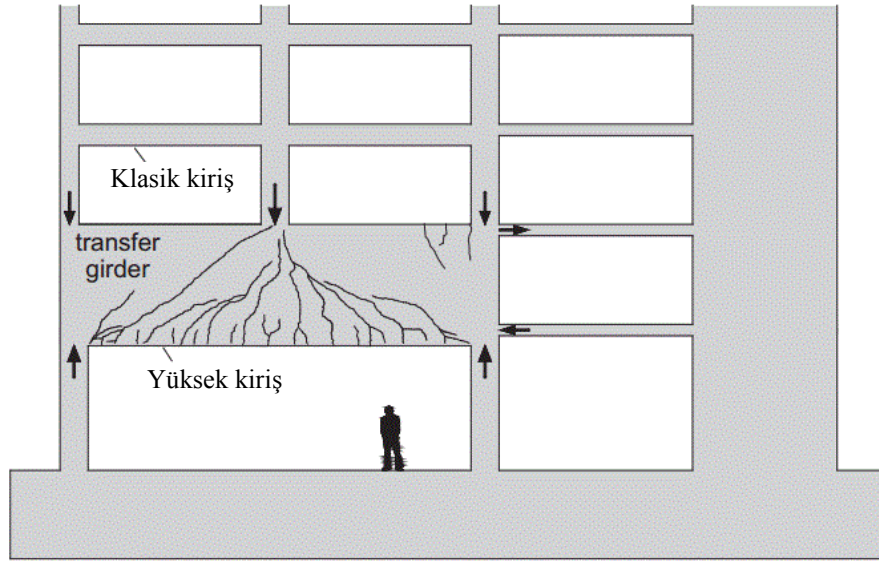
Şekil 3.1. B ve D-bölgelerinde birim şekil değiştirme dağılımı (Nawy, 2009).

B-bölgesi klasik kesit davranışının görüldüğü, kesme açıklığının faydalı yüksekliğine oranı (a/d) oranı 2'den büyük olan betonarme kiriş elemanlarına genel olarak "klasik kirişler" denilmektedir. D-bölgesi davranışının gözlemlendiği, a/d oranı küçük olan elemanlara ise "Yüksek Kiriş (Deep Beam)" denilmektedir. Genellikle bir kiriş üzerinde a/d oranı 2'den küçük olan bölgelerin yüksek kiriş davranışı sergilediği kabul edilmektedir. Örneğin, Şekil 3.2.'de gösterilen kirişte, kiriş üzerindeki tekil yükün sağ ve sol tarafındaki a/d oranı sırasıyla 2 ve 5 olarak hesaplanmıştır. Kirişin sol tarafında (A-A kesiti) gerilmeler klasik kiriş teorisine göre hesaplanabilirken, sağ taraf (B-B kesiti) yüksek kiriş bölgesi olarak dikkate alınmaktadır. Bu bölgede kesme birim şekildeğiştirmeleri hâkim olup, iç gerilmelerin belirlenmesinde klasik kiriş teorisi artık kullanılamaz (Birrcher ve ark., 2009). Yüksek kirişlerde, klasik kirişler için yapılan doğrusal gerilme yayılımı kabulü geçerliliğini yitirmekte ve ayrıca kesme etkisi ön plana çıkmaktadır. Bu elemanlarda kesme etkisi nedeniyle asal çekme gerilmelerinden oluşan eğik çatlaklar ani ve gevrek kırılmaya neden olabilmektedir (Doğangün, 2012).



Şekil 3.2. B ve D-bölgelerinde gerilme dağılımı çizgileri (Bircher ve ark., 2009).

Son yıllarda betonarme yüksek kirişlerin uygulama alanları giderek artmaktadır. Özellikle yüksek yapılar, kıyı yapıları, tanklar ve temelerde yüksek kirişler yaygın olarak kullanılmaktadır (Metwally, 2015). Bir binadaki yüksek kiriş örneği Şekil 3.3.'te gösterilmiştir.



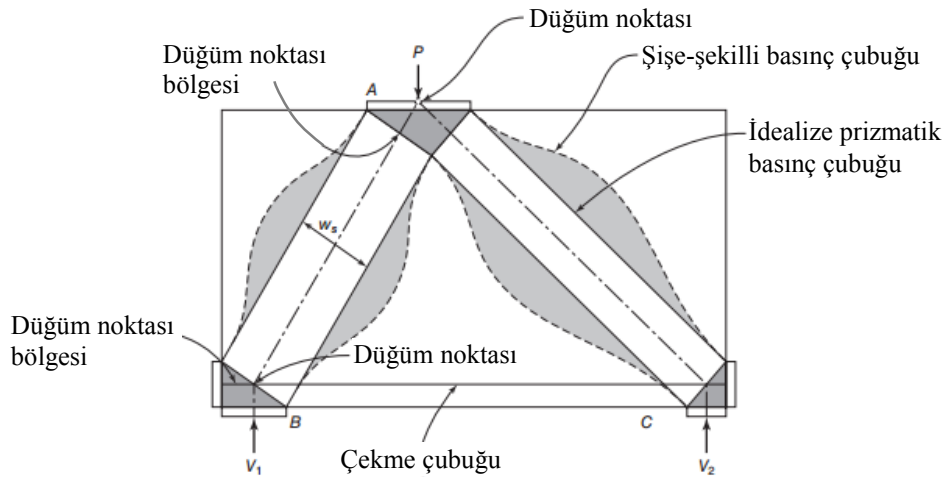
Şekil 3.3. Bir binadaki yüksek kiriş örneği (Mihaylov, 2015).

Yönetmeliklerde yüksek kirişler; bir yüzünden yüklenip diğer yüzünden mesnetlenen betonarme elemanlar olarak tanımlanmaktadır. Bu tip kirişler ayrıca eleman net açıklığının (l_n), faydalı yüksekliğine (d) oranına göre de tarif edilirler. Bu oran TS 500 (2000) ve ACI 318-14 (2014)'de sırasıyla 5 ve 4 olarak verilmiştir ve bu yönetmeliklerde l_n/d oranı verilen değerlerden küçük olan elemanlar için, klasik kirişlerden farklı hesap esasları getirilmiştir.

Betonun inelastik ve doğrusal olmayan birim şekildeğiştirme davranışı D-bölgeleri için genel bir davranış teorisi oluşturulmasını zorlaştırmaktadır. Sonuç olarak günümüzde bu elemanların tasarımında ampirik tasarım metotları kullanılmaktadır. Bu metotlardan literatürde en yaygın olarak kullanılan; “Strut-and-Tie (Çubuk Analojisi)” modeli olup ve ACI 318-14 (2014), AASHTO LRFD (2008) gibi uluslararası yönetmeliklerde de süreksizlik bölgeleri ve yüksek kirişlerin tasarımında kullanılması önerilmektedir (Gong ve Su, 2013).

3.1. Çubuk Analojisi Yöntemi (Strut-and-Tie Model)

Strut-and-Tie (Çubuk Analojisi) modeli, yapısal bir elemandaki karmaşık gerilme akışının, bir kafes kiriş sisteminin aksenal elemanları gibi idealize edilmesini kapsamaktadır. Basınç bölgelerindeki gerilmeler “beton basınç çubukları (strut)”, çekme bölgelerindeki gerilmeler ise “çekme çubukları (tie)” tarafından taşınmaktadır. Beton basınç ve çekme çubuklarının birleşim noktalarına “düğüm noktası (node)” denilmektedir. Strut, tie ve node’lar birleşerek strut-and-tie modelini (STM) oluşturmaktadır (Birrcher ve ark., 2009). Tekil bir kuvvet etkisi altında basit mesnetli bir yüksek kirişte örnek bir STM modeli Şekil 3.4.’te gösterilmiştir.

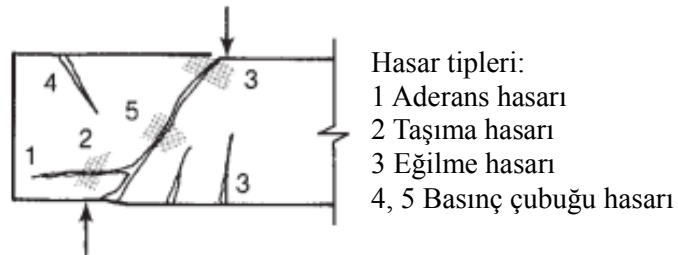


Şekil 3.4. Yüksek kirişlerde örnek bir strut-and-tie modeli (Wight, 2016).

Klasik kirişlerden farklı olarak yüksek kirişler, kesme kuvvetlerini mesnetlere kesme gerilmelerinden ziyade basınç gerilmeleri ile aktarırlar. Betonun çatlamasından önce yüksek kirişte elastik gerilmeler hâkimdir. Eğik çatlaklar (diagonal cracks) klasik kiriş

davranışını oluşturan eğik asal çekme gerilmelerini elimine ederek, iç gerilmelerin yeniden dağılımına sağlar. Bu durum kirişin bağlı kemer (tied arch) gibi davranmasına yol açar. Kemer etkisi yükün mesnetlere direkt iletimini sağlayacak basınç çubuklarının (strut) oluşmasını içerir. Eğilme donatısı ise kemeri, mesnet noktalarında birbirine bağlayan bağ elemanları (tie) gibi davranır. Bundan dolayı kesme donatısı içermeyen klasik betonarme kirişlerden farklı olarak, yüksek kirişler eğik çatlağın oluşumundan sonra bile önemli bir rezerv kapasiteye sahiptirler (Metwally, 2015; Wight, 2016).

Güvenli bir STM’de, kafes kiriş elemanları, içindeki kuvvetleri aktarabilecek yeterli deformasyon kapasitesine sahip olmalı ve elemanlara etkileyen gerilmeler akma ya da plastik akış (yield or plastic flow) kapasitelerini aşmamalıdır. STM’de hasar genellikle; basınç çubukların kırılması (crushing of struts), düğüm noktalarının ezilmesi ve çekme çubuklarının akması ya da bu çubuklarda aderans kırılması şeklinde oluşmaktadır (Şekil 3.5.) (Birrcher ve ark., 2009; Wight, 2016).

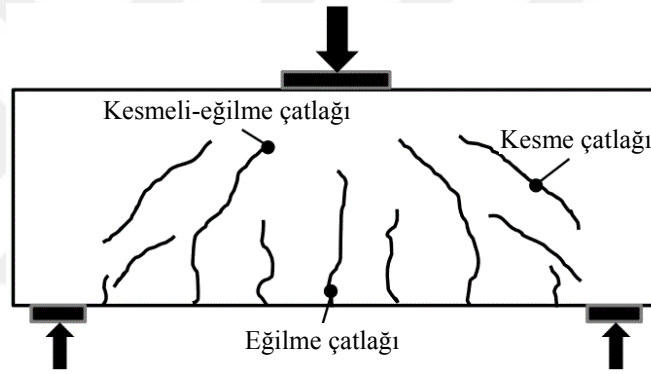


Şekil 3.5. Betonarme yüksek kirişlerde hasar mekanizmaları (Wight, 2016).

3.2. Betonarme Yüksek Kirişlerde Kesme Hasarı

Betonarme elemanların eğilme davranışını incelemek amacıyla günümüze kadar pek çok deneysel ve nümerik çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen bulgulara dayanarak eğilme çatlaklarının davranışına etki eden başlıca parametrelerin; donatı gerilmesi, beton kabuğu ve donatı aralığı olduğu belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar, yukarıda verilen parametrelerden “donatı çeliği gerilmesinin” eğilme çatlak davranışına etki eden en önemli parametre olduğunu göstermiştir (Wight, 2016).

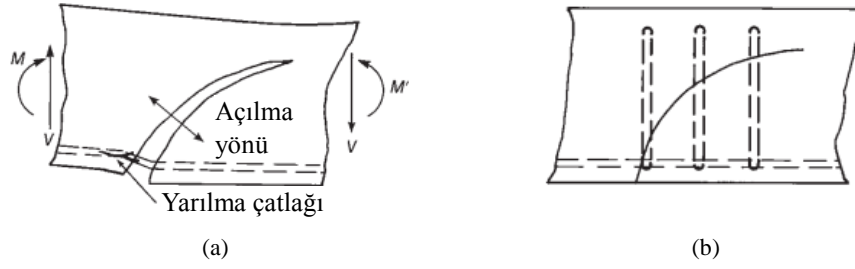
Bununla birlikte betonarme yüksek kirişlerde kesme etkisi, eğilmeye göre daha etkin ve kritiktir. Kesme etkisindeki bu elemanlar üzerinde; kesmeli-eğilme çatlakları (flexure-shear cracks) ve kesme çatlakları (web-shear / splitting cracks) olmak üzere iki temel eğik çatlak formu oluşur (Şekil 3.6.). Kesmeli-eğilme çatlakları, eğilme çatlaklarından sonra ya da eş zamanlı olarak oluşurlar. Bu çatlaklar eğilme çatlaklarının üzerinden uzayarak yüklemeye noktasına doğru ilerler. Kesme çatlakları ise eğilme çatlaklarından bağımsız olarak oluşur. Bu çatlaklar; elemanın gövdesindeki asal çekme gerilmelerinin, betonun çekme gerilmesini aştığı zaman meydana gelir. Özellikle basınç çubuklarındaki (strut) basınç gerilmelerinin artmasıyla oluşan enine çekme gerilmeleri nedeniyle oluşur. Ayrıca basınç çubuklarındaki, basınç gerilmeleri kesmeli-eğilme çatlaklarının ilerlemesine de yol açar (Birrcher ve ark., 2009).



Şekil 3.6. Betonarme yüksek kirişlerde oluşan kesme çatlakları tipleri (Birrcher ve ark., 2009).

Bu tez çalışması kapsamında betonarme yüksek kirişlerde kesme etkisi nedeniyle oluşan “kesmeli-eğilme” ve “kesme” çatlaklarının her ikisi birden “eğik çatlak” olarak adlandırılmıştır.

Kesme donatısı içermeyen betonarme klasik kirişler, eleman üzerinde eğik çatlakların oluşumundan kısa bir süre sonra gevrek kesme hasarına maruz kalır (Şekil 3.7.). Bu sebepten dolayı böyle bir elemanın kesme kapasitesi eğik çatlama yüküne eşit kabul edilir (Wight, 2016). Bu elemanlarda eğik çatlak genişliklerinin daha fazla açılmaması için enine donatılar (etriye) kesme donatısı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Şekil 3.7.).



Şekil 3.7. Bir betonarme kiriş üzerindeki eğik çatlak (a) ve etriye uygulaması (b) (Wight, 2016).

Betonarme yüksek kirişlerde ise, eleman yüksekliğinin fazla olması nedeniyle, kesite enine olarak yerleştirilen etriyelere ilave olarak kiriş gövdesinde yan yüzlere boyuna doğrultuda yerleştirilen donatılar uygulamada sıklıkla kullanılmaktadır (Kaplan ve Şenel, 2002). Yüksek kirişlerde kesme donatısı olarak kullanılan bu donatılara gövde donatısı denilmektedir. Bununla birlikte literatürde, yüksek kirişlere düşey ve yatay doğrultuda konulan kesme donatıları bir bütün olarak “gövde donatısı (web reinforcement)” olarak adlandırılmaktadır. Ancak ülkemizde gövde donatısı denilince sadece kesit gövdesine (yan yüzeylere) boyuna doğrultuda yerleştirilen donatılar anlaşılmaktadır. Bu karışıklığı gidermek amacıyla bu tez çalışması kapsamında, kiriş kesitine düşey doğrultuda yerleştirilen kesme donatısı “etriye”, yatay doğrultuda yerleştirilen kesme donatısı ise “gövde donatısı” olarak isimlendirilmiştir. Etriye oranı; ρ_v ve gövde donatısı oranı; ρ_h ile gösterilmiş olup, her ikisine birden “kesme donatısı (kesme donatısı oranı: ρ_w)” denilmiştir.

Bir önceki bölümdeki literatür özetinde belirtildiği gibi yüksek kirişlerin eğik kesme çatlak davranışına etki eden en önemli parametrelerden birisinin kesme donatısı oranı olduğu görülmektedir. Yatay ve düşeyde konulan kesme donatısı oranlarının eğik çatlak davranışına olan etkisi, a/d oranına göre değişmektedir. Düşük a/d oranlarında (< 1) eğik çatlak genişliklerinin sınırlandırılmasında, elemana boyuna doğrultuda konulan gövde donatısı daha etkin çalışır iken, a/d oranı arttıkça etriyelerin etkinliği giderek artmaktadır. Ancak yüksek kirişlerde eğik çatlak genişliklerinin sınırlandırılması için mutlaka elemana etriye ve gövde donatısının birlikte konulması gerekmektedir. Ayrıca, yüksek kirişlerde belirli bir etriye ve gövde donatısı oranının üzerinde, çatlak genişliklerinin sınırlandırılması için elemandaki kesme donatısının artırılması, istenilen verimde etki oluşturmamaktadır. Kesme etkisi ön planda olan

betonarme yüksek kirişlerde asal çekme gerilmelerinden oluşan eğik çatlakların ani ve gevrek kırılmaya neden olabileceği gözardı edilmemelidir. Bundan dolayı mevcut yüksek kiriş elemanların eğik çatlak hasarlarının sürekli olarak takip edilmesi oldukça önemli bir husustur (Birrcher ve ark., 2009). Bu tez çalışması kapsamında, betonarme yüksek kirişlerin kesme etkisi altındaki eğik çatlak davranışı deneysel ve nümerik olarak incelenmiş olup, mevcut çatlak genişliği ile eleman artık yük taşıma kapasitesi arasındaki ilişkiyi veren bir formül önerilmiştir. Bu sayede, literatürde ve uygulama da mevcut bulunan ihtiyacın giderilmesine önemli katkılar sağlanmıştır.



BÖLÜM 4. DOĞRUSAL OLMAYAN SONLU ELEMANLAR METODU

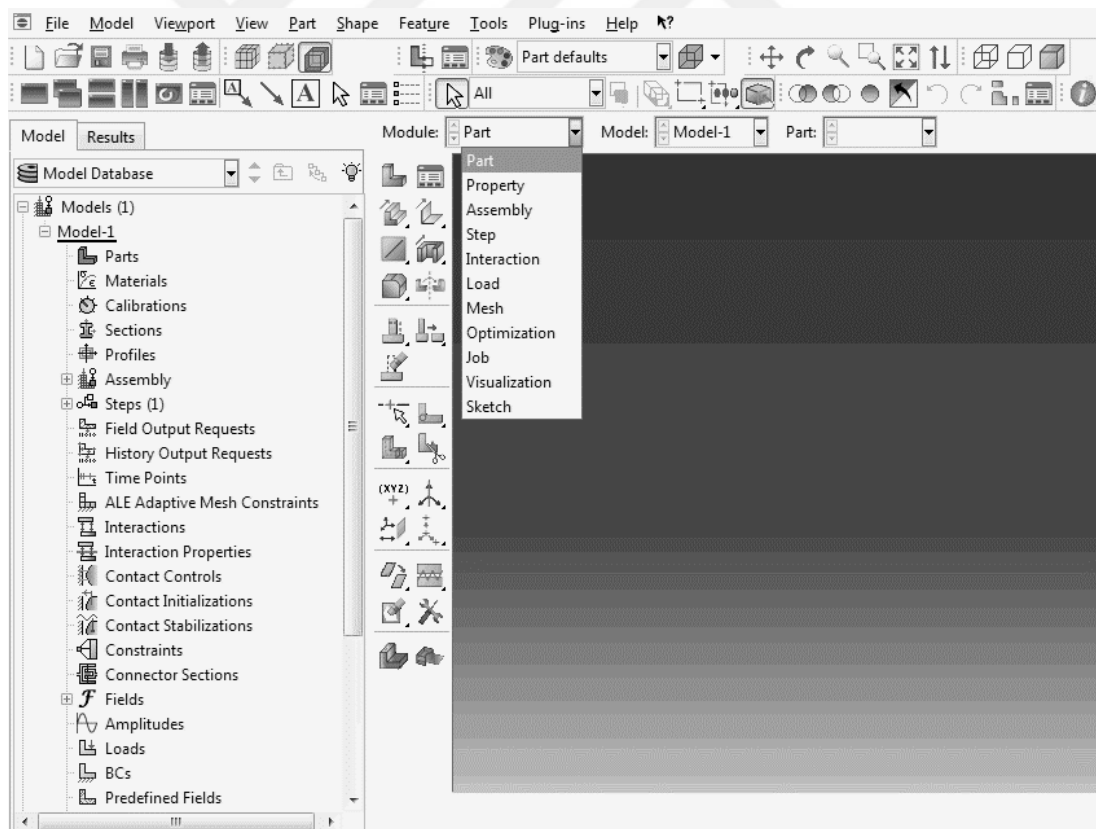
Sonlu elemanlar (SE) metodu, gelişen bilgisayar teknolojisi ile birlikte pek çok mühendislik problemlerine gerçekçi çözümler üreten sayısal/nümerik çözüm yöntemlerinden birisidir. SE metodu ilk olarak Courant (1943) tarafından 1943 yılında titreşim sistemlerine uygulanmıştır. Metot daha sonra farklı mühendislik uygulamalarında da kullanılmaya başlanması ile birlikte giderek yaygınlaşmıştır (Ngo ve Scordelis, 1967; Nilson, 1968; Chen, 1982; Ramadan, 1987). Bu yöntemde fiziksel bir sistem küçük sonlu elemanlara/parçalara bölünmekte ve bu elemanlara ait alt çözüm bölgeleri oluşturulmaktadır. Bu sonlu parçalar 1, 2 veya 3 boyutlu olabilmekte ve birbirlerine düğüm noktası (node) denilen noktalar ile bağlanmaktadır. Bu şekilde; geometrisi, malzeme davranışı, yükleme ve sınır şartları karmaşık yapısal elemanlar, sayısal olarak modellenilebilmekte ve bu sayede de karmaşık mühendislik problemlerin çözümüne imkan sağlanmaktadır (Khennane, 2013).

SE metodu; zorluk, zaman, iş gücü ve maliyet açısından deneysel çalışmalar ile karşılaştırıldığında oldukça avantajları olan alternatif bir bilimsel çalışma tekniğidir. Günümüzde SE metodu, betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışının incelenmesinde bilim insanları tarafından sıklıkla kullanılmaktadır. Metodun güvenilirliği gerçekleştirilen pek çok bilimsel çalışma ile de ispatlanmıştır (Fafitis ve Won, 1994; Enem ve ark., 2012; Riveros ve Gopalaratnam, 2013; Demir ve ark., 2016a). Ancak SE'de gerçekçi sonuçların elde edilebilmesi, doğru nümerik modelleme tekniği ve gerçekçi malzeme modellerinin kullanılmasına bağlıdır. Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen SE çalışması ile betonarme yüksek kiriş davranışının nümerik olarak gerçekçi bir şekilde modellenilebilmesi için gerekli nümerik modelleme tekniği ve malzeme modellerinin oluşturulması gösterilmiştir.

4.1. Kullanılan Sonlu Elemanlar Programı

Bu tez çalışmasında numerik modelleme için ABAQUS (2018) sonlu elemanlar ticari yazılımı kullanılmıştır. ABAQUS yapı ve yapısal sistemlerin statik ve dinamik davranışlarının modellenmesinde ve pek çok doğrusal ve doğrusal olmayan problemin çözümünde kullanılan bir sonlu elemanlar yazılımıdır (Hibbit ve ark., 2013). Ayrıca bu program inşaat mühendisliği problemlerinin çözümünde de yaygın olarak kullanılmaktadır (Khennane, 2013; Öztürk, 2016; Demir ve ark., 2016a).

ABAQUS programında yapısal bir sistemin nümerik modeli; sistemin geometri, malzeme, sınır şartları ve birleşim/temas özelliklerinin program arayüzünde farklı modüller (module) altında tanımlanması ve birleştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Ayrıca bu modüllere ağaç menü (expression tree) ile de erişilebilmektedir (Şekil 4.1.).



Şekil 4.1. ABAQUS kullanıcı ara yüzü.

Program ara yüzünde bulunan modüller altında temel olarak şu işlemler yapılabilmektedir;

- Part module: Sistemi oluşturan parçaların geometrik olarak oluşturulması,
- Property module: Malzeme ve kesit özelliklerinin tanımlanması ve parçalara atanması,
- Assembly module: Parçaların birleştirilerek genel sistem modelinin oluşturulması,
- Step module: Analiz yönteminin seçilmesi,
- Interaction module: Sistemi oluşturan parçaların temas eden yüzeylerinin ve temas özelliklerinin (contact properties) tanımlanması,
- Load module: Sistemin yükleme durumu ve sınır şartlarının oluşturulması,
- Mesh module: Sistemin sonlu parçalara (mesh) ayrılması ve sonlu parça özelliklerinin tanımlanması,
- Job module: Analiz işleminin gerçekleştirilmesi,
- Visualization module: Analiz sonuçlarının görüntülenmesi.

ABAQUS programında modelin oluşturulması ve malzeme özelliklerinin tanımlanması aşamalarında girilen sayısal veriler için bir birim seçme özelliği bulunmamaktadır. Bunun yerine programda yerleşik (önceden tanımlı) ve tutarlı birim sistemleri mevcuttur (Tablo 4.1.). Programa girilecek sayısal verilerin önceden tanımlı bu birim sistemlerinden herhangi birisi seçilerek girilmesi gerekmektedir. Program, girilen veriye göre analiz sonuçlarını aynı birim sistemine göre görüntülemektedir. Bu tez çalışması kapsamında “SI (mm)” birim sistemi kullanılmıştır.

Tablo 4.1. ABAQUS programında mevcut tutarlı birim sistemleri (Hibbitt ve ark., 2013).

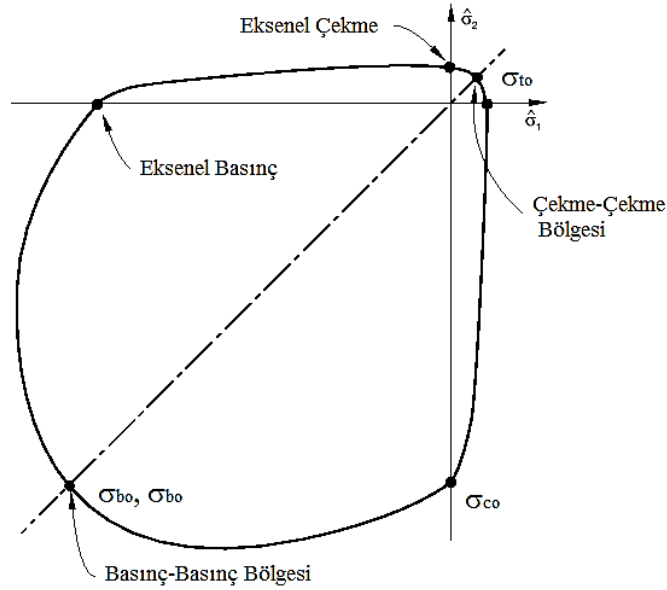
| Ölçü Birimi | SI | SI (mm) |
|-------------|------------------------|--------------------------|
| Uzunluk | m | mm |
| Kuvvet | N | N |
| Kütle | kg | ton |
| Zaman | S | s |
| Gerilme | Pa (N/m ²) | MPa (N/mm ²) |
| Enerji | J (N x m) | mJ (10 ⁻³ J) |
| Yoğunluk | kg/m ³ | ton/m ³ |

4.2. Beton Malzeme Modeli

Bu tez çalışmasında, betonun doğrusal olmayan davranışını tanımlamak için beton hasar plastisite (BHP) malzeme modeli kullanılmıştır. ABAQUS programında hazır olarak bulunan BHP modeli; tüm yapı tipleri için, beton gibi gevrek malzemeleri gerçekçi bir şekilde modelleyebilme yeteneğine sahiptir. Bu model; izotropik çekme ve basınç plastisitesi içeren izotropik hasar elastisitesini dikkate almaktadır. Bununla birlikte BHP modeli; basınç ve çekme etkisi altında plastik birim şekildeğiştirmelerden kaynaklanan elastik rijitliklerdeki azalmayı da dikkate almaktadır (Hibbitt ve ark., 2013). BHP modeli ilk olarak Lublinear ve arkadaşları (1989) tarafından monotonik yükleme için önerilmiştir. Daha sonra Lee ve Fenves (1998) tarafından dinamik ve çevrimsel yükleme etkilerinin dikkate alınabilmesi için geliştirilmiştir.

BHP modelinde betonun basınç ve çekme etkisi altındaki elastik sınırları bir akma (kırılma) yüzeyi ile belirlenir (Şekil 4.2.). Akma yüzeyi, 4 farklı oran ile tanımlanmakta olup bu oranın ilk ikisi; 2 eksenli basınç gerilmesi maksimum değerinin 1 eksenli basınç gerilmesi maksimum değerine oranı ve 1 eksenli çekme gerilmesinin 1 eksenli maksimum basınç gerilmesine oranının mutlak değeri olarak tanımlanmaktadır. Diğer iki oran ise; 2 eksenli basınç gerilmesinde oluşan asal plastik şekildeğiştirme değerinin 1 eksenli basınç gerilmesinde oluşan maksimum şekildeğiştirme değerine oranı ve düzlem gerilme durumunda çatlama anındaki asal çekme gerilmesinin 1 eksenli çekme durumundaki çekme maksimum gerilmesine oranıdır (Hibbitt ve ark., 2013; Öztürk, 2016).

ABAQUS programında, BHP modelinin oluşturabilmesi için girilmesi zorunlu bazı temel parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler betonun akma yüzeyinin oluşturulabilmesi için gerekli olup ilgili parametreler, varsayılan (default) değerleri ve tanımları ile birlikte Tablo 4.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Betonun iki eksenli akma yüzeyi (Öztürk, 2016).

Beton gevrek bir malzeme olup elastik limitinin ötesinde çatlak ve çatlak yüzeylerindeki kaymalardan kaynaklanan hacimsel değişime maruz kalmaktadır. Gevrek malzemelerdeki bu hacimsel değişime genellikle dilasyon (genleşme) denilmektedir. Betonarme elemanlardaki sargı basıncı, betonun dilasyon karakteristiği ile fazlaca etkilenmektedir. Bundan dolayı dilasyon, betonun basınç etkisindeki gerilme – birim şekildeğiştirme davranışı üzerinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Malzemedeki bu hacimsel değişim sayısal olarak bir açı ile temsil edilmekte ve bu açıya dilasyon açısı (ψ) denilmektedir. Dilasyon açısının büyük değerlerinde, betonda daha rijit gerilme – birim şekildeğiştirme ilişkisi gözlenmekte ve bu durum eleman üzerinde daha fazla sargı etkisine yol açmaktadır (Grassl, 2004). Bu sebeplerden dolayı betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışlarının nümerik olarak modellenmesinde ψ değerinin gerçekçi olarak tespit edilmesi oldukça önemlidir. Literatürde dilasyon açısı için birbirinden farklı değerler önerilmektedir. Bu değerler; eleman boyutu, sargı etkisi ve malzeme özelliklerine göre değişmekte ve farklı betonarme elemanlarda birbirinden farklı değerler alabilmektedir. Bu sebeple dilasyon açının gerçekçi olarak tespiti için parametrik çalışma yapılması literatürde en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisidir (Mercan ve ark., 2010; Szczecina ve Winnicki, 2016). Ayrıca literatürde betonarme yüksek kirişlerin nümerik modellemesinde, beton malzemesi için dilasyon açısının 50° civarında alınmasının

oldukça gerçekçi sonuçlar verdiği belirtilmiştir (Demir ve ark., 2016b; 2017). Bununla birlikte dilasyon açısı için ABAQUS programında $0 \sim 56,3^\circ$ arasında bir değer girilmesi zorunludur. Bu aralıktan farklı bir değer girildiğinde, program analizi başlatmayarak hata vermektedir.

Tablo 4.2. BHP modeli akma yüzeyi parametreleri (Hibbitt ve ark., 2013).

| Parametre | Varsayılan Değer | Tanım |
|---------------------------|------------------|---|
| ψ | - | Dilasyon açısı, maksimum değer = $Atan(3/2)$ |
| ϵ | 0,1 | Akma yüzeyi eksantrisitesi |
| σ_{b0}/σ_{c0} | 1,16 | Başlangıç aksenal basınç akma gerilmesinin başlangıç aksenal basınç gerilmesine oranını |
| K | 2/3 | Çekme fonksiyonu üzerindeki ikincil sabit gerilme oranı |
| μ | 0 | Vizkozite parametresi |

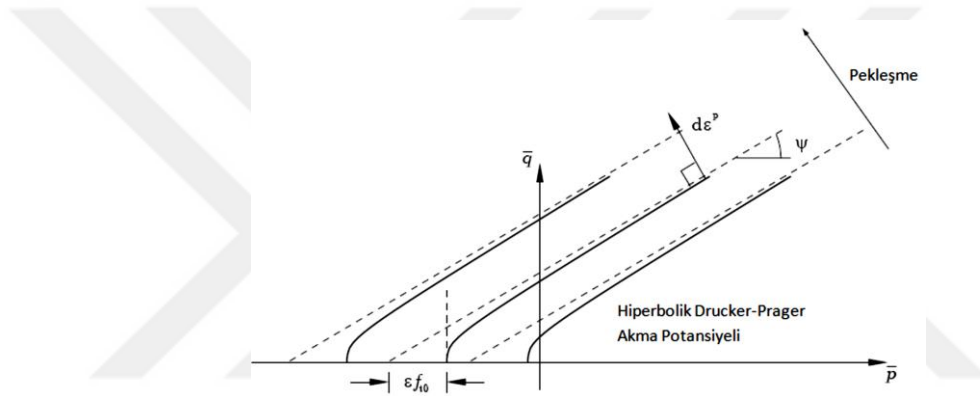
Kapalı (implicit) analiz yöntemlerinde doğrusal olmayan malzeme modelleri, malzemenin yumuşama ve rijitlik azalması davranışlarından dolayı büyük yakınsama problemleri (convergence) yaşayabilmektedir. Literatürde, malzeme modellerine vizkoplastik regülasyon uygulanmasının bu yakınsama problemlerini azaltacağı belirtilmiştir. ABAQUS programında vizkoplastik regülasyon, vizkozite parametresi BHP malzeme modeli ile birlikte tanımlanmaktadır (Hibbitt, 2013). Vizkozite parametresinin ABAQUS programındaki varsayılan (default) değeri 0 olarak verilmiştir. Bu değer, BHP malzeme modeline vizkoplastik regülasyon yapılmayacağı anlamına gelmektedir. Vizkozite parametresinin 0'dan farklı değer olarak tanımlanması ile malzeme modeline vizkoplastik regülasyon uygulanmaktadır. Ancak literatürde gerçekleştirilen çalışmalarda; vizkozite parametresinin aşırı artırılmasının analiz süresini kısaltması ile birlikte, sonuçların doğruluğunu azalttığı belirtilmiştir (Ma ve ark., 2012; Ren ve ark., 2015). Bu sebeple şayet nümerik modelde malzemeye vizkoplastik regülasyon uygulanmadan ($\mu = 0$) analizde yakınsama elde edilemiyorsa literatürde önerilen değerler de dikkate alınarak, parametrik bir çalışma ile vizkozite parametresinin optimum değeri belirlenebilmektedir.

BHP modelinde plastik akma potansiyeli ile plastik şekildeğiştirme arasındaki ilişki Drucker-Prager fonksiyonu kullanılarak tanımlanmaktadır (Şekil 4.3.). Bu fonksiyon Denklem 4.1 ile ifade edilmektedir. Drucker-Prager fonksiyonu elasto-plastik bir malzeme modeli olup gevrek malzemeler için doğrusal olmayan davranışı dikkate

almaktadır. Basınç gerilmeleri altında ezilme ve çekme gerilmeleri altında çatlama davranışı kohezyon ve içsel sürtünme açısına bağlı olarak tanımlanmaktadır (Myh, 1989; Öztürk, 2016).

$$G = \sqrt{(\epsilon \cdot \sigma_{to} \tan \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \cdot \tan \psi \quad (4.1)$$

Burada; ψ : dilasyon açısı, ϵ : akma yüzeyi eksantirisitesi, σ_{to} : aksel çekme gerilmesi, \bar{q} : eşdeğer mises etkili gerilmesi ve \bar{p} : hidrostatik basınç gerilmesi olarak tanımlanmaktadır (Sümer, 2010).



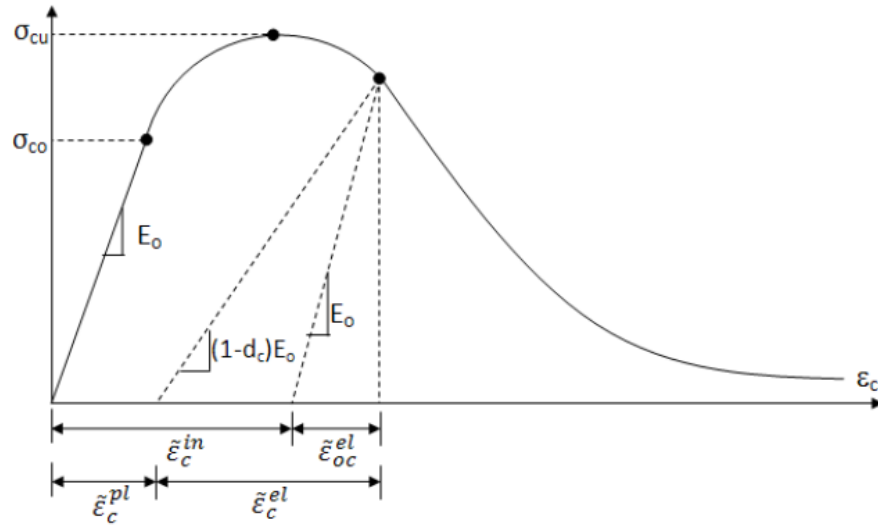
Şekil 4.3. Drucker-Prager plastik akma potansiyeli fonksiyonu (Sümer, 2010; Hibbitt ve ark., 2013).

ABAQUS programında, BHP malzeme modelinin oluşturulması için ayrıca betonun basınç ve çekme etkisi altındaki malzeme davranış modellerinin tanımlanması gerekmektedir. Bu davranış gerilme – birim şekildeğiştirme ($\sigma - \epsilon$) davranışı olarak temsil edilmekte ve en gerçekçi olarak malzeme deneylerinden elde edilmektedir. Bununla birlikte, literatürde betonun bu davranışı için pek çok sayısal beton malzeme modeli de bulunmaktadır (Hognestad, 1951; Mander ve ark., 1988; FIB MC2010, 2010). Deneysel çalışmaların zorluk, zaman, maliyet, iş gücü vb. açılardan getirdiği kısıtlardan dolayı literatürde gerçekleştirilen çalışmaların çoğunluğunda mevcut sayısal beton malzeme modellerinin daha yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Gerçekleştirilen çalışmalarda sayısal modellerin betonun basınç ve çekme etkisi altındaki davranışlarının nümerik olarak modellenmesinde oldukça başarılı sonuçlar verdiği gösterilmiştir (Birtel ve Mark, 2006; Kamali, 2012; López-Almansa ve ark., 2014; Demir ve ark., 2016a). Bu sebeple bu tez çalışması kapsamında da basınç ve

çekme etkisi altındaki betonun $\sigma - \varepsilon$ davranışının nümerik olarak modellenenilmesi için literatürde önerilen mevcut sayısal modeller kullanılmıştır. Kullanılan modeller aşağıda anlatılmıştır.

Eksenel basınç durumunda betonun gerilme – birim şekildeğiştirme ($\sigma_c - \varepsilon_c$) davranış grafiği Şekil 4.4.'te gösterilmektedir. σ_{c0} değerine kadar betonun davranışının elastik olduğu kabul edilerek, bu noktaya kadar olan birim şekildeğiştirme değerleri gerilme değerlerinin başlangıç elastisite modülüne (E_0) bölünmesi ile elde edilmektedir. Bu noktaya kadar betonda herhangi bir çatlama oluşmamaktadır. Literatürde bu noktanın maksimum beton basınç dayanımının ($\sigma_{cu} = f_{ck}$) % 30-60'ı civarında olduğu kabul edilmektedir (Doğangün, 2012). Bu değer aşılmasından sonra eleman üzerinde çatlaklar oluşmaya başlamakta ve σ_{cu} değerinin aşılması ile birlikte çatlakların yayılması hızlanmaktadır. Uygulanan yükün artması ile birlikte σ_{cu} değerinin aşılması sonrası birim şekildeğiştirme değerleri hızla artacak ve gerilme değerleri giderek azalacaktır. Betonun maksimum basınç gerilmesinden sonraki bu davranışına basınç yumuşaması denilmektedir (Hibbitt ve ark., 2013). Bu tez çalışmasında betonun σ_{c0} ile σ_{cu} arasında kalan $\sigma_c - \varepsilon_c$ davranış grafiği FIB MC2010 kullanılarak elde edilmiştir.

Bununla birlikte betonun basınç ve çekme etkisi altındaki maksimum gerilme sonrası davranışı mesh (çözüm ağı) özelliklerine oldukça hassastır. Bundan dolayı, betonun basınç yumuşaması davranışının sayısal modelinin oluşturulmasında mesh boyutunun dikkate alınmasının daha faydalı olacağı belirtilmiştir (Hillerborg, 1989; Van Mier, 1986). Bu tez çalışmasında betonun maksimum basınç gerilmesi sonrası davranışının sayısal olarak modellenmesi için Van Mier (1984) tarafından önerilen ve Vonk (1993) tarafından geliştirilen sayısal malzeme modeli kullanılmıştır. Bu malzeme modeli, maksimum gerilme sonrası betonun basınç davranışının oluşturulmasında çözüm ağı boyutunu da dikkate aldığı için nümerik modelde oluşabilecek mesh hassasiyetini azaltmaktadır.



Şekil 4.4. Betonun basınç davranışı (Hibbitt ve ark., 2013).

ABAQUS programında, betonun aksenal basınç etkisi altındaki davranışı, elastik davranışın bittiği σ_{c0} noktasından sonraki gerilme – inelastik birim şekildeğiştirme ($\sigma_c - \varepsilon_c^{in}$) davranışı cinsinden tanımlanması istenilmektedir. Bu sebeple betonun sayısal malzeme modeli kullanılarak elde edilen ε_c değerlerinin ε_c^{in} değerlerine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu dönüşüm Denklem 4.2 kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Kamali, 2012).

$$\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (4.2)$$

ABAQUS programında, modele tanımlanan betonun $\sigma_c - \varepsilon_c^{in}$ davranışı kullanılarak nümerik modeldeki malzemenin gerilme değerleri Denklem 4.3 ile ve plastik birim şekildeğiştirme değerleri (ε_c^{pl}) ise Denklem 4.4 ile programın kendisi tarafından hesaplanmaktadır.

$$\sigma_c = (1 - d_c) \cdot E_0 \cdot (\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl}) \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_c^{pl} = \varepsilon_c^{in} - \frac{d_c}{(1 - d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (4.4)$$

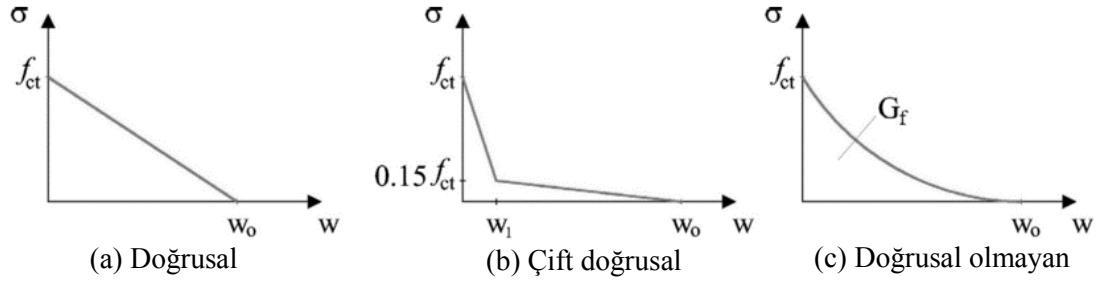
Denklemlerde; d_c : betonun basınç etkisi altındaki hasar parametresini göstermektedir. Bu parametre betonun, maksimum gerilme değerinden sonraki davranışında, gerilmenin zayıfladığı kısımdaki herhangi bir noktadan geri yükleme (unloading) yapıldığı durumlardaki elastik rijitlikteki azalmayı temsil etmektedir. Bu durum betonun yumuşama davranışı olup, plastik birim şekildeğiştirmenin bir fonksiyonudur. Hasar parametresi betonun çevrimsel (cyclic) yükleme altındaki davranışını temsil ettiği gibi, statik benzeri (quasi-static) yükleme durumlarında, herhangi bir yükleme adımında eleman üzerindeki hasarın farklı lokasyonda ilerlemesi sonucu mevcut çatlakların geri kapanmasında da etkisini göstermektedir. Bundan dolayı statik benzeri yükleme durumlarında betonun malzeme modelinde hasar parametresinin tanımlanması nümerik modelin performansını arttırmaktadır. Betonun basınç etkisindeki elastik rijitliklerindeki azalma, çekme etkisi durumunda da oluşmakta ve çekme etkisindeki hasar parametresi d_t ile gösterilmektedir. Betonun çekme ve basınç etkisi altındaki hasar parametrelerinin davranışları birbirlerinden oldukça farklıdır. Hasar parametreleri 0 ile 1 arasında değişen değerler almakta ve 0, hasarsız durumu, 1 ise tam hasarlı durumu (güç tükenmesi/failure) temsil etmektedir (Hibbitt ve ark., 2013). Eksenel basınç durumunda hasar parametresi (d_c) Denklem 4.5 ile hesaplanabilmektedir (Kamali, 2012).

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c/E_0}{\sigma_c/E_0 + \varepsilon_c^{in}(1 - b_c)} \quad (4.5)$$

Burada, $b_c = \varepsilon_c^{pl}/\varepsilon_c^{in}$ olup, literatürde beton için 0,5 ~ 0,7 arasında bir değer alınabileceği belirtilmiştir (Krätzig ve Pölling, 2004; Birtel ve Mark, 2006).

Eksenel çekme durumunda ise gerilme – birim şekildeğiştirme ($\sigma_t - \varepsilon_t$) davranışı maksimum çekme gerilmesi ($\sigma_{t0} = f_{ctk}$) değerine kadar elastik bir davranış göstermektedir (Şekil 4.5.). σ_{t0} değerine karşılık gelen birim şekildeğiştirme değeri (ε_{t0}), maksimum gerilmenin başlangıç elastisite modülüne (E_0) bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Maksimum çekme gerilmesi değerine ulaşıldığında betonda çekme çatlakları oluşmaktadır. Çatlakların oluşması ve ilerlemesi ile birlikte, gerilme değerleri hızla azalmakta ve elemanda ani ve gevrek bir davranış gözlenmektedir. (Hibbitt ve

(fracture energy) olup birim alanda çatlak oluşumu için gerekli olan enerjiyi temsil etmektedir. Bu çalışmada kullanılan G_f değerleri FIB MC2010 yönetmeliğinde verilen bağıntılar ile hesaplanmıştır.



Şekil 4.6. Betonun çatlama sonrası çekme davranışı (Demir ve ark., 2016a).

Betonun basınç davranışında olduğu gibi, çekme yumuşaması davranışı da mesh özelliklerine oldukça hassastır. Bu hassasiyetin giderilmesi için literatürde betonun çekme davranışının $\sigma_t - \epsilon_t$ yerine, gerilme – çatlak genişliği ($\sigma_t - w$) davranışının tanımlanması tavsiye edilmektedir. Bu sayede modelin mesh hassasiyeti azaltılabilmektedir (Hillerborg ve ark., 1976; Karayannis, 2000). Bu tez çalışmasında betonun σ_{t0} değerine kadar olan elastik davranışının elde edilmesinde FIB MC2010 (2010) sayısal malzeme modeli kullanılmıştır. Çatlama sonrası doğrusal olmayan çekme yumuşaması davranışı için ise Hordijk (1992) tarafından önerilen çekme davranış modeli kullanılmıştır. Bu model ile betonun çekme yumuşaması davranışı doğrudan $\sigma_t - w$ olarak hesaplanabilmektedir.

ABAQUS programında betonun çekme etkisindeki davranışının modellenmesi için programa elemanın çatlama sonrası davranışının ($\epsilon_t > \epsilon_{t0}$) tanımlanması gerekmektedir. Çatlama öncesi elastik davranışın girilmesine gerek yoktur. Programa girilen malzeme modeline göre betonun çekme etkisinde oluşan gerilme değerleri Denklem 4.6 ile ve plastik birim şekil değiştirme değerleri (ϵ_t^{pl}) ise Denklem 4.7 ile programın kendisi tarafından hesaplanmaktadır (Hibbitt ve ark., 2013).

$$\sigma_t = (1 - d_t) \cdot E_0 \cdot (\epsilon_t - \epsilon_t^{pl}) \quad (4.6)$$

$$\varepsilon_t^{pl} = \varepsilon_t^{ck} - \frac{d_t}{(1 - d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (4.7)$$

Burada; d_t : betonun çekme etkisi altındaki hasar parametresini göstermekte olup Denklem 4.8 ile hesaplanabilmektedir. ε_t^{ck} : çatlama sonrası inelastik birim şekildeğiştirme değeri olup Denklem 4.9 ile hesaplanabilmektedir (Kamali, 2012; López-Almansa ve ark., 2014). Denklemlerde yer alan b_t değeri için literatürde 0,1~0,7 arasında bir değer alınabileceği belirtilmiştir. Betonun çekme etkisindeki birim şekildeğiştirme değeri (ε_t) Denklem 4.10 ile hesaplanabilmekte olup, bu denklemde l_{eq} mesh boyutunu göstermektedir (Birtel ve Mark, 2006; Kamali, 2012).

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_{t0}/E_0}{\sigma_{t0}/E_0 + \varepsilon_t^{ck}(1 - b_t)} \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_t^{ck} = \varepsilon_t - \sigma_{t0}/E_0 \quad (4.9)$$

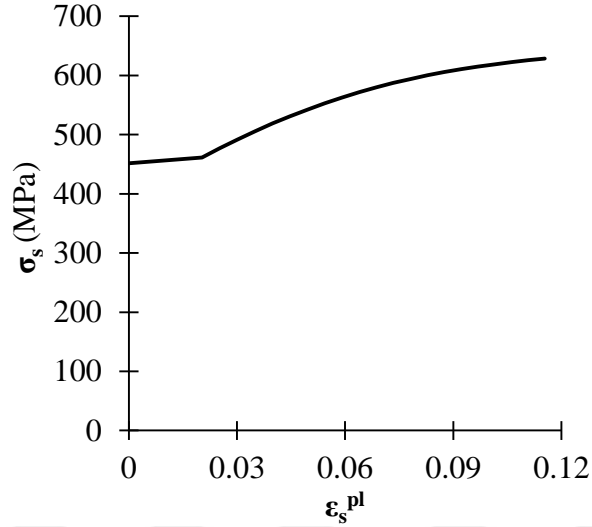
$$\varepsilon_t = \varepsilon_{t0} - w/l_{eq} \quad (4.10)$$

Betonun poisson oranının tespiti için literatürde Klink (1985) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada önerilen bağıntılar kullanılmıştır. Bu bağıntılar kullanılarak yapılan hesaplamalarda poisson oranı beton basınç dayanımına göre değişmektedir. Bu şekilde betonun poisson oranının daha gerçekçi olarak tespit edilebildiği belirtilmiştir.

4.3. Donatı Malzeme Modeli

Donatı çeliğinin malzeme davranışı gerilme birim şekildeğiştirme ($\sigma_s - \varepsilon_s$) olarak tanımlanmaktadır. Bu davranışın elde edilmesi için literatürde Mander ve arkadaşları (1984) tarafından önerilen ve Pipa (1993) tarafından geliştirilen pekleşmeyi de dikkate alan sayısal donatı çeliği malzeme modeli kullanılmıştır. $\sigma_s - \varepsilon_s$ davranışı, birim uzama sırasında oluşan kesit kaybının da dikkate alınabilmesi amacıyla “gerçek gerilme – gerçek birim şekildeğiştirme (true stress – true strain)” davranış grafiğine

dönüştürülmüştür (Kamali, 2012). Bu malzeme davranışının ABAQUS programına, gerilme – plastik birim şekildeğiştirme davranışı ($\sigma_s - \epsilon_s^{pl}$) olarak tanımlanması gerekmektedir. Bu sebeple elastik kısım grafikten çıkartılarak Şekil 4.7.'de örnek olarak gösterilen grafikteki gibi plastik donatı davranışı programa tanımlanmıştır. Bu tez çalışması kapsamında donatıların poisson oranı sabit 0,30 alınmıştır.



Şekil 4.7. Örnek bir donatı gerilme –plastik birim şekildeğiştirme grafiği.

4.4. Beton ve Donatı Arasındaki Etkileşim

Nümerik modelde beton ve donatı arasındaki etkileşimi tanımlamak için, iki malzeme arasında tam aderansı dikkate alan gömülü (embedded) donatı modeli yaklaşımı kabul edilmiştir. Bu yaklaşımda, nümerik model üzerinde gömülü elemanın serbestlik dereceleri, gömüldüğü elemana (host region) doğrudan bağlanmakta ve bu elemanların beraber hareket ettiği kabul etmektedir (Hibbitt ve ark., 2013).

4.5. Nümerik Modelleme, Yük ve Sınır Şartları

Sonlu elemanlar modelinin mesnetlenme koşulları deney düzeneğine benzer şekilde, mesnetlerden birisi sabit diğeri hareketli olacak şekilde oluşturulmuştur. Deney düzeneğinde numune, mesnetlerde çelik plakalar üzerine oturmakta olup, yük veren ile numune arasına da çelik plakalar yerleştirilmiştir. Bu çelik plakaların yeterli

kalınlık ve dayanıma sahip olması ve yükleme esnasında şekil değiştirme yapmaması deney düzeneğinin stabilitesi açısından oldukça önemlidir. Bu plakalar sayesinde ayrıca yükleme ve mesnet noktalarında gerilme yığılmalarının önlenmesi hedeflenmektedir. Bu tez çalışmasında, SE modellerinde deney düzeneğine benzer şekilde yük ve mesnet noktalarında plakalar oluşturulmuştur. Bu plakalar nümerik modelde “analitik sonsuz rijit (analytically rigid)” elemanlardan oluşturulmuştur. Analitik rijit elemanlar, nümerik olarak sonsuz rijit olup şekil değiştirme yapmamaktadır. Ayrıca nümerik modelde bu elemanlar için malzeme ve mesh özelliklerinin tanımlanması da gerekmemektedir. Bu elemanlar şekil değiştirme yapabilen diğer elemanlarla her türlü yüzey teması ve birleşimi yapabilmekte, üzerine gelen kuvvet ve yer değiştirme değerlerini, şekil değiştirmeden aktarabilmektedir. Analizlerde bu elemanlar için gerilme, birim şekil değiştirme vb. hesaplar yapılmamaktadır. Bu durum nümerik modelin denklem çözüm takımını küçültmekte ve analiz süresini oldukça kısaltmaktadır. Bu sayede modelin yakınsama (convergence) yeteneğini de artmaktadır. Literatürde, nümerik model üzerinde diğer elemanlara göre rijitlik ve dayanımı oldukça fazla olan, şekil değiştirme yapması beklenmeyen ve üzerinde oluşacak gerilme değerleri ile ilgilenilmeyen elemanların (deney düzeneğini oluşturan parçalar, kalıplar vb.) analitik rijit elemanlar ile modellenmesi tavsiye edilmektedir. Bu sayede model oluşturulması aşamasında bu elemanların malzeme ve mesh özelliklerinin tanımlanması gerekmediğinden daha hızlı model oluşturulabilmekte ve hızlı çözüm elde edilebilmektedir (Hibbitt ve ark., 2013).

Nümerik modelde numune ile yük ve mesnet plakaları arasında kalan temas yüzeyleri, “bağ sınır şartı (tie constraint)” tanımlanarak birbirlerine bağlanmıştır. Bağ sınır şartında temas yüzeylerinin serbestlik dereceleri sayısal olarak birbirlerine bağlanarak yüzeyler beraber hareket etmektedir. Bağ sınır şartı, diğer birleşim türlerine (kaba temas, sürtünmeli temas, normal temas, kayma teması vb.) göre analitik çözümü daha kolay olup nümerik modelin çözüm hızını arttırmaktadır (Hibbitt ve ark., 2013). Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmada, numunenin göçme noktasına ulaşmasına kadar geçen sürede yük ve mesnet plakalarının numune üzerindeki konumlarında herhangi bir kayma hareketi oluşmamış ve plakalarda şekil

değiştirme gözlenmemiştir. Bu sebeple nümerik modellerde numune ile yük ve mesnet plakaları arasına bağ sınır şartı tanımlanmıştır.

SE modelinde yük, yer değiştirme kontrollü olarak uygulanmıştır. Bu yükleme tipi nümerik modelin yakınsama performansının artmasına katkı sağladığı için literatürde oldukça yaygın olarak tercih edilmektedir (Kamali, 2012; Demir ve ark., 2016a) .

Sonlu elemanlar modeli 1, 2 ve 3 boyutlu (3D) olarak oluşturulabilmektedir. Analitik sonuçların gerçekliğinin arttırılabilmesi amacıyla bu tez çalışması kapsamında 3D modelleme tekniği uygulanmıştır. Çözüm ağında beton; 3 yer değiştirme serbestlik dereceli, 8-düğüm ve 1 azaltılmış integrasyon noktalı, doğrusal 3D kübik (C3D8R) sonlu elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Donatı çubukları ise aksel doğrultuda tek serbestlik dereceli, 2-düğüm noktalı, doğrusal 3D çubuk (T3D2) sonlu eleman parçaları ile modellenmiştir. SE metodunda nümerik analiz sonuçları mesh boyutlarına oldukça hassastır. Bu sebeple doğru mesh boyutunun seçilmesi gerçekçi sonuçların elde edilebilmesi açısından önemlidir. Literatürde, beton davranışının nümerik olarak gerçekçi bir şekilde modellenmesi için “büyük/kaba (coarse)” mesh boyutlarının seçilmesi ve meshlerin “en-boy oranının (aspect ratio)” 1’e yakın olması tavsiye edilmektedir (Mark ve Birtel, 2006; Demir ve ark., 2016a). Ayrıca optimum mesh boyutunun tespiti için parametrik bir çalışma yapılması en yaygın olarak kullanılan yöntemdir (Sümer, 2010). Bu tez çalışması kapsamında da nümerik modellerde en-boy oranı 1 olan sonlu parçalar kullanılmış ve optimum mesh boyutunun tespiti için parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

4.6. Analiz Yöntemi

SE metodunda, kapalı (implicit) ve açık (explicit) olmak üzere 2 genel çözüm yöntemi bulunmaktadır. İki çözüm yöntemi temel olarak doğrusal olmayan denklemin çözüm stratejisi üzerinde farklılıklar içermekte ve birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Implicit yöntemlerde denklemin çözümü adım adım gerçekleştirilmekte ve her bir adımda çözümü için bir iterasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Ancak explicit çözümlerde iterasyona gerek olmayıp, problem

yeterli küçüklükte adımlara bölünerek denklem takımı doğrudan çözülmektedir. Kapalı çözümlerde kütle (atalet) ve sönümün etkisi analizlerde dikkate alınmamakta ve denklem takımının çözümünde rijitlik matrisinin tersinin alınması işleminin yapılması gerekmektedir. Özellikle, problemin karmaşık ve adım sayısının büyük olduğu modellerde matris tersi alma işleminin defalarca yapılması gerekmektedir. Bu işlem nümerik olarak fazla zaman gerektiren oldukça zor bir işlemdir. Bununla birlikte açık yöntemlerde elemanın atalet ve sönüm etkisi dikkate alınmaktadır. Bu sebeple bu yöntem zamana bağlı dinamik problemlerin çözümünde oldukça kullanışlıdır. Açık yöntemlerde, kapalı yöntemlerin aksine matris tersini alma işlemi gerekmediğinden analiz süresini oldukça kısaltmaktadır. Bununla birlikte SE modelindeki elemanların temas yüzeylelerinin analizinde, kapalı yöntemlere göre oldukça hızlı bir şekilde çözüme ulaşılmaktadır. Ancak açık yöntemlerde doğrusal olmayan denklem takımının çözümünde adım sayısının büyüklüğünün doğru seçilmesi oldukça önemlidir. Aksi durumlarda, analizlerden hem gerçekçi sonuçlar elde edilememekte hem de analiz süresi uzamaktadır. Kapalı yöntemler adım sayısından bağımsız olduğu için bu riski taşımamaktadır (LS-DYNA Support). Literatürde, açık yöntemlerin zamana bağlı dinamik davranışın incelenmesinde, kapalı yöntemlerin ise zamana bağlı olmayan statik, statik benzeri (quasi-static) ve dinamik problemlerin çözümünde kullanılabileceği belirtilmiştir (Hibbitt ve ark., 2013). Bu tez çalışması kapsamında deneysel çalışmada yükleme statik benzeri olarak yapıldığı için SE analizinin çözüm yöntemi olarak kapalı (implicit) yöntem tercih edilmiştir. ABAQUS programında, kapalı çözüm yöntemlerinde biri olarak bulunan “Static, General” çözüm yöntemi kullanılmıştır.

4.7. Nümerik Model Üzerinden Çatlak Genişliklerinin Tespit Edilmesi

Betonarme elemanların hizmet görebilirlik (serviceability) sınır durumlarının belirlenmesinde maksimum çatlak genişliği en yaygın olarak kullanılan parametrelerden biridir. Çatlakların oluşumu ve ilerlemesi betonarme yapıların doğrusal olmayan davranışlarının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle uygulanan yükün maksimum dayanıma yakın olduğu durumlarda çatlak doğrultusunun değişimi betonarme yapıların rijitliğini etkilemektedir. Literatürde

gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, çatlak doğrultusunun yükleme geçmişine bağlı olarak değiştiği ve yapının davranışının mevcut çatlak davranışına bağlı olduğu belirtilmiştir (Vecchio ve Collins, 1986).

Bazı eski tasarım yönetmeliklerinde (BS:8110, 1989; ACI:318, 1984) maksimum çatlak genişliğinin hesaplanması için eğilme teorisine dayanan basit bağıntılar bulunmaktadır. Bu bağıntılar temel olarak eğilme kirişleri için kullanılmakta ve bundan dolayı beton kabuk kalınlığı, donatıdaki gerilme, boyuna donatı konfigürasyonu gibi yapısal kesit parametrelerinin fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Bununla birlikte günümüzde çatlak genişliği, ortalama çatlak aralığı ve donatı birim şekildeğiştirmesinin bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Benzer şekilde SE analizinde çatlak genişliği genellikle, ortalama çatlak aralığının, birim şekildeğiştirme değerleriyle çarpımı ile hesaplanabilmektedir. (Vidal ve ark., 2004; Marecki ve ark., 2007; Birrcher ve ark., 2009). Bu bağıntılar Theiner ve Hofstetter (2009) tarafından betonarme yapılardaki çatlak genişliklerinin tahmininde de kullanılmıştır. Bu yöntemin en önemli dezavantajı; ortalama çatlak aralığının tahmin edilmesi oldukça güçtür. Çünkü, çatlak aralığı pek çok farklı duruma göre değişkenlik gösterme ve ortalama çatlak aralığının açık bir fiziksel anlamı da bulunmamaktadır.

Bununla birlikte literatürde, betonarme elemanların doğrusal olmayan SE analizi sonuçları kullanılarak çatlak genişliğinin doğrudan elde edilebileceği alternatif bir yöntem önerilmiştir. Gopinath ve arkadaşları (2009) tarafından önerilen bu yöntemde çatlak genişliği, betonun çekme yumuşaması (tension softening) davranışının bir fonksiyonu olarak elde edilmektedir. Bilindiği üzere beton üzerinde oluşan çekme birim şekildeğiştirme değerleri, maksimum çekme gerilmesine ($\sigma_{t0} = f_{ctk}$) karşılık gelen birim şekildeğiştirme değerine (ϵ_{t0}) ulaştığı anda beton çatlamaktadır. Uygulanan yük arttırıldığında çatlaklar maksimum asal çekme birim şekildeğiştirme doğrultusuna dik doğrultuda ilerleyecektir (rotating crack model) (Gupta ve Akbar, 1984). Çatlak karakteristiklerinin maksimum asal çekme birim şekildeğiştirmesi ile direkt olan bu doğrultusal ilişkisi (çatlak doğrultu modeli), farklı betonarme elemanların çatlama sonrası doğrusal olmayan davranışlarının tahmin edilmesine olanak sağlamaktadır (Cerioni ve ark., 2008). Bu yaklaşım Gopinath ve arkadaşları

(2009) tarafından kullanılarak, çatlak genişliğinin; enerji eşdeğerlik prensibine (energy equivalence principle) göre beton birim şekildeğiştirme ve çatlama enerjisinin (fracture energy) bir fonksiyonu olarak elde edildiği bir yöntem önerilmiştir. Önerilen metodun, literatürde mevcut diğer yöntemlere göre önemli avantajları bulunmaktadır. Öncelikle önerilen yöntemde, hesaplanması zor olan ortalama çatlak aralığının belirlenmesine gerek yoktur. Bunun yerine SE analizinden elde edilen birim şekildeğiştirme değerleri ve deneyden ya da mevcut sayısal malzeme modellerinden elde edilen betonun çatlama enerjisi kullanılarak çatlak genişliği doğrudan hesaplanabilmektedir. Bu durum yöntemin kolaylığını ve gerçekliği arttırmaktadır. Bununla birlikte geleneksel doğrusal olmayan SE metodunda birim şekildeğiştirme değerleri genellikle kolayca elde edilebilir bir çıktı olması sebebiyle, önerilen metod oldukça kullanışlı ve elverişlidir (Gopinath ve ark., 2009).

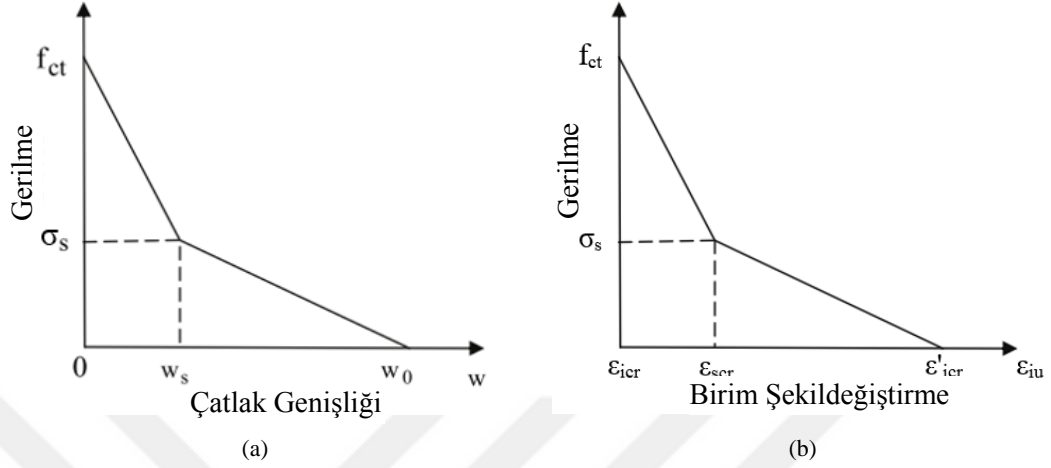
Gopinath ve arkadaşları (2009) tarafından önerilen yöntemde, betonun çekme yumuşaması davranış modeli olarak Petersson (1981) tarafından önerilen iki parçalı (bilinear) davranış modeli (Şekil 4.8.) temel alınmıştır. Bu davranış “gerilme – çatlak genişliği ($\sigma_t - w$)” cinsinden tanımlanmış olup, Gopinath ve arkadaşları (2009) tarafından “gerilme – birim şekildeğiştirme ($\sigma_t - \epsilon_{iu}$)” davranışına dönüştürülmüştür (Şekil 4.8.). Burada, SE modelinden elde edilen çekme birim şekildeğiştirme değerleri ϵ_{icr} ile ϵ_{scr} arasında olduğu durumlarda çatlak genişliği Denklem 4.11 ile, ϵ_{scr} 'den büyük olduğu durumlar da ise Denklem 4.12 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$w = \frac{0,6G_f}{f_{ct}} \left(\frac{\epsilon_{iu}}{\epsilon_{icr}} \right) \quad (4.11)$$

$$w = \frac{G_f}{f_{ct}} \left(\frac{10,8\epsilon'_{icr} - 14,4\epsilon_{icr} + 8,4\epsilon_{iu}}{3(\epsilon'_{icr} - 4\epsilon_{icr})} \right) \quad (4.12)$$

Denklemlerde; f_{ct} : betonun maksimum çekme gerilmesi, G_f : çatlama enerjisi, σ_s : iki parçalı (bilinear) davranış modelinin kırılma noktasına karşılık gelen gerilme, ϵ_{icr} : betonun maksimum çekme gerilmesine karşılık gelen birim şekildeğiştirme değeri,

ϵ_{scr} : σ_s 'ye karşılık gelen birim şekildeğiştirme değeri, ϵ'_{icr} : maksimum çatlak genişliğine (w_0) karşılık gelen birim şekildeğiştirme değerini göstermektedir.



Şekil 4.8. Betonun çekme etkisi altındaki davranış modeli (Gopinath ve ark., 2009).

Bu tez çalışması kapsamında, Gopinath ve arkadaşlarının (2009) önerdikleri metoda benzer bir yaklaşım kullanılarak, SE modeli üzerinden çatlak genişliklerinin ölçülebilmesi için yeni bir bağıntı önerilmiştir. Önerilen yeni bağıntı bu çalışmanın özgün değerlerinden birisi olup ayrıntıları Bölüm 6'da verilmiştir.

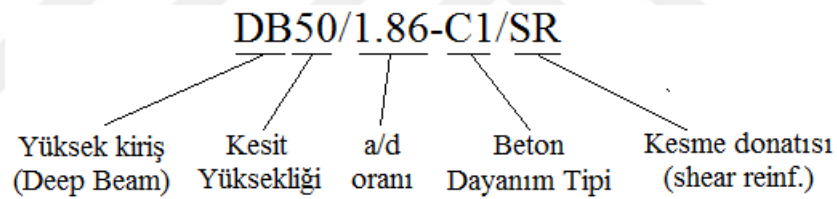
BÖLÜM 5. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışması kapsamında, betonarme yüksek kirişlerin kesme etkisi altındaki eğik çatlak davranışı 3 aşamalı bir çalışma ile incelenmiştir. İlk aşamada deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiş olup betonarme yüksek kirişlerin eğik kesme çatlak davranışına; kesit yüksekliği (h), kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d) ve karakteristik beton basınç dayanımı (f_{ck}) parametrelerinin etkisi incelenmiştir. İkinci aşamada, deneysel çalışma sonuçları kullanılarak nümerik bir çalışma gerçekleştirilmiş ve deney sonuçları doğrusal olmayan sonlu elemanlar metodu kullanılarak doğrulanmıştır. Daha sonra deneysel çalışmada kullanılan numuneler ile boyut ve malzeme özellikleri benzer ancak farklı kesme donatısı oranına sahip yeni betonarme yüksek kirişler tasarlanmıştır. Tasarlanan yeni elemanlar ile, deneysel çalışma ile doğrulanmış nümerik modeller kullanılarak parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmanın son aşamasında ise, gerçekleştirmiş deneysel ve nümerik çalışmalar ile literatürde mevcut çalışma sonuçları birlikte kullanılarak, eğik olarak çatlama yüksek kirişlerin, çatlak genişliğinden eleman artık yük taşıma kapasitesinin hesaplanabileceği bir formül önerilmiştir.

5.1. Deneysel Çalışma

Deneysel çalışmada, öncelikle deney numunelerinin boyut, donatı konfigürasyonu ve malzeme özellikleri tespit edilmiştir. Numunelerinin tasarımı ACI 318-14 (2014) yönetmeliğinde yüksek kirişlerin tasarımı için verilen hususlar dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler; yük ve mesnet plakaları ile basınç çubuklarının birleştiği noktalar (düğüm noktaları) ve çekme çubuklarının (ties) dayanımları yeterli ve eleman üzerinde sadece eğik kesme hasar davranışı hâkim olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu amaçla, düğüm noktalarında yeterli sargı etkisinin oluşması için gerekli yük ve mesnet plaka boyutları seçilmiş ve boyuna donatı uçları, donatı

sıyırılmasını engellemek için 90 derece bükülerek kiriş gövdesine uzatılmıştır. Literatür özetinde belirtildiği gibi, yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışını etkileyen en önemli parametrelerden birisi kesme donatısı oranıdır. Bu davranış literatürde detaylı olarak yeteri kadar incelenmiştir. Bu nedenle tez çalışması kapsamında deney matrisindeki bazı numunelerin kesme açıklığına kesme donatısı konulmamıştır. Bu sayede deneysel çalışmada incelenecek parametrelerin etkinliğinin daha net ve gerçekçi olarak görülebilmesi hedeflenmiştir. Bununla birlikte deney matrisine kesme donatısı içeren numuneler de eklenerek, kesme donatısı içeren ve içermeyen deney numunelerinin sonuçları da birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında 12 adet deney numunesi tasarlanmış olup deney numunelerinin boyut ve malzeme özellikleri Tablo 5.1.'de verilmiştir. Tabloda; f_{ck} : 28 günlük karakteristik silindir beton basınç dayanımını, l_t : toplam eleman boyunu, ρ_l , ρ_v , ve ρ_h ise sırasıyla çekme donatısı, etriye ve gövde donatısı oranlarını göstermektedir. Ayrıca numune isimlendirilmesi Şekil 5.1.'de gösterilmiştir.

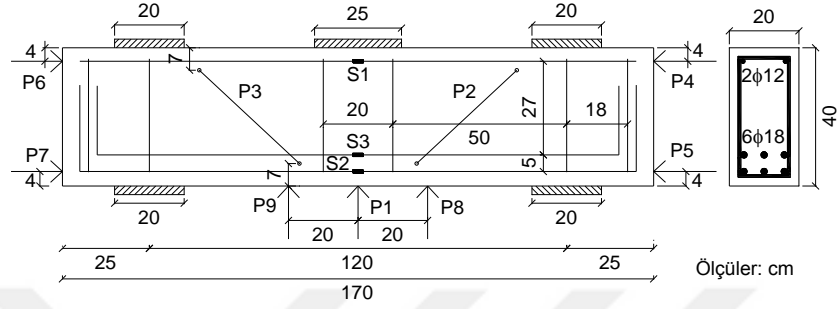


Şekil 5.1. Numune isimlendirilmesi.

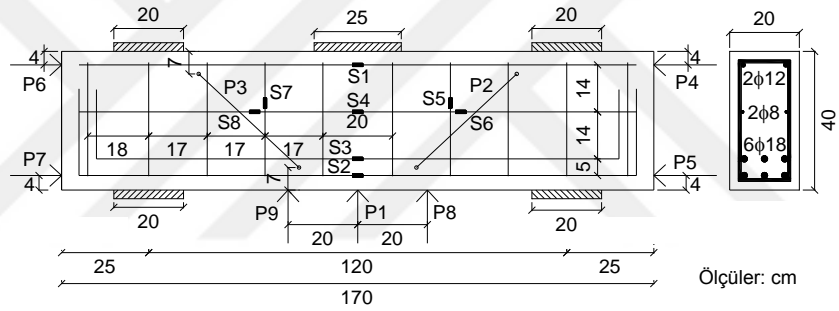
Tablo 5.1. Numunelerin boyut ve malzeme özellikleri.

| # | Numune Adı | h (mm) | a (mm) | a/d | l_t (mm) | ρ_l | ρ_v | ρ_h | f_{ck} (MPa) |
|----|-----------------|--------|--------|------|------------|----------|----------|----------|----------------|
| 1 | DB50/1.40-C1 | 500 | 600 | 1,40 | 1700 | 0,02201 | 0 | 0 | 18,1 |
| 2 | DB50/1.63-C1 | 500 | 700 | 1,63 | 1900 | 0,02201 | 0 | 0 | 18,1 |
| 3 | DB50/1.86-C1 | 500 | 800 | 1,86 | 2100 | 0,02201 | 0 | 0 | 18,1 |
| 4 | DB50/1.86-C1/SR | 500 | 800 | 1,86 | 2100 | 0,02201 | 0,00287 | 0,00272 | 18,1 |
| 5 | DB55/1.67-C1 | 550 | 800 | 1,67 | 2100 | 0,02375 | 0 | 0 | 18,1 |
| 6 | DB60/1.51-C1 | 600 | 800 | 1,51 | 2100 | 0,02113 | 0 | 0 | 18,1 |
| 7 | DB60/1.86-C1 | 600 | 1000 | 1,86 | 2500 | 0,02113 | 0 | 0 | 18,1 |
| 8 | DB60/1.86-C1/SR | 600 | 1000 | 1,86 | 2500 | 0,02113 | 0,00279 | 0,00320 | 18,1 |
| 9 | DB40/1.86-C1 | 400 | 600 | 1,86 | 1700 | 0,02348 | 0 | 0 | 18,1 |
| 10 | DB40/1.86-C2 | 400 | 600 | 1,86 | 1700 | 0,02348 | 0 | 0 | 25,3 |
| 11 | DB40/1.86-C3 | 400 | 600 | 1,86 | 1700 | 0,02348 | 0 | 0 | 32,0 |
| 12 | DB40/1.86-C1/SR | 400 | 600 | 1,86 | 1700 | 0,02348 | 0,00301 | 0,00372 | 18,1 |

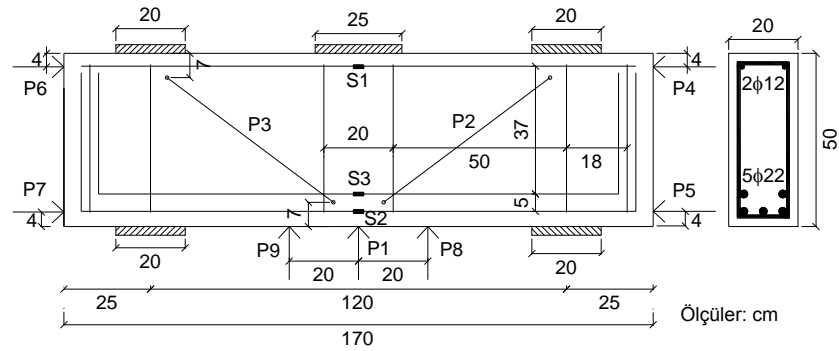
Tüm numunelerde; kiriş genişliği, $b_w=200$ mm, etriye ve gövde donatısı çapı $\varnothing 8$ mm, yük ve mesnet plakası genişlikleri sırasıyla 250 mm ve 200 mm, ve paspayı, $c_c=25$ mm olacak şekilde sabit alınmıştır. Deney numunelerinin görünüş, kesit ve donatı çizimleri Şekil 5.2. ile Şekil 5.11. arasında gösterilmiştir.



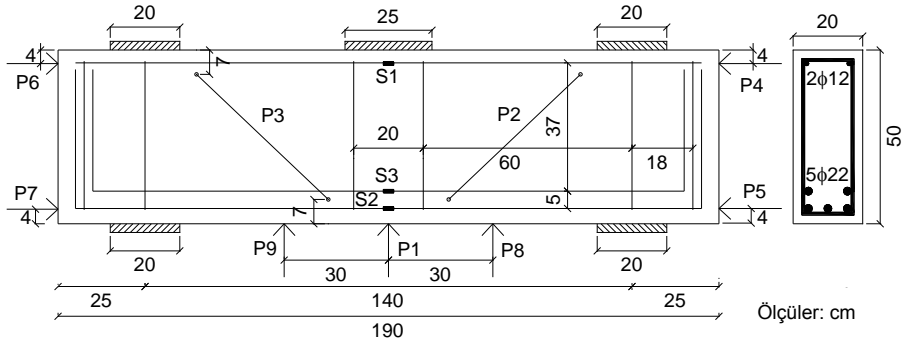
Şekil 5.2. DB40/1.86-C1, DB40/1.86-C2 ve DB40/1.86-C3 numunelerinin görünüş ve donatı çizimi.



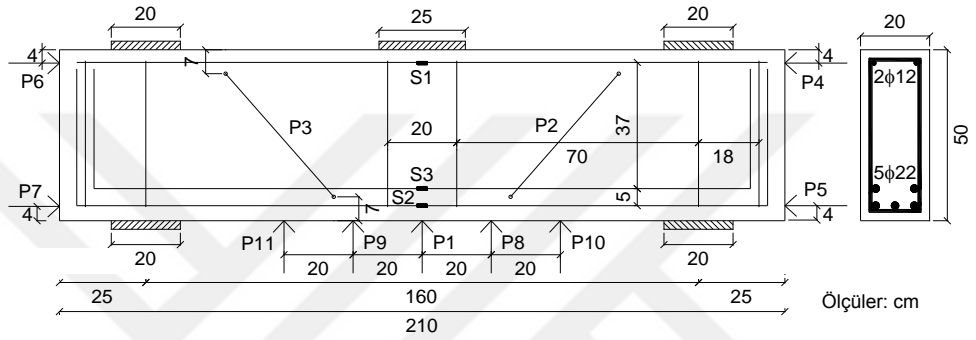
Şekil 5.3. DB40/1.86-C1/SR numunesinin görünüş ve donatı çizimi.



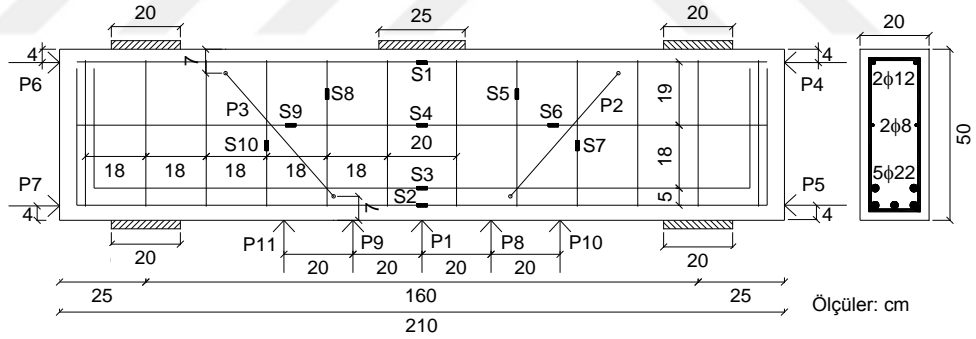
Şekil 5.4. DB50/1.40-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi.



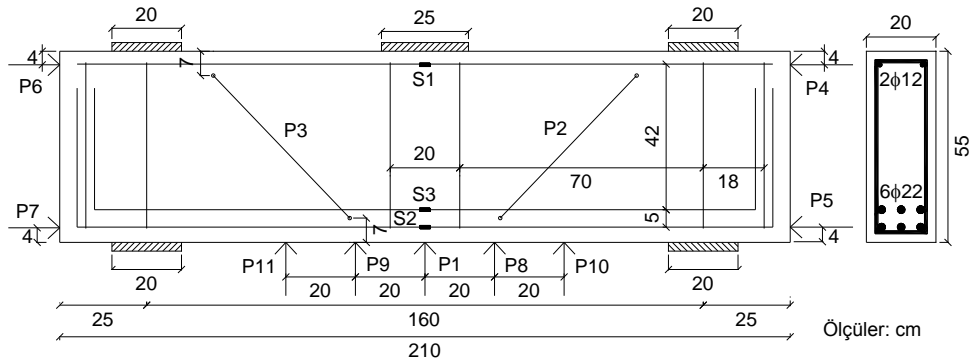
Şekil 5.5. DB50/1.63-C1 numunesinin görüntüş ve donatı çizimi.



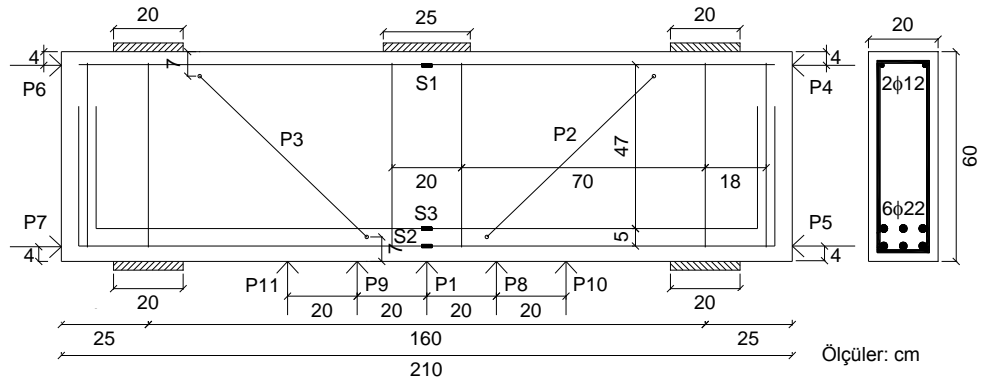
Şekil 5.6. DB50/1.86-C1 numunesinin görüntüş ve donatı çizimi.



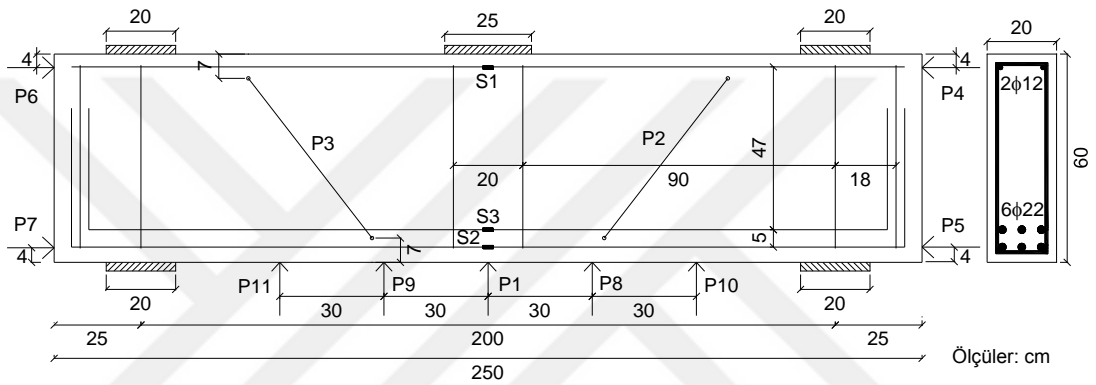
Şekil 5.7. DB50/1.86-C1/SR numunesinin görüntüş ve donatı çizimi.



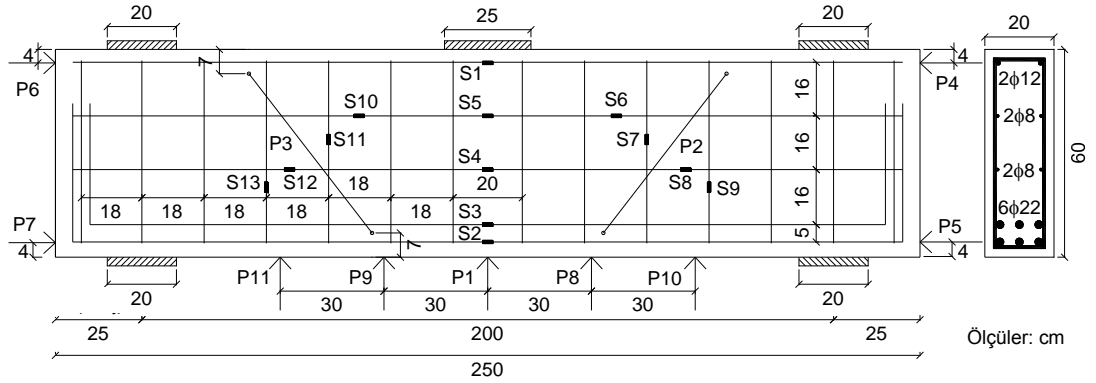
Şekil 5.8. DB55/1.67-C1 numunesinin görüntüş ve donatı çizimi.



Şekil 5.9. DB60/1.51-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi.



Şekil 5.10. DB60/1.86-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi.



Şekil 5.11. DB60/1.86-C1/SR numunesinin görünüş ve donatı çizimi.

Deney numunelerinin üretimi aşamasında öncelikli olarak donatılar hazırlanmıştır (Şekil 5.12.). Hazırlanan donatılara deney esnasında donatılar üzerinde oluşacak birim şekildeğiştirme değerlerinin ölçülebilmesi için gerinim pulları (strain gauge) yapıştırılmıştır (Şekil 5.12.).



(a)



(b)

Şekil 5.12. Donatıların hazırlanması (a) ve donatılara yapıştırılan gerinim pulları (b).

Kalıpların hazırlanmasından sonra donatılar kalıplara yerleştirilmiştir. Tasarım hesaplarında belirlenen beton paspayı değerlerinin sağlanabilmesi için donatılara plastik donatı paspayı aparatları takılmıştır. Beton santralinden bir transmikser kamyon ile getirilen hazır beton kalıplara yerleştirilmiş olup tüm numuneler aynı zamanda üretilmiştir. Betonun yerleştirilmesi esnasında yerleşmenin tam sağlanması için bir vibratör yardımıyla beton sıkılaştırılmıştır (Şekil 5.13.).



Şekil 5.13. Betonun kalıba yerleştirilmesi.

Beton döküm işleminden sonra kalıplar sökülerek numunelere kür işlemi uygulanmıştır (Şekil 5.14.). Betonun hedeflenen dayanıma ulaşması için 28 gün beklenmiş ve bu süre zarfında kür işlemine devam edilmiştir.

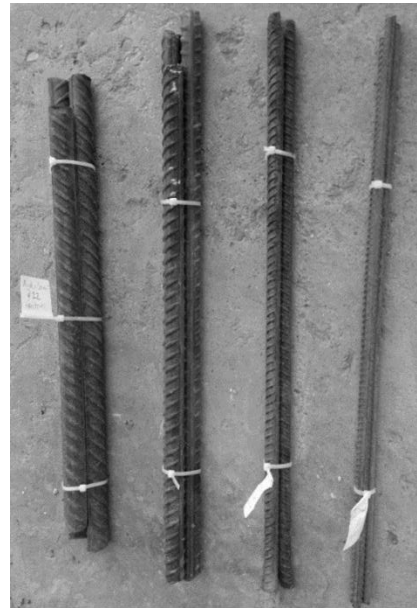


Şekil 5.14. Kalıbı sökülmüş deney numuneleri.

Bununla birlikte, üretilen numunelerde kullanılan malzeme özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla, TS500 (2000) ve TS708 (2010) yönetmeliklerinde verilen hususlara riayet edilerek örnek deney numuneleri alınmıştır. Her bir beton sınıfı ve donatı çapı için 3'er adet deney numunesi alınmıştır (Şekil 5.15.). Beton numunesi alınmasında 150 mm çap ve 300 mm yüksekliğe sahip silindir kalıplar kullanılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 5.15. Betondan (a) ve donatılardan (b) alınan malzeme deneyi numuneleri.

Betondan alınan malzeme deney numuneleri 28 gün boyunca kür havuzunda 20°C de bekletilmiştir (Şekil 5.16.). Bu süre sonunda numuneler kür havuzundan çıkartılarak kuruması için 1 gün bekletilmiştir. Kuruyan numunelerin alt ve üst yüzeylerine kükürt-grafit başlık yapılarak (Şekil 5.17.) ve beton presinde test edilerek karakteristik basınç dayanımları belirlenmiştir. Donatı numuneleri ise donatı çekme cihazında test edilerek donatıların akma dayanımları tespit edilmiştir (Şekil 5.18.). Malzeme deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 5.2.'de verilmiştir. Malzeme dayanımları; her bir farklı malzeme için alınan 3'er numunenin aritmetik ortalaması olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.2. Malzeme deneylerinin sonuçları.

| Beton Dayanım Tipi | Ortalama basınç dayanımı | Donatı çapı | Ortalama çekme dayanımı |
|--------------------|--------------------------|-------------|-------------------------|
| C1 | 18,1 MPa | Ø8 ve Ø12 | 421 MPa |
| C2 | 25,3 MPa | Ø18 | 454 MPa |
| C3 | 32,0 MPa | Ø22 | 482 MPa |



Şekil 5.16. Numunelerin kür havuzunda bekletilmesi.



Şekil 5.17. Kükürt-grafit başlık uygulaması.

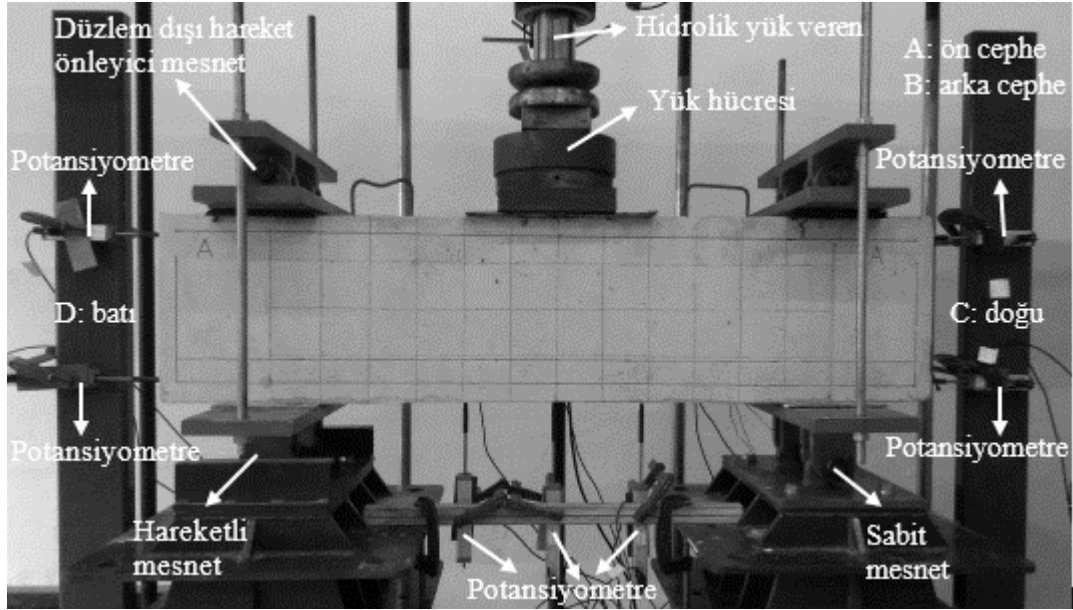


(a) Beton presi

(b) Donatı çekme cihazı

Şekil 5.18. Malzeme deneyleri.

Üretilen yüksek kiriş numuneleri Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Laboratuvarında bulunan 3 nokta yükleme deney düzeneğinde, mesnetlerinden birisi sabit diğer hareketli olacak şekilde test edilmiştir (Şekil 5.19.). Numunenin oturduğu sabit ve hareketli çelik mesnetlere ilave olarak, numunelerin üst noktalarına da mafsallı çelik mesnetler konulmuştur. Bu mesnetler alttaki mesnetler ile birbirlerine çelik miller yardımıyla bağlanarak sabitlenmiştir. Bu sayede numunelerin düzlem dışı hareketi önlenmiştir. Bununla birlikte, deney sırasında numunede oluşan düzlem dışı hareket, numune açıklığı ve kesit yüksekliğinin orta noktasına yerleştirilen bir adet dijital yerdeğiştirme ölçer ile ölçülmüştür (Şekil 5.20.).



Şekil 5.19. Deney düzeneği ve ölçüm cihazları.

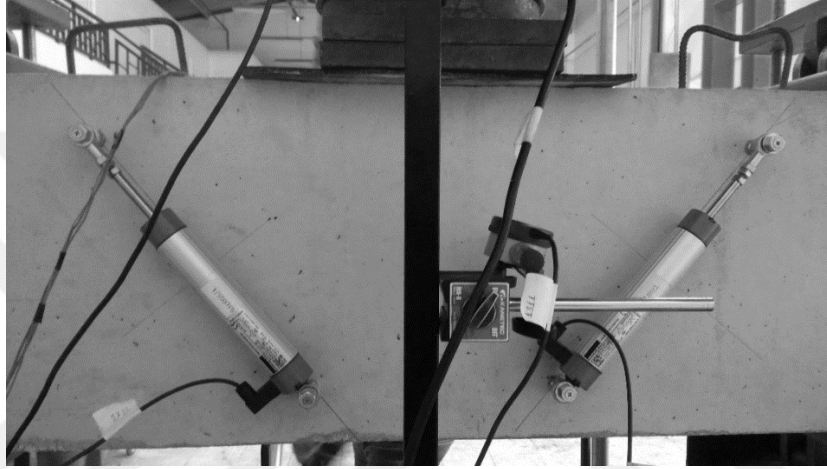
Numunenin çelik mesnet plakasına düzgün bir şekilde oturması ve yükün eşit bir şekilde numuneye aktarılabilmesi için yük ve mesnet plakaları ile numune arasında kalınlığı yaklaşık 5 mm olan kauçuk malzemeden üretilmiş plakalar yerleştirilmiştir. Bu şekilde numune yüzeyinde bulunabilecek pürüzlülük nedeniyle oluşabilecek gerilme yığılmalarının ve oluşabilecek lokal hasarın önlenmesi hedeflenmiştir. Deney esnasında yükün artımı ile birlikte bu kauçuk plakalarda çökmelerin oluşması beklenmektedir. Oluşacak bu çökmelerin ölçülebilmesi için sabit mesnetin eksenine bir adet dijital yerdeğiştirme ölçer yerleştirilmiştir (Şekil 5.20.).



Şekil 5.20. Numunede oluşan düzlem dışı hareket ve mesnet çökmesinin ölçülmesi.

Numunelerin deney düzeneğindeki yönlerinin gösterilmesi amacıyla; numune ön cephesi A, arka cephesi B, doğu cephesi C ve batı cephesi D olarak isimlendirilmiştir (Şekil 5.19.). Deney esnasında yük, numuneye hidrolik bir yük veren ile sabit hızla manuel olarak uygulanmıştır. Uygulanan yük, numune ile yük veren arasında yerleştirilen bir yük hücresi (load cell) ile okunmuştur. Numune alt bölgesinde, eleman açıklığının orta ve yan noktalarına yerleştirilen potansiyometreler yardımıyla, numunede oluşan düşey yer değiştirme değerleri ölçülmüştür. Ayrıca numune C ve D cephelerindeki yan yüzeylerine, alt ve üst noktalarda da potansiyometreler yerleştirilerek yatay yerdeğiştirme değerleri de okunmuştur (Şekil 5.19.). Her bir numuneye yerleştirilen potansiyometrelerin adedi ve konumları Şekil 5.2. ile Şekil 5.11. arasında ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Çizimler üzerinde potansiyometreler “P” harfi ile belirtilmiş ve sıra numaraları da yanlarına yazılmıştır.

Numunede oluşacak eğik kesme çatlak genişliklerinin ölçülebilmesi amacıyla, numunelerin B cephesindeki (arka yüzey) 2 adet çatlak ölçer cihaz yerleştirilmiştir (Şekil 5.21.). Bu cihazlar iki ucu mafsallı olarak numuneye sabitlenerek, çatlak oluştuğunda mafsallarından dönebilmekte ve çatlak genişliğini hassas bir şekilde ölçebilmektedir. Cihazın numuneye bağlantı noktaları, eğik kesme çatlak oluşması beklenen doğrultuya (yük ve mesnet plakası uçları arasında kalan eksen) dik bir şekilde kesme bölgesinin ortasına gelecek şekilde belirlenmiştir.

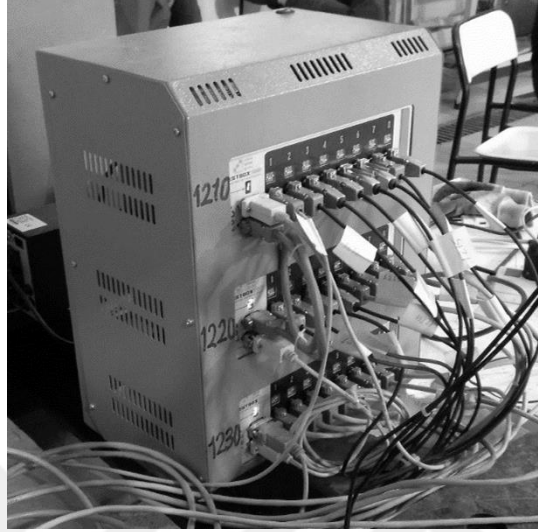


Şekil 5.21. Çatlak ölçerler ve yerleşimleri.

Bununla birlikte, çekme donatılarına, etriyelere ve gövde donatılarına yapıştırılan gerinim pulları (strain gauge) ile bu donatılarda oluşan birim şekildeğiştirme değerleri okunmuştur. Oluşacak eğik çatlakın; mesnet plakası ucundan yükleme plakası ucu arasında kalan eğik eksen üzerinde oluşması beklenildiği için, kesme donatılarına yerleştirilen gerinim pulları, bu eksen üzerine denk gelen kesit orta yüksekliğindeki bölgeye yapıştırılmıştır. Her bir deney numunesinde donatılar üzerinde gerinim pulu yapıştırılan noktalar Şekil 5.2. ile Şekil 5.11. arasında ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Çizimler üzerinde gerinim pulları “S” harfi ile belirtilmiş ve sıra numaraları da yanlarına yazılmıştır.

Ölçüm cihazlarından ölçülen data, bir veri toplama cihazı (data logger) ile toplanarak bir bilgisayara aktarılmış ve veri toplama sisteminin yazılımı ile kayıt altına alınmıştır (Şekil 5.22.). Veri toplama sistemi ile saniyede 4 veri kaydedilmiştir. Ayrıca farklı numuneler üzerinde çatlak oluşumu ve ilerlemesinin karşılaştırılabilmesine imkan

sağlaması amacıyla numune A cephesine 10 cm boyutlarında karelaj çizilmiştir. Numune içinde bulunan donatı konfigürasyonu da numune üzerine farklı renkte kalemler ile çizilerek gösterilmiştir.



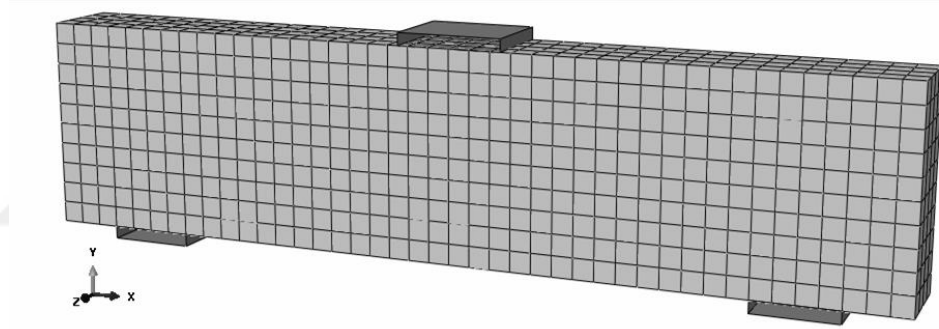
Şekil 5.22. Veri toplama cihazı.

5.2. Nümerik Modelleme

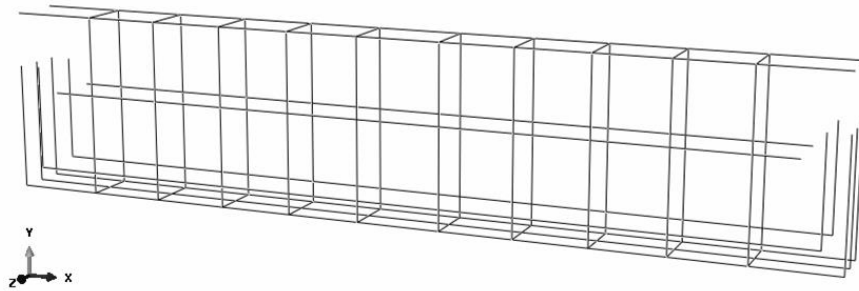
Nümerik modelleme için ABAQUS (2013) sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Öncelikle programın part (parça) modülü altında modeli oluşturan beton, donatı, yük ve mesnet plakaları modellenmiştir. Beton ve donatılar sırasıyla 3D katı (solid) ve çubuk elemanlar (truss) kullanılarak oluşturulmuştur. Daha sonra yük ve mesnet plakaları 3D analitik rijit elemanlar olarak oluşturulmuştur. Oluşturulan parçalar assembly (birleşim) modülü altında birleştirilmiştir. Donatılar betonun içine, yük ve mesnet plakaları ise deney düzeneğindeki yerleri ile aynı olacak şekilde numune üst ve alt yüzeylerine yerleştirilmiştir. Donatılar betona gömülü (embedded) olarak modellenmiş, yük ve mesnet plakaları ile beton arasında kalan yüzeylere bağ sınır şartı (tie constraint) tanımlanmıştır. Load modülünde, mesnet plakaları üzerinde biri sabit diğeri hareketli olmak üzere modelin mesnetlenme şartları oluşturulmuştur. Uygulanan yük, düşey yerdeğiştirme olarak yük plakası üzerine tanımlanmıştır.

Nümerik modelde, beton 8 düğüm noktalı doğrusal kübik (C3D8R) elemanlar ve donatı çubukları ise iki noktalı doğrusal ve üç boyutlu çubuk (T3D2) sonlu elemanlar

ile modellenmiştir. Betonun optimum mesh (çözüm ağı) boyutunun belirlenmesi amacıyla parametrik bir çalışma yapılmış ve literatürde önerildiği gibi en-boy oranı 1 olacak şekilde 20, 30, 40 ve 50 mm lik mesh boyutları parametrik olarak denenmiştir. Parametrik çalışma sonucunda optimum mesh boyutunun 50 mm olduğu görülmüştür. Bu boyut, literatürde betonun nümerik olarak modellenmesinde, büyük/kaba (coarse) mesh boyutu kullanılmasının daha gerçekçi sonuçlar verdiği bulgusu ile de örtüşmektedir. Donatılar, çubuk (truss) elemanlar olarak modellendiği için sadece tek doğrultuda beton ile aynı mesh boyutunda çözüm ağına bölünmüştür. Yük ve mesnet plakaları, nümerik karakteristikleri nedeniyle mesh yapılmasına gerek olmadığı için çözüm ağına ayrılmamıştır. Deneysel çalışmada kullanılan numuneler için oluşturulmuş olan örnek bir SE modeli ve modelin çözüm ağlarına bölünmüş hali Şekil 5.23. ve Şekil 5.24.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.23. Beton, yük ve mesnet plakaları nümerik modeli.



Şekil 5.24. Donatıların nümerik modeli.

Daha sonra property modülü altında betonun malzeme ve donatıların malzeme ve kesit özellikleri nümerik modele tanımlanmıştır. Betonun doğrusal olmayan davranışının tanımlanması için beton hasar plastisite (BHP) modeli kullanılmıştır. Programda, BHP

modeli oluşturulurken girilmesi gereken temel parametreler için literatürde önerilen varsayılan (default) değerler kullanılmıştır. Modelin yakınsama performansının artırılması için çok küçük miktarda vizkozite parametresi de tanımlanmıştır. Bu değerler tüm modellerde aynı olacak şekilde sabit olarak alınmış ve Tablo 5.3.'te verilmiştir. Literatürde betonarme yüksek kirişlerin nümerik olarak doğrusal olmayan davranışlarının modellenmesinde dilasyon açısının (ψ), 50° civarında alınması önerilmiştir (Demir ve ark., 2016b; 2017). Bu çalışmada da ψ 'nin optimum değerinin tespiti için, SE modellerinde parametrik bir çalışma yapılarak $48^\circ \sim 52^\circ$ arasında değişen değerler elde edilmiştir.

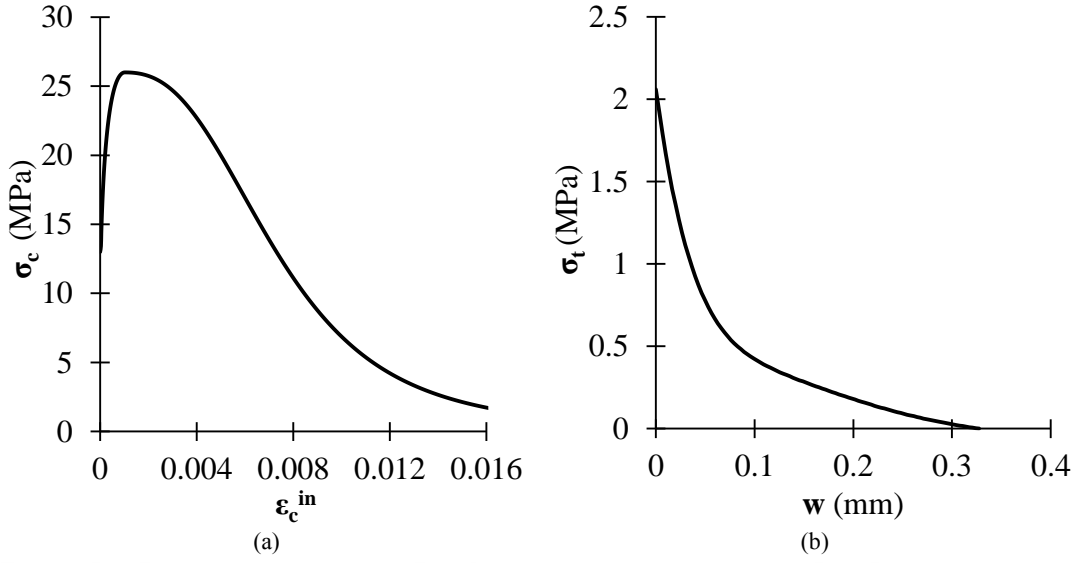
Tablo 5.3. BHP modeli temel parametreleri.

| Parametre | Değer |
|---------------------------|--------------------------|
| ψ | $48^\circ \sim 52^\circ$ |
| ϵ | 0,10 |
| σ_{b0}/σ_{c0} | 1,16 |
| K | 0,6667 |
| μ | 0,0001 |

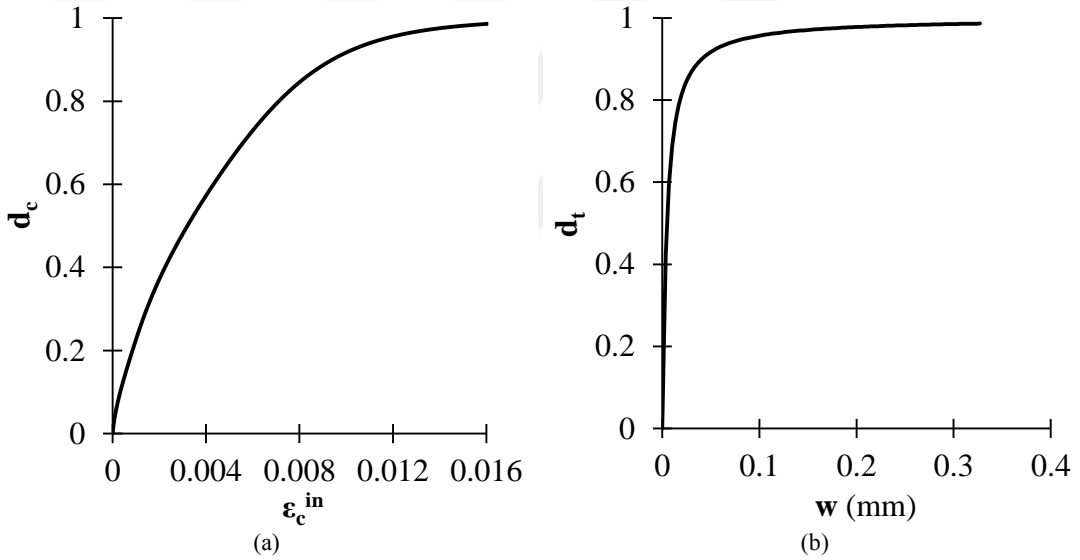
Betonun basınç altındaki davranışı; gerilme – inelastik birim şekildeğiştirme ($\sigma_c - \epsilon_c^{in}$) cinsinden, çekme etkisi altındaki davranışı ise gerilme – çatlak genişliği ($\sigma_t - w$) cinsinden tanımlanmıştır (Şekil 5.25.). Ayrıca basınç ve çekme etkisi altındaki hasar parametresi davranışını gösteren grafikler Şekil 5.26.'da gösterilmiştir. Farklı beton sınıfına ait, beton malzeme modelleri oluşturulurken hesaplamalarda kullanılan diğer parametreler Tablo 5.4.'te verilmiştir. Tabloda, betonun maksimum basınç gerilmesi ($\sigma_{cu} = f_{ck}$) gerçekleştirilen malzeme deneyleri ile elde edilmiştir. Diğer parametreler ise σ_{cu} değerine bağlı olarak literatürde verilen sayısal hesap yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir.

Tablo 5.4. Betonun sayısal modelinde kullanılan diğer parametreler.

| σ_{cu} (MPa) | σ_{t0} (MPa) | E_0 (MPa) | G_f (MPa) | Poisson oranı | b_c | b_t |
|---------------------|---------------------|-------------|-------------|---------------|-------|-------|
| 18,1 | 2,06 | 25398 | 0,131 | 0,221 | 0,7 | 0,1 |
| 25,3 | 2,56 | 28008 | 0,137 | 0,260 | 0,5 | 0,3 |
| 32,0 | 3,02 | 30406 | 0,142 | 0,294 | 0,6 | 0,3 |



Şekil 5.25. Betonun basınç (a) ve çekme (b) etkisindeki davranış grafikleri.

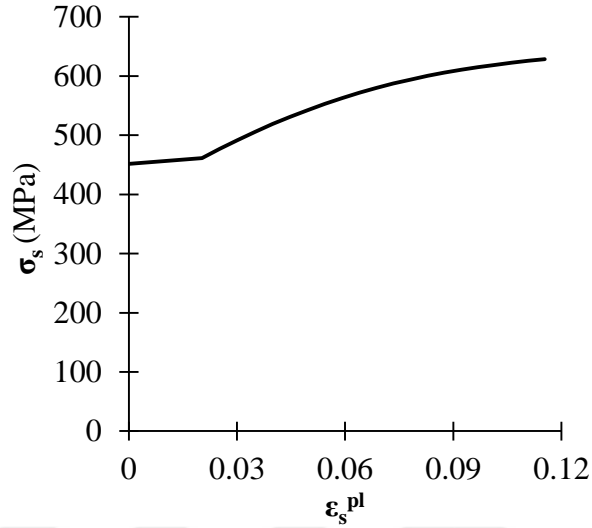


Şekil 5.26. Betonun basınç (a) ve çekme (b) etkisindeki hasar parametresi grafikleri.

SE modelinde donatı çeliğinin malzeme davranışı, pekleşmeyi ve kesitteki küçülmeyi de dikkate alan, gerçek gerilme – plastik birim şekildeğiştirme ($\sigma_s - \epsilon_s^{pl}$) davranışı olarak tanımlanmıştır. Nümerik modelde tanımlanan örnek bir $\sigma_s - \epsilon_s^{pl}$ eğrisi Şekil 5.27.’de gösterilmiştir.

Nümerik modelin tamamlanmasından sonra, modelin doğrulanması deney sonuçlarından elde edilen “yük – orta nokta yerdeğiştirmesi” ve “yük – eğik çatlak genişliği” davranış grafiklerinin karşılaştırılması ile belirlenmiştir. Bu iki davranışta

yeterli oranda yakınsama elde edildiğinde nümerik modelin doğrulandığı kabul edilmiş ve bu model üzerinde parametrik çalışmanın gerçekleştirilebileceğine karar verilmiştir.



Şekil 5.27. Donatı çeliği gerçek $\sigma_s - \epsilon_s^{pl}$ davranış grafiği.

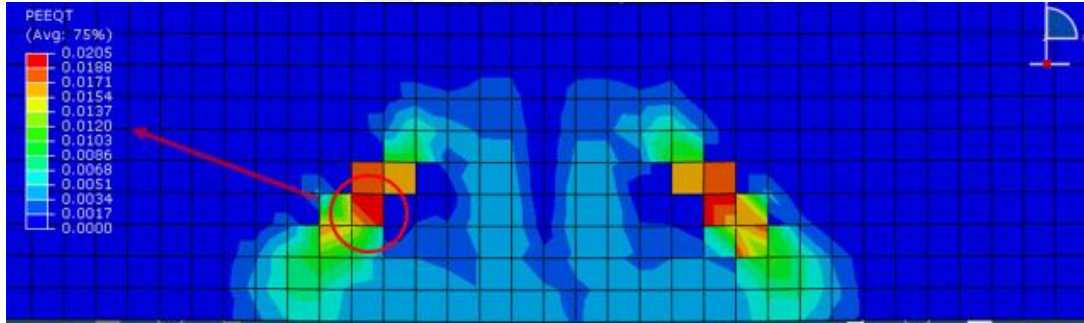
5.3. Çatlak Genişliğinin Belirlenmesi

Bu tez çalışması kapsamında, Gopinath ve arkadaşlarının (2009) önerdikleri metoda benzer bir yaklaşım kullanılarak, SE modeli üzerinden çatlak genişliklerinin ölçülebilmesi için yeni bir bağıntı önerilmiştir (Denklem 6.1). Bağıntının oluşturulmasında, betonun çatlama sonrası çekme yumuşaması davranışı için Hordijk (1992) tarafından önerilen doğrusal olmayan (üstel) davranış modeli temel alınmıştır. Bu modeli oluşturan denklemlerde bir dönüşüm işlemi yapılarak, betonun çatlak genişliğinin asal çekme birim şekildeğiştirme değerleri kullanılarak hesaplanabildiği Denklem 6.1 elde edilmiştir. Bu denklem ile nümerik model üzerinde istenilen adımda, bir sonlu parça üzerinde asal çekme birim şekildeğiştirmesi değeri okunarak, bu değere karşılık gelen çatlak genişliği elde edilebilmektedir. Her bir analiz adımında, okunan yük ve önerilen formül ile hesaplanan çatlak genişliği değerleri birleştirilerek yük – çatlak genişliği davranış grafiği oluşturulmaktadır.

$$w = \left[\epsilon_t^{pl} + \frac{\sigma_t d_t}{(1 - d_t) E_0} \right] l_{eq} \quad (6.1)$$

Denklemdede; ϵ_t^{pl} : SE modeli üzerinden okunan asal plastik çekme birim şekildeğiştirme değeri, σ_t : ϵ_t^{pl} 'ye karşılık gelen çekme gerilmesi, E_0 : başlangıç elastisite modülü, d_t : σ_t 'ye karşılık gelen hasar parametresi ve l_{eq} : mesh boyutunu göstermektedir.

SE modeli üzerinden çatlak genişliğinin tespit edilebilmesi için öncelikle analiz sonuçlarından asal çekme birim şekildeğiştirme değerlerinin okunması gerekmektedir. Bu işlem ABAQUS programında visualization modülünde, beton üzerinde eşdeğer çekme plastik birim şekildeğiştirme (equivalent plastic strain in tension, PEEQT) değerlerinin okunması ile elde edilmektedir (Şekil 5.28.). Numune üzerinde, maksimum PEEQT değerinin olduğu noktada maksimum çatlak genişliği oluşmaktadır. İlgili sonlu parça seçilerek, bu parçanın integrasyon noktasından PEEQT değerinin analiz boyunca hesaplanan geçmişi (analyze time history) “zaman – PEEQT” grafiği olarak elde edilmektedir. Daha sonra Denklem 6.1 kullanılarak çatlak genişliği hesaplanmaktadır.



Şekil 5.28. Eşdeğer çekme plastik birim şekildeğiştirme (PEEQT).

5.4. Parametrik Çalışma

Bu tez çalışması kapsamında, deneysel çalışmada kullanılan numuneler ile benzer boyut ve malzeme özelliklerine sahip fakat farklı oranlarda kesme donatısı içeren 24 adet yeni betonarme yüksek kiriş elemanı tasarlanmıştır (Tablo 5.5.). Bu elemanların tasarımı ACI 318-14 yönetmeliğinde verilen hususlar dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan bu yeni yüksek kiriş elemanları, deneysel çalışma ile doğrulanmış bulunan nümerik modeller kullanılarak analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen

parametrik çalışma ile; uygulamada karşılaşılabilecek farklı kesme donatısı oranına sahip betonarme yüksek kiriş elemanlarının analizi gerçekleştirilerek, önerilen formülün oluşturulmasında kullanılan veri sayısı arttırılmıştır. Bu sayede önerilen formülün kapsamı arttırılmıştır. Parametrik çalışma sonucunda yüksek kirişlerin “yük – eğik çatlak genişliği” davranış grafikleri elde edilmiştir.

Tablo 5.5. Parametrik çalışmada kullanılan numunelerin boyut ve malzeme özellikleri.

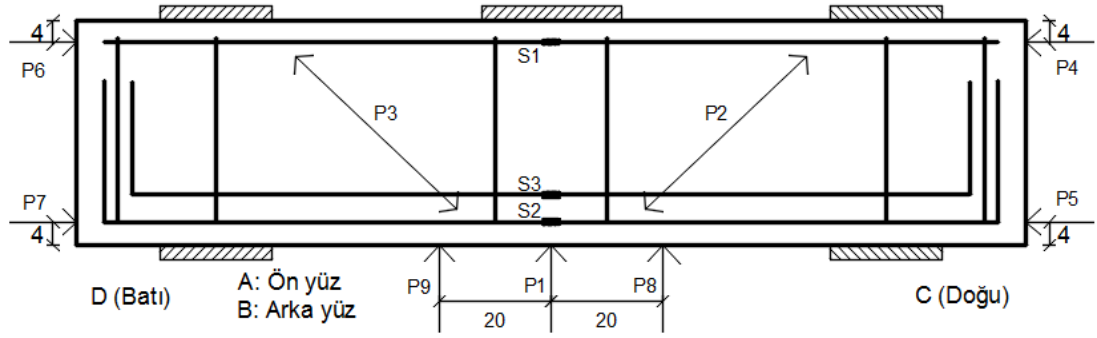
| # | Numune Adı | h mm | a mm | a/d | l_t mm | ρ_l | Çekme donat. | ρ_v | Etriye | ρ_h | Gövde donat. | f_{ck} MPa |
|----|-----------------------|---------|---------|------|-------------|----------|-----------------|----------|--------------|----------|-----------------|-----------------|
| 1 | DB50/1.84- C1/SR-1 | 500 | 800 | 1.84 | 1600 | 0.0146 | 5 ϕ 18 | 0.0057 | ϕ 8/87 | 0.0064 | ϕ 8/79 | 18.1 |
| 2 | DB50/1.75- C1/SR-2 | 500 | 800 | 1.75 | 1600 | 0.0125 | 3 ϕ 22 | 0.0057 | ϕ 8/87 | 0.0060 | ϕ 8/83 | 18.1 |
| 3 | DB50/1.75- C1/SR-3 | 500 | 800 | 1.75 | 1600 | 0.0125 | 3 ϕ 22 | 0.0036 | ϕ 8/140 | 0.0036 | ϕ 8/139 | 18.1 |
| 4 | DB50/1.38- C1/SR-1 | 500 | 600 | 1.38 | 1200 | 0.0146 | 5 ϕ 18 | 0.0060 | ϕ 8/83 | 0.0064 | ϕ 8/79 | 18.1 |
| 5 | DB50/1.32- C1/SR-2 | 500 | 600 | 1.32 | 1200 | 0.0125 | 3 ϕ 22 | 0.0060 | ϕ 8/83 | 0.0060 | ϕ 8/83 | 18.1 |
| 6 | DB50/1.32- C1/SR-3 | 500 | 600 | 1.32 | 1200 | 0.0125 | 3 ϕ 22 | 0.0040 | ϕ 8/125 | 0.0036 | ϕ 8/139 | 18.1 |
| 7 | DB60/1.87- C1/SR-1 | 600 | 1000 | 1.87 | 2000 | 0.0143 | 6 ϕ 18 | 0.0050 | ϕ 8/100 | 0.0051 | ϕ 8/99 | 18.1 |
| 8 | DB60/1.80- C1/SR-2 | 600 | 1000 | 1.80 | 2000 | 0.0103 | 3 ϕ 22 | 0.0050 | ϕ 8/100 | 0.0049 | ϕ 8/103 | 18.1 |
| 9 | DB60/1.80- C1/SR-3 | 600 | 1000 | 1.80 | 2000 | 0.0103 | 3 ϕ 22 | 0.0034 | ϕ 8/150 | 0.0039 | ϕ 8/129 | 18.1 |
| 10 | DB60/1.50- C1/SR-1 | 600 | 800 | 1.50 | 1600 | 0.0143 | 6 ϕ 18 | 0.0050 | ϕ 8/100 | 0.0051 | ϕ 8/99 | 18.1 |
| 11 | DB60/1.44- C1/SR-2 | 600 | 800 | 1.44 | 1600 | 0.0103 | 3 ϕ 22 | 0.0050 | ϕ 8/100 | 0.0049 | ϕ 8/103 | 18.1 |
| 12 | DB60/1.44- C1/SR-3 | 600 | 800 | 1.44 | 1600 | 0.0103 | 3 ϕ 33 | 0.0036 | ϕ 8/140 | 0.0039 | ϕ 8/129 | 18.1 |
| 13 | DB55/1.65- C1/SR-1 | 550 | 800 | 1.65 | 1600 | 0.0158 | 6 ϕ 18 | 0.0050 | ϕ 8/100 | 0.0056 | ϕ 8/89 | 18.1 |
| 14 | DB55/1.58- C1/SR-2 | 550 | 800 | 1.58 | 1600 | 0.0113 | 3 ϕ 22 | 0.0050 | ϕ 8/100 | 0.0054 | ϕ 8/93 | 18.1 |
| 15 | DB55/1.58- C1/SR-3 | 550 | 800 | 1.58 | 1600 | 0.0113 | 3 ϕ 22 | 0.0036 | ϕ 8/140 | 0.0032 | ϕ 8/116 | 18.1 |
| 16 | DB40/1.80- C1/SR-1 | 400 | 600 | 1.80 | 1200 | 0.0229 | 6 ϕ 18 | 0.0070 | ϕ 8/71 | 0.0085 | ϕ 8/59 | 18.1 |
| 17 | DB40/1.68- C1/SR-2 | 400 | 600 | 1.68 | 1200 | 0.0107 | 3 ϕ 18 | 0.0070 | ϕ 8/71 | 0.0079 | ϕ 8/63 | 18.1 |
| 18 | DB40/1.68- C1/SR-3 | 400 | 600 | 1.68 | 1200 | 0.0107 | 3 ϕ 18 | 0.0050 | ϕ 8/100 | 0.0047 | ϕ 8/106 | 18.1 |
| 19 | DB40/1.80- C2/SR-1 | 400 | 600 | 1.80 | 1200 | 0.0229 | 6 ϕ 18 | 0.0070 | ϕ 8/71 | 0.0085 | ϕ 8/59 | 25.3 |
| 20 | DB40/1.68- C2/SR-2 | 400 | 600 | 1.68 | 1200 | 0.0107 | 3 ϕ 18 | 0.0070 | ϕ 8/71 | 0.0079 | ϕ 8/63 | 25.3 |
| 21 | DB40/1.68- C2/SR-3 | 400 | 600 | 1.68 | 1200 | 0.0107 | 3 ϕ 18 | 0.0050 | ϕ 8/100 | 0.0047 | ϕ 8/106 | 25.3 |
| 22 | DB40/1.80- C3/SR-1 | 400 | 600 | 1.80 | 1200 | 0.0229 | 6 ϕ 18 | 0.0070 | ϕ 8/71 | 0.0085 | ϕ 8/59 | 32.0 |
| 23 | DB40/1.68- C3/SR-2 | 400 | 600 | 1.68 | 1200 | 0.0107 | 3 ϕ 18 | 0.0070 | ϕ 8/71 | 0.0079 | ϕ 8/63 | 32.0 |
| 24 | DB40/1.68- C3/SR-3 | 400 | 600 | 1.68 | 1200 | 0.0107 | 3 ϕ 18 | 0.0050 | ϕ 8/100 | 0.0047 | ϕ 8/106 | 32.0 |

Parametrik çalışma kapsamında, ilk olarak deneysel çalışma ile doğrulanmış nümerik modeller farklı kaydedilerek yeni nümerik modeller oluşturulmuştur. Bu modellerde numunelerin geometri, boyut, malzeme özellikleri ve sonlu elemanlar modelleme tekniği sabit tutulmuştur. Modeller üzerinde sadece çekme ve kesme donatısı oranları değiştirilmiştir. Elemanlar üzerinde çekme donatısı oranlarının değişimine bağlı olarak faydalı yüksekliklerde (d) değişimler oluşmuştur. Bu değişimler elemanların a/d oranlarında küçük değişikliklere yol açmıştır.

Parametrik çalışmada uygulanan yöntemin doğruluğu ve performansı, bu tez yazarı ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bilimsel bir nümerik çalışmada da (Demir ve ark., 2016a) gösterilmiştir. Çalışmada, sadece kesme donatısı oranları farklı ancak diğer tüm kesit ve malzeme özellikleri benzer 2 adet deney numunesinin deneysel sonuçları kullanılarak nümerik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Nümerik modellerin tüm özellikleri sabit tutularak sadece kesme donatısı oranları değiştirilmiş ve deney sonuçlarının doğrulanmasında oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında da benzer yöntem kullanılmıştır. Bununla birlikte, deney matrisine benzer geometri, boyut, malzeme özelliklerine sahip fakat farklı kesme donatısı oranı içeren numuneler de eklenerek yöntemin gerçekliği tekrar kontrol edilmiştir.

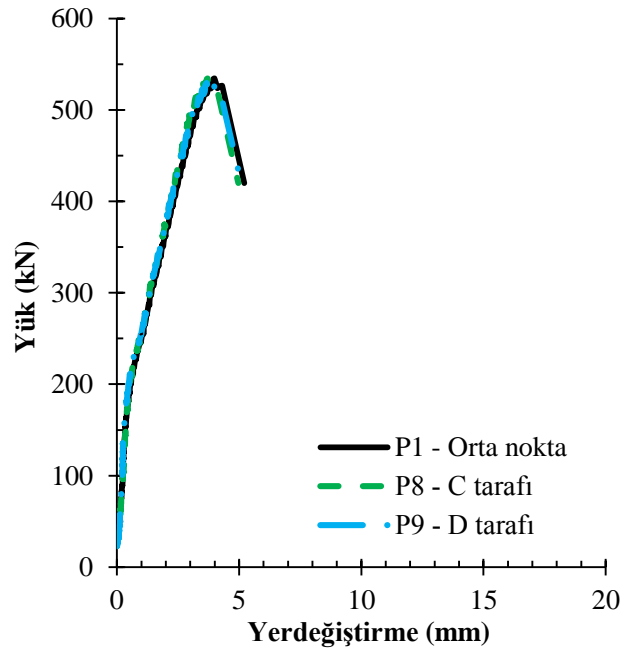
BÖLÜM 6. DENEYSEL VE NÜMERİK ÇALIŞMA SONUÇLARI

Bu tez çalışması kapsamında, betonarme yüksek kirişlerin kesme etkisi altındaki eğik çatlak davranışının gerçekçi olarak incelenebilmesi amacıyla gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışma için üretilen numuneler, kesme kritik davranış sergileyecek şekilde tasarlanmıştır. Bundan dolayı, deney esnasında numune üzerinde düşey ve yatayda oluşacak yerdeğiştirme miktarlarının oldukça sınırlı seviyede kalması ve çekme donatılarında oluşacak gerilme değerlerinin ise donatı akma dayanımlarına ulaşmaması beklenmektedir. Elemanlarda, mesnetlerde oluşan dönme miktarlarının oldukça sınırlı seviyede kalacak olması sebebiyle sünek bir davranış beklenmemektedir. Hedeflenen tasarıma ulaşıp ulaşılmadığının kontrolü için deney esnasında numune üzerinde belirli noktalardan düşey ve yatay yerdeğiştirme ile donatı birim şekildeğiştirme değerleri ölçülmüştür. Bununla birlikte numune, deney düzeneğine alt ve üst mesnet plakası arasında yerleştirilmiş olup bu iki mesnet plakası miller vasıtasıyla sıkıştırılarak birbirlerine bağlanmıştır. Bu sayede, numunenin düzlem dışı hareketinin engellenmesi ve numune ile mesnet plakaları arasına konulan kauçuk plakaların deney öncesinde yeteri kadar sıkıştırılıp, deney sırasında oluşabilecek mesnet çökmelerinin sınırlandırılması hedeflenmiştir. Buna rağmen, numunede oluşan düzlem dışı hareket ve mesnet çökmesi değerleri deney esnasında ölçülerek, deney düzeneğinin stabilitesi de ayrıca kontrol edilmiştir. Yukarıda belirtilen ölçüm sonuçları DB40/1.86-C2 deney numunesi üzerinde aşağıda örnek olarak gösterilmiştir. Deney esnasında numune üzerinde ölçüm alınan noktalar Şekil 6.1.'de verilmiştir.



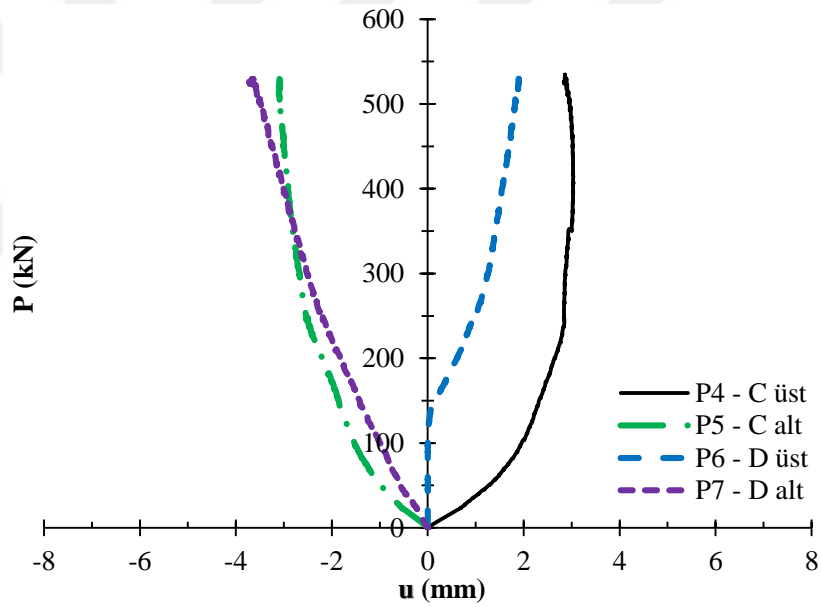
Şekil 6.1. Deney numunesinden ölçüm yapılan noktalar.

Deney esnasında numunenin alt yüzeyinde, potansiyometreler ile P1, P8 ve P9 noktalarından ölçülerek elde edilen “yük – düşey yerdeğiştirme” davranış grafikleri Şekil 6.2.’de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi numune 529 kN luk bir yük altında maksimum 4,06 mm düşey yerdeğiştirme yaparak, kesme etkisi altında ani ve gevrek göçme davranışı sergilemiştir. Şekil 6.2. üzerinde numune altından 3 farklı noktadan ölçülen düşey yerdeğiştirme grafikleri karşılaştırıldığında (P1, P8 ve P9), eleman davranışının oldukça birbirlerine benzer olduğu görülmektedir. Numunelerin tasarımından beklenildiği gibi, elemanda eğilme hasarı oluşmamış ve numune altından ölçülen düşey yerdeğiştirme miktarları her üç potansiyometrede de oldukça benzer ve sınırlı seviyede kalmıştır.



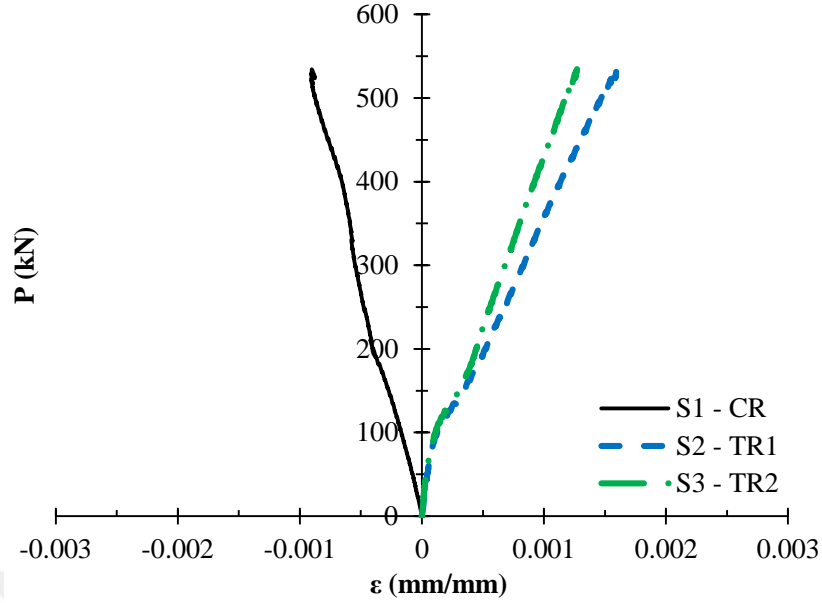
Şekil 6.2. Yük – düşey yerdeğiştirme davranış grafiği.

Deney esnasında numunenin C ve D yan yüzeylerinde; P4, P5, P6 ve P7 noktalarından ölçülen “yük – yatay yerdeğiştirme” davranış grafikleri Şekil 6.3.’te verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi numunelerin yan yüzeylerinde; üst noktalar (P4 ve P6) mesnetlerden içeri doğru, alt noktalar (P5 ve P7) ise mesnetlerden dışarı doğru hafif bir yatay yerdeğiştirme hareketi gerçekleşmiştir. Bu yatay yerdeğiştirme davranışı, numunenin mesnetlerinden hafifçe içeri doğru döndüğünü göstermektedir. Ancak belirli bir yük seviyesinin üzerinde yatay yerdeğiştirme değerleri artmamıştır. Bununla birlikte, ölçülen maksimum yatay yerdeğiştirme değeri 4 mm olarak elde edilmiştir. Bu değer oldukça küçük olup, bir miktarının çelik mesnet mafsallarının rahatça dönebilmesi için mafsalın oturduğu çelik plakalara 2 mm toleranslı olarak açılan deliklerden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 6.3. Yük – yatay yerdeğiştirme davranış grafiği.

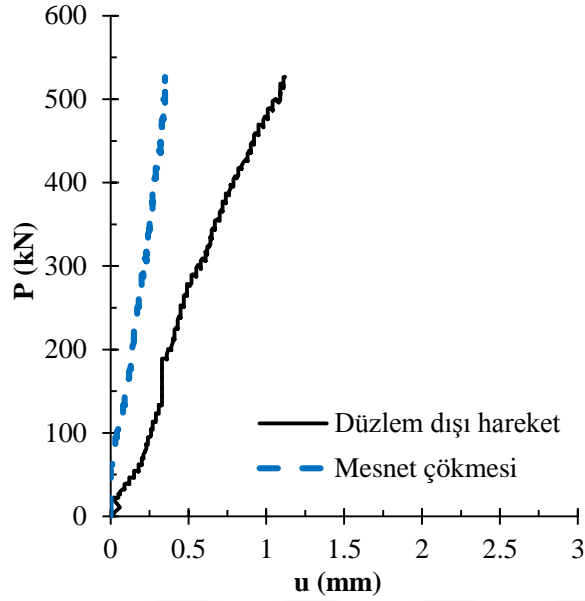
Çekme ve basınç donatılarına yapıştırılan gerinim pullarından ölçülen “yük – birim şekildeğiştirme” davranış grafikleri Şekil 6.4.’te verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi, basınç ve çekme donatılarında akma gözlenmemiştir. Maksimum donatı birim şekildeğiştirmesi % 0,10 mertebesinde elde edilmiştir.



Şekil 6.4. Yük – donatı birim şekil değiştirme davranış grafikleri.

Deney esnasında sabit mesnet ekseninde ölçülen “yük – mesnet çökmesi” grafiği Şekil 6.5.’de verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi, mesnette oluşan çökme miktarı maksimum 0.3 mm mertebesinde olup oldukça sınırlı seviyededir. Bununla birlikte, deney sonucunda elde edilen yük – düzlem dışı yer değiştirme grafiği de Şekil 6.5.’de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, elemanda oluşan maksimum düzlem dışı hareketin 1.1 mm mertebesinde olduğu görülmektedir. Bu değer oldukça düşük olup, deney düzeneğinde düzlem dışı hareketin sınırlandırılması için kullanılan çelik mesnetlerin oldukça başarılı bir şekilde çalıştığı düşünülmektedir.

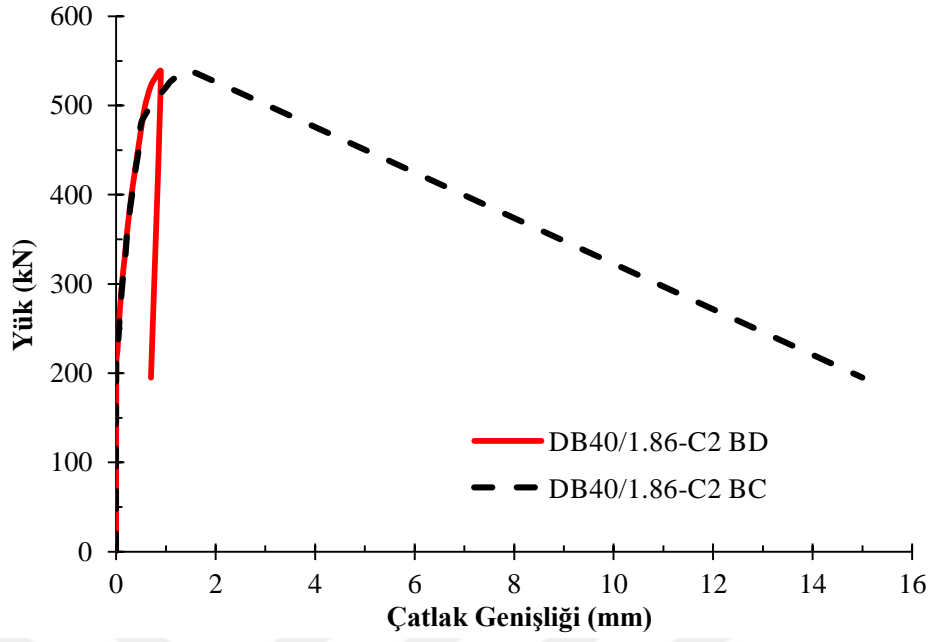
Sonuç olarak, numune üzerinde düşey ve yatayda ölçülen yük – yer değiştirme, donatılardan ölçülen yük – birim şekil değiştirme, kiriş gövdesinden ölçülen yük – düzlem dışı yer değiştirme ve mesnetten ölçülen yük – mesnet çökmesi davranış grafikleri bir bütün olarak incelendiğinde; elde edilen yer değiştirme değerlerinin oldukça küçük seviyede olduğu ve donatıların elastik bölgede kalarak akmadığı görülmektedir. Bu sebeple, numune tasarımında hedeflenen kesme kritik davranışın başarılı bir şekilde sağlandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte numunede düzlem dışı hareket ve mesnet çökmesi değerleri oldukça sınırlı seviyededir. Bu durum, deney düzeneğinin oldukça stabil çalıştığını göstermektedir. Deney matrisindeki tüm numunelerde yukarıda anlatılan davranışın benzeri görülmüştür.



Şekil 6.5. Yük – mesnet çökmesi davranış grafikleri.

6.1. Eğik Çatlak Ölçüm Yönteminin Değerlendirmesi ve Nümerik Modeli

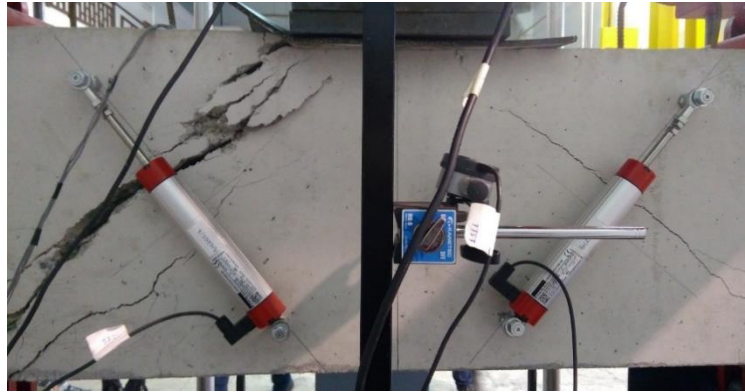
DB40/1.86-C2 deney numunesi üzerinde, eğik kesme çatlak genişliklerinin ölçülmesi amacıyla yerleştirilen çatlak ölçerlerden elde edilen sonuçlar Şekil 6.6.'da örnek olarak gösterilmiştir. Numunede deney sonucunda elde edilen hasar mekanizması A yüzü (ön) ve çatlak ölçerlerin yerleştirildiği B yüzü (arka) için Şekil 6.7.'de gösterilmiştir. Deney sırasında uygulanan yükün artışı ile birlikte her iki kesme açıklığındaki kesme çatlakları eş zamanlı olarak oluşmuş ve yükleme ile birlikte genişlikleri de artmıştır. Güç tükenmesinin olduğu C tarafında, maksimum yük seviyesine yakın değerlerde çatlak adedi ve genişlikleri göçme anında hızla artmıştır. Diğer tarafta (D tarafı) oluşan çatlak bir adet ile sınırlı olup yükün artışı ile birlikte sadece çatlak genişliği artmıştır. Bu tez çalışması kapsamında, önerilen formülde kullanılan çatlak genişliği, eleman üzerindeki bir adet çatlığa ait maksimum çatlak genişliğidir. Bu sebeple, deneysel çalışmanın çatlak genişliği ölçüm sonuçlarından tek çatlığa ait maksimum çatlak genişliği sonuçları dikkate alınmıştır.



Şekil 6.6. Yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği.



(a) A yüzeyi (ön).

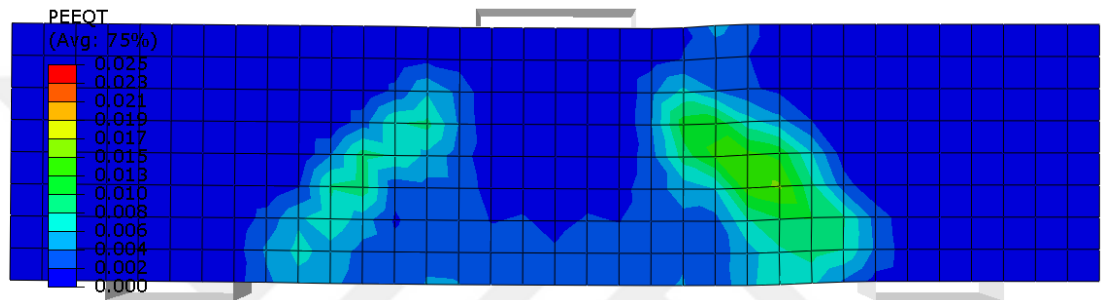


(b) B yüzeyi (arka).

Şekil 6.7. Numunenin hasar sonrası göçme mekanizması.

Deney numunesinin, doğrusal olmayan SE tekniği kullanılarak oluşturulmuş nümerik modelinden elde edilen eşdeğer çekme plastik birim şekildeğiştirme (PEEQT)

davranışı Şekil 6.8.'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, nümerik modelde elemanın basınç çubuğu eksenine doğrultusunda dik asal çekme gerilmeleri oluşmuştur. Bu çekme gerilmeleri elemanda eğik kesme çatlaklarının oluşumuna yol açmaktadır. Bu davranışın deney numunesinde görülen hasar mekanizması ile oldukça benzer olup, nümerik modelin elemanda oluşan çatlak ve hasar davranışını oldukça başarılı bir şekilde temsil ettiği düşünülmektedir. Deneysel ve nümerik çalışmadaki, hasar mekanizması ve çatlak davranışı açısından görülen bu uyum diğer tüm deney numunesi ve nümerik modeller arasında da görülmüştür.



Şekil 6.8. Numunenin nümerik PEEQT davranışı.

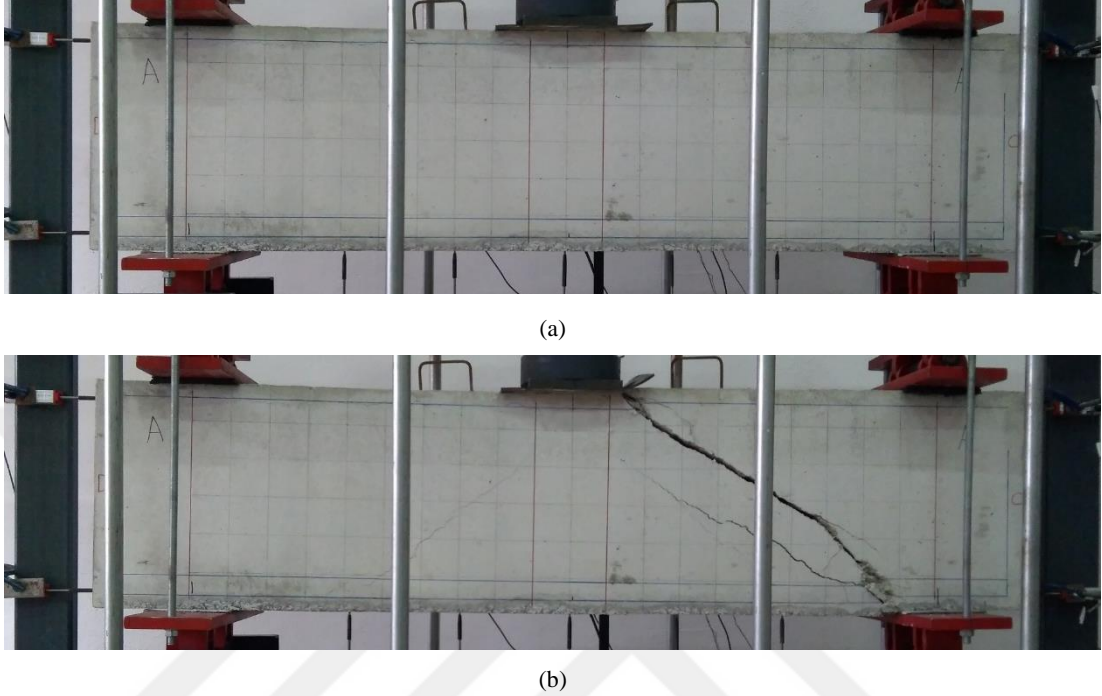
6.2. Deneysel Çalışma ve Nümerik Model Doğrulama Çalışması Sonuçları

Deneysel çalışma kapsamında 12 adet deney numunesi tasarlanmış ve test edilmiştir. Bu numunelerden 3 adedi kesme donatısı içermekte olup 9 adedi kesme donatısı içermemektedir. Her bir deney numunesine ait deneysel ve nümerik çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda açıklanmıştır.

6.2.1. DB60/1.86-C1 deney numunesi

Deney numunesinin deney öncesi hasarsız ve deney sonrası hasarlı durumu Şekil 6.9.'da gösterilmiştir. Numunede kritik çatlama yükü ($P_{cr}=235$ kN) aşılana kadar herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiş olup bu değerle aşılmasıyla elemanda basınç çubuğu eksenine (strut) üzerinde eğik kesme çatlakları oluşmuştur. Bu çatlak her iki kesme açıklığında eş zamanlı olarak gözlenmiştir. Uygulanan yükün artışı ile birlikte kesme çatlakları genişlikleri giderek artmıştır. Deney sonucunda, basınç çubuğunun

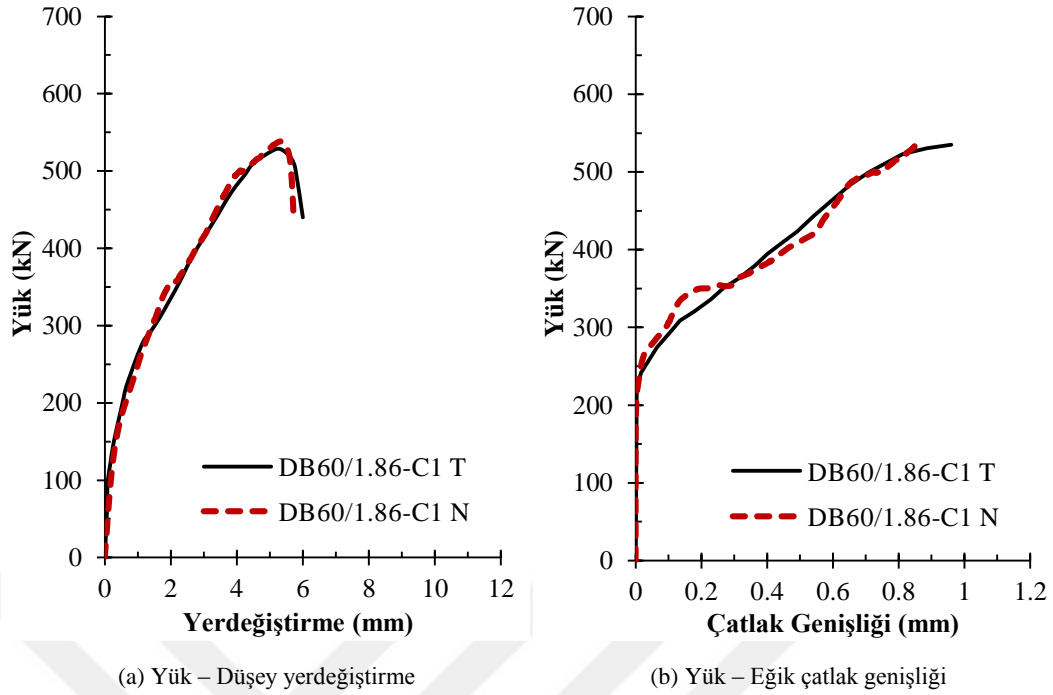
(strut) maksimum dayanıma ulaşarak kırılması ile numunede ani ve gevrek kesme hasarı oluşmuştur (Şekil 6.9.).



Şekil 6.9. DB60/1.86-C1 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.

Deney sonucunda, numuneden elde edilen “yük – orta nokta düşey yerdeğiştirme ($P - u$)” ve “yük – çatlak genişliği ($P - w$)” davranış grafikleri Şekil 6.10.’da verilmiştir. Numunenin yük – düşey yerdeğiştirme davranış grafiği incelendiğinde, elemanın maksimum yük taşıma kapasitesi 529 kN ve maksimum düşey yerdeğiştirme değeri 5,22 mm olarak elde edilmiştir. Elemanda, yerdeğiştirme değerinin oldukça küçük olması sebebiyle gevrek kesme davranışı hakim olmuş olup sünek davranış gözlenmemiştir. Maksimum yük değerine (P_u) ulaşıldığında, kesme çatlak genişliklerinin hızla artışı ile birlikte uygulanan yükte ani bir düşüş gözlenmiştir. Eleman artık daha fazla yük taşıyamayarak göçme noktasına ulaşmıştır.

Yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği (Şekil 6.10.) incelendiğinde, kritik kesme yüküne ulaşıldığında elemanda kesme çatlak oluşmuş ve uygulanan yükün artışı ile birlikte çatlak genişliği giderek artmıştır. Maksimum yüke karşılık gelen maksimum çatlak genişliği 0,96 mm olarak elde edilmiştir.



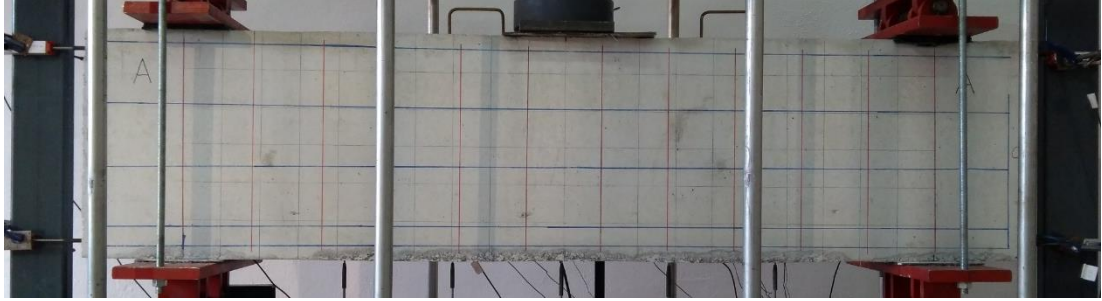
Şekil 6.10. DB60/1.86-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

Doğrusal olmayan SE modeli üzerinden elde edilen yük – düşey yerdeğiştirme ve yük – eğik çatlak genişliği davranış grafikleri deney sonuçları ile karşılaştırıldığında (Şekil 6.10.), nümerik modelin deney sonuçları ile oldukça başarılı bir şekilde örtüştüğü görülmüştür. Bu sebeple, oluşturulan nümerik model ile deney sonuçlarının oldukça etkin bir şekilde doğrulandığı düşünülmektedir.

6.2.2. DB60/1.86-C1/SR deney numunesi

DB60/1.86-C1/SR deney numunesi boyut ve malzeme özellikleri açısından DB60/1.86-C1 numunesi ile benzer olup sadece ilave kesme donatısı (etriye oranı: 0,0028 ve gövde donatısı oranı: 0,0032) içermektedir. Numunenin deney düzeneği üzerinde, deney öncesi hasarsız ve deney sonrası hasarlı durumu Şekil 6.11.'de gösterilmiştir. Deney esnasında, uygulanan yük 245 kN değerine ulaştığında, her iki kesme açıklığında da eş zamanlı olarak basınç çubuğu ekseninde eğik kesme çatlakları oluşmuştur. Uygulanan yükün artışı ile birlikte, mevcut kesme çatlakları genişlikleri giderek artmıştır. Numune üzerinde eğilme çatlakları oluşumu gözlenmemiştir. Deney sonucunda, D tarafındaki basınç çubuğunun maksimum

dayanımına ulaşarak kırılması ile numunede gevrek kesme hasarı oluşmuştur (Şekil 6.11.).



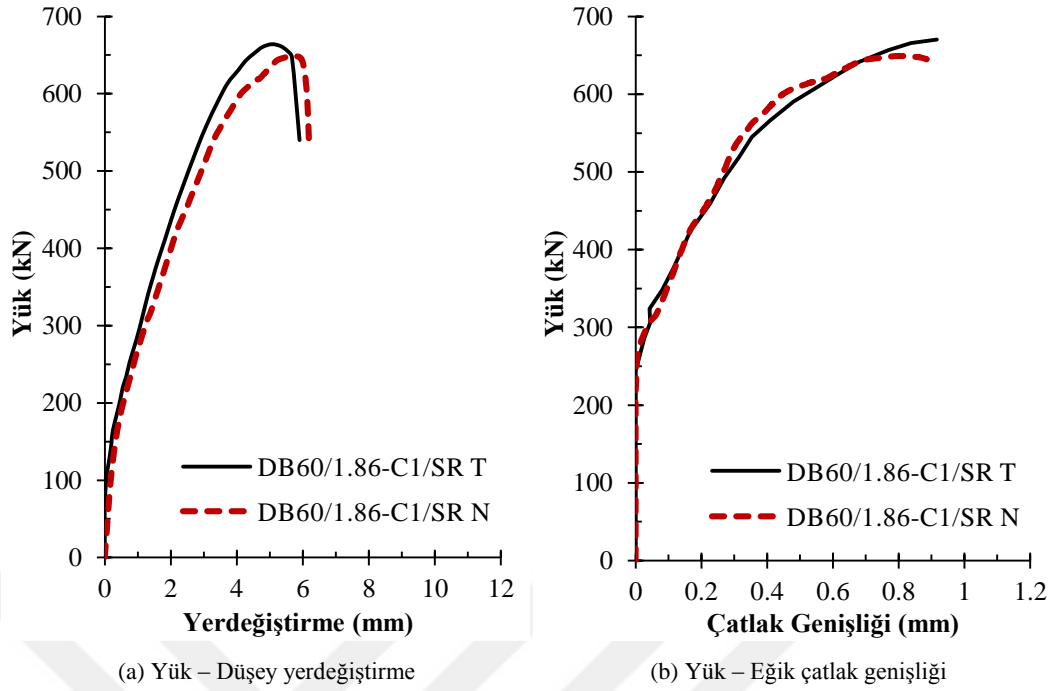
(a)



(b)

Şekil 6.11. DB60/1.86-C1/SR numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.

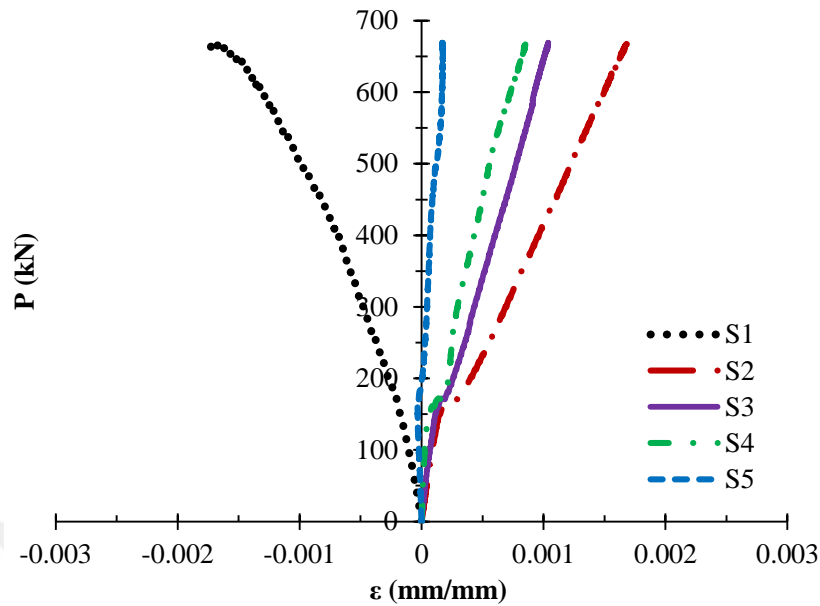
Deney sonucunda numuneden elde edilen $P - u$ ve $P - w$ davranış grafikleri Şekil 6.12.'de verilmiştir. Numunenin $P - u$ davranış grafiğinden görüldüğü gibi elemanın maksimum yük taşıma kapasitesi ve buna karşılık gelen düşey yerdeğiştirme değeri sırasıyla 664 kN ve 5,06 mm olarak elde edilmiştir. Deney sonuçları DB60/1.86-C1 numunesi ile karşılaştırıldığında benzer şekilde düşey yerdeğiştirme değerleri oldukça küçük seviyede kalmış olup kesme donatısı etkisiyle elemanda sadece yük taşıma kapasitesinde artış gözlenmiştir. Numunede sünek davranış gözlenmemiş, ancak önceki numuneye benzer şekilde gevrek kesme davranışı hakim olmuştur. Uygulanan yük, maksimum yük taşıma kapasitesine ulaştığında, kesme çatlağı genişliğinin hızla artması ile birlikte yükte ani bir düşüş gerçekleşmiştir. Kesme donatıları; numuneye süneklik açısından beklenen katkıyı sağlamamasına rağmen yük taşıma kapasitesinde önemli artışa yol açmıştır. Bu durum, literatürde de belirtildiği gibi (Doğangün, 2012) betonarme yüksek kirişlerin kesme kritik elemanlar olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.12. DB60/1.86-C1/SR deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

Numunenin yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği (Şekil 6.12.) incelendiğinde, P_{cr} aşıldığında elemanda kesme çatlakları oluşmuş ve uygulanan yükün artışı ile birlikte çatlak genişliği giderek artmıştır. Maksimum yüke karşılık gelen maksimum çatlak genişliği 0,92 mm olarak elde edilmiştir.

Kesme donatısı içeren bu numunede, çekme ve basınç donatılarına ilave olarak etriye ve gövde donatılarına da gerinim pulları (Şekil 5.11.) yapıştırılmıştır. Elemanın, uygulanan yükün altında kalan orta eksenli hizasına denk gelen basınç (S1), çekme (S2 ve S3) ve gövde (S4 ve S5) donatılarına yapıştırılan gerinim pullarından ölçülen birim şekildeğiştirme (ϵ_s) eğrileri Şekil 6.13.'te verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi uygulanan yükün artışı ile birlikte basınç donatısında birim kısalma, çekme ve gövde donatılarında ise birim uzama oluşmuştur. Basınç bölgesinden çekme bölgesine doğru gidildikçe donatılardaki birim uzama miktarları giderek artmıştır. Maksimum birim şekildeğiştirme değeri, çekme bölgesi dış lifine en yakın konumdaki çekme donatısında oluşmuştur. Oluşan gerilme değerleri, donatıların akma gerilmesi değerlerini aşmamış ve donatılar sadece elastik bölgede çalışmıştır. Sadece basınç donatısı akma noktasına ulaşmış ancak donatının akma sahanlığı bölgesinde önemli bir birim şekildeğiştirme oluşumu gözlenmemiştir.

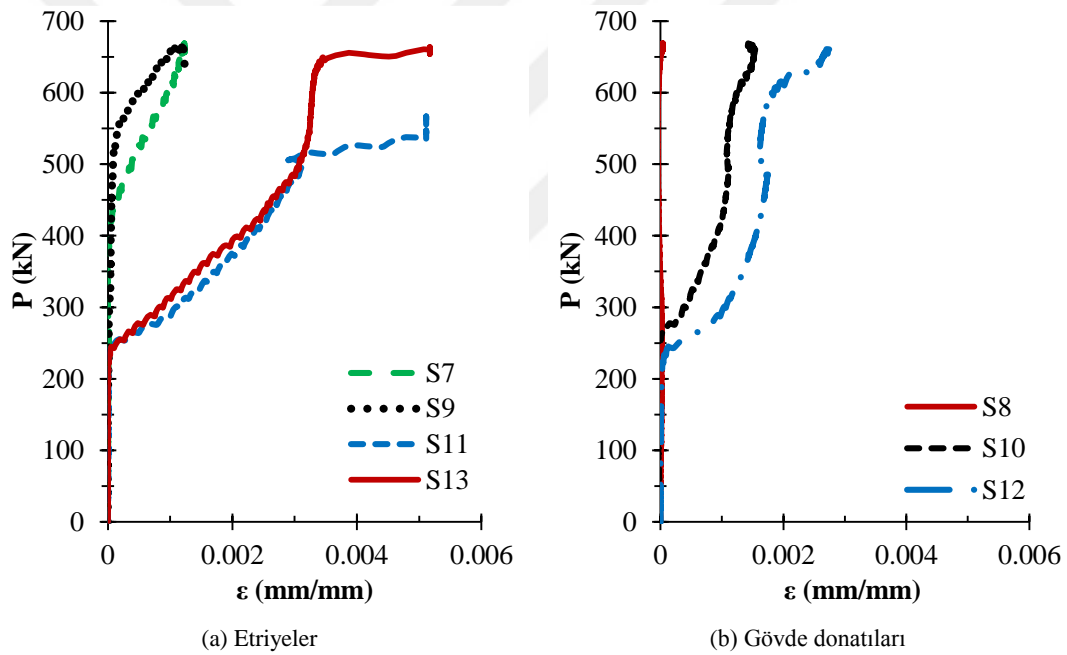


Şekil 6.13. DB60/1.86-C1/SR deney numunesi orta eksenli hizasındaki donatıların birim şekildeğiştirme eğrileri.

Deney esnasında numunenin çatlak (basınç çubuğu) eksenine denk gelen etriyelere yapıştırılan gerinim pullarından (Şekil 5.11.) ölçülen $P - \epsilon_s$ davranış grafikleri Şekil 6.14.'te verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi, etriyelerin yük taşımaya başladığı nokta; P_{cr} değerine karşılık gelmektedir. Bu noktada, betonda kesme çatlakları oluşmakta ve donatılarda birim uzamalar oluşmaya başlamaktadır. Bu nokta ayrıca çatlak ölçerlerde, çatlak genişliği değerlerinin oluşmaya başladığı noktaya da karşılık gelmektedir (Şekil 6.6.). Kesme çatlaklarının oluşumundan sonra elemandaki çatlak genişlikleri ve etriyelerdeki birim şekildeğiştirme değerleri giderek artmaktadır. Göçme hasarının olduğu D tarafındaki etriyelerde (S11 ve S13), kesme hasarı oluşan ancak göçme oluşmayan C tarafındaki etriyelere (S7 ve S9) göre daha fazla birim şekildeğiştirme oluşmuştur (Şekil 6.14.). D tarafındaki etriyeler yaklaşık 0,003 birim şekildeğiştirme değerinde akmıştır. C tarafındaki etriyeler (S7 ve S9) ise sadece elastik bölgede kalmış, donatılardaki uzamalar akma birim şekildeğiştirme değerine ulaşmamıştır.

Bununla birlikte, gövde donatılarına yapıştırılan gerinim pullarının (Şekil 5.11.) sonuçları incelendiğinde (Şekil 6.14.); etriyelere benzer şekilde, göçme hasarının olduğu taraftaki gövde donatılarının (S10 ve S12) daha fazla birim şekildeğiştirme

yaptığı gözlenmiştir. Maksimum birim şekildeğiştirme değeri, basınç bölgesi dış lifine en yakın gövde donatısında (S12) oluşmuştur. Kesme çatlakları oluşan ancak göçmenin oluşmadığı taraftaki (S8) gövde donatısında önemli bir birim şekildeğiştirme değeri oluşmamıştır. Etriye ve gövde donatısı birim şekildeğiştirme değerleri bir bütün olarak birbirleri ile karşılaştırıldığında, etriyelerin gövde donatılarına göre, eleman kesme kapasitesine daha fazla katkı sağladığı ve bunun sonucunda gövde donatılarına oranla daha fazla birim şekildeğiştirme yaptığı görülmüştür. Bu durum literatürde yer alan, “gövde donatısı, a/d oranı 1’den küçük olan numunelerde daha etkin çalışırken, a/d oranı arttıkça etriyelerin etkinliği giderek artmaktadır” tezini desteklemektedir (Smith ve Vantsiotis, 1982). Bu deney numunesinin a/d oranı 1,86 olduğu için benzer davranış burada da gözlenmiştir.

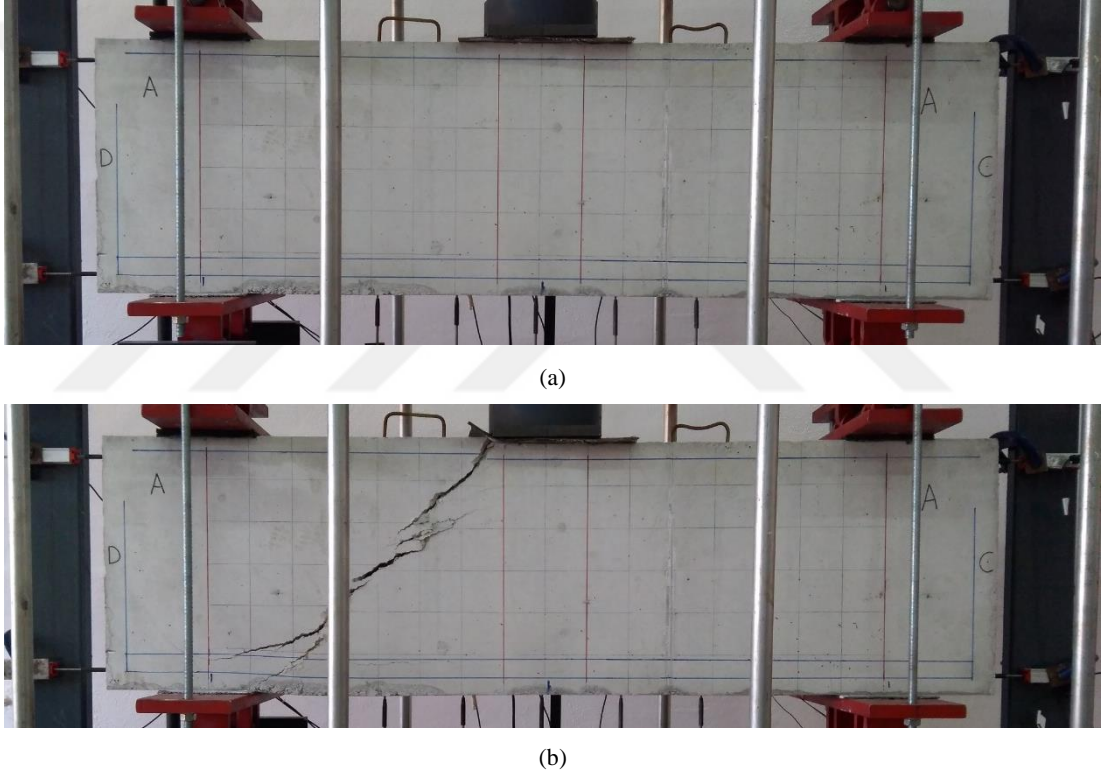


Şekil 6.14. DB60/1.86-C1/SR deney numunesi çatlak eksenine paralel bulunan donatıların davranışı.

Son olarak, nümerik modelden elde edilen yük – düşey yerdeğiştirme ve yük – çatlak genişliği davranış grafikleri (Şekil 6.12.) deney sonuçları ile karşılaştırıldığında, nümerik modelin deney sonucunu oldukça başarılı ve etkin bir şekilde temsil ettiği görülmüştür.

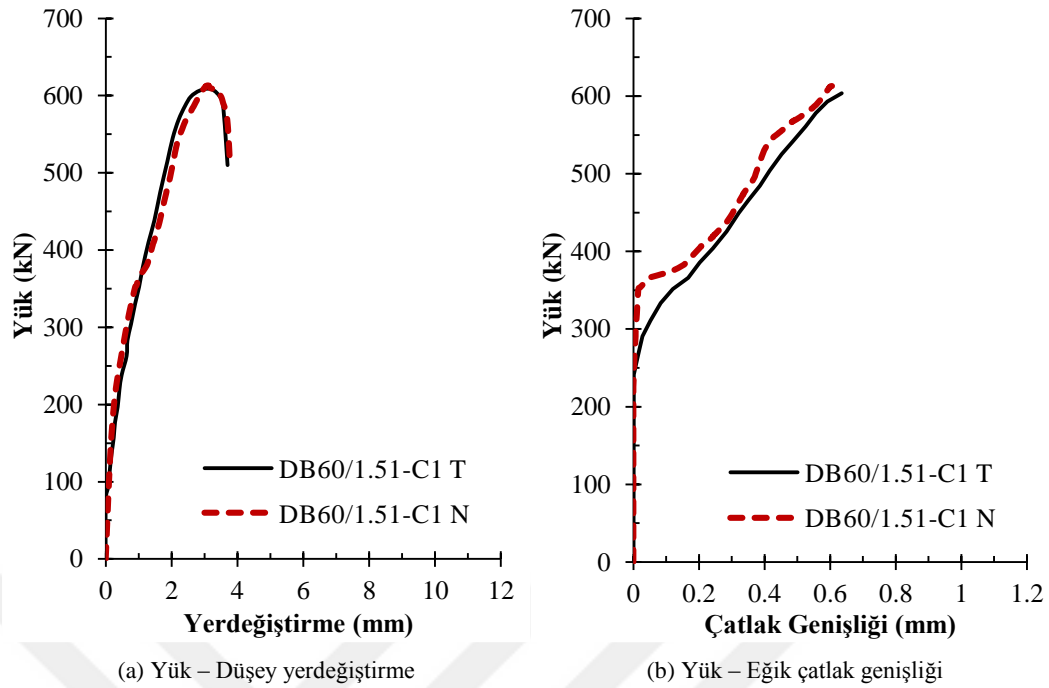
6.2.3. DB60/1.51-C1 deney numunesi

Deney numunenin düzenek üzerinde, deney öncesi hasarsız durumu Şekil 6.15.'de gösterilmiştir. Deney esnasında uygulana yük 255 kN değerine ulaşmasıyla birlikte elemanda mesnet plakasından yükleme plakası arasında kalan eksen (basınç çubuğu ekseni) üzerinde eğik kesme çatlakları oluşmuştur. Bu çatlak her iki kesme açıklığında eş zamanlı olarak gözlenmiştir. Yükün artışı ile birlikte oluşan kesme çatlakları genişlikleri giderek artmış ve basınç çubuğu (strut) maksimum dayanımına ulaşarak numune ani ve gevrek bir şekilde güç tükenmesine ulaşmıştır (Şekil 6.15.).



Şekil 6.15. DB60/1.51-C1 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.

Deney sonucunda elde edilen $P - u$ ve $P - w$ davranış grafikleri Şekil 6.16.'da verilmiştir. Numunenin maksimum yük taşıma kapasitesi ve düşey yerdeğiştirme değeri sırasıyla 609 kN ve 3,16 mm olarak elde edilmiştir. Maksimum düşey yerdeğiştirme değeri oldukça küçük olup sünek bir davranış gözlenmemiştir. Yük maksimum yük taşıma kapasitesine ulaştığında kesme çatlakları genişliklerinin hızlıca artması ile birlikte yükte ani bir düşüş gerçekleşmiştir.



Şekil 6.16. DB60/1.51-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

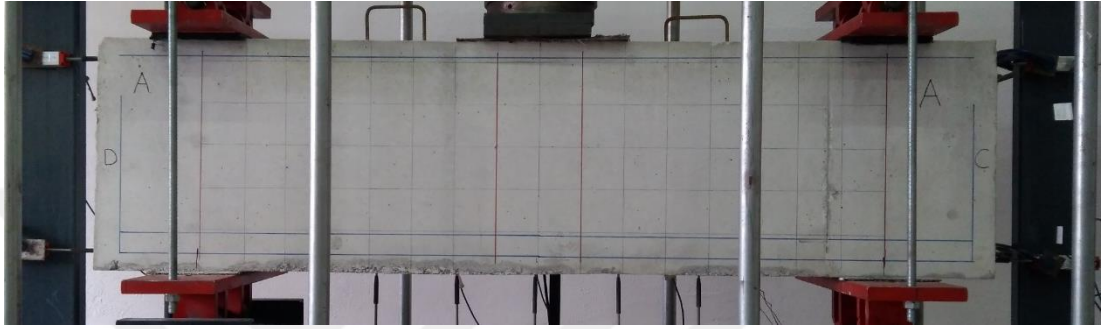
Yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği (Şekil 6.16.) incelendiğinde, P_{cr} aşıldığında elemanda kesme çatlakları oluşmuş ve uygulanan yükün artışı ile birlikte çatlak genişliği de giderek artmıştır. Maksimum yüke karşılık gelen maksimum çatlak genişliği 0,64 mm olarak elde edilmiştir.

Nümerik modelden elde edilen $P - u$ davranış grafiği Şekil 6.16.'da verilmiştir. Nümerik modelin hem yük hem de yerdeğiştirme davranışı açısından deney sonuçları ile oldukça başarılı bir şekilde örtüştüğü görülmüştür. Bununla birlikte, $P - w$ davranışı (Şekil 6.16.) incelendiğinde ise; nümerik modelden elde edilen çatlak genişliği, çatlak oluşumundan sonraki ilk kısımda daha rijit ancak yükün artışı ile birlikte deney sonucu ile uyumlu bir davranış sergilediği görülmektedir. Sonuç olarak, deney sonucunun nümerik olarak oldukça başarılı ve etkin bir şekilde doğrulandığı değerlendirilmiştir.

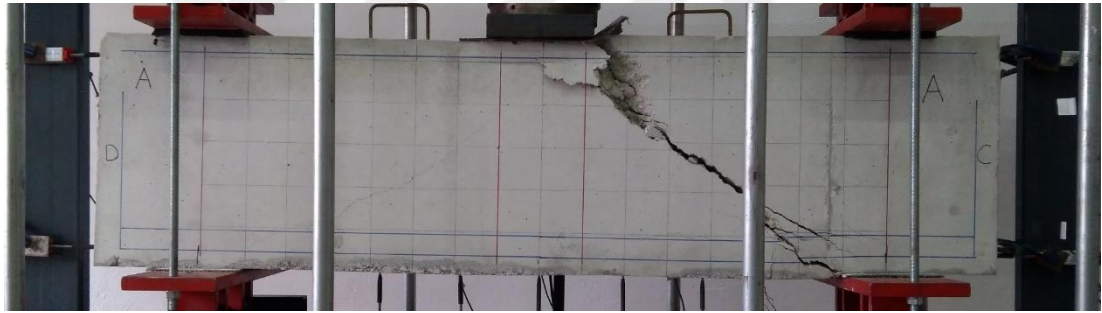
6.2.4. DB55/1.67-C1 deney numunesi

DB55/1.67-C1 numunesinin deney düzeneği üzerindeki, deney öncesi durumu Şekil 6.17.'de gösterilmiştir. Numunede P_{cr} (225 kN) aşılanaya kadar herhangi bir çatlak

oluşumu gözlenmemiştir. Bu değerin aşılmasıyla elemanda basınç çubuğu eksen (strut) üzerinde eğik kesme çatlakları oluşmuştur. Bu çatlakların oluşumu her iki kesme açıklığında eş zamanlı olarak gözlenmiştir. Uygulanan yükün artışı ile birlikte kesme çatlakları genişlikleri giderek artmıştır. Deney sonucunda, basınç çubuğunun maksimum dayanımına ulaşarak kırılması ile numunede ani ve gevrek kesme hasarı oluşmuştur (Şekil 6.17.).



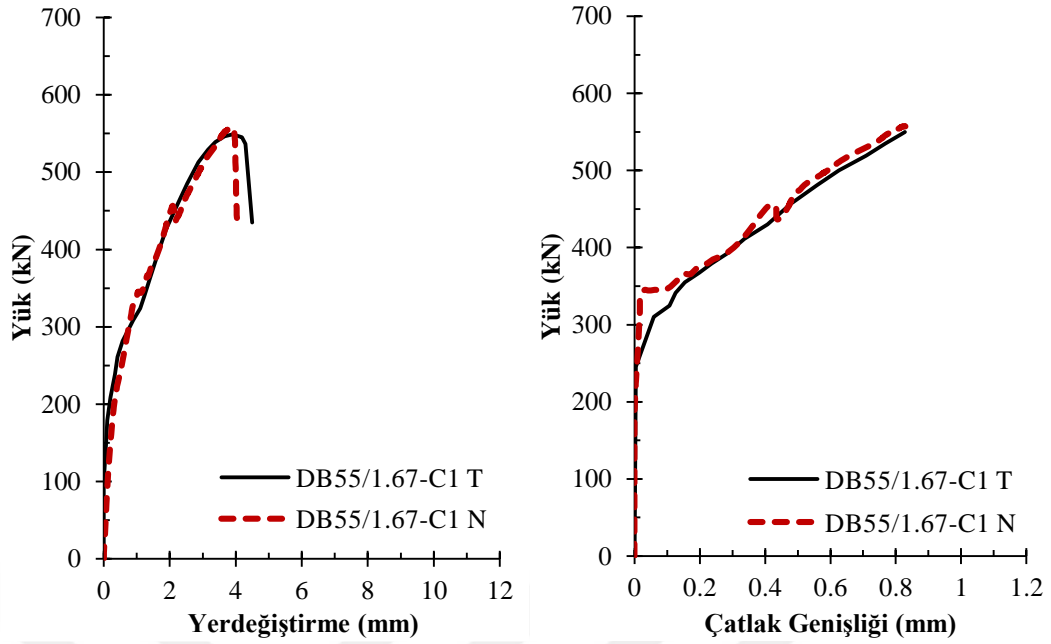
(a)



(b)

Şekil 6.17. DB55/1.67-C1 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.

Deney sonucunda numuneden elde edilen yük – orta nokta düşey yerdeğiştirme ve yük – çatlak genişliği davranış grafikleri Şekil 6.18.'de verilmiştir. P – u davranış grafiği incelendiğinde, elemanın maksimum yük taşıma kapasitesi 549 kN ve buna karşılık gelen düşey yerdeğiştirme değeri 3,91 mm olarak elde edilmiştir. Elemanda yerdeğiştirme değerinin oldukça küçük olması sebebiyle gevrek kesme davranışı hakim olur. Numunede sünek davranış gözlenmemiştir. Uygulanan yükün maksimum değerine ulaşıldığında kesme çatlakları genişliğinin hızlıca artması ile birlikte yükte ani bir düşüş gözlenmiştir.



(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

Şekil 6.18. DB55/1.67-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

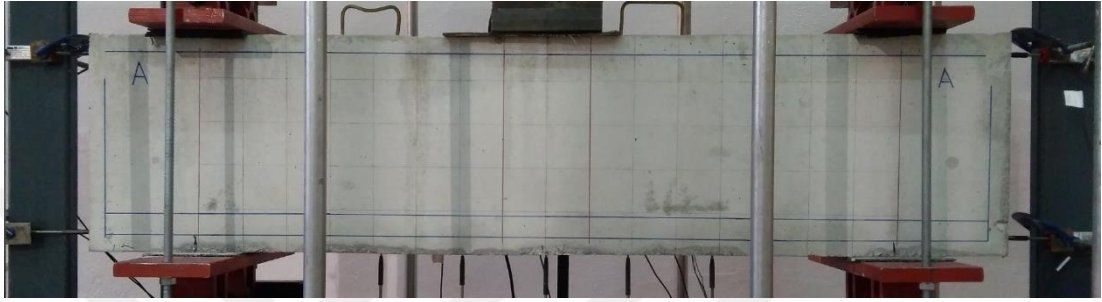
Numunenin yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği incelendiğinde, kritik kesme yükü aşıldığında elemanda kesme çatlakları oluşmuş ve uygulanan yükün artışı ile birlikte çatlak genişliği giderek artmıştır. Maksimum yüke karşılık gelen maksimum çatlak genişliği 0,82 mm olarak elde edilmiştir.

Nümerik modelden elde edilen yük – düşey yerdeğiştirme davranış grafiği (Şekil 6.18.) incelendiğinde, nümerik modelin hem yük hem de yerdeğiştirme açısından deney sonucu ile oldukça başarılı bir şekilde örüştüğü görülmüştür. Yük – eğik çatlak genişliği davranışı (Şekil 6.18.) incelendiğinde ise; nümerik modelden elde edilen çatlak genişliği, çatlak oluşumundan sonraki ilk kısımda daha rijit ancak yükün artışı ile birlikte deney sonucu ile uyumlu bir davranış sergilediği görülmektedir. Sonuç olarak, deney sonucunun nümerik olarak oldukça başarılı ve etkin bir şekilde doğrulandığı düşünülmektedir.

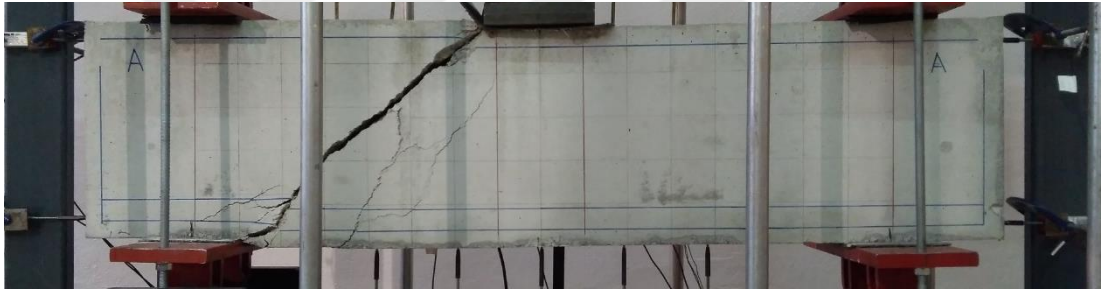
6.2.5. DB50/1.86-C1 deney numunesi

Deney numunesinin düzenek üzerindeki, deney öncesi hasarsız ve deney sonrası hasar almış durumları Şekil 6.19.'da gösterilmiştir. Uygulanan yük 240 kN değerine

ulaştığında numunede her iki kesme açıklığında eş zamanlı olarak kesme çatlağı görülmüştür. Bu çatlaklar basınç çubuğu ekseninde oluşmuş olup uygulanan yükün artışı ile birlikte genişlikleri giderek artmıştır. Numunede kesme davranışı hakim olmuş olup sünek bir davranış gözlenmemiştir. Deney sonucunda, numune D tarafındaki basınç çubuğunda oluşan kesme hasarının artışı ile birlikte ani ve gevrek güç tükenmesine ulaşmıştır (Şekil 6.19.).



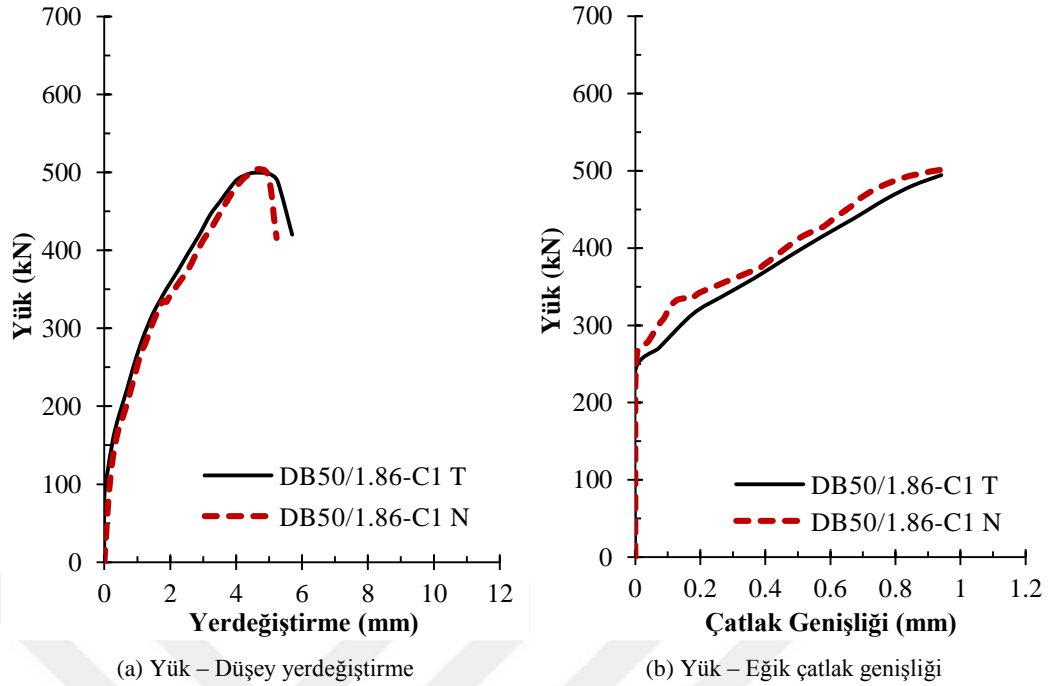
(a)



(b)

Şekil 6.19. DB50/1.86-C1 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.

Deney sonucunda numuneden elde edilen $P - u$ ve $P - w$ davranış grafikleri Şekil 6.20.'de verilmiştir. Numunenin yük - düşey yerdeğiştirme davranış grafiği incelendiğinde, elemanın maksimum yük taşıma kapasitesi 500 kN ve buna karşılık gelen düşey yerdeğiştirme değeri 4,71 mm olarak elde edilmiştir. Elemanda, yerdeğiştirme değerinin oldukça küçük olması sebebiyle gevrek kesme davranışı hakim olmuş olup, sünek davranış gözlenmemiştir. Uygulanan yükün maksimum değerine ulaşıldığında kesme çatlağı genişliğinin hızlıca arttığı ve yükün ani olarak düştüğü gözlenmiştir.



Şekil 6.20. DB50/1.86-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

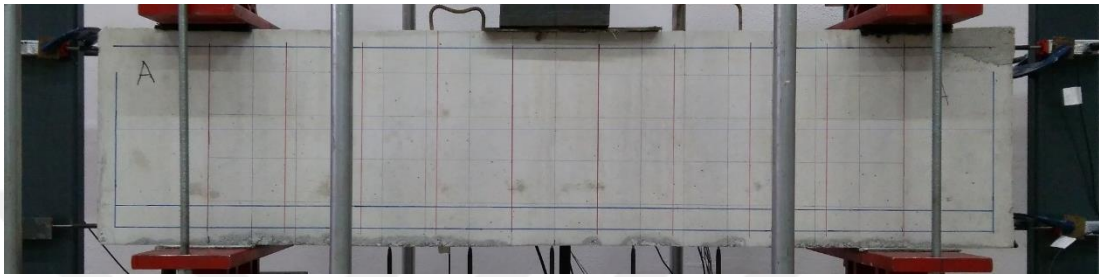
Numunenin yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği incelendiğinde, kritik kesme yükü aşıldığında elemanda kesme çatlakları oluşmuş olup uygulanan yükün artışı ile birlikte çatlak genişliği giderek artmıştır. Maksimum yüke karşılık gelen maksimum çatlak genişliği 0,94 mm olarak elde edilmiştir.

Nümerik modelden elde edilen yük – düşey yerdeğiştirme ve yük – eğik çatlak genişliği davranış grafikleri (Şekil 6.20.) incelendiğinde, nümerik modelin hem yük hem de yerdeğiştirme ve çatlak genişlikleri davranışları açısından deney sonucu ile oldukça başarılı bir şekilde örtüştüğü görülmüştür. Sonuç olarak, deney sonucunun nümerik olarak oldukça etkin bir şekilde doğrulandığı değerlendirilmiştir.

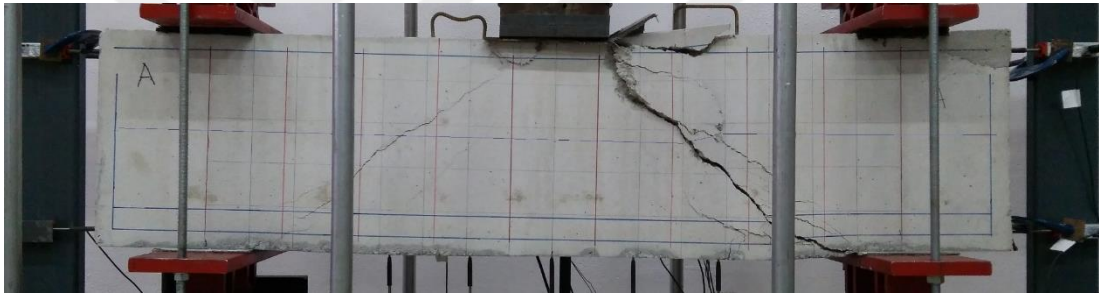
6.2.6. DB50/1.86-C1/SR deney numunesi

DB50/1.86-C1/SR deney numunesi boyut ve malzeme özellikleri açısından DB50/1.86-C1 numunesi ile benzer olup sadece ilave kesme donatısı (etriye oranı: 0,0029 ve gövde donatısı oranı: 0,0028) içermektedir. Numunenin deney düzeneği üzerinde, deney öncesi durumu Şekil 6.21.'de gösterilmiştir. Deney esnasında numunede kritik kesme yükü ($P_{cr}=220$ kN) aşılanaya kadar herhangi bir çatlak oluşumu

gözlenmemiştir. P_{cr} değerinin aşılmasıyla birlikte elemanda her iki kesme açıklığında da eş zamanlı olarak basınç çubuğu eksenini üzerinde eğik kesme çatlakları oluşumu gözlenmiştir. Yükün artışı ile birlikte oluşan kesme çatlak genişlikleri giderek artmış ancak eğilme çatlakları oluşmamıştır. Deney sonucunda, basınç çubuğu (strut) maksimum dayanımına ulaşarak kırılması ile numunede ani ve gevrek kesme hasarı oluşmuştur (Şekil 6.21.).



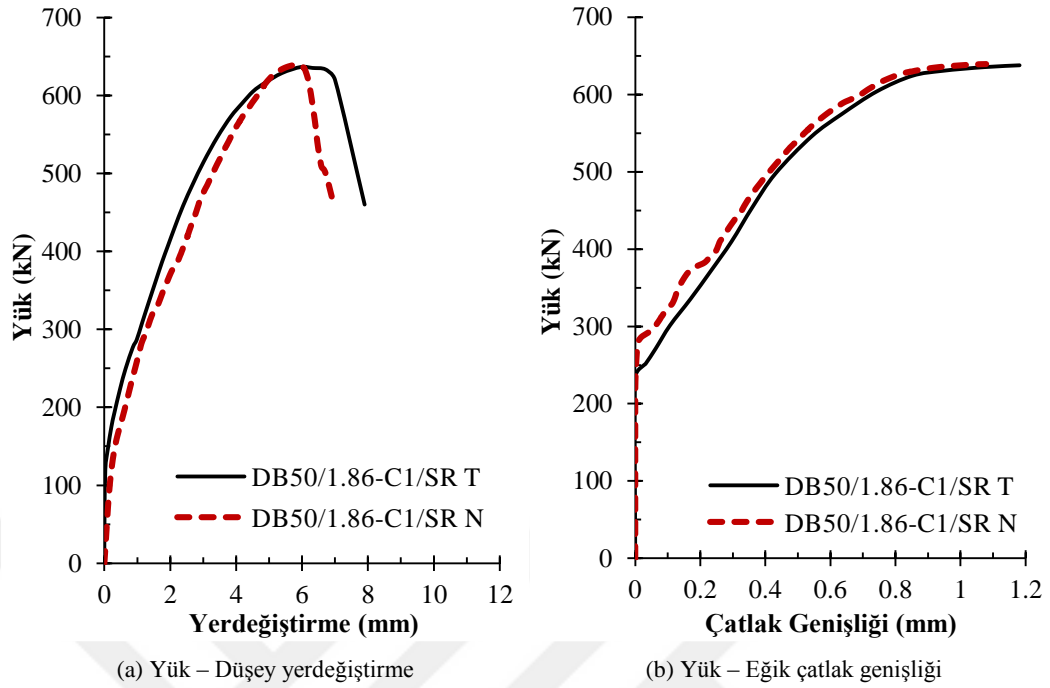
(a)



(b)

Şekil 6.21. DB50/1.86-C1/SR numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.

Deney sonucunda numuneden elde edilen yük – orta nokta düşey yerdeğiştirme ve yük – çatlak genişliği davranış grafikleri Şekil 6.22.'de verilmiştir. Numunenin $P - u$ davranış grafiğinden görüldüğü gibi elemanın maksimum yük taşıma kapasitesi ve buna karşılık gelen düşey yerdeğiştirme değeri sırasıyla 636 kN ve 5,97 mm olarak elde edilmiştir. DB50/1.86-C1 numunesi ile karşılaştırıldığında benzer şekilde düşey yerdeğiştirme değerleri oldukça küçük seviyede kalmış olup kesme donatısı sebebiyle sadece yük taşıma kapasitesinde bir artış gözlenmiştir. Numunede sünek bir davranış gözlenmemiş, gevrek kesme davranışı hakim olmuştur. Yük maksimum yük taşıma kapasitesine ulaştığında kesme çatlakları genişliğinin hızlıca artması ile birlikte yükte ani bir düşüş gerçekleşmiştir. Burada kesme donatıları süneklik olarak beklenen katkıyı sağlamamasına rağmen yük taşıma kapasitesinde önemli artışa yol açmıştır.

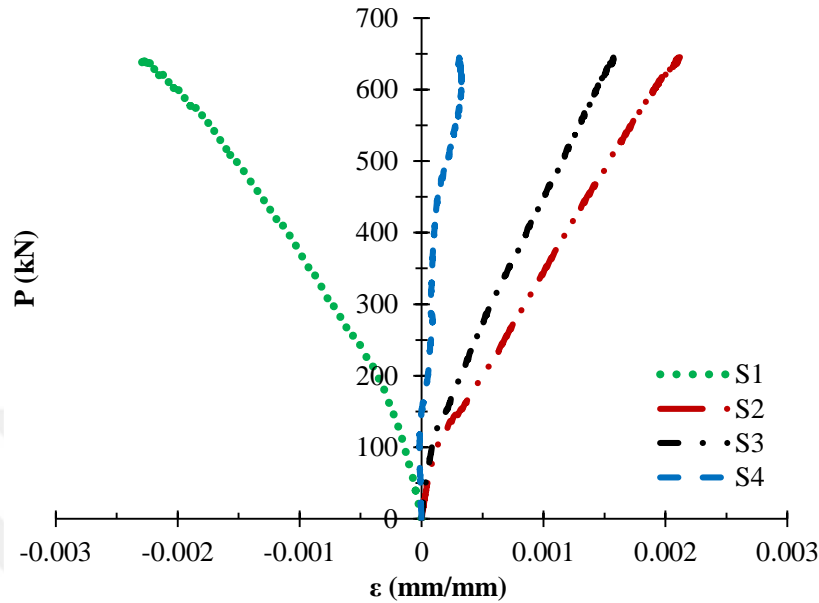


Şekil 6.22. DB50/1.86-C1/SR deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

Yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği (Şekil 6.22.) incelendiğinde, P_{cr} aşıldığında elemanda kesme çatlak oluşmuş ve uygulanan yükün artışı ile birlikte çatlak genişliği de giderek artmıştır. Maksimum yüke karşılık gelen maksimum çatlak genişliği 1,18 mm olarak elde edilmiştir. Kesme donatısı içermeyen DB50/1.86-C1 numunesi ile karşılaştırıldığında ise kesme donatısının etkisiyle maksimum çatlak genişliğinde artış gözlenmiştir.

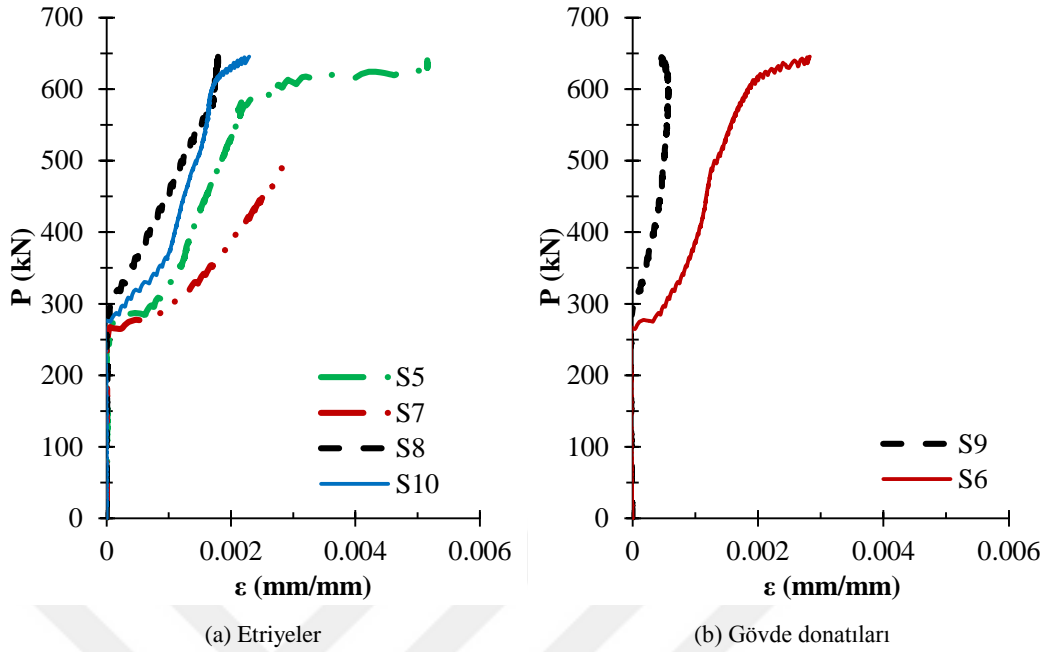
Kesme donatısı içeren bu numunede, çekme ve basınç donatılarına ilave olarak etriye ve gövde donatılarına da gerinim pulları yapıştırılmıştır (Şekil 5.7.). Elemanın, uygulanan yükün altında kalan orta noktası eksenine hizasına denk gelen basınç (S1), çekme (S2 ve S3) ve gövde (S4) donatılarına yapıştırılan gerinim pullarından ölçülen birim şekildeğiştirme eğrileri Şekil 6.23.'te verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi uygulanan yükün artışı ile birlikte basınç donatısında birim kısalma, çekme ve gövde donatılarında ise birim uzama oluşmuştur. Basınç bölgesinden çekme bölgesine doğru gidildikçe donatılardaki birim uzama miktarları giderek artmıştır. Maksimum birim şekildeğiştirme değeri, çekme bölgesi dışı lifine en yakın konumdaki çekme

donatısında oluşmuştur. Oluşan gerilme değerleri, donatıların akma gerilmesi değerlerini aşmamış ve donatılar sadece elastik bölgede çalışmıştır.



Şekil 6.23. DB50/1.86-C1/SR deney numunesi orta noktadaki donatıların birim şekil değiştirme eğrileri.

Deney esnasında numunenin çatlak (basınç çubuğu) ekseninde bulunan etriyelere yapıştırılan gerinim pullarından (Şekil 5.7.) ölçülen $P - \epsilon_s$ davranış grafikleri Şekil 6.24.'te verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi, etriyeler P_{cr} değerinin aşılması ile birlikte yük taşımaya başlamış ve eğik kesme çatlakları oluşmuştur. Kesme çatlaklarının oluşumundan sonra, elemandaki çatlak genişlikleri ve etriyelerdeki birim şekil değiştirme değerleri giderek artmıştır. Şekil 6.24. incelendiğinde elemanda göçme hasarının olduğu C tarafındaki etriyelerde (S5 ve S7), kesme hasarı oluşan ancak göçme oluşmayan D tarafındaki etriyelere (S8 ve S10) göre daha fazla birim şekil değiştirme olduğu görülmektedir. Göçmenin olduğu taraftaki etriyeler yaklaşık 0,002 birim şekil değiştirme değerinde akmıştır. Diğer taraftaki etriyeler (S8 ve S10) ise sadece elastik bölgede çalışmış, donatılar akmamıştır. Bununla birlikte, gövde donatılarına yapıştırılan gerinim pullarının (Şekil 5.7.) sonuçları incelendiğinde etriyelere benzer şekilde, göçme hasarının olduğu taraftaki gövde donatısının (S6) daha fazla birim şekil değiştirme yaptığı ve aktığı gözlenmiştir (Şekil 6.24.). Kesme hasarı oluşan ancak göçme oluşmayan diğer taraftaki (S9) gövde donatısında önemli bir birim şekil değiştirme değeri elde edilmemiştir.



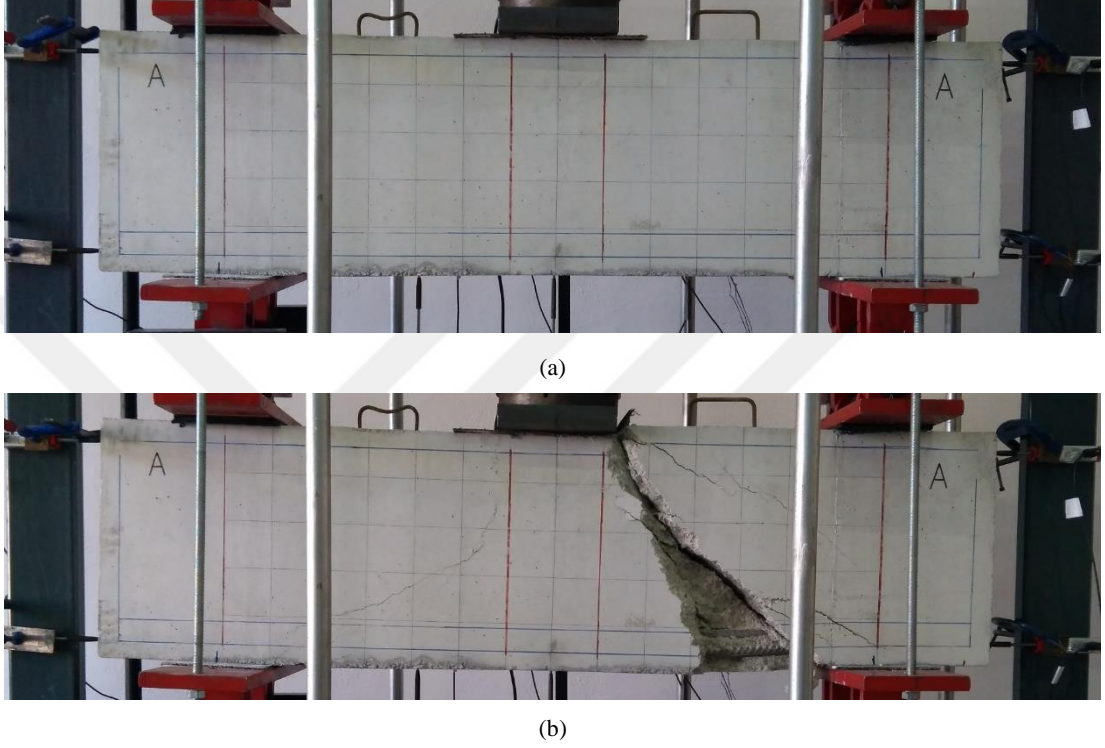
Şekil 6.24. DB50/1.86-C1/SR deney numunesi çatlak eksenine paralel bulunan donatıların davranışı.

Nümerik modelden elde edilen yük – düşey yerdeğiştirme davranış grafiği (Şekil 6.22.) incelendiğinde, nümerik modelin yük seviyesi olarak deney sonucu ile oldukça başarılı bir şekilde örtüştüğü görülmüştür. Ancak maksimum düşey yerdeğiştirme değerinde oldukça küçük bir fark oluşmuştur. Maksimum düşey yerdeğiştirme sonucunda görülen bu küçük fark maksimum çatlak genişliği sonucunda da gözlenmiştir (Şekil 6.22.). Elemanda gevrek kesme hasarı oluşması ve maksimum düşey yerdeğiştirme değerinin oldukça küçük seviyede olması sebebiyle, sonuçlarda oluşan bu küçük farkın kabul edilebilir sınırlarda olduğu düşünülmektedir. Sonuç olarak, deney sonucunun nümerik olarak oldukça başarılı ve etkin bir şekilde doğrulandığı değerlendirilmektedir.

6.2.7. DB50/1.63-C1 deney numunesi

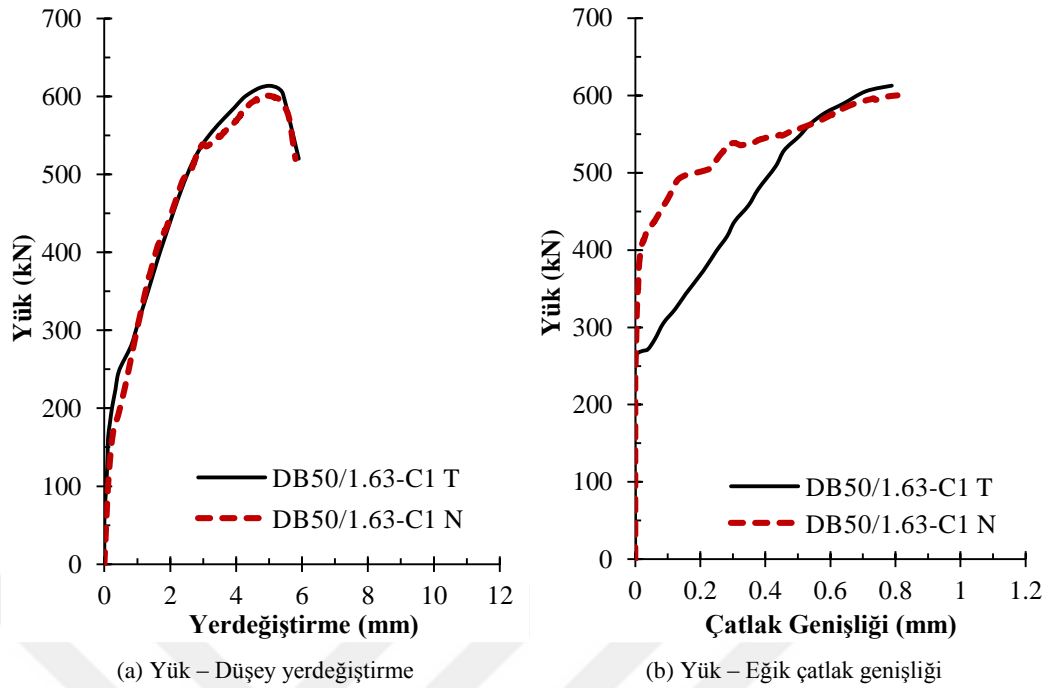
Numunenin deney düzeneği üzerinde, deney öncesi ve sonrası hasar almış durumları Şekil 6.25.'de gösterilmiştir. Deney esnasında numunede P_{cr} (260 kN) aşılana kadar herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Kritik kesme yükü değerinin aşılmasıyla birlikte elemanda mesnet plakası ile yükleme plakası arasında kalan eksen (basınç çubuğu eksenine) üzerinde eğik kesme çatlakları oluşmuştur. Bu çatlak her iki kesme

açıklığında da eş zamanlı olarak gözlenmiştir. Yükün artışı ile birlikte oluşan kesme çatlağı genişlikleri giderek artmıştır. Deney sonucunda, basınç çubuğunun (strut) maksimum dayanıma ulaşarak kırılması ile numunede ani ve gevrek kesme hasarı oluşmuştur (Şekil 6.25.).



Şekil 6.25. DB50/1.63-C1 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.

Deney sonucunda numuneden elde edilen yük – orta nokta düşey yerdeğiştirme ve yük – çatlak genişliği davranış grafikleri Şekil 6.26.'da verilmiştir. Numunenin yük – düşey yerdeğiştirme davranış grafiğinden görüldüğü gibi elemanın maksimum yük taşıma kapasitesi ve düşey yerdeğiştirme değerleri sırasıyla 614 kN ve 5,01 mm olarak elde edilmiştir. Grafikte düşey yerdeğiştirme değerinin oldukça küçük olması sebebiyle sünek bir davranış gözlenmemiş, gevrek kesme davranışı hakim olmuştur. Yük maksimum yük taşıma kapasitesine ulaştığında kesme çatlağı genişliğinin hızlı artışı ile birlikte yükte ani bir düşüş gerçekleşmiştir.



Şekil 6.26. DB50/1.63-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

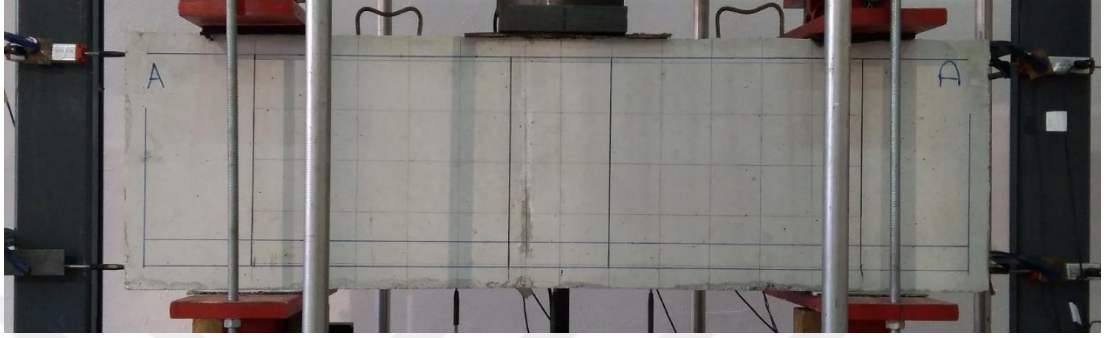
Numunenin yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği incelendiğinde, P_{cr} aşıldığında elemenda kesme çatlak oluşmuş ve uygulanan yükün artışı ile birlikte çatlak genişliği de giderek artmıştır. Maksimum yüke karşılık gelen maksimum çatlak genişliği 0,79 mm olarak elde edilmiştir.

Nümerik modelden elde edilen $P - u$ davranış grafiği (Şekil 6.26.) incelendiğinde, nümerik modelin hem yük hem de yerdeğiştirme açısından deney sonucu ile oldukça başarılı bir şekilde örtüştüğü görülmüştür. Ancak $P - w$ davranışı (Şekil 6.26.) incelendiğinde ise; nümerik modelden elde edilen çatlak genişliği, çatlak oluşumundan sonraki ilk kısımda oldukça rijit olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, çatlak genişlikleri yükün artışı ile birlikte deney sonucu ile uyumlu bir davranış sergilemiştir. Nümerik model üzerinde çatlak davranışında oluşan bu farklılıktan dolayı bu numunenin SE modeli, parametrik çalışmada kullanılmamıştır.

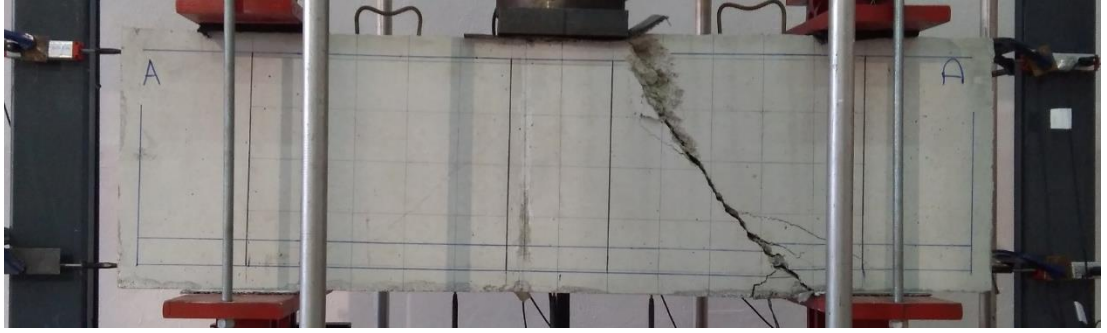
6.2.8. DB50/1.40-C1 deney numunesi

Deney numunesinin deney öncesi düzenek üzerindeki durumu Şekil 6.27.'de gösterilmiştir. Numunede $P=270$ kN değerine ulaşılmasıyla birlikte basınç çubuğu

ekseni üzerinde eğik kesme çatlağı gözlenmiştir. Bu çatlak her iki kesme açıklığında eş zamanlı olarak oluşmuştur. Uygulanan yükün artışı ile birlikte kesme çatlağı genişlikleri giderek artmıştır. Deney sonucunda, C tarafındaki basınç çubuğunun kırılması ile numunede ani ve gevrek kesme hasarı oluşmuştur (Şekil 6.27.).



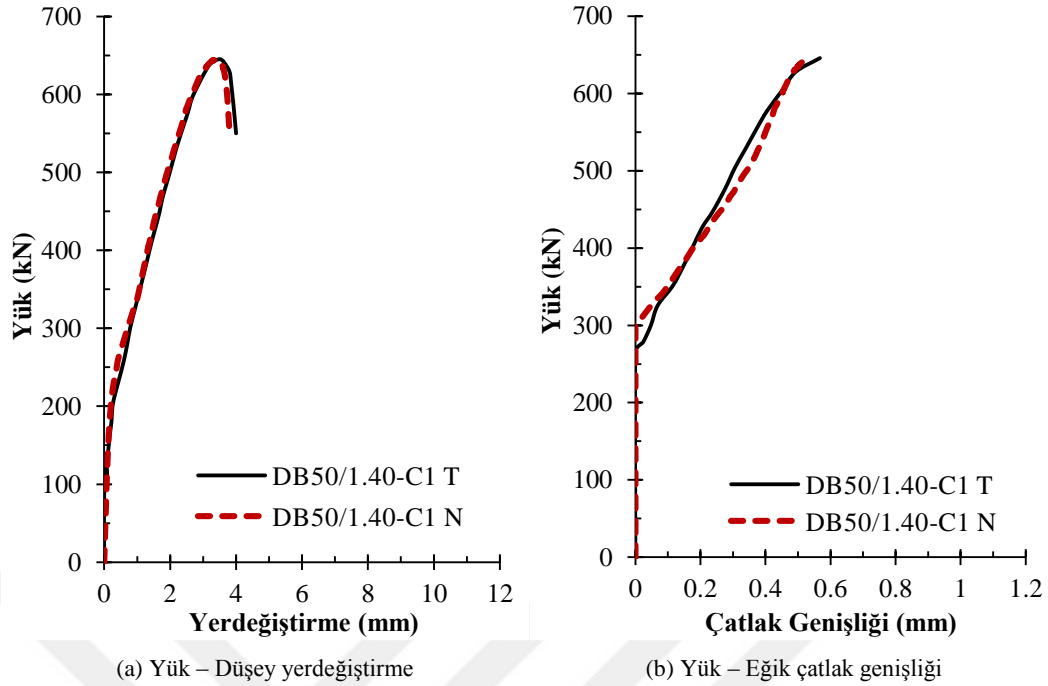
(a)



(b)

Şekil 6.27. DB50/1.40-C1 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.

Deney sonucunda numuneden elde edilen yük – orta nokta düşey yerdeğiştirme ve yük – çatlak genişliği davranış grafikleri Şekil 6.28.'de verilmiştir. Numunenin yük – düşey yerdeğiştirme davranış grafiği incelendiğinde, elemanın maksimum yük taşıma kapasitesi 645 kN ve buna karşılık gelen düşey yerdeğiştirme değeri 3,82 mm olarak elde edilmiştir. Elemanda gevrek kesme davranışı hakim olmuş olup sünek davranış gözlenmemiştir. Maksimum yük değerine ulaşıldığında kesme çatlağı genişliğinde hızlı bir artış ve yükte de ani bir düşüş gözlenmiştir. Numune basınç çubuğu üzerindeki kesme hasarı nedeniyle güç tükenmesine ulaşmıştır.



Şekil 6.28. DB50/1.40-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

Numunenin P – w davranış grafiği (Şekil 6.28.) incelendiğinde, kritik kesme yükü aşıldığında elemanda kesme çatlakları oluşmuş olup uygulanan yükün artışı ile birlikte çatlak genişliği giderek artmıştır. Maksimum yüke karşılık gelen maksimum çatlak genişliği 0,57 mm olarak elde edilmiştir.

Nümerik modelden elde edilen yük – düşey yerdeğiştirme davranış grafiği (Şekil 6.28.) incelendiğinde, nümerik modelin hem yük hem de yerdeğiştirme açısından deney sonucu ile oldukça başarılı bir şekilde örtüştüğü görülmüştür. Yük – eğik çatlak genişliği davranışı (Şekil 6.28.) incelendiğinde ise; nümerik modelden elde edilen çatlak genişliği, çatlakın oluşumundan sonraki ilk kısımda biraz daha rijit ancak yükün artışı ile birlikte deney sonucu ile uyumlu bir davranış sergilediği görülmektedir. Sonuç olarak, deney sonucunun nümerik olarak oldukça başarılı ve etkin bir şekilde doğrulandığı değerlendirilmiştir.

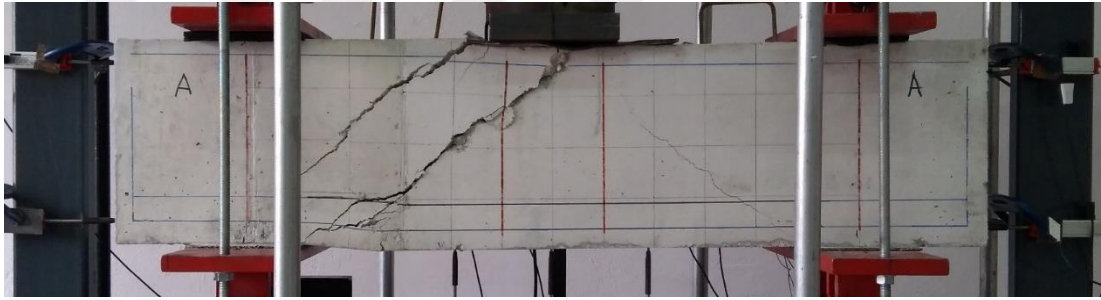
6.2.9. DB40/1.86-C1 deney numunesi

Deney numunesinin düzenek üzerindeki, deney öncesi hasarsız durumu Şekil 6.29.'da gösterilmiştir. Numunede P_{cr} (200 kN) aşılana kadar herhangi bir çatlak oluşumu

gözlenmemiş olup bu değerin aşılmasıyla elemanda basınç çubuğu ekseninde eğik kesme çatlakları gözlenmiştir. Bu çatlak her iki kesme açıklığında eş zamanlı olarak oluşmuştur. Uygulanan yükün artışı ile birlikte kesme çatlakları genişlikleri giderek artmıştır. Deney sonucunda, basınç çubuğunun maksimum dayanıma ulaşarak kırılması ile numunede ani ve gevrek kesme hasarı oluşmuştur (Şekil 6.29.).



(a)



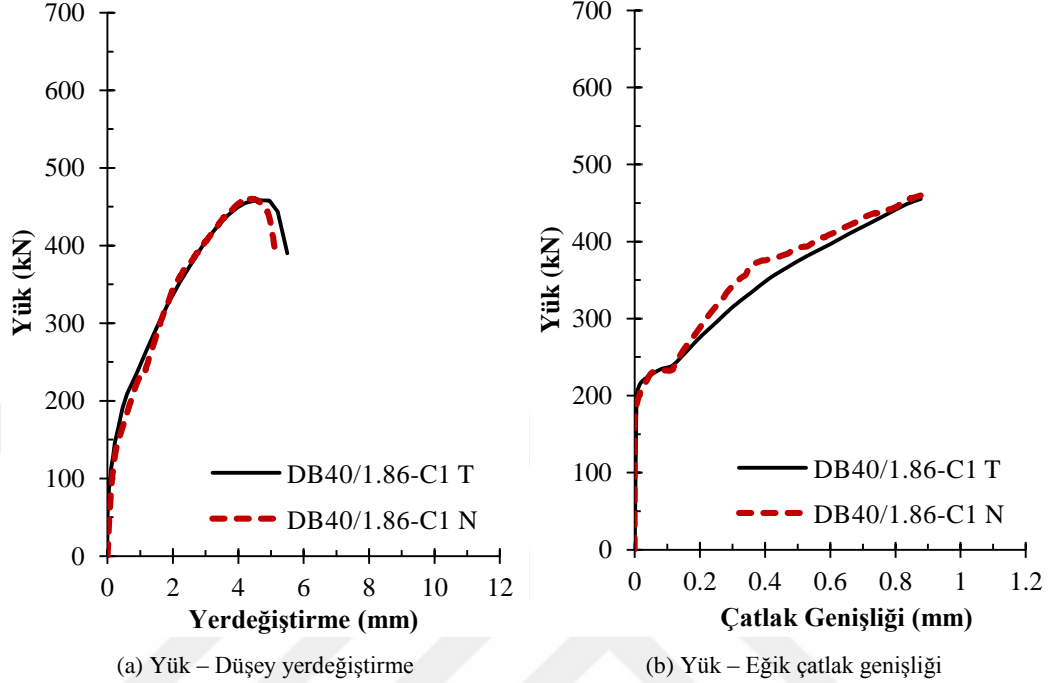
(b)

Şekil 6.29. DB40/1.86-C1 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.

Deney sonucunda numuneden elde edilen yük – orta nokta düşey yerdeğiştirme ve yük – çatlak genişliği davranış grafikleri Şekil 6.30.'da verilmiştir. Numunenin yük – düşey yerdeğiştirme davranış grafiği incelendiğinde, elemanın maksimum yük taşıma kapasitesi 459 kN ve buna karşılık gelen düşey yerdeğiştirme değeri 4,56 mm olarak elde edilmiştir. Elemanda yerdeğiştirme değerinin oldukça küçük olması sebebiyle gevrek kesme davranışı hakim olmuş ve sünek davranış gözlenmemiştir. Uygulanan yükün maksimum değerine ulaşıldığında kesme çatlakları genişliğinin hızlıca arttığı ve daha sonra yükte ani bir düşüş olduğu görülmüştür.

Numunenin yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği (Şekil 6.30.) incelendiğinde, kritik kesme yükü aşıldığında elemanda kesme çatlakları oluşmuş olup uygulanan yükün

artışı ile birlikte çatlak genişliği giderek artmıştır. Maksimum yüke karşılık gelen maksimum çatlak genişliği 0,88 mm olarak elde edilmiştir.



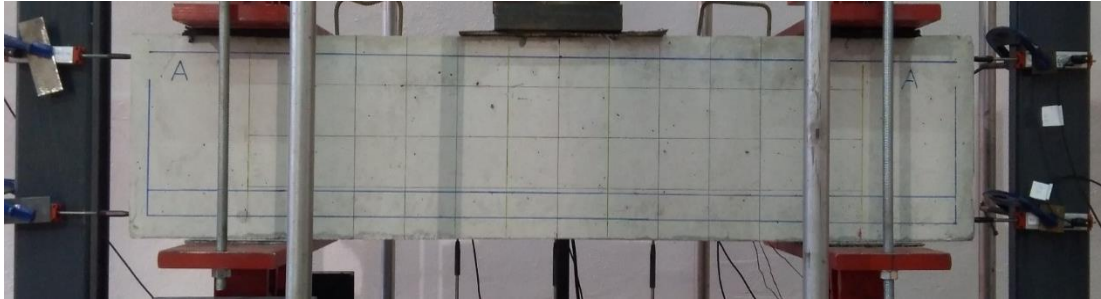
Şekil 6.30. DB40/1.86-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

Doğrusal olmayan SE modeli üzerinden elde edilen $P - u$ ve $P - w$ davranış grafikleri (Şekil 6.30.) incelendiğinde, nümerik modelin deney sonucu ile oldukça başarılı bir şekilde örtüştüğü görülmüştür. Sonuç olarak, deney sonucunun nümerik olarak oldukça etkin bir şekilde doğrulandığı değerlendirilmektedir.

6.2.10. DB40/1.86-C2 deney numunesi

DB40/1.86-C2 numunesinin, DB40/1.86-C1 deney numunesi ile boyut özellikleri ve donatı konfigürasyonu aynı olup sadece betonun basınç dayanımı farklıdır. Malzeme deneylerinden, DB40/1.86-C1 numunesinde $f_{ck}=18,10$ MPa ve DB40/1.86-C2 numunesinde ise $f_{ck}=25,30$ MPa olarak tespit edilmiştir. Numunenin düzenek üzerindeki, deney öncesi ve sonrası durumları Şekil 6.31.'de gösterilmiştir. Numunede P_{cr} (215 kN) aşılanaya kadar herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiş olup bu değer aşılanmasıyla elemanda basınç çubuğu eksen (strut) üzerinde eğik kesme çatlakları gözlenmiştir. Bu çatlak her iki kesme açıklığında eş zamanlı olarak oluşmuştur.

Uygulanan yükün artışı ile birlikte kesme çatlakları genişlikleri giderek artmıştır. Deney sonucunda, basınç çubuğunun (strut) maksimum dayanıma ulaşarak kırılması ile numunede ani ve gevrek kesme hasarı oluşmuştur (Şekil 6.31.).



(a)

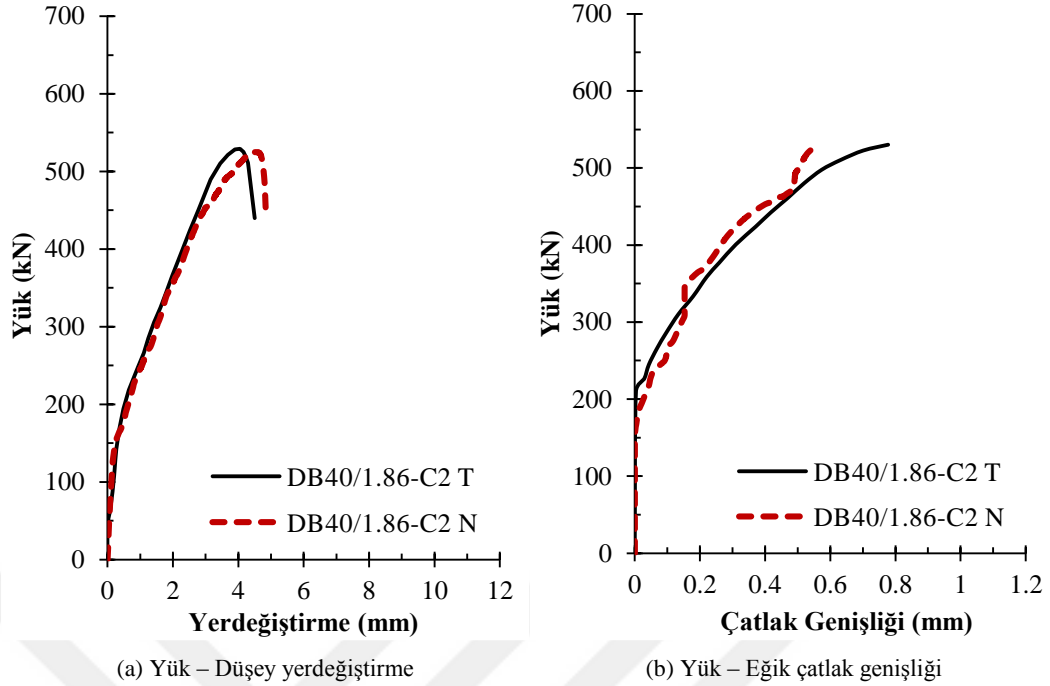


(b)

Şekil 6.31. DB40/1.86-C2 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.

Deney sonucunda numuneden elde edilen yük – orta nokta düşey yerdeğiştirme ve yük – çatlak genişliği davranış grafikleri Şekil 6.32.'de verilmiştir. Numunenin yük – düşey yerdeğiştirme davranış grafiği incelendiğinde, elemanın maksimum yük taşıma kapasitesi 529 kN ve buna karşılık gelen düşey yerdeğiştirme değeri 4,06 mm olarak elde edilmiştir. Elemanda yerdeğiştirme değerinin oldukça küçük olması sebebiyle sünek davranış gözlenmemiş olup gevrek kesme davranışı hakim olmuştur. Uygulanan yükün maksimum değerine ulaşıldığında kesme çatlakları genişliğinin hızlıca artışı ile birlikte yükte ani bir düşüş gözlenmiştir.

Numunenin yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği (Şekil 6.32.) incelendiğinde, kritik kesme yükü aşıldığında elemanda kesme çatlakları oluşmuş olup uygulanan yükün artışı ile birlikte çatlak genişliği giderek artmıştır. Maksimum yüke karşılık gelen maksimum çatlak genişliği 0,78 mm olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.32. DB40/1.86-C2 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

Nümerik modelden elde edilen yük – düşey yerdeğiştirme davranış grafiği (Şekil 6.32.) incelendiğinde, nümerik modelin hem yük hem de yerdeğiştirme açısından deney sonucu ile oldukça başarılı bir şekilde örtüştüğü görülmüştür. Ancak maksimum yük seviyesinde yerdeğiştirme değerlerinde ihmal edilebilir seviyede bir fark oluşmuştur. Yük – eğik çatlak genişliği davranışı (Şekil 6.32.) incelendiğinde ise; nümerik modelden elde edilen çatlak genişliği, çatlak oluşumundan sonraki ilk kısımda oldukça uyumlu olup maksimum yük seviyelerinde çatlak genişliği artımı yavaşlamıştır. Nümerik model ile deneyden elde edilen maksimum çatlak genişliği değerlerinde küçük farklar oluşmuştur. Bununla birlikte, deney sonucunun nümerik olarak yeterli bir şekilde doğrulandığı düşünülmektedir.

6.2.11. DB40/1.86-C3 deney numunesi

DB40/1.86-C3 numunesinin, DB40/1.86-C1 ve DB40/1.86-C2 deney numuneleri ile boyut özellikleri ve donatı konfigürasyonu aynı olup sadece beton malzemesinin basınç dayanımı değişmektedir. Malzeme deneylerinden DB40/1.86-C3 numunesinde $f_{ck}=32$ MPa olarak tespit edilmiştir. Numunenin düzenek üzerindeki, deney öncesi ve deney sonrası durumları Şekil 6.33.'te gösterilmiştir. Numunede uygulana yük 220 kN

değerine ulaştığında basınç çubuğu ekseninde eğik kesme çatlakları gözlenmiştir. Eş zamanlı olarak oluşan bu çatlakların genişlikleri uygulanan yükün artışı ile birlikte artmıştır. Deney sonucunda, basınç çubuğunun maksimum dayanımına ulaşarak kırılması ile numunede ani ve gevrek kesme hasarı oluşmuştur (Şekil 6.33.).



(a)

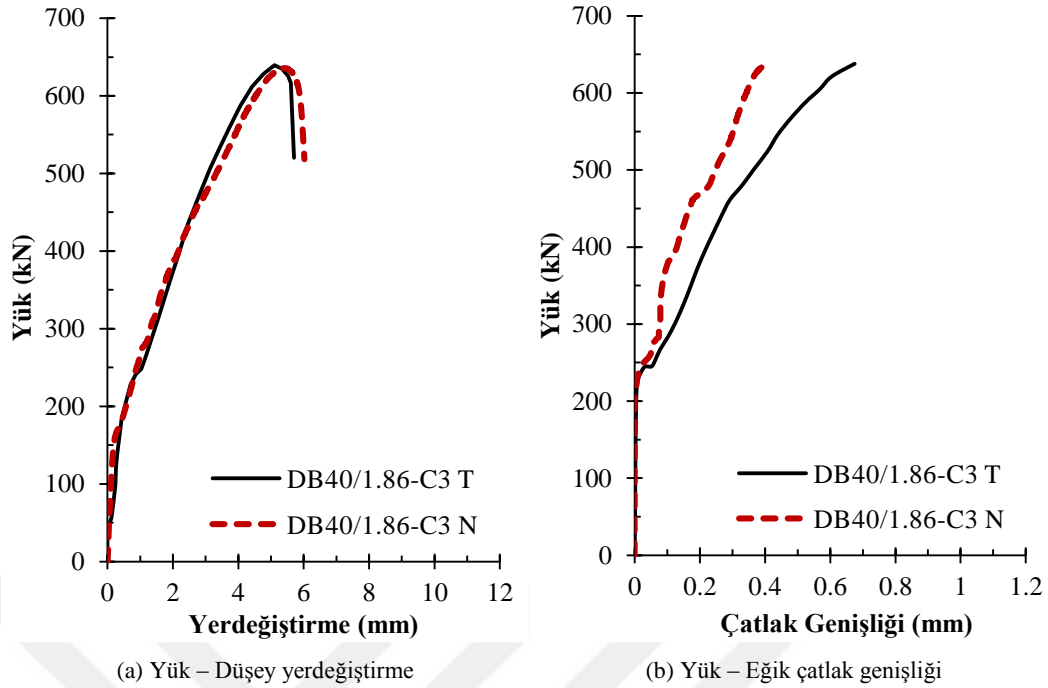


(b)

Şekil 6.33. DB40/1.86-C3 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.

Deney sonucunda numuneden elde edilen yük – orta nokta düşey yerdeğiştirme ve yük – çatlak genişliği davranış grafikleri Şekil 6.34.'te verilmiştir. Numunenin P – u davranış grafiği incelendiğinde, elemanın maksimum yük taşıma kapasitesi 640 kN ve buna karşılık gelen düşey yerdeğiştirme değeri 5,11 mm olarak elde edilmiştir. Elemanda yerdeğiştirme değerinin oldukça küçük olması sebebiyle gevrek kesme davranışı hakim olmuş ancak sünek davranış gözlenmemiştir. Uygulanan yükün maksimum değerine ulaşıldığında kesme çatlakları genişliğinin hızlı artışı ve daha sonra yükte ani bir düşüş gözlenmiştir.

Numunenin yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği (Şekil 6.34.) incelendiğinde, kritik kesme yükü aşıldığında elemanda kesme çatlakları oluşmuş olup uygulanan yükün artışı ile birlikte çatlak genişliği giderek artmıştır. Maksimum yüke karşılık gelen maksimum çatlak genişliği 0,67 mm olarak elde edilmiştir.



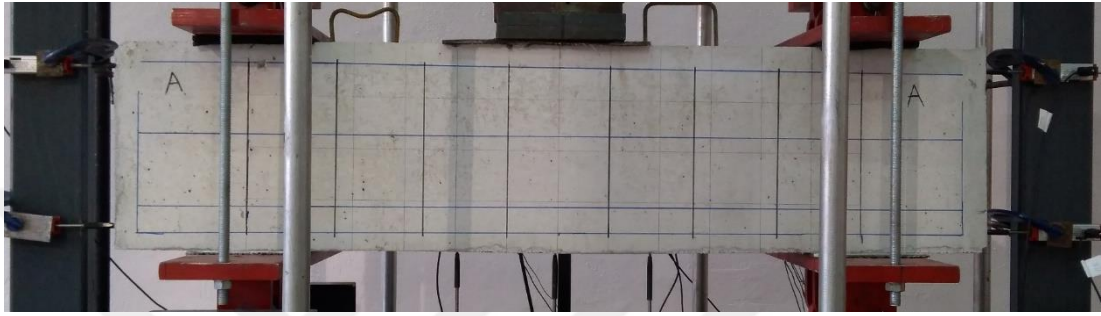
Şekil 6.34. DB40/1.86-C3 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

Nümerik modelden elde edilen yük – düşey yerdeğiştirme davranış grafiği (Şekil 6.34.) incelendiğinde, nümerik modelin hem yük hem de yerdeğiştirme açısından deney sonucu ile oldukça başarılı bir şekilde örtüştüştür. Yük – eğik çatlak genişliği davranışı (Şekil 6.34.) incelendiğinde ise; nümerik modelin P_{cr} değerine karşılık gelen ilk çatlama noktasını oldukça başarılı bir şekilde yakaladığı görülmüştür. Ancak uygulanan yükün artışı ile birlikte nümerik model üzerinde elde edilen çatlak genişlikleri deneysel çalışmaya göre daha rijit artmıştır. Nümerik model ile deneyden elde edilen maksimum çatlak genişliği değerlerinde farklar oluşmuştur. Bu durumun deney esnasında çatlak ölçer cihazdan ölçülen veri içerisinde birden fazla çatlak genişliği değerlerinin olabileceği ihtimalinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

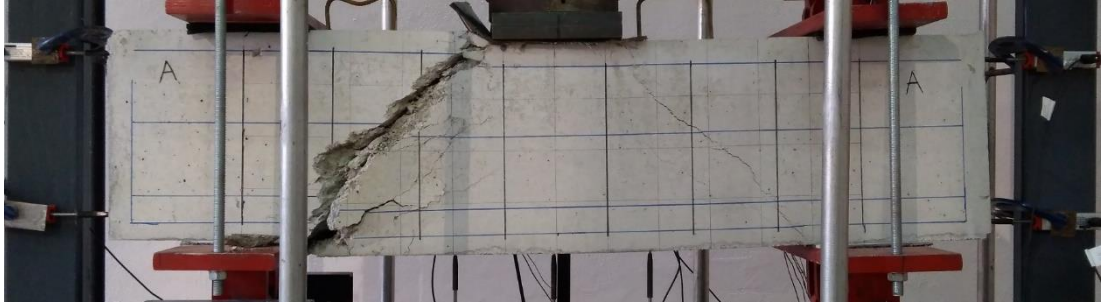
6.2.12. DB40/1.86-C1/SR deney numunesi

DB40/1.86-C1/SR deney numunesi boyut ve malzeme özellikleri açısından DB40/1.86-C1 numunesi ile benzer olup sadece ilave kesme donatısı (etriye oranı: 0,0030 ve gövde donatısı oranı: 0,0037) içermektedir. Numunenin deney düzeneği üzerinde, deney öncesi hasarsız ve sonrası hasar almış durumu Şekil 6.35.'de gösterilmiştir. Deney esnasında numunede kritik kesme yükü aşılanaya kadar herhangi

bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. P_{cr} (230 kN) değerinin aşılmasıyla elemanda basınç çubuğu ekseninde eğik kesme çatlağı oluşmuştur. Bu çatlak her iki kesme açıklığında da eş zamanlı olarak gözlenmiştir. Yükün artışı ile birlikte oluşan kesme çatlağı genişlikleri giderek artmış ancak eğilme çatlağı oluşmamıştır. Deney sonucunda, basınç çubuğu maksimum dayanıma ulaşarak kırılması ile numunede ani ve gevrek kesme hasarı oluşmuştur (Şekil 6.35.).



(a)

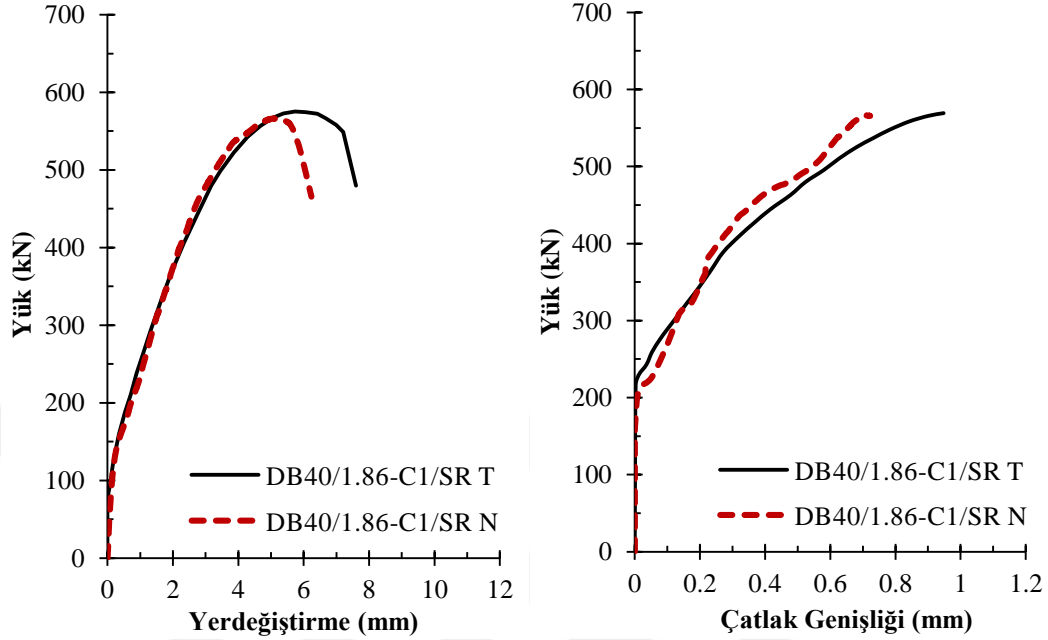


(b)

Şekil 6.35. DB40/1.86-C1/SR numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.

Deney sonucunda numuneden elde edilen yük – orta nokta düşey yerdeğiştirme ve yük – çatlak genişliği davranış grafikleri ise Şekil 6.36.'da verilmiştir. Numunenin yük – düşey yerdeğiştirme davranış grafiğinden görüldüğü gibi elemanın maksimum yük taşıma kapasitesi ve buna karşılık gelen düşey yerdeğiştirme değeri sırasıyla 575 kN ve 5,73 mm olarak elde edilmiştir. DB40/1.86-C1 numunesi ile karşılaştırıldığında benzer şekilde düşey yerdeğiştirme değerleri oldukça küçük seviyede kalmış olup kesme donatısı sebebiyle sadece yük taşıma kapasitesinde artış gözlenmiştir. Numunede sünek bir davranış gözlenmemiş, yine benzer şekilde gevrek kesme davranışı hakim olmuştur. Yük maksimum yük taşıma kapasitesine ulaştığında kesme çatlağı genişliğinin hızlıca artması ile birlikte yükte ani bir düşüş gerçekleşmiştir.

Burada kesme donatıları süneklik olarak beklenen katkıyı sağlamamasına rağmen yük taşıma kapasitesinde önemli bir artışa yol açmıştır.

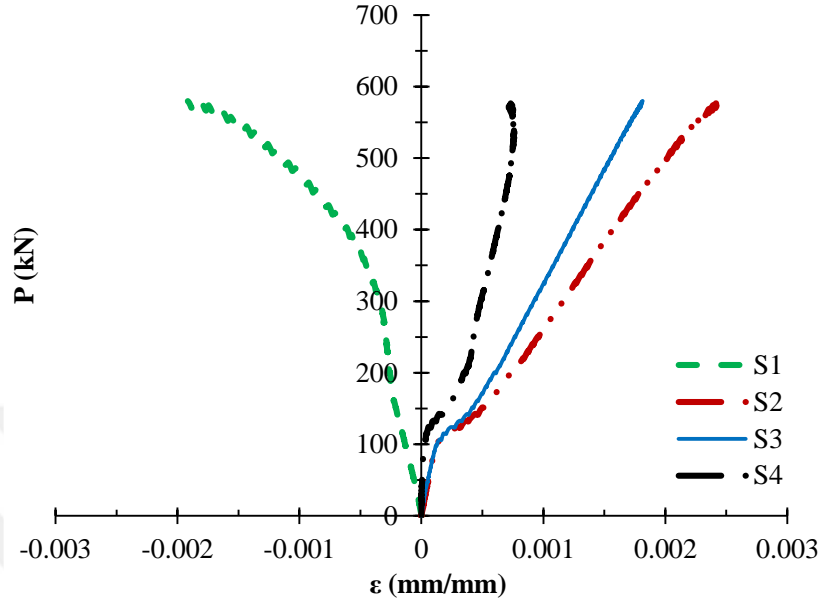


Şekil 6.36. DB40/1.86-C1/SR deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

Numunenin yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği (Şekil 6.36.) incelendiğinde, P_{cr} aşıldığında elemanda kesme çatlakları oluşmuş ve uygulanan yükün artışı ile birlikte çatlak genişliği de giderek artmıştır. Maksimum yüke karşılık gelen maksimum çatlak genişliği 0,94 mm olarak elde edilmiştir.

Kesme donatısı içeren bu numunede, çekme ve basınç donatılarına ilave olarak etriye ve gövde donatılarına da gerinim pulları (Şekil 5.3.) yapıştırılmıştır. Elemanın, uygulanan yükün altında kalan orta noktası eksenine hizasına denk gelen basınç (S1), çekme (S2 ve S3) ve gövde (S4) donatılarına yapıştırılan gerinim pullarından ölçülen birim şekildeğiştirme eğrileri Şekil 6.37.'de verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi uygulanan yükün artışı ile birlikte basınç donatısında birim kısalma, çekme ve gövde donatılarında ise birim uzama oluşmuştur. Basınç bölgesinden çekme bölgesine doğru gidildikçe donatılardaki birim uzama miktarları giderek artmıştır. Maksimum birim şekildeğiştirme değeri, çekme bölgesi dışı lifine en yakın konumdaki çekme

donatısında oluşmuştur. Oluşan gerilme değerleri, donatıların akma gerilmesi değerlerini aşmamış ve donatılar sadece elastik bölgede çalışmıştır.

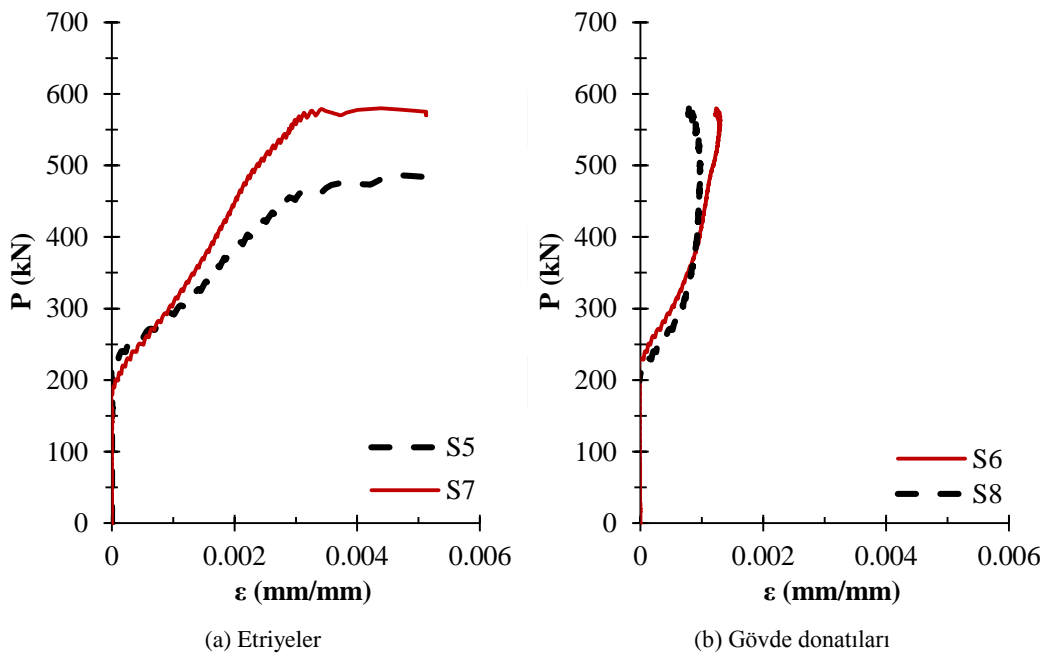


Şekil 6.37. DB40/1.86-C1/SR deney numunesi orta noktadaki donatıların birim şekildeğiştirme eğrileri.

Deney esnasında, numunenin çatlak (basınç çubuğu) ekseninde bulunan etriyelere yapıştırılan gerinim pullarından (Şekil 5.3.) ölçülen $P - \epsilon_s$ davranış grafikleri Şekil 6.38.'de verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi, etriyeler P_{cr} değerini aşılması ile birlikte yük taşımaya başlamış ve eğik kesme çatlakları oluşmuştur. Kesme çatlaklarının oluşumundan sonra, elemandaki çatlak genişlikleri ve etriyelerdeki birim şekildeğiştirme değerleri giderek artmıştır. Şekil 6.38. incelendiğinde, elemanda etriyeler üzerindeki birim şekildeğiştirme davranışının oldukça benzer olduğu görülmektedir. Etriyeler yaklaşık 0,003 birim şekildeğiştirme değerinde akmıştır. Bu noktadan sonra uygulanan yük sabit kalmış ve donatılardaki birim uzama değerlerinde artış devam etmiştir. Bununla birlikte, gövde donatılarına yapıştırılan gerinim pullarının sonuçları (Şekil 6.38.) incelendiğinde etriyelere benzer şekilde, her iki kesme bölgesinde de oldukça benzer bir davranış elde edilmiştir. Ölçülen birim şekildeğiştirme değerleri oldukça sınırlı olup, donatılar elastik bölgede çalışmıştır.

Nümerik modelden elde edilen yük – düşey yerdeğiştirme davranış grafiği (Şekil 6.36.) incelendiğinde, nümerik modelin yük seviyesi olarak deney sonucu ile oldukça

başarılı bir şekilde örtüştüğü görülmüştür. Ancak maksimum düşey yerdeğiştirme değerinde oldukça küçük bir fark bulunmaktadır. Maksimum düşey yerdeğiştirme sonucunda görülen bu küçük fark maksimum çatlak genişliği sonucunda da gözlenmiştir (Şekil 6.36.). Elemanda gevrek kesme hasarı oluşması ve maksimum düşey yerdeğiştirme değerinin oldukça küçük seviyede olması sebebiyle, sonuçlarda oluşan bu farkın kabul edilebilir sınırlarda olduğu düşünülmektedir. Deney sonucunun numerik olarak oldukça başarılı ve etkin bir şekilde doğrulandığı değerlendirilmektedir.



Şekil 6.38. DB50/1.86-C1/SR deney numunesi çatlak eksenine paralel bulunan donatıların davranışı.

Sonuç olarak; deneysel ve nümerik çalışma sonuçlarından elde edilen kritik kesme yükü (P_{cr}), maksimum yük taşıma kapasitesi (P_u), maksimum yerdeğiştirme (u_u), maksimum çatlak genişliği (w_0), ve hasar mekanizması Tablo 6.1.'de verilmiştir. Nümerik modelin deney sonuçlarını doğrulama performansı Tablo 6.2.'de gösterilmiş olup, hata oranları deney sonuçlarının nümerik sonuçlara bölünmesi ile elde edilmiştir. Kesme donatısı içermeyen numunelerin deney sonuçları bir bütün olarak değerlendirildiğinde; elemanların sadece basınç çubuklarında eğik kesme çatlakları oluşmuştur. Numuneler, maksimum yük seviyesine ulaşıldığında ani ve gevrek kesme hasarından güç tükenmesine ulaşmıştır. Numunelerin, kemer etkisi (arc action) nedeniyle eğik çatlak oluşumundan sonra bile önemli bir yük taşıma kapasitesine sahip

oldukları görülmüştür. Deney sonuçlarından, elemanların tasarımında hedeflenen kesme kritik davranışın yakalandığı tespit edilmiştir. Kesme donatısı içeren numunelerin deney sonuçları incelendiğinde; kesme donatısının süneklik açısından beklenen etkiyi göstermediği ancak yük taşıma kapasitesinde önemli seviyede artış sağladığı görülmüştür. Kesme donatısı içeren numunelerin hepsinde, kesme donatısı içermeyen numunelere benzer şekilde sadece eğik kesme çatlakları oluşmuş ve numuneler kesme hasarından güç tükenmesine ulaşmıştır. Ancak göçme anındaki hasar davranışları daha yumuşak gerçekleşmiştir. Elemanlara kesme donatısı konulmasına rağmen sünek davranış elde edilememesi, betonarme yüksek kirişlerin doğası gereği kesme kritik elemanlar olduğunu göstermektedir.

Tablo 6.1. Deneysel ve nümerik çalışma sonuçları.

| # | Numune Adı | Deneysel Çalışma | | | | Nümerik Çalışma | | | | Hasar |
|----|-----------------|------------------|---------------|---------------|---------------|------------------|---------------|---------------|---------------|-------|
| | | P_{cr} (kN) | P_u (kN) | u_u (mm) | w_o (mm) | P_{cr} (kN) | P_u (kN) | u_u (mm) | w_o (mm) | |
| 1 | DB50/1.40-C1 | 270 | 645 | 3,82 | 0,57 | 285 | 645 | 3,44 | 0,54 | Kesme |
| 2 | DB50/1.63-C1 | 260 | 614 | 5,01 | 0,79 | 270 | 601 | 4,98 | 0,81 | Kesme |
| 3 | DB50/1.86-C1 | 240 | 500 | 4,71 | 0,94 | 255 | 504 | 4,72 | 0,95 | Kesme |
| 4 | DB50/1.86-C1/SR | 220 | 636 | 5,97 | 1,18 | 235 | 639 | 5,84 | 1,09 | Kesme |
| 5 | DB55/1.67-C1 | 225 | 549 | 3,91 | 0,82 | 215 | 557 | 3,87 | 0,83 | Kesme |
| 6 | DB60/1.51-C1 | 255 | 609 | 3,16 | 0,64 | 250 | 613 | 3,10 | 0,61 | Kesme |
| 7 | DB60/1.86-C1 | 235 | 529 | 5,22 | 0,96 | 230 | 538 | 5,32 | 0,87 | Kesme |
| 8 | DB60/1.86-C1/SR | 245 | 664 | 5,06 | 0,92 | 245 | 650 | 5,72 | 0,82 | Kesme |
| 9 | DB40/1.86-C1 | 200 | 459 | 4,56 | 0,88 | 195 | 460 | 4,43 | 0,88 | Kesme |
| 10 | DB40/1.86-C2 | 215 | 529 | 4,06 | 0,78 | 190 | 525 | 4,5 | 0,57 | Kesme |
| 11 | DB40/1.86-C3 | 220 | 640 | 5,11 | 0,67 | 225 | 636 | 5,4 | 0,41 | Kesme |
| 12 | DB40/1.86-C1/SR | 230 | 575 | 5,73 | 0,94 | 210 | 567 | 5,10 | 0,73 | Kesme |

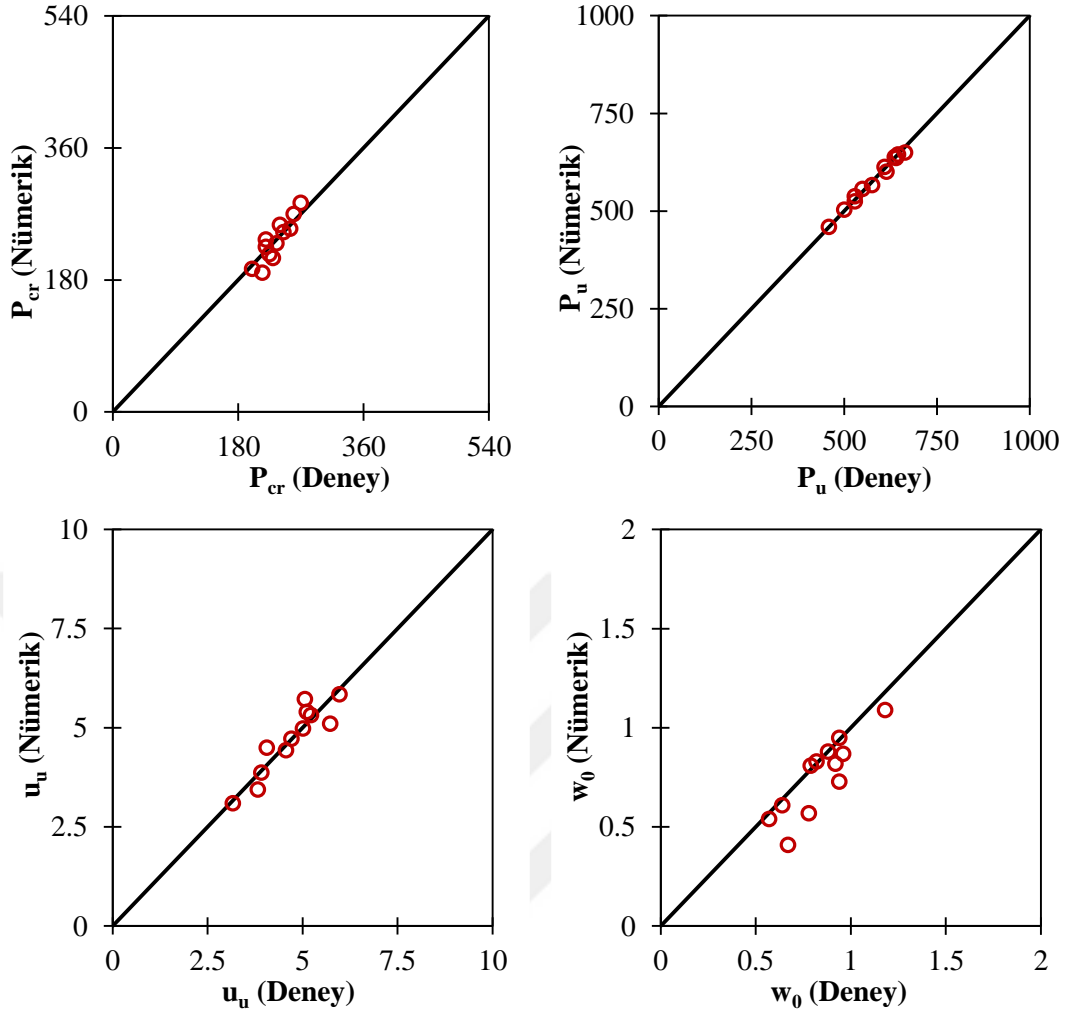
Tablo 6.2. Deneysel ve nümerik çalışma sonuçlarının performansı.

| # | Numune Adı | Hata Oranı | | | |
|----|-----------------|------------|-------|-------|-------|
| | | P_{cr} | P_u | u_u | w_o |
| 1 | DB50/1.40-C1 | 0.95 | 1.00 | 1.11 | 1.06 |
| 2 | DB50/1.63-C1 | 0.96 | 1.02 | 1.01 | 0.98 |
| 3 | DB50/1.86-C1 | 0.94 | 0.99 | 1.00 | 0.99 |
| 4 | DB50/1.86-C1/SR | 0.94 | 1.00 | 1.02 | 1.08 |
| 5 | DB55/1.67-C1 | 1.05 | 0.99 | 1.01 | 0.99 |
| 6 | DB60/1.51-C1 | 1.02 | 0.99 | 1.02 | 1.05 |
| 7 | DB60/1.86-C1 | 1.02 | 0.98 | 0.98 | 1.10 |
| 8 | DB60/1.86-C1/SR | 1.00 | 1.02 | 0.88 | 1.12 |
| 9 | DB40/1.86-C1 | 1.03 | 1.00 | 1.03 | 1.00 |
| 10 | DB40/1.86-C2 | 1.13 | 1.01 | 0.90 | 1.37 |
| 11 | DB40/1.86-C3 | 0.98 | 1.01 | 0.95 | 1.63 |
| 12 | DB40/1.86-C1/SR | 1.10 | 1.01 | 1.12 | 1.29 |

Doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulan nümerik modellerin, deney sonuçlarına göre doğrulanma performansını gösteren saçılım diyagramları Şekil 6.39.'da verilmiştir. Nümerik modellerin sonuçları bir bütün olarak incelendiğinde; oluşturulmuş olan SE modellerinin $P - u$ davranışı açısından deneysel çalışma sonuçları ile oldukça başarılı bir şekilde örtüştüğü görülmektedir. Genel olarak yük – çatlak genişliği davranışları da küçük farklar oluşmasına rağmen yeterli oranda doğrulandığı düşünülmektedir. Sonuç olarak, nümerik modellerin deneysel çalışma sonuçlarıyla başarılı bir şekilde doğrulandığı ve betonarme yüksek kirişlerin kesme ve eğik çatlak davranışını yeterli oranda temsil ettiği kabul edilmiştir.

Bununla birlikte Bölüm 5’de, SE modeli üzerinden çatlak genişliklerinin ölçülebilmesi için yeni bir bağıntı (Denklem 6.1) önerilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında oluşturulmuş nümerik modellerin, $P - w$ davranış grafikleri deney sonuçları ile karşılaştırıldığında, modellerin deneysel çalışma sonuçlarıyla başarılı bir şekilde doğrulandığı görülmektedir. Bu sebeple, SE modeli üzerinden çatlak genişliklerinin ölçülebilmesi için önerilen bağıntının ve uygulama biçiminin oldukça başarılı olduğu düşünülmektedir.

Deney numunelerinin maksimum yük taşıma kapasiteleri, “strut-and-tie model (STM)” kullanılarak hesaplanmıştır. STM hesaplarında ACI 318-14 yönetmeliğinde verilen hususlar dikkate alınmıştır. Bununla birlikte, elemanların yük kapasiteleri literatürde STM’nin değiştirilmesi ile oluşturulmuş “modified strut-and-tie modeli (MSTM)” kullanılarak da hesaplanmıştır (Bircher ve ark., 2009). Hesaplamalarda kullanılan bağıntılarda, malzemeler için verilen güvenlik katsayıları dikkate alınmamıştır. Elde edilen sonuçlar, deneysel çalışma ile numunelerden elde edilen maksimum yük taşıma kapasiteleri ile karşılaştırılmıştır (Tablo 6.3.). Tablodan görüldüğü gibi; STM kullanılarak elde edilen sonuçlar, deney sonuçlarına göre oldukça güvenli (conservative) tarafta kalmaktadır. MSTM ile hesaplanan değerler ise deney sonuçları ile daha uyumlu olup yine bir miktar güvenli tarafta yer almaktadır.



Şekil 6.39. Nümerik sonuçların performansı.

Tablo 6.3. Numunelerin deney ve hesap sonucu bulunan maksimum yük taşıma kapasiteleri.

| # | Numune Adı | Deney | STM | MSTM |
|----|-----------------|------------|------------|------------|
| | | P_u (kN) | P_u (kN) | P_u (kN) |
| 1 | DB50/1.40-C1 | 645 | 562 | 624 |
| 2 | DB50/1.63-C1 | 614 | 538 | 596 |
| 3 | DB50/1.86-C1 | 500 | 433 | 489 |
| 4 | DB50/1.86-C1/SR | 636 | 554 | 608 |
| 5 | DB55/1.67-C1 | 549 | 428 | 519 |
| 6 | DB60/1.51-C1 | 609 | 531 | 584 |
| 7 | DB60/1.86-C1 | 529 | 442 | 506 |
| 8 | DB60/1.86-C1/SR | 664 | 558 | 643 |
| 9 | DB40/1.86-C1 | 459 | 375 | 433 |
| 10 | DB40/1.86-C2 | 529 | 471 | 504 |
| 11 | DB40/1.86-C3 | 640 | 560 | 621 |
| 12 | DB40/1.86-C1/SR | 575 | 467 | 556 |

Bununla birlikte; benzer geometri, boyut ve malzeme özelliklerine sahip fakat kesme donatısı içeren veya içermeyen numunelerin (DB40/1.86-C1 ile DB40/1.86-C1/SR,

DB50/1.86-C1 ile DB50/1.86-C1/SR, DB60/1.86-C1 ile DB60/1.86-C1/SR) SE modellerinin deneysel ve nümerik sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Oluşturulan nümerik modellerin donatı konfigürasyonunda ki değişimi oldukça gerçekçi ve başarılı bir şekilde temsil ettikleri görülmüştür. Bu durum ayrıca literatürde önerilen yöntemi de (Demir ve ark.,2016a) doğrulamaktadır. Sonuç olarak, mevcut SE modeli üzerindeki elemanların; geometri, boyut, malzeme ve nümerik özellikleri sabit tutulup, sadece donatı konfigürasyonları değiştirilerek gerçekleştirilecek parametrik bir çalışmanın oldukça gerçekçi ve başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu sebeple bu tez çalışması kapsamındaki parametrik çalışma, deney sonuçları ile doğrulanmış nümerik modeller üzerinde sadece donatı konfigürasyonu değiştirilerek elde edilmiş yeni nümerik modeller kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

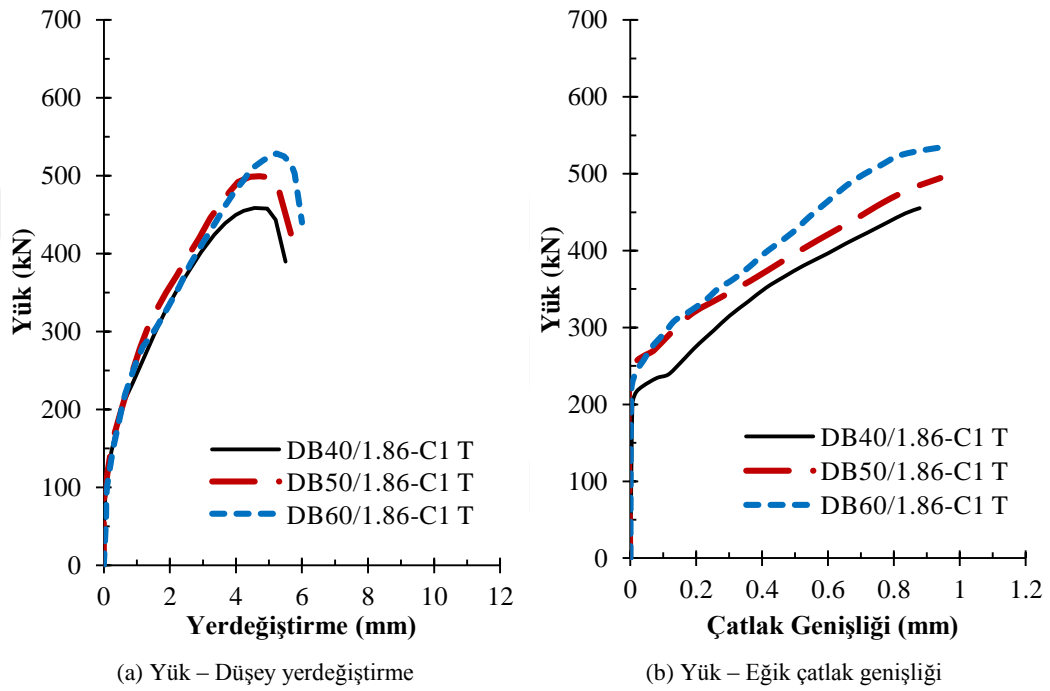
6.3. Betonarme Yüksek Kirişlerde Eğik Kesme Çatlağı Davranışına Etki Eden Parametrelerin Deney Sonuçlarına Göre Değerlendirilmesi

Bu tez çalışması kapsamında, gerçekleştirilen deneysel çalışma ile betonarme yüksek kirişlerin eğik kesme çatlağı davranışına; kesit yüksekliği (h), kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d) ve karakteristik beton basınç dayanımı (f_{ck}) parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Bu parametrelerin incelenmesinde kullanılacak numune matrisi Tablo 6.4.'te verilmiştir. İncelenecek her bir parametre için, kendi grubunda yer alan numunelerin sonuçları dikkate alınmıştır.

Tablo 6.4. İncelenecek parametreler için numune matrisi.

| İncelenen Parametre | Numune Adı | h (mm) | a (mm) | a/d | f_{ck} (MPa) | Sabit Tutulan Parametreler |
|---------------------|--------------|----------|----------|-------|----------------|----------------------------|
| h | DB40/1.86-C1 | 400 | 600 | 1,85 | 18,1 | a/d f_{ck} |
| | DB50/1.86-C1 | 500 | 800 | 1,85 | 18,1 | |
| | DB60/1.86-C1 | 600 | 1000 | 1,85 | 18,1 | |
| a/d | DB50/1.86-C1 | 500 | 800 | 1,85 | 18,1 | d f_{ck} |
| | DB50/1.63-C1 | 500 | 700 | 1,62 | 18,1 | |
| | DB50/1.40-C1 | 500 | 600 | 1,39 | 18,1 | |
| a/d | DB50/1.86-C1 | 500 | 800 | 1,85 | 18,1 | a f_{ck} |
| | DB55/1.67-C1 | 550 | 800 | 1,67 | 18,1 | |
| | DB60/1.51-C1 | 600 | 800 | 1,48 | 18,1 | |
| f_{ck} | DB40/1.86-C1 | 400 | 600 | 1,85 | 18,1 | a/d h |
| | DB40/1.86-C2 | 400 | 600 | 1,85 | 25,3 | |
| | DB40/1.86-C3 | 400 | 600 | 1,85 | 32,0 | |

Betonarme yüksek kirişlerde kesit yüksekliğindeki (h) değişimin, yük – düşey yerdeğiştirme ve yük – eğik çatlak genişliği davranışlarına etkisi Şekil 6.40.'da gösterilmiştir. Yük – yerdeğiştirme davranış grafiği incelendiğinde, kesit yüksekliğinin artışı ile birlikte yük taşıma kapasitesinde artış gözlenmiştir. Betonarme klasik kirişlerde geçerli olan bu davranış yüksek kirişlerde de benzer etkiyi göstermiştir. Ayrıca düşey yerdeğiştirme değerlerinde küçük artışlar oluşmuştur.

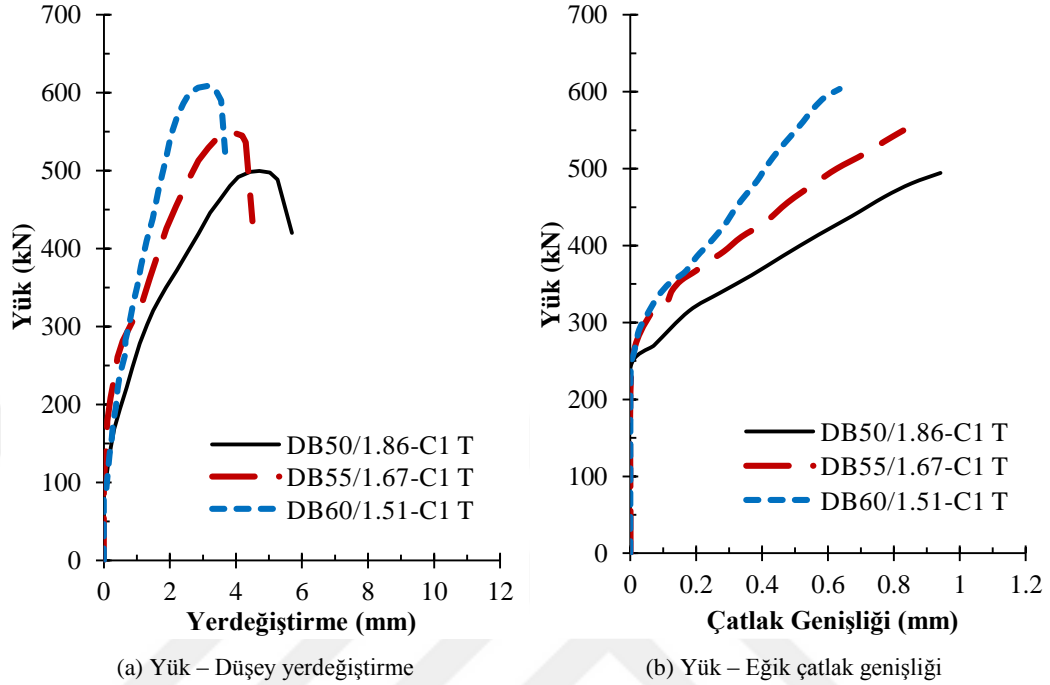


Şekil 6.40. Kesit yüksekliğinin yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkisi.

Numunelerin yük – eğik çatlak genişliği davranışı incelendiğinde ise elemanların çatlak genişliği davranışları oldukça benzer olup kesit yüksekliğinin artışı ile birlikte maksimum çatlak genişliği değerlerinde çok küçük artışlar oluşmuştur. Sonuç olarak; kesit yüksekliğinin artışının betonarme yüksek kirişlerin yük taşıma kapasitesini olumlu yönde etkilediği ve maksimum çatlak genişliklerinde ise küçük miktarda artışlara yol açtığı görülmüştür.

Betonarme yüksek kirişlerde kesme açıklığı (a) sabit tutularak a/d oranındaki değişimin yük – düşey yerdeğiştirme ve yük – eğik çatlak genişliği davranışlarına etkisi Şekil 6.41.'de gösterilmiştir. P – u davranışı incelendiğinde, a/d oranının azalması ile birlikte elemanların yük taşıma kapasitesinde artış gözlenmiştir. Ayrıca

düşey yerdeğiştirme değerlerinde de küçük azalmalar oluşmuş olup daha gevrek bir davranış elde edilmiştir.



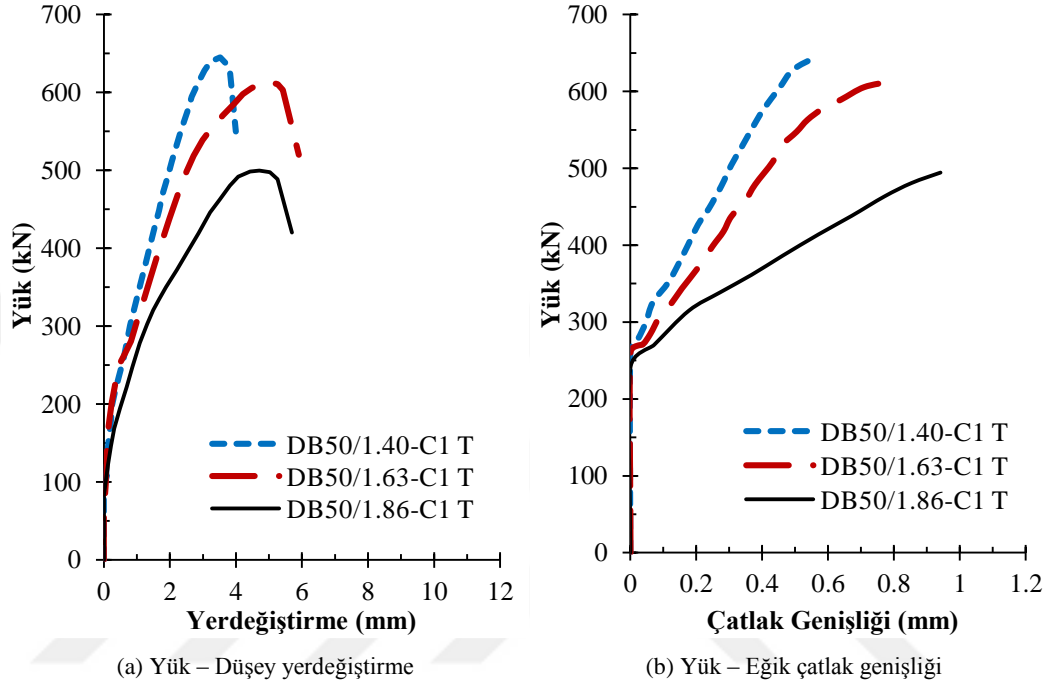
Şekil 6.41. a/d oranının (a sabit) yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkisi.

Numunelerin yük – eğik çatlak genişliği davranışı incelendiğinde a/d oranının artışı ile birlikte maksimum çatlak genişliği değerlerinde artışlar oluşmuştur. Sonuç olarak; a/d oranının artışının betonarme yüksek kirişlerin yük taşıma kapasitesini azalttığı ve maksimum çatlak genişliklerinde ise önemli artışlara yol açtığı görülmüştür.

Betonarme yüksek kirişlerde faydalı yükseklik (d) sabit tutularak a/d oranındaki değişimin; P – u ve P – w davranışlarına etkisi Şekil 6.42.'de gösterilmiştir. Yük – yerdeğiştirme davranışı incelendiğinde a/d oranının azalması ile birlikte yük taşıma kapasitesinde artış gözlenmiştir. Ayrıca düşey yerdeğiştirme değerlerinde de küçük farklılıklar olup daha gevrek bir davranış elde edilmiştir. Ancak DB50/1.63-C1 numunesinde a/d oranının azalması ile birlikte yerdeğiştirme değerinde azalma gözlenmemiştir.

Numunelerin P – w davranış grafikleri (Şekil 6.42.) incelendiğinde a/d oranının artışı ile birlikte maksimum çatlak genişliği değerlerinde artışlar oluşmuştur. Sonuç olarak;

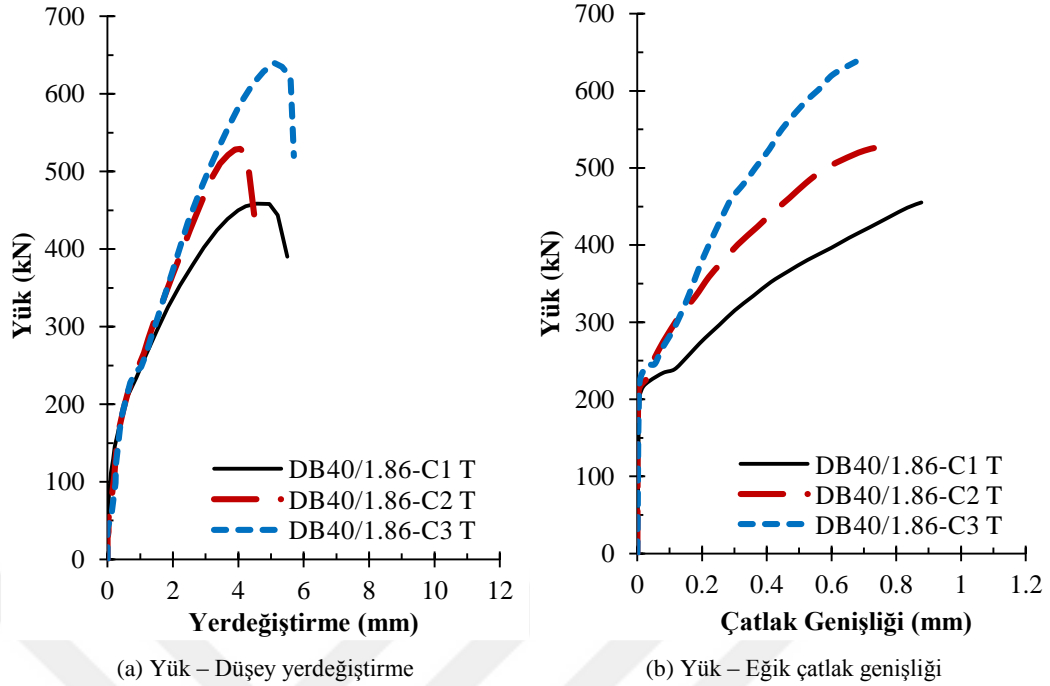
a/d oranının artışının betonarme yüksek kirişlerin yük taşıma kapasitesini azalttığı ve maksimum çatlak genişliklerinde ise önemli artışlara yol açtığı görülmüştür. Ayrıca bu davranış, literatürde Bircher ve arkadaşları (2009) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları ile de örtüşmektedir.



Şekil 6.42. a/d oranının (d sabit) yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkisi.

Betonarme yüksek kirişlerde karakteristik beton basınç dayanımındaki (f_{ck}) değişimin, yük - düşey yerdeğiştirme ve yük - eğik çatlak genişliği davranışlarına etkisi Şekil 6.43.'te gösterilmiştir. Yük - yerdeğiştirme davranışı incelendiğinde f_{ck} 'nin artışı ile birlikte yük taşıma kapasitesinde artış gözlenmiştir. Betonarme klasik kirişlerde geçerli olan bu davranış yüksek kirişlerde de benzer etkiyi göstermiştir. Ayrıca düşey yerdeğiştirme değerlerinde de küçük farklar oluşmuştur.

Numunelerin yük - eğik çatlak genişliği davranışı (Şekil 6.43.) incelendiğinde f_{ck} 'nin artışı ile birlikte maksimum çatlak genişliği değerlerinde azalmalar oluşmuştur. Sonuç olarak; f_{ck} 'nin artışının betonarme yüksek kirişlerin yük taşıma kapasitesini olumlu yönde etkilediği ancak maksimum çatlak genişliklerinde ise azalmalara yol açtığı görülmüştür.



Şekil 6.43. Beton basınç dayanımının yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkisi.

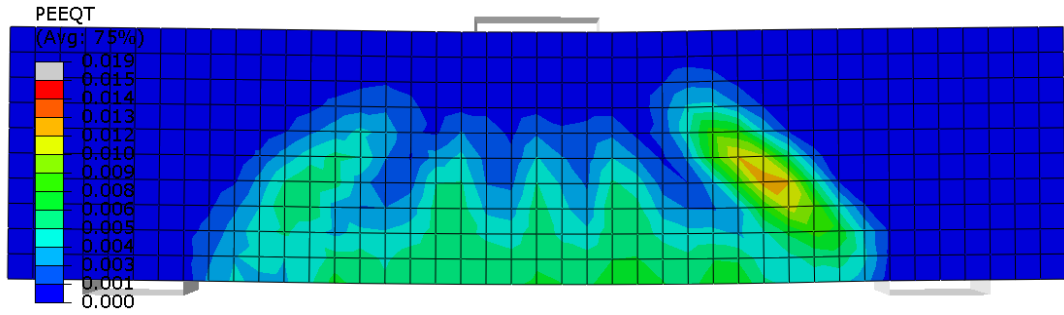
6.4. Parametrik Çalışma Sonuçları

Deneysel çalışma sonuçları kullanılarak doğrulanan ve sadece donatı konfigürasyonu değiştirilerek elde edilmiş nümerik modeller ile gerçekleştirilen parametrik çalışma sonuçları Tablo 6.5.'de gösterilmiştir. Ayrıca ACI 318-14 (2014) yönetmeliğinde verilen hususlara göre tasarlanan bu yeni yüksek kiriş elemanlarının, doğrusal olmayan SE analizleri sonucunda elde edilen “P – u” ve “P – w” davranış grafikleri Ek 1’de verilmiştir. Analiz sonuçları irdelendiğinde, elemanların donatı konfigürasyonunun değişimiyle birlikte yük taşıma kapasitelerinde farklılıklar oluşmuş ancak yerdeğiştirme kapasitelerinde önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Eleman tasarımında ACI 318-14 (2014) yönetmeliğinde verilen hususlara riayet edilmiş olursa bile, gerçekleştirilen tasarım sünek davranış elde edilmesi için yeterli olmamıştır. Bu durum, yüksek kirişlerin kesme kritik davranışa sahip elemanlar olduğunun açık bir göstergesidir.

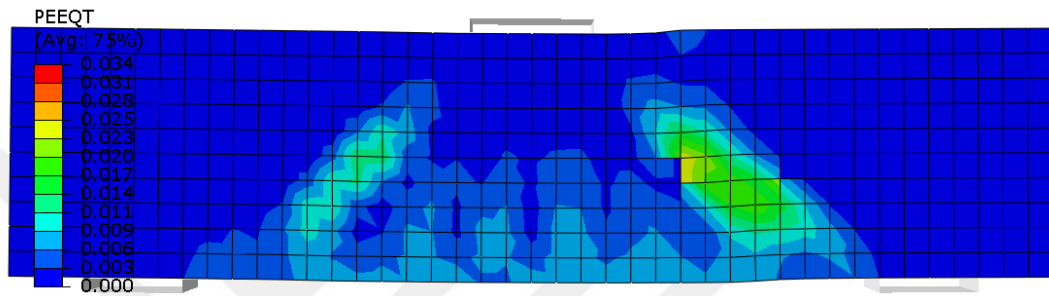
Tablo 6.5. Parametrik çalışma sonuçları.

| # | Numune Adı | P_u (kN) | u_u (mm) | w_0 (mm) | Hasar Mekanizması |
|----|-------------------|------------|------------|------------|-------------------|
| 1 | DB50/1.84-C1/SR-1 | 731 | 7,6 | 0,39 | Kesmeli-eğilme |
| 2 | DB50/1.75-C1/SR-2 | 774 | 9,3 | 1,04 | Kesmeli-eğilme |
| 3 | DB50/1.75-C1/SR-3 | 631 | 7,7 | 0,97 | Kesmeli-eğilme |
| 4 | DB50/1.38-C1/SR-1 | 690 | 5,1 | 0,83 | Kesmeli-eğilme |
| 5 | DB50/1.32-C1/SR-2 | 653 | 4,7 | 0,51 | Kesmeli-eğilme |
| 6 | DB50/1.32-C1/SR-3 | 574 | 3,6 | 0,43 | Kesmeli-eğilme |
| 7 | DB60/1.87-C1/SR-1 | 751 | 9,2 | 0,72 | Kesmeli-eğilme |
| 8 | DB60/1.80-C1/SR-2 | 738 | 9,5 | 0,62 | Kesmeli-eğilme |
| 9 | DB60/1.80-C1/SR-3 | 664 | 9,2 | 1,13 | Kesmeli-eğilme |
| 10 | DB60/1.50-C1/SR-1 | 810 | 5,5 | 0,24 | Kesmeli-eğilme |
| 11 | DB60/1.44-C1/SR-2 | 721 | 4,8 | 0,36 | Kesmeli-eğilme |
| 12 | DB60/1.44-C1/SR-3 | 620 | 5,2 | 0,90 | Kesmeli-eğilme |
| 13 | DB55/1.65-C1/SR-1 | 703 | 6,1 | 0,94 | Kesmeli-eğilme |
| 14 | DB55/1.58-C1/SR-2 | 637 | 6,9 | 0,77 | Kesmeli-eğilme |
| 15 | DB55/1.58-C1/SR-3 | 626 | 6,1 | 0,88 | Kesmeli-eğilme |
| 16 | DB40/1.80-C1/SR-1 | 664 | 5,8 | 0,50 | Kesmeli-eğilme |
| 17 | DB40/1.68-C1/SR-2 | 582 | 7,0 | 0,84 | Kesmeli-eğilme |
| 18 | DB40/1.68-C1/SR-3 | 545 | 7,4 | 1,15 | Kesmeli-eğilme |
| 19 | DB40/1.80-C2/SR-1 | 566 | 4,6 | 0,19 | Kesmeli-eğilme |
| 20 | DB40/1.68-C2/SR-2 | 511 | 6,0 | 0,16 | Kesmeli-eğilme |
| 21 | DB40/1.68-C2/SR-3 | 438 | 5,5 | 0,89 | Kesmeli-eğilme |
| 22 | DB40/1.80-C3/SR-1 | 635 | 4,4 | 0,23 | Kesmeli-eğilme |
| 23 | DB40/1.68-C3/SR-2 | 617 | 7,0 | 0,59 | Kesmeli-eğilme |
| 24 | DB40/1.68-C3/SR-3 | 610 | 7,1 | 0,58 | Kesmeli-eğilme |

Numunelerin çekme bölgesinde öncelikle, asal çekme gerilmelerine dik doğrultuda eğilme çatlakları oluşmuş olup uygulanan yükün artışı ile birlikte bu çatlaklar kiriş gövdesine doğru ilerlemiştir. Mesnetlere yakın bölgelerdeki eğilme çatlak boylarının kiriş gövdesine doğru uzamasıyla kesmeli-eğilme çatlakları (flexure-shear cracks) oluşmuştur. Elemandaki donatı konfigürasyonuna bağlı olarak kesmeli-eğilme çatlakları, eğilme çatlaklarının oluşumundan hemen sonra ya da eğilme çatlakları ile eşzamanlı olarak oluşmuştur. Kesmeli-eğilme çatlaklarının ilerlemesi ve çatlak genişliklerinin artışı ile birlikte eleman güç tükenmesine ulaşmıştır. Bu durum, örnek olarak DB50/1.84-C1/SR-1 ve DB50/1.75-C1/SR-3 numunelerinin SE modelleri üzerinde sırasıyla Şekil 6.44. ve Şekil 6.45.'de gösterilmiştir. Gösterilen numunelerin nümerik analizleri sonucunda elde edilen eşdeğer çekme plastik birim şekil değiştirme (PEEQT) davranış şekillerinden görüldüğü gibi, elemanın çekme bölgesinde asal çekme gerilmelerine dik doğrultuda eğilme çatlakları oluşmuştur. Mesnetlere yakın bölgelerdeki eğilme çatlaklarının kiriş gövdesine doğru uzamasıyla birlikte kesmeli-eğilme çatlakları oluşmuştur. Bununla birlikte numunelerde, kesme ve çekme donatısı konfigürasyonundaki değişime bağlı olarak çatlak genişlikleri ve çatlak ilerlemelerinde farklılıklar gözlenmiştir.



Şekil 6.44. DB50/1.84-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz sonucu.



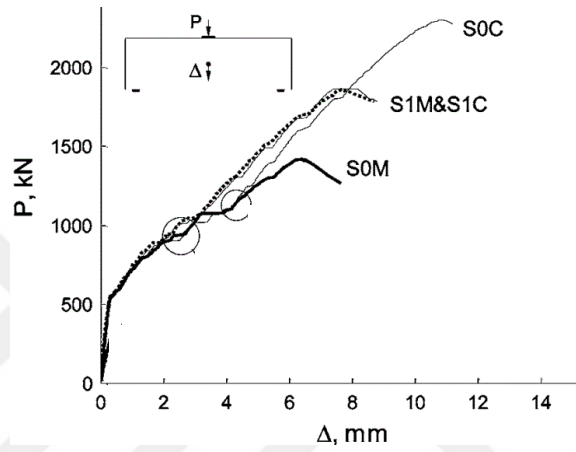
Şekil 6.45. DB50/1.75-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz sonucu.

6.5. Literatürde Gerçekleştirilmiş Olan Çalışmaların Sonuçları

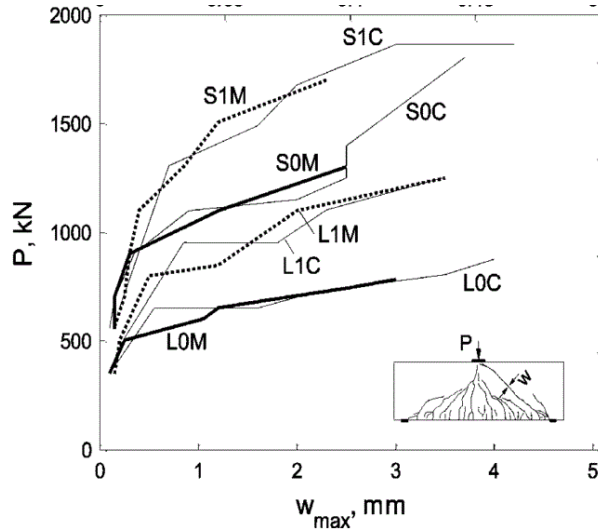
Literatürde, betonarme yüksek kirişlerin çatlak davranışının incelenip eğik çatlak genişliklerinin ölçüldüğü deneysel çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Bununla birlikte, bu tez çalışması kapsamında, betonarme yüksek kirişlerin eğik çatlak genişliği davranışından artık yük taşıma kapasitesinin hesaplanabilmesi için önerilen formülün oluşturulmasında literatürde gerçekleştirilmiş sınırlı sayıdaki çalışma sonuçları da kullanılmıştır. Bu çalışmalarda kullanılan numunelerin boyut ve malzeme özellikleri Tablo 6.6.'da verilmiştir. Ayrıca çalışmalarda verilen yük, yerdeğiştirme ve çatlak genişliği davranış grafikleri Şekil 6.46. ile Şekil 6.51. arasında gösterilmiştir.

Tablo 6.6. Literatürdeki çalışmalardan alınan numunelerin boyut ve malzeme özellikleri.

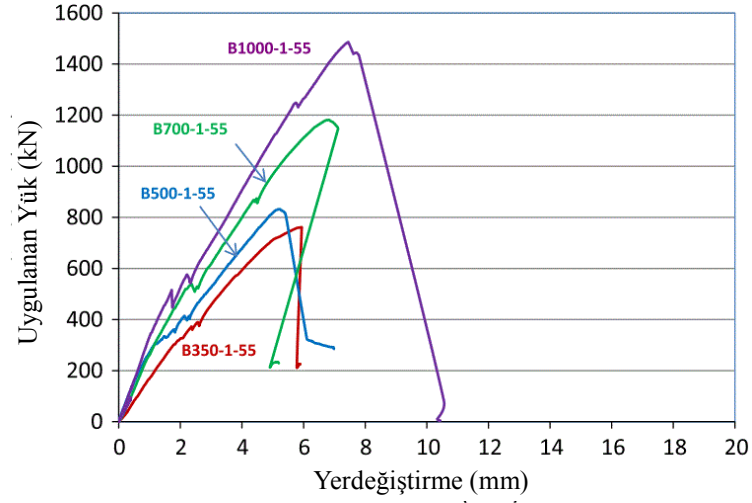
| Çalışma | Numune Adı | h (mm) | a (mm) | a/d | b_w (mm) | l_n (mm) | ρ_l | ρ_v | ρ_h | f_{ck} (MPa) |
|-------------------------------|------------|--------|--------|------|------------|------------|----------|----------|----------|----------------|
| Mihaylov ve ark. (2010) | S0M | 1200 | 1700 | 1,55 | 400 | 3400 | 0,0070 | 0 | 0 | 34,2 |
| | S1M | 1200 | 1700 | 1,55 | 400 | 3400 | 0,0070 | 0,001 | 0 | 33 |
| | B350-1-55 | 350 | 293 | 1,00 | 150 | 1586 | 0,0147 | 0 | 0 | 53,9 |
| El-Sayed ve Shuraim (2015) | B500-1-55 | 500 | 419 | 1,00 | 150 | 1838 | 0,0147 | 0 | 0 | 53,9 |
| | B700-1-55 | 700 | 615 | 1,00 | 150 | 2230 | 0,0147 | 0 | 0 | 53,9 |
| | B1000-1-55 | 1000 | 910 | 1,00 | 150 | 2820 | 0,0147 | 0 | 0 | 53,9 |
| Tuchscherer ve Quesada (2015) | 00_00 | 460 | 610 | 1,50 | 300 | 1220 | 0,0160 | 0 | 0 | 29,4 |
| | 00_02 | 460 | 610 | 1,50 | 300 | 1220 | 0,0160 | 0,002 | 0,002 | 29,8 |
| | 00_03 | 460 | 610 | 1,50 | 300 | 1220 | 0,0160 | 0,003 | 0,003 | 29,8 |



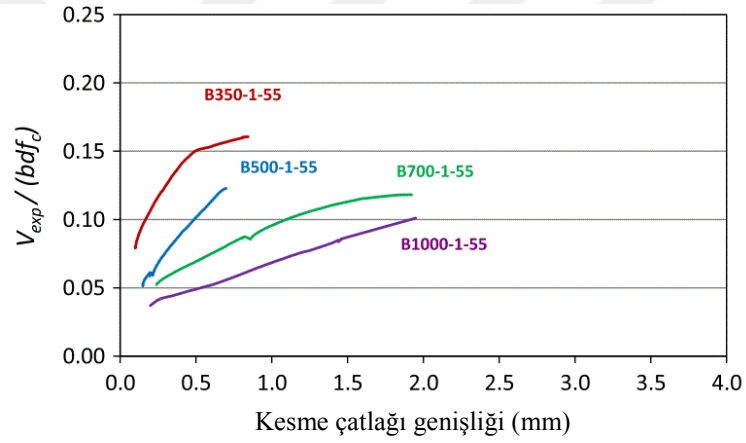
Şekil 6.46. SOM ve S1M numunesi yük – yerdeğiştirme davranış grafikleri (Mihaylov ve ark., 2010).



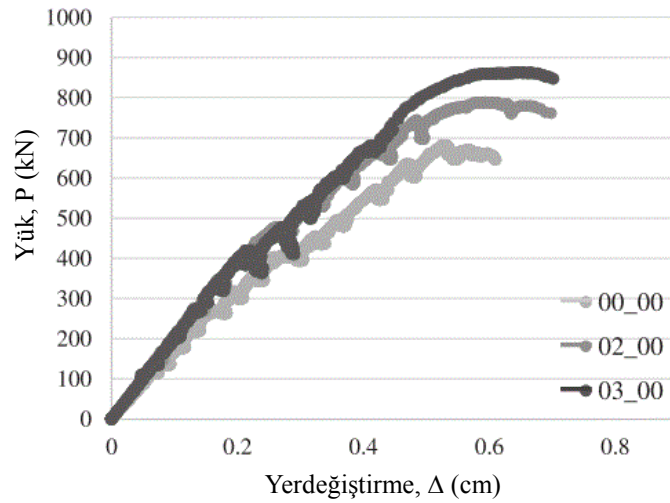
Şekil 6.47. SOM ve S1M numunesi yük – çatlak genişliği davranış grafikleri (Mihaylov ve ark., 2010).



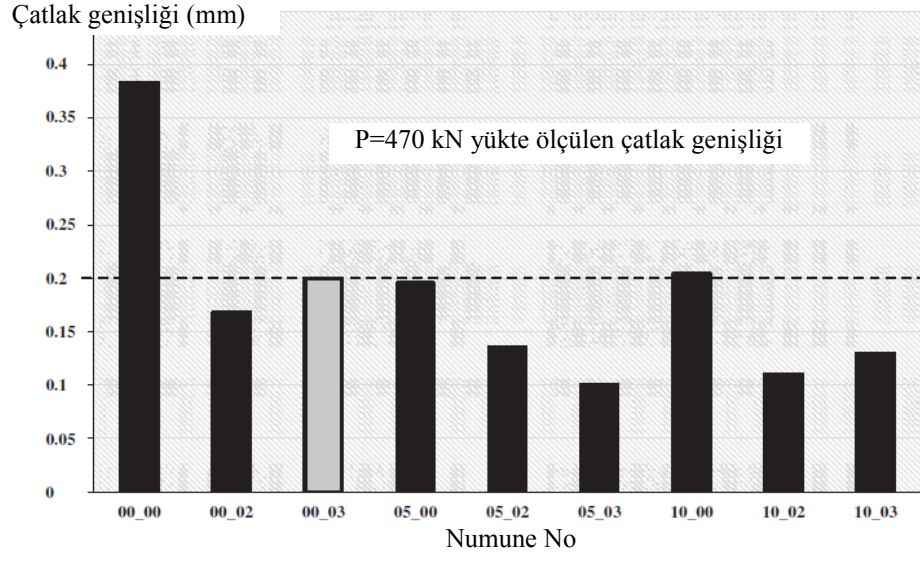
Şekil 6.48. B350-1-55, B500-1-55, B700-1-55 ve B1000-1-55 numunesi yük – yerdeğiştirme davranış grafikleri (El-Sayed ve Shuraim, 2015).



Şekil 6.49. B350-1-55, B500-1-55, B700-1-55 ve B1000-1-55 numunesi yük – çatlak genişliği davranış grafikleri (El-Sayed ve Shuraim, 2015).



Şekil 6.50. 00_00, 00_02 ve 00_03 numunesi yük – yerdeğiştirme davranış grafikleri (Tuchscherer ve Quesada, 2015).



Şekil 6.51. 00_00, 00_02 ve 00_03 numunesi yük – çatlak genişliği davranış grafikleri (Tuchscherer ve Quesada, 2015).

BÖLÜM 7. ARTIK YÜK TAŞIMA KAPASİTESİNİN HESABI İÇİN ÖNERİLEN FORMÜL

Tez çalışmasının son aşamasında, literatürde gerçekleştirilmiş çalışmalar ile bu tez kapsamında yapılan deneysel ve parametrik çalışma sonuçları birlikte kullanılarak, eğik olarak çatlama betonarme yüksek kirişlerin çatlak genişliğinden, eleman artık yük taşıma kapasitesinin hesaplanabileceği yeni, etkin ve basit bir formül önerilmiştir. Önerilen formülün oluşturulmasında gen ifadeli programlama (Gene expression programming, GEP) optimizasyon tekniği kullanılmıştır.

1992 yılında John Koza tarafından geliştirilen GEP, ele alınan problemin yapı taşlarından oluşturulan muhtemel ilkel çözüm tarzlarının belirli bir uyum kriterine göre geliştirilerek mükemmelleşmesini amaçlayan evrimsel bir algoritma tekniğidir (Koza, 1992). GEP evrimsel gelişime dayalı optimizasyon algoritmaları arasında yer almakta olup kromozomlar ve açıklama ağaçları (expression trees) temel bileşenleridir. Çözüm modelleri; baş (head), kuyruk (tail) ve sabit değerlerden (constants) oluşan genler ve bu genleri birbirlerine bağlayan kromozomlar (fonksiyonlar) ile oluşturulmaktadır. Bu sebeple, çözüm mimarisi oluşturulurken gen ve kromozom sayıları, başlık boyutu ve bağlantı fonksiyonunun seçilmesi gereklidir. Karmaşık problemlerin çözümü için uzun kromozom yapılarına gereksinim duyulmaktadır (Ferreira, 2006).

GEP'te, daha iyi niteliklere sahip yeni nesillerin üretilebilmesi için mevcut nüfus (popülasyon) üzerinde genetik operatörler yardımıyla algoritma alanı genişletilmektedir. Çaprazlama (crossover) ve mutasyon (mutation) olmak üzere 2 genel operatör bulunmaktadır. İki farklı kromozomun eşleştirilerek yeni bir kromozomun oluşturulmasına çaprazlama, eş kromozoma ihtiyaç olmadan tek bir kromozom üzerindeki bir gende meydana gelen rakamsal değişime mutasyon

denilmektedir GEP’te çözüm stratejileri, genetik operatörlerin ve rastgele sabit değerlerin farklı kullanımları ile oluşturulmaktadır. (İşçi ve Korukoğlu, 2003; GeneXproTools Tutorials).

Genetik ifadeli programlamada, genlerin çözüm yeteneği (performansı) uygunluk fonksiyonları (fitness functions) ile gösterilmektedir. Analizlerde, mutlak hata (MAE), ortalama karesel hata (MSE), bağıl karesel hata (RSE), kök bağıl karesel hata (RRSE) vb. uygunluk fonksiyonları kullanılmaktadır (Ferreira, 2006). Bu tez çalışması kapsamında GEP analizlerinde kök bağıl karesel hata (RRSE) kullanılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında, GEP analizlerinde Candida Ferreira tarafından geliştirilen GeneXproTools (5.0) ticari yazılım kullanılmıştır. GeneXproTools, etkinliği pek çok çalışmada kanıtlanmış gen ifadeli programlama yazılımlarından birisidir (Caglar, 2015). Programda, optimal evolution, constant fine-tuning, model fine-tuning, subset selection ve custom olarak 5 ayrı çözüm stratejisi eğitim stratejisi bulunmaktadır (GeneXproTools Tutorials). Tez çalışması kapsamında analizlerde bu çözüm stratejilerinden optimal evolution, model fine-tuning ve sub-set selection kullanılmıştır. Bununla birlikte çözüm mimarisinin oluşturulması için seçilmesi gerekli olan parametrelerin değerleri Tablo 7.1.’de verilmiştir. Bu parametrelerin optimum değerinin tespiti için parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. En iyi uygunluk performansı sergileyen değerler tabloya yazılmıştır.

Tablo 7.1. GEP çözüm mimarisini oluşturan parametreler ve seçilen değerleri.

| Parametre | Seçilen değer |
|---------------------|---------------|
| Kromozom sayısı | 40 |
| Başlık boyutu | 15 |
| Gen sayısı | 2 |
| Bağlantı fonksiyonu | Toplama |

GEP analizlerinde kullanılan ve betonarme yüksek kirişlerin eğik kesme çatlağı davranışına etkisi olabilecek parametreler, gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışma ve literatürde mevcut çalışmaların sonuçları bir bütün olarak değerlendirilerek belirlenmiştir. Tespit edilen parametreler şunlardır;

- Kesme donatısı oranı; ρ_w

- Beton basınç dayanımı; f_{ck}
- a/d oranı
- Kesit alanı; $b_w d$
- Çekme donatısı oranı; ρ_l

Belirlenen bu parametreler kullanılarak GEP analizi için eğitim (training) ve doğrulama (validation) verisi oluşturulmuştur. Analizlerde 960 adet eğitim ve 240 adet doğrulama verisi kullanılmış olup, rastgele oluşturulan bu veriler Ek 2’de verilmiştir. Ayrıca, analizlerde kullanılan datanın minimum ve maksimum sınır değerleri Tablo 7.2.’de gösterilmiştir.

Tablo 7.2. Analizlerde kullanılan verinin sınır değerleri.

| Parametreler | Minimum | Maksimum |
|----------------------------|---------|----------|
| Girdi parametreleri | | |
| ρ_w (%) | 0 | 1,007 |
| f_{ck} (MPa) | 18,10 | 53,90 |
| a/d | 1,00 | 1,90 |
| $b_w d$ (cm ²) | 525 | 4800 |
| ρ_l (%) | 0,700 | 2,375 |
| w (mm) | 0,100 | 2,490 |
| Çıktı parametreleri | | |
| P (kN) | 209 | 1700 |

Bir betonarme yüksek kiriş elemanının artık yük taşıma kapasitesi oranı (η); elemana etkileyen mevcut yükün (P), maksimum yük taşıma kapasitesine (P_u) bölünmesiyle elde edilmektedir ($\eta = 1 - P/P_u$). Yüksek kirişlerde P_u değeri mevcut tasarım yönetmeliklerinde (ACI 318-14, AASHTO LRFD, FIB MC2010 vb.) veya literatürde önerilen yöntemlerden (Birrcher ve ark., 2009; Gong ve Su, 2013; Hassoun ve Al-Manaseer, 2015; Wight, 2016) birisi kullanılarak rahatlıkla hesaplanabilmektedir. Ancak, eğik olarak çatlamış betonarme yüksek kirişlerin artık yük taşıma kapasite oranının belirlenebilmesi için gerekli olan P değerinin hesabı için literatürde bir bağıntıya pek rastlanmamıştır. Bu sebeple, bu tez çalışması kapsamında P değerinin hesabı için bir formül önerilmiştir (Denklem 8.1). Önerilen formül ile eğik olarak çatlamış bir yüksek kiriş elemanının kesit, malzeme ve donatı özellikleri ile maksimum eğik çatlak genişliği değerleri kullanılarak, P değeri hesaplanabilmektedir. Ayrıca önerilen formülün hesabında bulunan parametreler Denklem 8.2, 8.3, 8.4 ve 8.5’de verilen bağıntılar yardımı ile elde edilmektedir.

$$P = A + B - C D \quad (8.1)$$

$$A = 7400w \left(f_{ck} + \frac{2a}{d} - 3,5 \right) + 90000 \quad (8.2)$$

$$B = \rho_l (f_{ck} + 40) \left(\frac{a}{d} - 4 \right) \left(\frac{3700}{w} - A_c - 23000 \right) \quad (8.3)$$

$$C = \frac{a}{d} \rho_w (f_{ck} + 280) w^{0,25} \quad (8.4)$$

$$D = \frac{1260}{w} - 2A_c - 103200 \quad (8.5)$$

Denklemlerde; w: eğik çatlak genişliğini (mm), f_{ck} : betonun 28 günlük karakteristik silindir basınç dayanımını (MPa), a/d: kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranını, ρ_l ve ρ_w sırasıyla çekme ve kesme donatısı oranlarını göstermektedir. ρ_w 'nin hesabı ACI 318-14 yönetmeliğinde verilen hususlara göre yapılmaktadır. Ayrıca, $A_c = b_w d$ olarak hesaplanmaktadır.

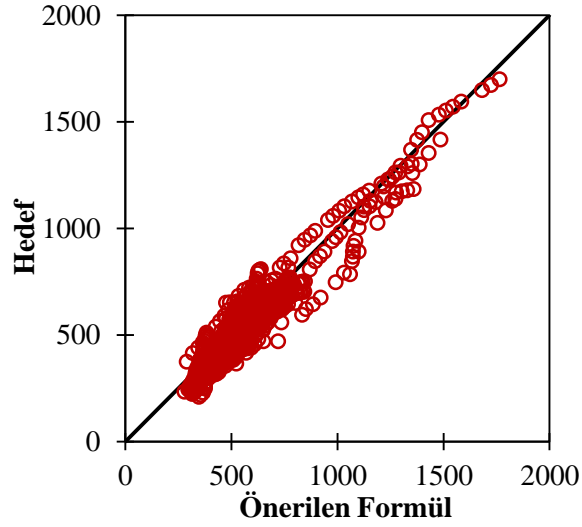
Denklemden görüldüğü gibi önerilen formül oldukça basit, anlaşılır ve kullanımı kolaydır. Formül için gerekli hesaplamalar basit bir hesap makinası yardımıyla veya yaygın olarak kullanılan tablolama programları (Excel vb.) ile kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. Bununla birlikte önerilen formülde kullanılan parametrelerin tespiti için, öncelikle kapsamlı bir literatür araştırılması gerçekleştirilmiştir. Bu konuda literatürde gerçekleştirilen çalışmaların oldukça kısıtlı sayıda olduğu tespit edilmiş olup hakkında yeterli bilgi bulunamayan parametreler için bu tez çalışması kapsamında deneysel ve nümerik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Literatür araştırması ve gerçekleştirilen deneysel ve nümerik çalışma sonuçları bir bütün olarak değerlendirilerek betonarme yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etki eden önemli parametreler tespit edilmiştir. Gerçekleştirilmiş olan bu kapsamlı çalışma neticesinde oldukça başarılı, etkin ve geçekçi sonuçlar veren bir formül elde edilmiştir.

Önerilen formülün performansı istatistiksel olarak Tablo 7.3.’te gösterilmiştir. Tabloda R^2 : tanımlayıcılık katsayısı olup regresyon denklemi ile belirlenen bağımlı değişkenliğin toplam değişkenliğe oranını ifade etmektedir. R^2 , 0 ile 1 arasında değişen değerler alabilmekte ve 1; tanımlanan eğri, örneklemdaki tüm bağımlı değişken değerlerindeki farklılaşmayı açıklayabildiği, 0; ise regresyon denklemi, verideki değişkenliği hiçbir şekilde açıklanmıyor anlamına gelmektedir (Ferreira, 2006). Tablo 7.3.’ten görülebileceği gibi, önerilen formülün R^2 değeri 0,91 gibi oldukça büyük bir değer olarak elde edilmiştir. Ayrıca formülün oluşturulmasında eğitim (training) verisi olarak kullanılmayan doğrulama (validation) verisinde ise, R^2 değeri 0,90 olarak oldukça büyük bir değer elde edilmiştir. Bununla birlikte, önerilen formülün yakınsama performansını gösteren “en iyi uygunluk (best fitness)” değeri eğitim için 902, doğrulama için ise 900 olarak tespit edilmiştir. En iyi uygunluk değeri maksimum 1000 değerini alabilmekte olup bu değer tam yakınsamanın sağlandığı anlamına gelmektedir (Ferreira, 2006). Önerilen formülün tam yakınsama değerine oldukça yaklaştığı görülmüştür. Elde edilen R^2 ve en iyi uygunluk değerleri birlikte değerlendirildiğinde, önerilen formülün etkin ve performansının oldukça başarılı olduğu görülmektedir.

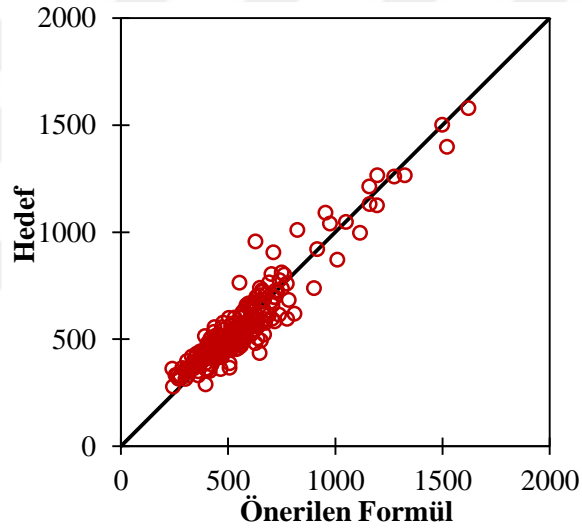
Tablo 7.3. Önerilen formülün performansı.

| | Eğitim | Doğrulama |
|------------------------|--------|-----------|
| R^2 | 0,91 | 0,90 |
| En iyi uygunluk değeri | 902 | 900 |

Ayrıca, önerilen formülün oluşturulmasında kullanılan eğitim verisinin saçılım diyagramı (scatter plot) Şekil 7.1.’de verilmiştir. Doğrulama verisinin saçılım diyagramı ise Şekil 7.2.’de gösterilmiştir. Her iki diyagramdan görülebileceği gibi, önerilen formülün performansı oldukça başarılıdır.



Şekil 7.1. Eğitim verisinin saçılım diyagramı (birim: kN).



Şekil 7.2. Doğrulama verisinin saçılım diyagramı (birim: kN).

Bu tez çalışması kapsamında, eğik olarak çatlamış betonarme yüksek kirişlerin mevcut çatlak genişliği ile kesit ve malzeme özellikleri kullanılarak, eleman yük taşıma kapasitesinin hesaplanabilmesi önerilen formülün kullanımında dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda belirtilmiştir;

- Öncelikle, formülün oluşturulmasında literatürde gerçekleştirilmiş çalışmalar ile bu tez kapsamında yapılan deneysel ve parametrik çalışma sonuçları birlikte kullanılmıştır. Bu sebeple formülün oluşturulmasında kullanılan verinin kapsam ve sınırı bulunmaktadır. Önerilen formül ancak Tablo 7.2.'de verilen

sınır değerler dikkate alındığında gerçekçi sonuçlar vermektedir. Önerilen formülün bu sınır değerler dışında kalan özelliklere sahip yüksek kırışlerde kullanılmasının yanıltıcı sonuçlar verme ihtimali göz ardı edilmemelidir.

- Önerilen formülün oluşturulmasında, deneysel ve parametrik çalışma sonucunda elde edilen veri, hiç değiştirilmeden doğrudan kullanılmıştır. Diğer bir ifadeyle, sonuçlarda herhangi bir güvenlik katsayısı dikkate alınmamıştır. Betonarme yüksek kırışler kesme kritik davranışları sebebiyle ani ve gevrek hasara maruz kalabilmektedir. Bu sebeple önerilen formülün kullanılmasında bu husus dikkate alınmalıdır. Bununla birlikte, bir betonarme yüksek kırış elemanının artık yük taşıma kapasitesi oranı (η); elemana etkiyen mevcut yükün (P), maksimum yük taşıma kapasitesine (P_u) bölünmesiyle elde edilmektedir ($\eta = 1 - P/P_u$). P değeri bu tez kapsamında önerilen formül ile hesaplanabilirken, P_u değerinin, mevcut tasarım yönetmeliklerinde veya literatürde önerilen yöntemlerden birisi kullanılarak hesaplanması gerekmektedir. Bu sebeple, mevcut tasarım yönetmeliklerinde veya literatürde önerilen yöntemlerdeki güvenlik hususu dikkate alınmalıdır.
- Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışma laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş olup saha ve laboratuvar koşullarında oluşabilecek farklılıklar dikkate alınmalıdır.
- Betonarme yüksek kırışlerin eğik çatlak genişliklerine etkisi önemli olabilecek ancak bu tez çalışması kapsamına girmeyen başka parametrelerin de var olabileceği ihtimali unutulmamalıdır.
- Betonarme elemanlarda genel olarak, çatlak davranışının değişkenlik gösterebileceği göz ardı edilmemelidir.

BÖLÜM 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasının amacı; eğik olarak çatlamış mevcut betonarme yüksek kirişlerin, artık yük taşıma kapasitelerinin gerçekçi olarak belirlenebilmesi ve bu sayede acil müdahale gerektirecek kritik elemanların önceden tespit edilerek oluşabilecek can ve mal kaybı riskinin azaltılmasıdır. Bu amaçla, betonarme yüksek kirişlerin kesme etkisi altındaki eğik çatlak davranışı 3 aşamalı bir çalışma ile incelenmiştir. İlk aşamada deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiş olup betonarme yüksek kirişlerin eğik kesme çatlağı davranışına; kesit yüksekliği (h), kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d) ve karakteristik beton basınç dayanımı (f_{ck}) parametrelerinin etkisi incelenmiştir. İkinci aşamada, deneysel çalışma sonuçları kullanılarak nümerik bir çalışma gerçekleştirilmiş ve doğrusal olmayan sonlu elemanlar metodu kullanılarak oluşturulmuş nümerik modeller deney sonuçları kullanılarak doğrulanmıştır. Daha sonra, deneysel çalışmada kullanılan numuneler ile boyut ve malzeme özellikleri tamamen aynı fakat farklı kesme donatısı oranına sahip yeni betonarme yüksek kirişler tasarlanmıştır. Tasarlanan yeni yüksek kiriş elemanları ile deneysel çalışmayla doğrulanmış nümerik modeller kullanılarak parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Parametrik çalışma sonucunda yüksek kirişlerin “yük – yerdeğiştirme” ve “yük – çatlak genişliği” davranış grafikleri elde edilmiştir. Tez çalışmasının son aşamasında ise, gerçekleştirmiş olan deneysel ve parametrik çalışmalar ile literatürde verilen çalışma sonuçları birlikte kullanılarak, eğik olarak çatlamış betonarme yüksek kirişlerin çatlak genişliğinden, eleman artık yük taşıma kapasitesinin hesaplanabileceği ve literatürde bulunan tabloya alternatif olarak yeni, etkin ve basit bir formül önerilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında, gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışma kapsamında 12 adet betonarme yüksek kiriş numunesi üretilmiştir. Numunelerin 3 adedi kesme donatısı içermekte olup kalan 9 adet numune kesme donatısı içermemektedir.

Numuneler 3 nokta yükleme deney düzeneğinde, mesnetlerinden birisi sabit diğeri hareketli olacak şekilde test edilmiştir. Deney esnasında yük, numuneye hidrolik bir yük veren ile sabit hızla uygulanmıştır. Uygulanan yük, numune ile yük veren arasına yerleştirilen bir yük hücresi ile okunmuştur. Numunelerin alt bölgesi ve yan yüzeylerine yerleştirilen potansiyometreler vasıtasıyla, deney esnasında numunede oluşan düşey ve yatay yerdeğiştirme değerleri ölçülmüştür. Donatılarda oluşan birim şekildeğiştirme değerleri, donatılara yapıştırılan gerinim pulları ile ölçülmüştür. Deney esnasında numunede oluşan eğik çatlak genişliklerinin ölçümü, numune arka yüzeyine yerleştirilen çatlak ölçerler ile yapılmıştır. Ayrıca deney düzeneğinin stabilitesinin kontrol edilmesi amacıyla deney sırasında numunede oluşan düzlem dışı hareket ve mesnet çökmesi değerleri de ölçülmüştür. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır;

- Numune üzerinde düşey ve yatayda ölçülen yük – yerdeğiştirme, donatılardan ölçülen yük – birim şekildeğiştirme, kiriş gövdesinden ölçülen yük – düzlem dışı yerdeğiştirme ve mesnetten ölçülen yük – mesnet çökmesi davranış grafikleri bir bütün olarak incelendiğinde; elde edilen yerdeğiştirme değerlerinin oldukça küçük seviyede olduğu ve donatıların elastik bölgede kalarak akmadığı görülmüştür. Bu sebeple, numune tasarımında hedeflenen kesme kritik davranışın başarılı bir şekilde sağlanmıştır. Bununla birlikte numunede düzlem dışı hareket ve mesnet çökmesi değerleri oldukça sınırlı seviyededir. Bu durum, deney düzeneğinin oldukça stabil çalıştığını göstermektedir.
- Kesme donatısı içermeyen numunelerin deney sonuçları bir bütün olarak değerlendirildiğinde; elemanların sadece basınç çubuklarında eğik kesme çatlakları oluşmuştur. Numuneler, maksimum yük seviyesine ulaşıldığında ani ve gevrek kesme hasarından güç tükenmesine ulaşmıştır. Numunelerin, kemer etkisi (arc action) nedeniyle eğik çatlak oluşumundan sonra bile önemli bir yük taşıma kapasitesine sahip oldukları görülmüştür.

- Kesme donatısı içeren numunelerin deney sonuçları incelendiğinde; kesme donatısının süneklik açısından beklenen etkiyi göstermediği ancak yük taşıma kapasitesinde önemli seviyede artış sağladığı görülmüştür. Kesme donatısı içeren numunelerin hepsinde, kesme donatısı içermeyen numunelere benzer şekilde sadece eğik kesme çatlakları oluşmuş ve numuneler kesme hasarından güç tükenmesine ulaşmıştır. Ancak göçme anındaki hasar davranışları daha yumuşak gerçekleşmiştir. Elemanlara kesme donatısı konulmasına rağmen sünek davranış elde edilememesi, betonarme yüksek kirişlerin kesme kritik elemanlar olduğunu göstermektedir.
- Deney numunelerinin maksimum yük taşıma kapasiteleri, “strut-and-tie model (STM)” kullanılarak hesaplanmıştır. STM hesaplarında ACI 318-14 yönetmeliğinde verilen hususlar dikkate alınmıştır. Bununla birlikte, elemanların yük kapasiteleri literatürde STM'nin değiştirilmesi ile oluşturulmuş “modified strut-and-tie modeli (MSTM)” kullanılarak da hesaplanmıştır. Hesaplamalarda kullanılan bağıntılarda, malzemeler için verilen güvenlik katsayıları dikkate alınmamıştır. Elde edilen sonuçlar, deneysel çalışma ile numunelerden elde edilen maksimum yük taşıma kapasiteleri ile karşılaştırılmıştır (Tablo 6.3.). Sonuçlardan görüldüğü gibi; STM kullanılarak elde edilen sonuçlar, deney sonuçlarına göre oldukça güvenli (conservative) tarafta kalmaktadır. MSTM ile hesaplanan değerler ise deney sonuçları ile daha uyumlu olup yine bir miktar güvenli tarafta yer almaktadır.
- Betonarme yüksek kirişlerde kesit yüksekliğindeki (h) değişimin, yük – düşey yerdeğiştirme ($P - u$) ve yük – eğik çatlak genişliği ($P - w$) davranışlarına etkisi incelendiğinde; kesit yüksekliğinin artışı ile birlikte elemanın yük taşıma kapasitesinde artış gözlenmiştir. Betonarme klasik kirişlerde geçerli olan bu davranış yüksek kirişlerde de benzer etkiyi göstermiştir. Ayrıca düşey yerdeğiştirme değerlerinde küçük artışlar oluşmuştur. Numunelerin yük – eğik çatlak genişliği davranışı incelendiğinde ise elemanların çatlak genişliği davranışları oldukça benzer olup kesit yüksekliğinin artışı ile birlikte maksimum çatlak genişliği değerlerinde çok küçük artışlar oluşmuştur. Sonuç

olarak; kesit yüksekliğinin artışının betonarme yüksek kirişlerin yük taşıma kapasitesini olumlu yönde etkilediği ve maksimum çatlak genişliklerinde ise küçük miktarda artışlara yol açtığı görülmüştür.

- Betonarme yüksek kirişlerde kesme açıklığı (a) sabit tutularak a/d oranındaki değişimin $P - u$ ve $P - w$ davranışlarına etkisi incelendiğinde; a/d oranının azalması ile birlikte elemanların yük taşıma kapasitesinde artış gözlenmiştir. Ayrıca düşey yerdeğiştirme değerlerinde de küçük azalmalar oluşmuş olup daha gevrek bir davranış elde edilmiştir. Numunelerin yük – eğik çatlak genişliği davranışı incelendiğinde ise a/d oranının artışı ile birlikte maksimum çatlak genişliği değerlerinde artışlar oluşmuştur. Sonuç olarak; a/d oranının artışının betonarme yüksek kirişlerin yük taşıma kapasitesini azalttığı ve maksimum çatlak genişliklerinde ise küçük artışlara yol açtığı görülmüştür.
- Betonarme yüksek kirişlerde faydalı yükseklik (d) sabit tutularak a/d oranındaki değişimin; yük – düşey yerdeğiştirme ve yük – eğik çatlak genişliği davranışlarına etkisi incelendiğinde; a/d oranının azalması ile birlikte yük taşıma kapasitesinde artış gözlenmiştir. Ayrıca düşey yerdeğiştirme değerlerinde de küçük farklılıklar olup daha gevrek bir davranış elde edilmiştir. Ancak DB50/1.63-C1 numunesinde a/d oranının azalması ile birlikte yerdeğiştirme değerinde azalma gözlenmemiştir. Numunelerin $P - w$ davranış grafikleri incelendiğinde ise; a/d oranının artışı ile birlikte maksimum çatlak genişliği değerlerinde artışlar oluşmuştur. Sonuç olarak; a/d oranının artışının betonarme yüksek kirişlerin yük taşıma kapasitesini azalttığı ve maksimum çatlak genişliklerinde ise önemli artışlara yol açtığı görülmüştür.
- Betonarme yüksek kirişlerde karakteristik beton basınç dayanımındaki (f_{ck}) değişimin, $P - u$ ve $P - w$ davranışlarına etkisi incelendiğinde; f_{ck} 'nin artışı ile birlikte elemanların yük taşıma kapasitesinde artış gözlenmiştir. Betonarme klasik kirişlerde geçerli olan bu davranış yüksek kirişlerde de benzer etkiyi göstermiştir. Ayrıca düşey yerdeğiştirme değerlerinde de küçük farklar oluşmuştur. Numunelerin, yük – eğik çatlak genişliği davranışı incelendiğinde

ise f_{ck} 'nin artışı ile birlikte maksimum çatlak genişliği değerlerinde azalmalar oluşmuştur. Sonuç olarak; f_{ck} 'nin artışının betonarme yüksek kirişlerin yük taşıma kapasitesini olumlu yönde etkilediği ancak maksimum çatlak genişliklerinde ise azalmalara yol açtığı görülmüştür.

Çalışmanın ikinci aşamasında öncelikle, deneysel çalışmada kullanılan numuneler doğrusal olmayan SE metodu kullanılarak modellenmiştir. Numerik modelleme için ABAQUS (2013) sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Betonun doğrusal olmayan davranışını tanımlamak için beton hasar plastisite (BHP) modeli kullanılmıştır. Donatı ile beton arasındaki şekil değiştirme oranı eşit kabul edilerek, tam aderans kabulü ile donatı beton içerisine gömülü (embedded) olarak modellenmiştir. SE analizlerinde en uygun çözüm ağı (mesh) boyutu 50 mm olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte bu tez çalışması kapsamında, nümerik model üzerinden çatlak genişliğinin hesaplanabilmesi için birim şekildeğiştirme ve kırılma enerjisi tabanlı alternatif yeni bir bağıntı önerilmiştir. Oluşturulan nümerik modeller deney sonuçları kullanılarak doğrulanmıştır. Daha sonra, deneysel çalışmada kullanılan numuneler ile boyut ve malzeme özellikleri tamamen aynı ancak farklı kesme donatısı oranına sahip 24 adet yeni betonarme yüksek kirişler tasarlanmıştır. Tasarlanan yeni yüksek kiriş elemanları ile deneysel çalışmayla doğrulanmış nümerik modeller kullanılarak parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. SE modelleme çalışması ve parametrik çalışma sonucunda elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır;

- Nümerik modellerin sonuçları bir bütün olarak incelendiğinde; oluşturulmuş olan SE modelleri ile deneysel çalışma sonuçlarının P – u davranışı açısından oldukça başarılı bir şekilde yakanladığı görülmüştür. Yük – çatlak genişliği davranışlarında küçük farklar oluşmasına rağmen genel olarak çatlak davranışı yeterli oranda doğrulanmıştır. Sonuç olarak, nümerik modellerin deneysel çalışma sonuçlarıyla başarılı bir şekilde doğrulandığı ve betonarme yüksek kirişlerin kesme ve eğik çatlak davranışını yeterli oranda temsil ettiği görülmüştür.

- Bölüm 6’da, SE modeli üzerinden çatlak genişliklerinin ölçülebilmesi için yeni bir bağıntı (Denklem 6.1) önerilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında oluşturulmuş nümerik modellerin, P – w davranış grafikleri deney sonuçları ile karşılaştırıldığında, modellerin deneysel çalışma sonuçlarıyla başarılı bir şekilde doğrulanmıştır. Bu sebeple, SE modeli üzerinden çatlak genişliklerinin ölçülebilmesi için önerilen bağıntının ve uygulama metodunun oldukça başarılı olduğu görülmüştür.
- Benzer geometri, boyut ve malzeme özelliklerine sahip fakat kesme donatısı içeren veya içermeyen numunelerin SE modelleri, deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Oluşturulan nümerik modellerin donatı konfigürasyonunda ki değişimi oldukça gerçekçi ve başarılı bir şekilde temsil ettikleri görülmüştür. Bu durum ayrıca literatürde önerilen yöntemi de (Demir ve ark., 2016a) doğrulamaktadır. Sonuç olarak mevcut SE modelindeki, betonarme kiriş elemanlarının geometri, boyut, malzeme ve nümerik özellikleri sabit tutulup, sadece donatı konfigürasyonları değiştirilerek gerçekleştirilecek parametrik bir çalışmanın oldukça gerçekçi ve başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Parametrik çalışma sonuçları irdelendiğinde, elemanların donatı konfigürasyonunun değişimiyle birlikte yük taşıma kapasitelerinde farklılıklar oluşmuş ancak yerdeğiştirme kapasitelerinde önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Eleman tasarımında ACI 318-14 (2014) yönetmeliğinde verilen hususlara riayet edilmiş olursa bile, gerçekleştirilen tasarım sünek davranış elde edilmesi için yeterli olmamıştır. Bu durum, yüksek kirişlerin kesme kritik davranışa sahip elemanlar olduğunun açık bir göstergesidir. Numunelerin çekme bölgesinde öncelikle, asal çekme gerilmelerine dik doğrultuda eğilme çatlakları oluşmuş olup uygulanan yükün artışı ile birlikte bu çatlaklar kiriş gövdesine doğru ilerlemiştir. Mesnetlere yakın bölgelerdeki eğilme çatlak boylarının kiriş gövdesine doğru uzamasıyla kesmeli-eğilme çatlakları (flexure-shear cracks) oluşmuştur. Elemandaki donatı konfigürasyonuna bağlı olarak kesmeli-eğilme çatlakları, eğilme çatlaklarının

oluşumundan hemen sonra ya da eğilme çatlakları ile eşzamanlı olarak oluşmuştur. Kesmeli-eğilme çatlaklarının ilerlemesi ve çatlak genişliklerinin artışı ile birlikte eleman güç tükenmesine ulaşmıştır.

Tez çalışmasının son aşamasında ise, gerçekleştirmiş olan deneysel ve nümerik çalışmalar ile literatürde verilen çalışma sonuçları birlikte kullanılarak, eğik olarak çatlama yüksek kirişlerin çatlak genişliğinden, eleman artık yük taşıma kapasitesinin hesaplanabileceği, literatürde bulunan tabloya da alternatif olarak yeni, etkin ve basit bir formül önerilmiştir. Önerilen formülün oluşturulmasında gen ifadedi programlama (GEP) optimizasyon tekniği kullanılmıştır. Analiz verisinin oluşturulması amacıyla öncelikle, betonarme yüksek kirişlerin eğik kesme çatlak davranışına etkisi olabilecek parametreler, gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışma ve literatürde mevcut çalışmaların sonuçları bir bütün olarak değerlendirilerek belirlenmiştir. Belirlenen parametreler dikkate alınarak, literatürde gerçekleştirilmiş çalışmalar ile bu tez kapsamında yapılan deneysel ve parametrik çalışma sonuçları birlikte kullanılarak analiz verisi (1200 adet) oluşturulmuştur. GEP analizlerinde GeneXproTools (5.0) ticari yazılımı kullanılmıştır. Toplam veri, eğitim (960 adet) ve doğrulama (240 adet) verisi olarak rastgele ayrılmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen bulgular aşağıda belirtilmiştir;

- Betonarme yüksek kirişlerin eğik kesme çatlak davranışına etkisi olduğu tespit edilen parametreler şunlardır; kesme donatısı oranı (ρ_w), beton basınç dayanımı (f_{ck}), a/d oranı, kesit alanı ($b_w d$) ve çekme donatısı oranı (ρ_l).
- Gerçekleştirilmiş olan çalışma neticesinde, betonarme yüksek kirişlerin yük taşıma kapasitesinin hesaplanabileceği, literatürde önerilen tablonun eksikliklerini giderebilecek oldukça basit, anlaşılır ve kullanımı kolay bir formül önerilmiştir.
- Önerilen formül ile elde edilen sonuçlar, R^2 ve “en iyi uygunluk” değeri açısından değerlendirilmiş ve saçılım diyagramları çizilmiştir. R^2 değeri eğitim ve doğrulama verisi için sırasıyla 0,91 ve 0,90 ve “en iyi uygunluk” değeri ise

sırasıyla 902 ve 900 olarak elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, önerilen formülün performansının başarılı olduğu ve oldukça etkin ve geçekçi sonuçlar verdiği görülmüştür.

8.1. Gelecekteki Çalışmalar İçin Öneriler

Literatürde gerçekleştirilmiş çalışmalar ile bu tez çalışması kapsamında yapılan deneysel ve parametrik çalışma sonuçları dikkate alınarak, gelecekte yapılabilecek çalışmalar için yapılan öneriler aşağıda belirtilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında, betonarme yüksek kirişlerin kesme etkisi altındaki eğik çatlak davranışı, tek açıklıklı, basit mesnetli, 3 nokta yükleme deney düzeneğinde ve yükün monotonik olarak uygulandığı elemanlarda incelenmiştir. Gelecek çalışmalarda eğik çatlak davranışı, sürekli açıklıklı betonarme yüksek kirişler üzerinde incelenebilir. Numunelere yükleme monotonik ya da çevrimsel olarak uygulanabilir. Numuneler deney düzeneğinde sabit veya ankastre mesnet koşullarında test edilebilir. Ayrıca üzerinde boşluk bulunan betonarme yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışı incelenebilir.

Bu tez çalışması kapsamında; betonarme yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışı, sadece normal dayanımlı elemanlar üzerinde incelenmiştir. Gelecekteki çalışmalarda yüksek dayanımlı ($f_{ck} > 50$ MPa) yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışı incelenebilir. Bununla birlikte çalışmada, sadece kesme etkisinden oluşan eğik çatlak hasarı dikkate alınmıştır. Bu sebeple, gelecekteki çalışmalarda betonarme yüksek kirişlerde oluşabilecek diğer hasar türlerinin davranışı da incelenebilir.

Bununla birlikte bu tez çalışması kapsamında, SE modeli üzerinden çatlak genişliklerinin ölçülebilmesi için önerilen ve betonarme yüksek kirişlerin nümerik modellerinde oldukça başarılı sonuçlar veren yeni bağıntı, farklı betonarme elemanlar (klasik kiriş, kolon, perde vb.) üzerinde de denenebilir.

Betonarme elemanların kesme dayanımlarının arttırılması için literatürde önerilen yöntemler (çapraz kesme donatıları, çelik lif uygulamaları vb.), betonarme yüksek kirişlere de uygulanarak, elemanın eğik çatlak davranışına olan katkıları araştırılabilir.

Ayrıca boşluksuz veya boşluklu betonarme yüksek kirişlerin, çarpma (impact) etkisi altındaki çatlak davranışı deneysel ve nümerik olarak incebebilir.



KAYNAKLAR

- AASHTO LRFD. 2008. Bridge Design Specifications. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ABAQUS 2018 Research Edition. Abaqus Unified FEA. Dassault Systèmes SE: 10 rue Marcel Dassault CS 40501 78946 Vélizy-Villacoublay Cedex, France.
- ACI 318. 1984. Building Code Requirements for Reinforced Concrete. Detroit: American Concrete Institute.
- ACI 318-14. 2014. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Michigan: American Concrete Institute.
- Ashour, A. F., Alvarez, L. F., Toropov, V. V. 2003. Empirical modelling of shear strength of RC deep beams by genetic programming. *Computers and Structures*, 81(5):331-338.
- Birrcher, D., Tuchscherer, R., Huizinga, M., Bayrak, O., Wood, S., Jirsa, J. 2009. Strength and Serviceability Design of Reinforced Concrete Deep Beams. Austin: Center for Transportation Research The University of Texas.
- Birrcher, D. B., Tuchscherer, R. G., Huizinga, M., Bayrak, O. 2013. Minimum web reinforcement in deep beams. *ACI Structural Journal*, 110(2):297-306.
- Birrcher, D. B., Tuchscherer, R. G., Huizinga, M., Bayrak, O. 2014. Depth effect in deep beams. *ACI Structural Journal*, 111(4):731-740.
- Birtel, V., Mark, P. 2006. Parameterised finite element modelling of RC beam shear failure. *ABAQUS User's Conference*, 95-108.
- BS:8110. 1989. British Standard, Structural Use of Concrete - Part 2. London: British Standards Institutions.
- Caglar, N., Demir, A., Ozturk, H., Akkaya, A. 2015. A simple formulation for effective flexural stiffness of circular reinforced concrete columns. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 38:79-87.
- Celep, Z. 2013. Betonarme Yapılar. İstanbul: Beta Yayınevi.
- Cerioni, R., Iori, I., Michelini, E., Bernardi, P. 2008. Multi-directional modeling of crack pattern in 2D R/C members. *Engineering Fracture Mechanics*, 75(3-4):615-628.
- Cevik, A., Arslan, M. H., Koroglu, M. A. 2010. Genetic-programming-based modeling of RC beam torsional strength. *KSCE J. Civ. Eng.*, 14(3):371-384.
- Chen, W. 1982. Plasticity in reinforced concrete. New York: McGraw-Hill Book Co..

- Chen, H. M., Kao, W. K., Tsai, H. C. 2012. Genetic programming for predicting aseismic abilities of school buildings. *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 25(6):1103-1113.
- Courant, R. 1943. Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibration. *Bull. Am. Math. Soc.*, 49:1-43.
- Demir, A., Caglar, N., Ozturk, H., Sumer, Y. 2016a. Nonlinear finite element study on the improvement of shear capacity in reinforced concrete T-Section beams by an alternative diagonal shear reinforcement. *Engineering Structures*, 120:158-165.
- Demir, A., Ozturk, H., Dok, G. 2016b. 3D Numerical Modeling of RC Deep Beam Behavior by Nonlinear Finite Element Analysis. *Disaster Sci. Eng.*, 2(1):13-18.
- Demir, A., Ozturk, H., Bogdanovic, A., Stojmanovska, M., Edip, K. 2017. Sensitivity of Dilation Angle in Numerical Simulation of Reinforced Concrete Deep Beams. *Scientific Journal of Civil Engineering*, 6(1):33-37.
- Doğangün, A. 2012. *Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- EERI, Earthquake Engineering Research Institute. Shear failure of deep beam in bus terminal. <https://www.eeri.org/1983/03/popayan/04-10/>, Erişim Tarihi: 23 Mart 2018.
- El-Sayed, A. K., Shuraim, A. B. 2015. Size effect on shear resistance of high strength concrete deep beams. *Materials and Structures*, 1871-1882.
- Enem, J. I., Ezech, J. C., Mbagiorgu, M. S., Onwuka, D. O. 2012. Analysis of Deep Beam Using Finite Element Method. *Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research*, 1(2):348-356.
- Ersoy, U., Özcebe, G., Tankut, T. 2012. *Reinforced Concrete*. İstanbul: Metu Press.
- Fafitis, A., Won, Y. H. 1994. Nonlinear finite element analysis of concrete deep beams. *Journal of Structural Engineering*, 120(4):1202-1220.
- Ferreira, C. 2006. *Gene Expression Programming Mathematical Modeling by an Artificial Intelligence*. New York: Springer.
- FIB MC2010, 2013. *CEB-FIB Model Code for Concrete Structures 2010*. Lausanne: International Federation for Structural Concrete.
- Gandomi, A. H., Yun, G. J., Alavi, A. H. 2013. An evolutionary approach for modeling of shear strength of RC deep beams. *Materials and Structures*, 46:2109-2119.
- GeneXproTools, v.5.0. *Gene Expression Programming Tools*. Gepsoft Limited: 65 Bristol Road, Keynsham Bristol BS31 2WB, United Kingdom.
- GeneXproTools Tutorials. *Gene Expression Programming Tools*. <https://www.gepsoft.com/tutorials.htm>, Erişim Tarihi: 01 Nisan 2018.
- Gong, H., Su, Mi. 2013. Introduction of the Application of Strut-And-Tie Model in Concrete Deep Beams. *Advanced Materials Research*, 671-674:704-708.
- Gopalaratnam, V., Shah, S. 1985. Softening response of plain concrete in direct tension. *ACI Journal*, 82(3):310-23.

- Gopinath, S., Rajasankar, J., Rajasankar, N. R., Krishnamoorthy, T. S. 2009. A Strain-Based Constitutive Model for Concrete under Tension in Nonlinear Finite Element Analysis of RC Flexural Members. *Structural Durability & Health Monitoring*, 5(4):311-335.
- Grassl, P. 2004. Modelling of dilation of concrete and its effect in triaxial compression. *Finite Elem. Anal. Des.*, 40:1021-1033.
- Gupta, A. K., Akbar H. 1984. Cracking in RC analysis. *Jl. Struct. Eng., ASCE*, 110(8):1735-1746.
- Hassoun, M. N., Al-Manaseer, A. 2015. *Structural Concrete: Theory and Design*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc..
- Hibbitt H. D., Karlsson B. I., Sorensen E. P. 2013. *ABAQUS user's manual*. Providence (RI): Dassault Systemes Simulia Corp.
- Hillerborg, A. 1989. The compression stress-strain curve for design of reinforced concrete beams. *Fracture mechanics: application to concrete*, ACI-SP-118. American Concrete Institute, 281-294.
- Hillerborg, A., Modeer, M., Peterson, P. E. 1976. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cem Concr Res*, 6:773-82
- Hognestad, E. 1951. A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members. *Sta. Bull. No. 399*. University of Illinois Engineering Exp.
- Hordijk, D. A. 1992. Tensile and tensile fatigue behaviour of concrete - experiments, modelling and analyses. *Heron*, 37(1):3-79.
- Islam, S. M. S., Khennane, A. 2012. Experimental Verification of Automated Design of Reinforced Concrete Deep Beams. *SIMULIA Customer Conference*.
- İşçi, Ö., Korukoğlu, S. 2003. Genetik Algoritma Yaklaşımı ve Yöneylem Araştırmasında Bir Uygulama. *Yönetim ve Ekon.*, 10(2).
- Kamali, A. Z. 2012. *Shear Strength of Reinforced Concrete Beams subjected to Blast Loading*. Royal Institute of Technology (KTH), Department of Civil and Architectural Engineering, Division of Structural Engineering and Bridges. PhD Thesis.
- Kaplan, H., Şenel Ş. M. 2002. Değişik donatı taşıyan denge altı betonarme kirişlerin eğilme davranışının tersinir yükleme altında incelenmesi. *Türkiye Bilimse ve Teknik Araştırma Kurumu, İnşaat Teknolojileri Araştırma Grubu, Proje No: INTAG-564*.
- Karayannis, C. G. 2000. Smearred crack analysis for plain concrete in torsion. *J. Struct Eng ASCE*, 126:638-45.
- Kaya, M. 2001. Betonarme yüksek kiriş tasarımında genetik algoritmaların kullanılması. *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Khennane, A. 2013. *Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB and Abaqus*. Florida: CRC Press.

- Klink, S. A. 1985, Actual Poisson Ratio of Concrete. *ACI Journal*, 82-74:813-817.
- Kong, F., Robins, P., Cole, D. 1970. Web Reinforcement Effects on Deep Beams. *ACI Journal*, (67):1010-1018.
- Koza, J. R., 1992. *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. Cambridge (MA): MIT Press.
- Krätzig, W. B., Pölling, R. 2004. An elasto-plastic damage model for reinforced concrete with minimum number of material parameters. *Computer and Structures*, 82:1201-1215.
- Lee J., Fenves, L. 1998. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(8):892-900.
- López-Almansa, F., Alfarah, B., Oller, S. 2014. Numerical simulation of RC frame testing with damaged plasticity model. Comparison with simplified models. *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul*, 1-12.
- LS-DYNA Support. What are the differences between implicit and explicit? <http://www.dynasupport.com/faq/general/what-are-the-differences-between-implicit-and-explicit>, Erişim Tarihi: 27 Mart 2018.
- Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., Onate, E. 1989. A plastic-damage model for concrete. *Solids and Structures*, 25(3):299-326.
- Ma, H., Wang, H. H., Li, Z. B., Sun, X. Y., Zhang, X. W. 2012. The Finite Element Analysis of RC Energy Absorption Columns Based on ABAQUS Software. *Applied Mechanics and Materials*, 174-177.
- Marecki, T., Marzec, I., Bobiski, J., Tejchman, J. 2007. Effect of a characteristic length on crack spacing in a reinforced concrete bar under tension. *Mechanics Research Communications*, 34(5-6):460-465.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., Park, R. 1984. Seismic design of bridge piers. *Research Rep. No. 84-2*, Dept. of Civil Engineering. Univ. of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., Park, R. 1988. Theoretical stress- strain model for confined concrete. *J. Struct. Eng.*, 114(8):1804-1826.
- Mercan, B., Schultz, A. E., Stolarski, H. K. 2010. Finite element modeling of prestressed concrete spandrel beams. *Eng. Struct.*, 32(9):2804-2813.
- Metwally, I. M. 2015. Three-dimensional nonlinear finite element analysis of concrete deep beam reinforced with GFRP bars. *HBRC Journal*.
- Mihaylov, B. 2015. Five-spring model for complete shear behaviour of deep beams. *Structural Concrete*, (1):71-83.
- Mihaylov, B. I., Bentz, E. C., Collins, M. R. 2010. Behavior of large deep beams subjected to monotonic and reversed cyclic shear. *ACI Structural Journal*, 107(6):726-734.

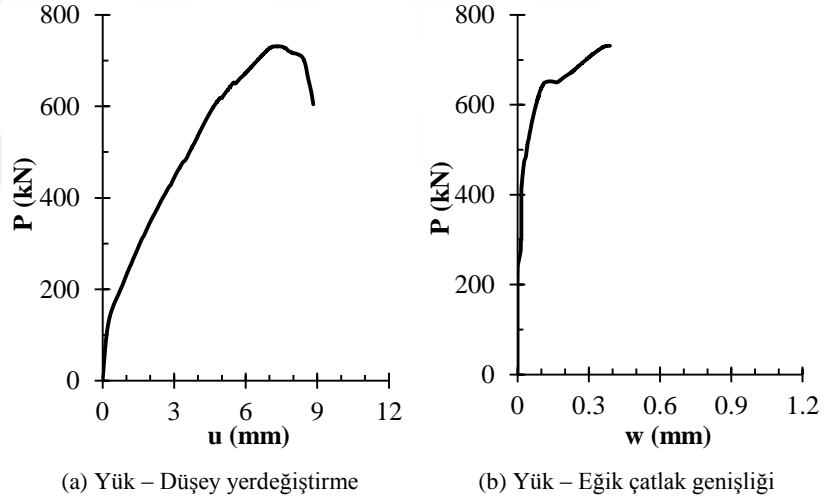
- Mohamed, A. R., Shoukry, M. S., Saeed, J. M. 2014. Prediction of the behavior of reinforced concrete deep beams with web openings using the finite element method. *Alexandria Engineering Journal*, 53:329-339.
- Myh, B. 1989. *Concrete and Concrete Structures: Numerical Modelling and Applications*. London: Middlesex Polytechnic Faculty of Engineering, Elsevier Applied Science.
- Nawy, E. G. 2009. *Reinforced Concrete: A Fundamental Approach*. New Jersey: Pearson Education Inc..
- Ngo, D., Scordelis, A. 1967. Finite element analysis of reinforced concrete beams. *ACI Journal*, 3:64.
- Nilson, A. 1968. Nonlinear analysis of reinforced concrete by the finite element method. *ACI Journal*, 9:65.
- Öztürk, H. 2016. Betonarme kısa kirişlerde kesme dayanımının çapraz kesme donatıları ile iyileştirilmesi. *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi*.
- Peterson, P. E. 1981. Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials, Report TVBM-1006. Lund: Lund Institute of Technology, Division of Building Materials.
- Pipa, J. A. L. 1993. Ductility of Reinforced Concrete Elements Subjected to Cyclical Actions, Influence of the Mechanical Characteristics of the Rebar. *Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, PhD Thesis*.
- Ramadan, S. 1987. Finite element analysis of reinforced concrete members. Ankara: Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Ren, W., Sneed, L. H., Yang, Y., He, R. 2015. Numerical Simulation of Prestressed Precast Concrete Bridge Deck Panels Using Damage Plasticity Model. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 9(1):45-54.
- Riveros, G. A. 2005. Post-cracking behavior of reinforced concrete deep beams: a numerical fracture investigation of concrete strength and beam size. University of Missouri, Phd Thesis.
- Riveros, G. A., Gopalratnam, V. 2013. Fracture Response of Reinforced Concrete Deep Beams Finite Element Investigation of Strength and Beam Size. *Applied Mathematics*, 4:1568-1582.
- Smith, K., Vantsiotis, A. 1982. Shear Strength of Deep Beams. *ACI Journal*, (79):201-213.
- Suter, G., Manuel, R. 1971. Diagonal Crack Width Control in Short Beams. *ACI Journal*, 68-41:451-455.
- Sümer, Y. 2010. FRP elemanlarla güçlendirilmiş hasarlı betonarme kirişlerin doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemiyle analizi. *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi*.
- Szczecina, M., Winnicki, A. 2016. Selected aspects of computer modeling of reinforced concrete structures. *Arch. Civ. Eng.*, LXII(1):51-64.

- Theiner, Y., Hofstetter, Y. G. 2009. Numerical prediction of crack propagation and crack widths in concrete structures. *Engineering Structures*, 31(8):1832-1840.
- TS500, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- TS708, 2010. Çelik – Betonarme için – Donatı çeliği. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- Tuchscherer, R., Birrcher, D., Huizinga, M., Bayrak, O. 2010. Confinement of Deep Beam Nodal Regions. *ACI Structural Journal*, 107(6):709-717.
- Tuchscherer, R., Birrcher, D., Huizinga, M., Bayrak, O. 2011. Distribution of stirrups across web of deep beams. *ACI Structural Journal*, 108(6):779-781.
- Tuchscherer, R. G., Quesada, A., 2015. Replacement of Deformed Side-Face Steel Reinforcement in Deep Beams With Steel Fibers. *Structures*, 3:130-136.
- Wight, J. K. 2016. Reinforced Concrete Mechanics and Design. New Jersey: Pearson Education Inc..
- Van Mier, J. G. M. 1984. Strain-softening of concrete under multiaxial loading conditions. Techn. Univ. Eindhoven, PhD Thesis.
- Van Mier, J. G. M. 1986. Multiaxial strain-softening of concrete. *Mater & Struct (RILEM)*, 19(111):179-200.
- Vecchio, F.J., Collins, M. P. 1986. The modified compression field theory for RC elements subjected to shear. *J. ACI*, 83(6):925-933.
- Vidal, T., Castel, A., François, R. 2004. Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1):165-174.
- Vonk, R. A. 1993. A micromechanical investigation of softening of concrete loaded in compression. *Heron* 38(3):3-94.
- Yılmaz, M. 2016. Farklı donatı düzenine sahip betonarme yüksek kirişlerin davranışlarının deneysel ve teorik olarak incelenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Young, B., Bracci, J., Keating, P., Hueste, M. 2002. Cracking in Reinforced Concrete Bent Caps. *ACI Structural Journal*, 99(4):488-498.
- Zhang, N., Tan, K. H. 2007. Size effect in RC deep beams: Experimental investigation and STM verification. *Engineering Structures*, 29:3241-3254.

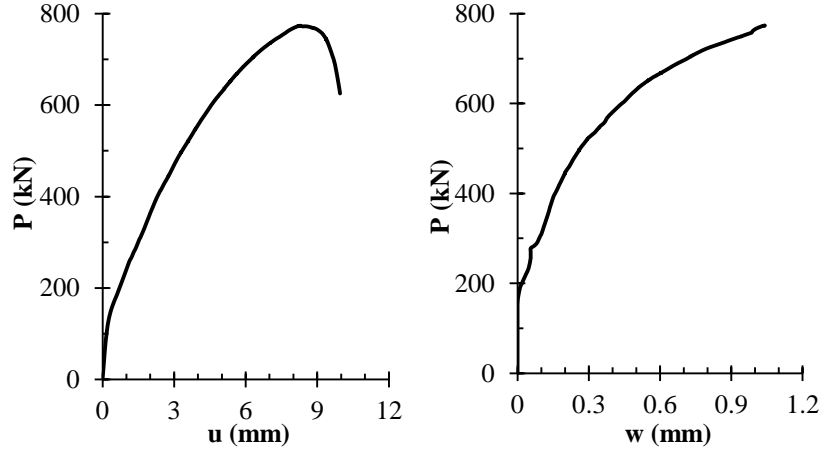
EKLER

EK 1: Parametrik Çalışma Sonuçları

Deneysel çalışma sonuçları kullanılarak doğrulanan ve sadece donatı konfigürasyonu değiştirilerek elde edilmiş nümerik modeller kullanılarak gerçekleştirilen parametrik çalışma sonucunda elde edilen “P – u” ve “P – w” davranış grafikleri aşağıda verilmiştir.



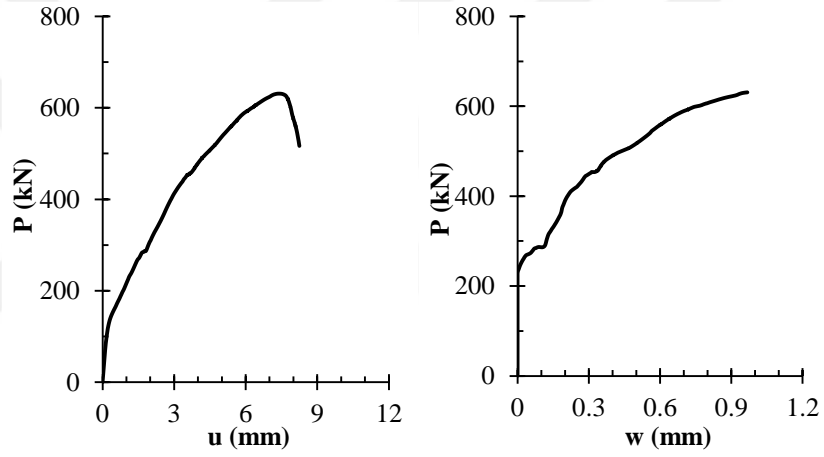
Şekil Ek 1.1. DB50/1.84-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

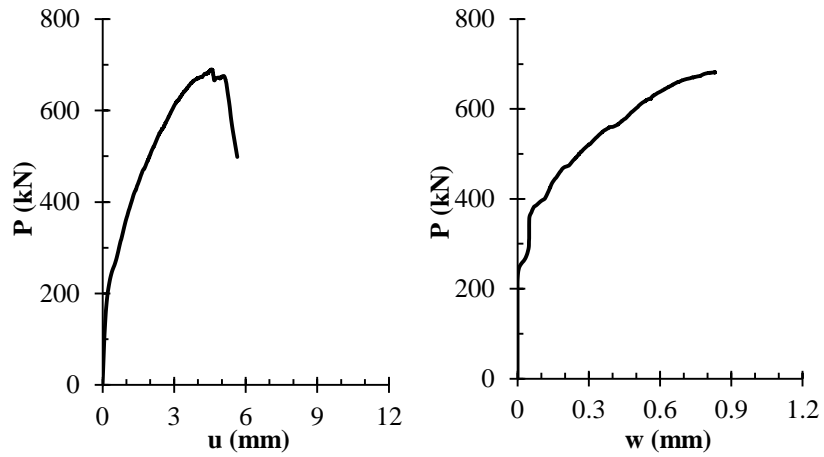
Şekil Ek 1.2. DB50/1.75-C1/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

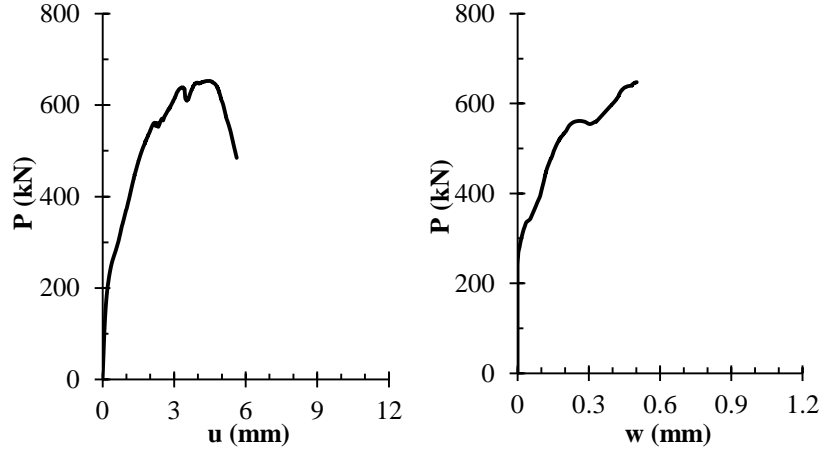
Şekil Ek 1.3. DB50/1.75-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

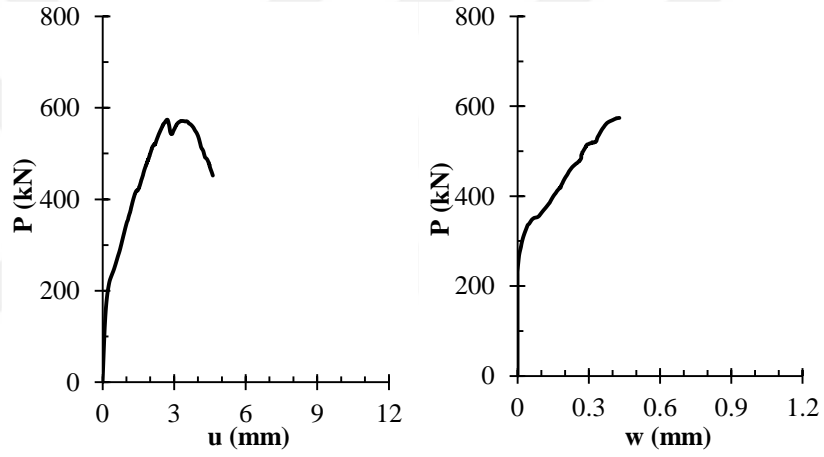
Şekil Ek 1.4. DB50/1.38-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

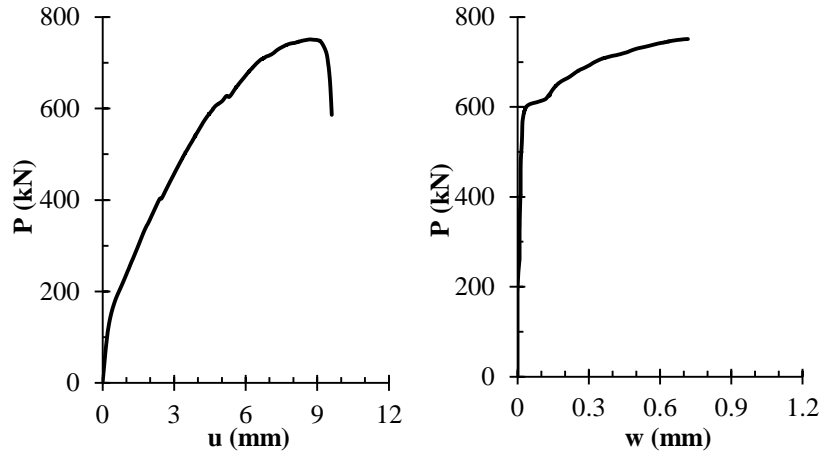
Şekil Ek 1.5. DB50/1.32-C1/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

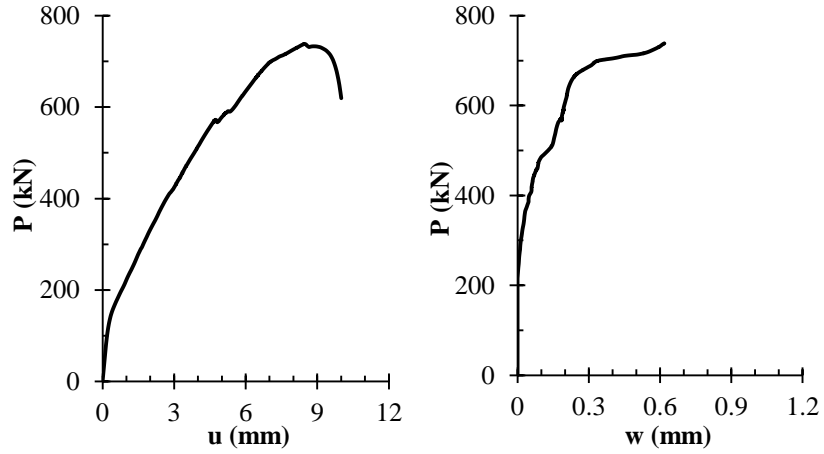
Şekil Ek 1.6. DB50/1.32-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

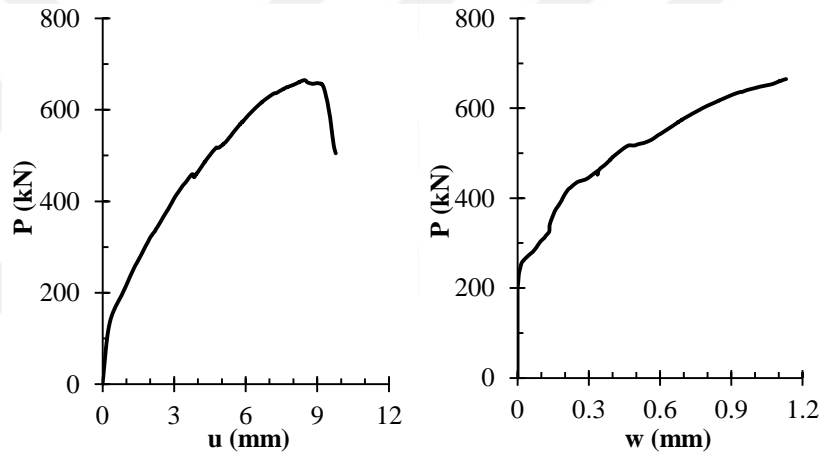
Şekil Ek 1.7. DB60/1.87-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük - Eğik atlak genişliği

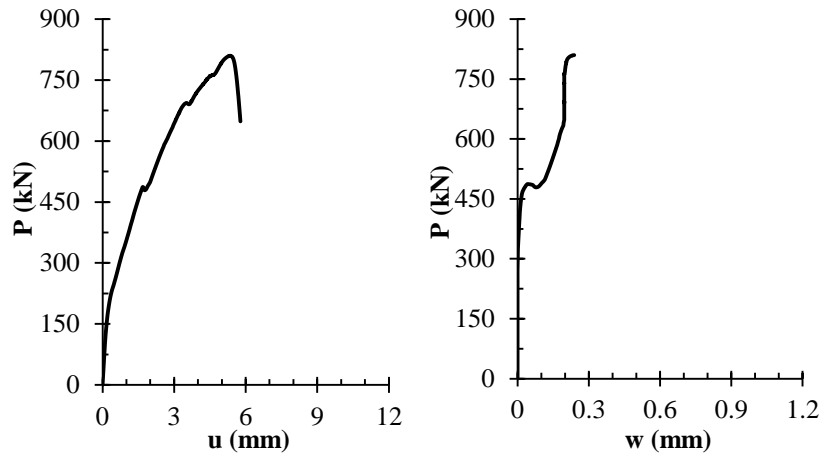
şekil Ek 1.8. DB60/1.80-C1/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yk - Dşey yerdeğiştirme

(b) Yk - Eğik atlak genişliği

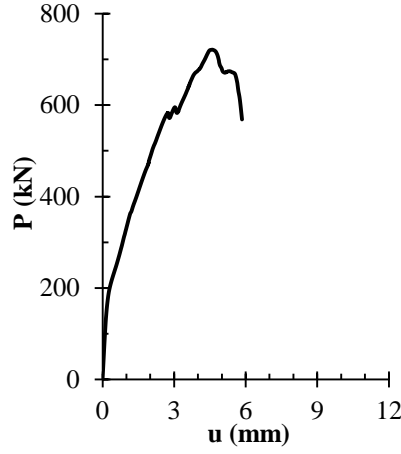
şekil Ek 1.9. DB60/1.80-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



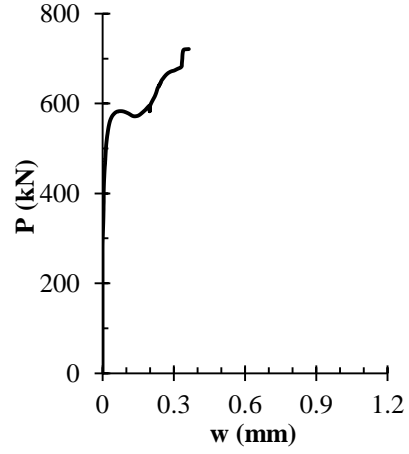
(a) Yk - Dşey yerdeğiştirme

(b) Yk - Eğik atlak genişliği

şekil Ek 1.10. DB60/1.50-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

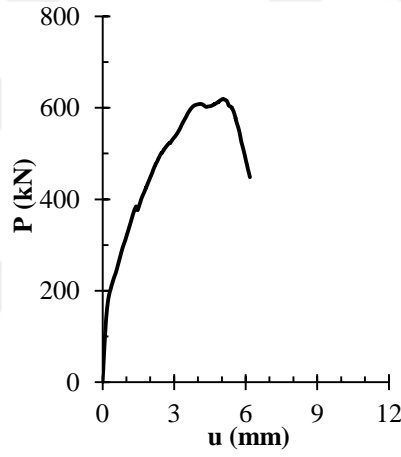


(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

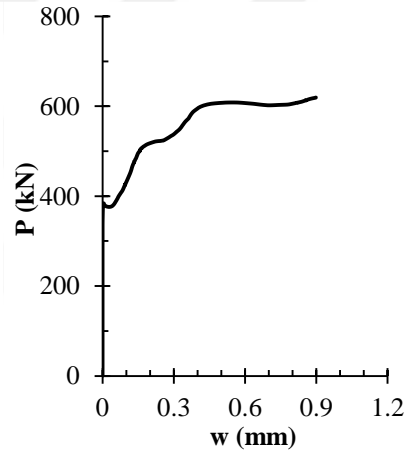


(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

Şekil Ek 1.11. DB60/1.44-C1/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

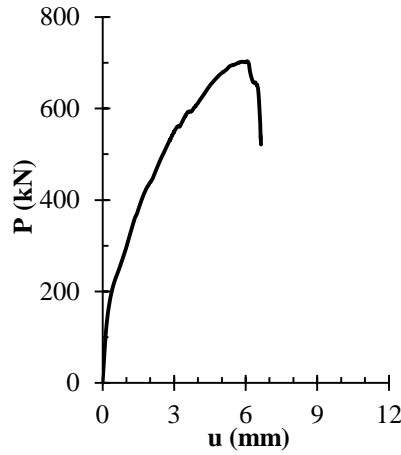


(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

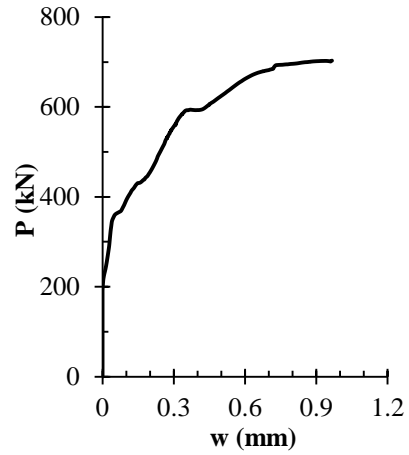


(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

Şekil Ek 1.12. DB60/1.44-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

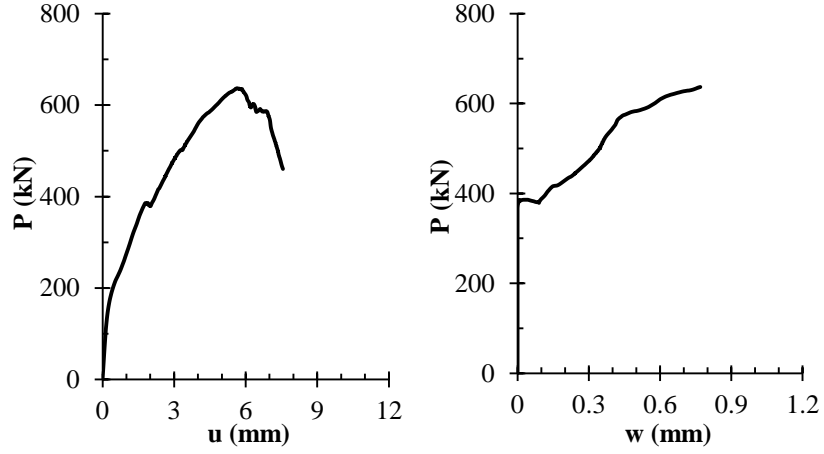


(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme



(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

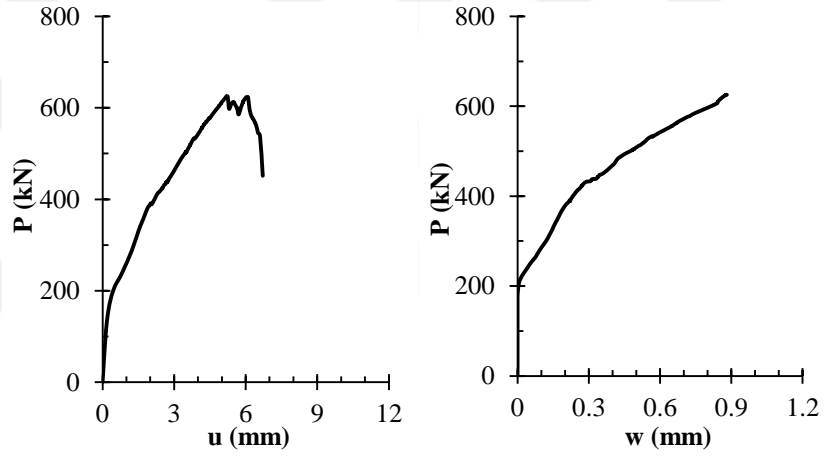
Şekil Ek 1.13. DB55/1.65-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

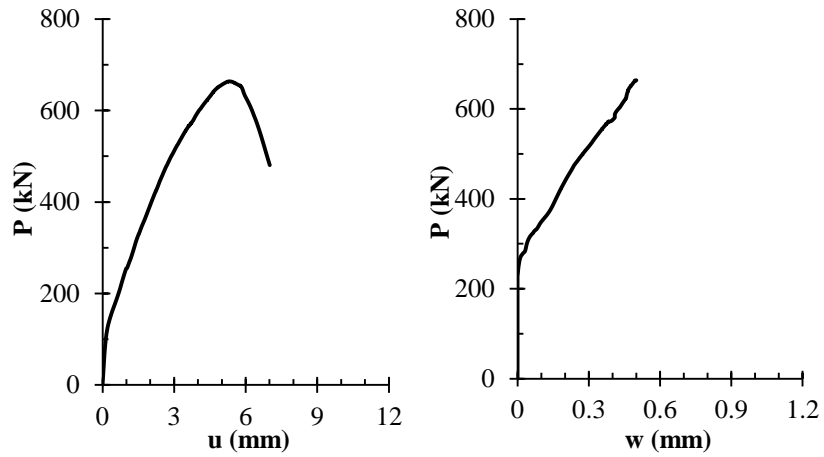
Şekil Ek 1.14. DB55/1.58-C1/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

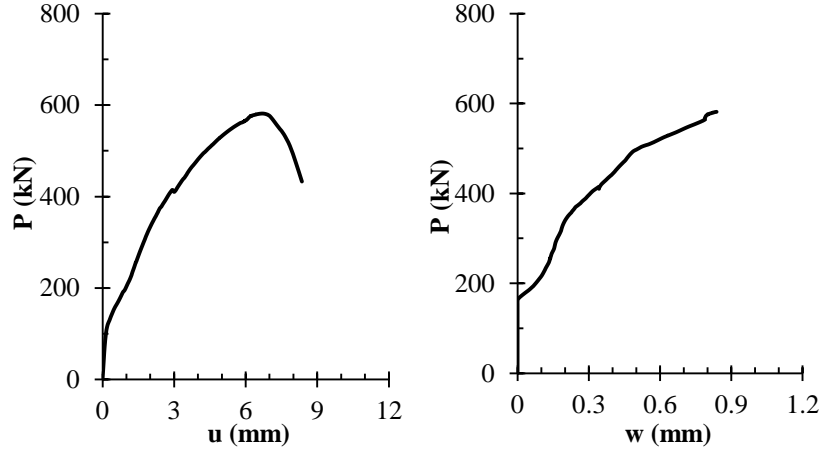
Şekil Ek 1.15. DB55/1.58-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

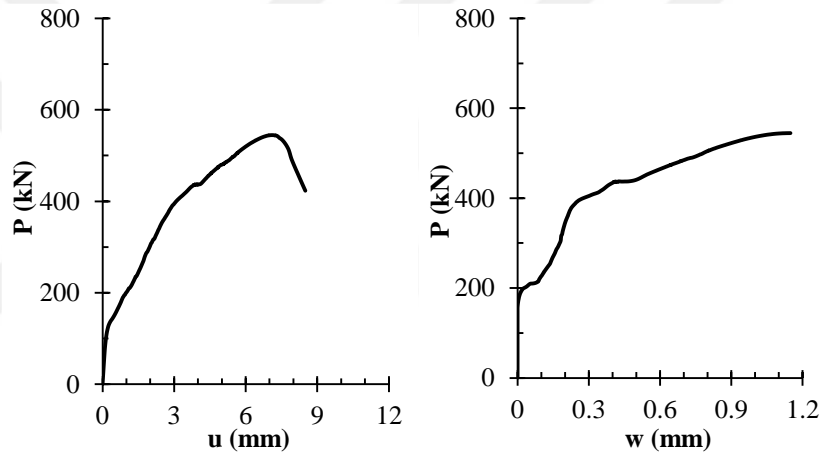
Şekil Ek 1.16. DB40/1.80-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

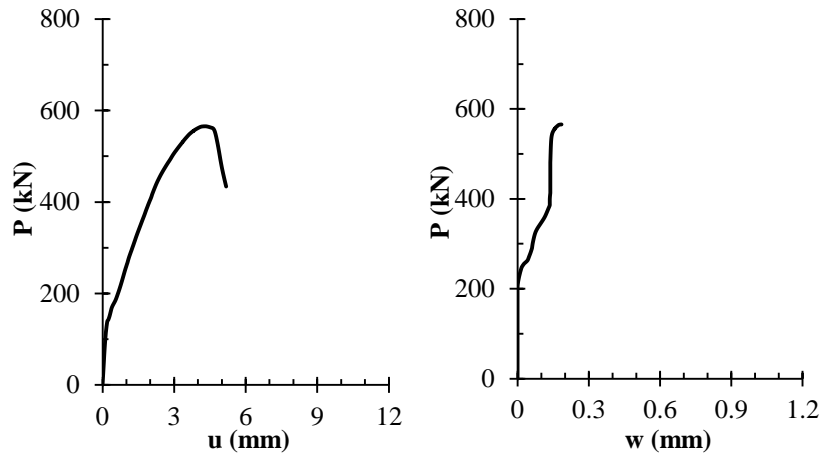
Şekil Ek 1.17. DB40/1.68-C1/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

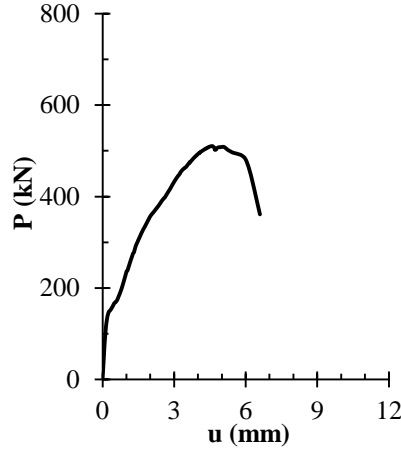
Şekil Ek 1.18. DB40/1.68-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



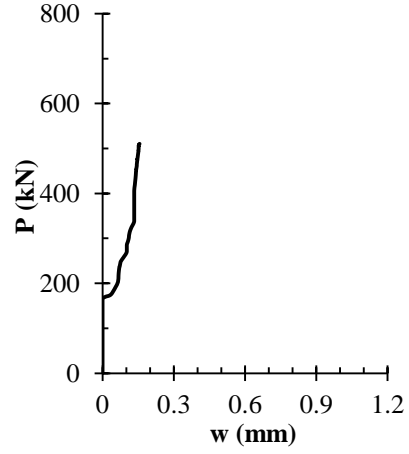
(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

Şekil Ek 1.19. DB40/1.80-C2/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

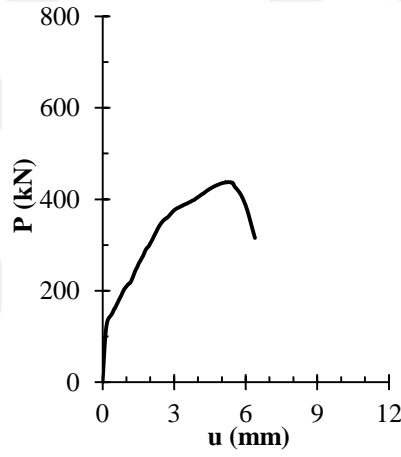


(a) Yk – Dşey yerdeğiştirme

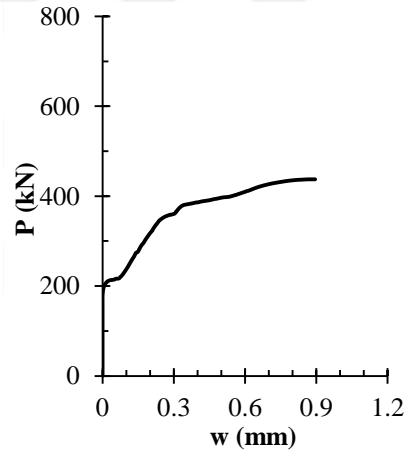


(b) Yk – Eğik atlak genişliği

Şekil Ek 1.20. DB40/1.68-C2/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

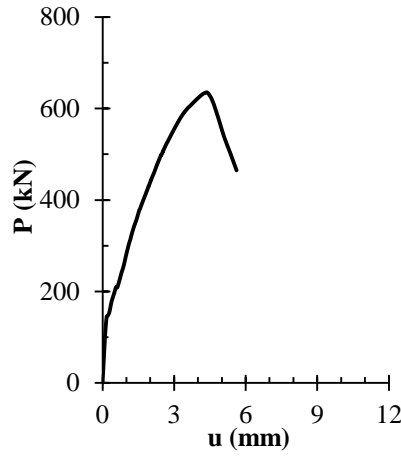


(a) Yk – Dşey yerdeğiştirme

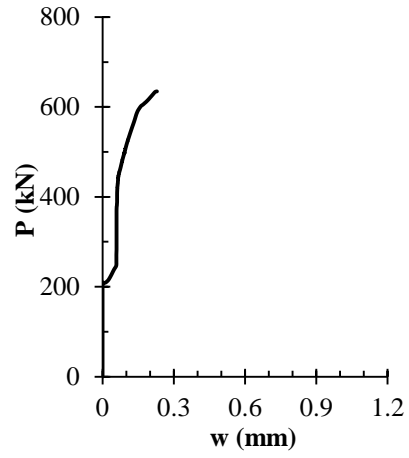


(b) Yk – Eğik atlak genişliği

Şekil Ek 1.21. DB40/1.68-C2/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

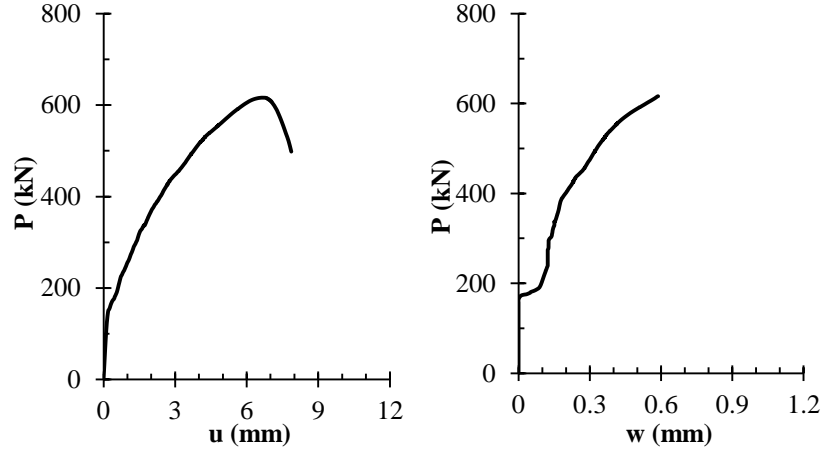


(a) Yk – Dşey yerdeğiştirme



(b) Yk – Eğik atlak genişliği

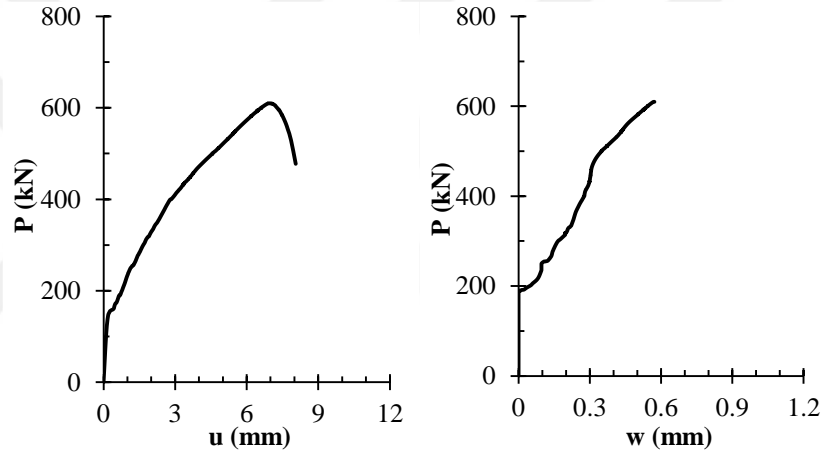
Şekil Ek 1.22. DB40/1.80-C3/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük – Eğik atlak genişliği

şekil Ek 1.23. DB40/1.68-C3/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük – Eğik atlak genişliği

şekil Ek 1.24. DB40/1.68-C3/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

EK 2: GEP Analiz Verisi

GEP analizlerinde 960 adet eğitim datası kullanılmış olup, bu veriler Tablo Ek 2.1.'de verilmiştir. Ayrıca doğrulama verisi olarak ise 240 adet veri kullanılmış olup, Tablo Ek 2.2.'de verilmiştir. Tablolarda "Numune" sütununda verinin, literatürden veya bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel ve parametrik çalışmadan alındığı belirtilmiştir.

Tablo Ek 2.1. Analizlerde kullanılan eğitim (training) datası.

| # | A_c (mm ²) | ρ_l | a/d | ρ_w | f_{ck} (MPa) | w (mm) | P (N) | Numune |
|----|--------------------------|----------|------|----------|----------------|--------|---------|---------------------------------|
| 1 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0 | 34.2 | 0.15 | 558824 | SOM (Mihaylov ve ark., 2010) |
| 2 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0 | 34.2 | 0.15 | 623529 | |
| 3 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0 | 34.2 | 0.15 | 700000 | |
| 4 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0 | 34.2 | 0.19 | 752941 | |
| 5 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0 | 34.2 | 0.23 | 815686 | |
| 6 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0 | 34.2 | 0.27 | 858824 | |
| 7 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0 | 34.2 | 0.39 | 921569 | |
| 8 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0 | 34.2 | 0.50 | 947059 | |
| 9 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0 | 34.2 | 0.60 | 966667 | |
| 10 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0 | 34.2 | 0.69 | 988235 | |
| 11 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0 | 34.2 | 0.92 | 1039216 | |
| 12 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0 | 34.2 | 1.01 | 1058824 | |
| 13 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0 | 34.2 | 1.13 | 1082353 | |
| 14 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0 | 34.2 | 1.22 | 1103922 | |
| 15 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0 | 34.2 | 1.37 | 1125490 | |
| 16 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0 | 34.2 | 1.49 | 1145098 | |
| 17 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0 | 34.2 | 1.57 | 1158824 | |
| 18 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0 | 34.2 | 1.69 | 1176471 | |
| 19 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0 | 34.2 | 1.92 | 1209804 | |
| 20 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0 | 34.2 | 2.04 | 1229412 | |
| 21 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0 | 34.2 | 2.12 | 1243137 | |
| 22 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0 | 34.2 | 2.25 | 1262745 | |
| 23 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0 | 34.2 | 2.41 | 1290196 | |
| 24 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0 | 34.2 | 2.49 | 1301961 | |
| 25 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0.001 | 33.0 | 0.16 | 560784 | SIM (Mihaylov ve ark., 2010) |
| 26 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0.001 | 33.0 | 0.18 | 596078 | |
| 27 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0.001 | 33.0 | 0.22 | 668627 | |
| 28 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0.001 | 33.0 | 0.25 | 698039 | |
| 29 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0.001 | 33.0 | 0.26 | 737255 | |
| 30 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0.001 | 33.0 | 0.27 | 784314 | |
| 31 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0.001 | 33.0 | 0.30 | 866667 | |
| 32 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0.001 | 33.0 | 0.30 | 890196 | |
| 33 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0.001 | 33.0 | 0.30 | 917647 | |
| 34 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0.001 | 33.0 | 0.32 | 941176 | |
| 35 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0.001 | 33.0 | 0.35 | 1003922 | |
| 36 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0.001 | 33.0 | 0.37 | 1050980 | |
| 37 | 480000 | 0.0070 | 1.55 | 0.001 | 33.0 | 0.40 | 1101961 | |

Tablo Ek 2.1. (Devamı)

| # | A _c (mm ²) | ρ _l | a/d | ρ _w | f _{ck} (MPa) | w (mm) | P (N) | Numune |
|----|-----------------------------------|----------------|------|----------------|-----------------------|--------|---------|--|
| 38 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0,001 | 33,0 | 0,46 | 1129412 | S1M (Mihaylov ve ark., 2010) |
| 39 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0,001 | 33,0 | 0,61 | 1196078 | |
| 40 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0,001 | 33,0 | 0,68 | 1227451 | |
| 41 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0,001 | 33,0 | 0,76 | 1262745 | |
| 42 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0,001 | 33,0 | 0,82 | 1294118 | |
| 43 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0,001 | 33,0 | 0,96 | 1368627 | |
| 44 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0,001 | 33,0 | 1,04 | 1415686 | |
| 45 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0,001 | 33,0 | 1,11 | 1450980 | |
| 46 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0,001 | 33,0 | 1,20 | 1507843 | |
| 47 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0,001 | 33,0 | 1,35 | 1533333 | |
| 48 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0,001 | 33,0 | 1,45 | 1552941 | |
| 49 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0,001 | 33,0 | 1,56 | 1570588 | |
| 50 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0,001 | 33,0 | 1,69 | 1594118 | |
| 51 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0,001 | 33,0 | 2,00 | 1649020 | |
| 52 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0,001 | 33,0 | 2,14 | 1672549 | |
| 53 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0,001 | 33,0 | 2,28 | 1700000 | |
| 54 | 52500 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,10 | 374859 | B350-1-55 (El-Sayed ve Shuraim, 2015) |
| 55 | 52500 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,12 | 415082 | |
| 56 | 52500 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,14 | 440952 | |
| 57 | 52500 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,16 | 463950 | |
| 58 | 52500 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,17 | 481206 | |
| 59 | 52500 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,23 | 538716 | |
| 60 | 52500 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,26 | 564602 | |
| 61 | 52500 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,30 | 590495 | |
| 62 | 52500 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,33 | 616389 | |
| 63 | 52500 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,43 | 682568 | |
| 64 | 52500 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,49 | 711368 | |
| 65 | 52500 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,54 | 721488 | |
| 66 | 52500 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,57 | 725850 | |
| 67 | 52500 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,73 | 749040 | |
| 68 | 52500 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,79 | 756305 | |
| 69 | 52500 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,84 | 763554 | |
| 70 | 75000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,15 | 351382 | B500-1-55 (El-Sayed ve Shuraim, 2015) |
| 71 | 75000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,23 | 431610 | |
| 72 | 75000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,25 | 462457 | |
| 73 | 75000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,28 | 499480 | |
| 74 | 75000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,31 | 532391 | |
| 75 | 75000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,42 | 627051 | |
| 76 | 75000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,47 | 664108 | |
| 77 | 75000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,51 | 701159 | |
| 78 | 75000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,56 | 734098 | |
| 79 | 75000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,66 | 816423 | |
| 80 | 75000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,70 | 834996 | |
| 81 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,24 | 522050 | B700-1-55 (El-Sayed ve Shuraim, 2015) |
| 82 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,28 | 558319 | |
| 83 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,36 | 612808 | |
| 84 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,41 | 643115 | |
| 85 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,48 | 679483 | |
| 86 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,54 | 715834 | |
| 87 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,70 | 806707 | |
| 88 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,76 | 846063 | |
| 89 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,81 | 870335 | |
| 90 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,87 | 891585 | |
| 91 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,96 | 940072 | |
| 92 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 1,00 | 958285 | |
| 93 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 1,05 | 982557 | |
| 94 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 1,14 | 1018982 | |

Tablo Ek 2.1. (Devamı)

| # | A_c (mm ²) | ρ_l | a/d | ρ_w | f_{ck} (MPa) | w (mm) | P (N) | Numune |
|-----|--------------------------|----------|------|----------|----------------|--------|---------|---|
| 95 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 1,33 | 1085854 | B700-1-55 (El-Sayed ve Shuraim, 2015) |
| 96 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 1,40 | 1104132 | |
| 97 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 1,47 | 1122426 | |
| 98 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 1,57 | 1146846 | |
| 99 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 1,71 | 1168368 | |
| 100 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 1,78 | 1174608 | |
| 101 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 1,85 | 1177819 | |
| 102 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 1,93 | 1184076 | |
| 103 | 150000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,24 | 594092 | B1000-1-55 (El-Sayed ve Shuraim, 2015) |
| 104 | 150000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,26 | 620967 | |
| 105 | 150000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,32 | 643530 | |
| 106 | 150000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,40 | 675059 | |
| 107 | 150000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,55 | 747083 | |
| 108 | 150000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,64 | 792086 | |
| 109 | 150000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,73 | 845983 | |
| 110 | 150000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,80 | 890913 | |
| 111 | 150000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 1,02 | 1025667 | |
| 112 | 150000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 1,12 | 1084072 | |
| 113 | 150000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 1,20 | 1129002 | |
| 114 | 150000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 1,24 | 1138090 | |
| 115 | 150000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 1,44 | 1259382 | |
| 116 | 150000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 1,52 | 1299890 | |
| 117 | 150000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 1,63 | 1353884 | |
| 118 | 150000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 1,77 | 1416941 | |
| 119 | 138000 | 0,0160 | 1,50 | 0 | 29,4 | 0,38 | 470000 | 00_00 |
| 120 | 138000 | 0,0160 | 1,50 | 0,003 | 29,8 | 0,17 | 470000 | 00_02 |
| 121 | 138000 | 0,0160 | 1,50 | 0,004 | 29,8 | 0,20 | 470000 | 00_03 |
| 122 | 100000 | 0,0221 | 1,40 | 0 | 18,1 | 0,12 | 367879 | DB50/1.40-C1 (Deneysel çalışma) |
| 123 | 100000 | 0,0221 | 1,40 | 0 | 18,1 | 0,22 | 428485 | |
| 124 | 100000 | 0,0221 | 1,40 | 0 | 18,1 | 0,26 | 452727 | |
| 125 | 100000 | 0,0221 | 1,40 | 0 | 18,1 | 0,31 | 479394 | |
| 126 | 100000 | 0,0221 | 1,40 | 0 | 18,1 | 0,34 | 501212 | |
| 127 | 100000 | 0,0221 | 1,40 | 0 | 18,1 | 0,40 | 556970 | |
| 128 | 100000 | 0,0221 | 1,40 | 0 | 18,1 | 0,43 | 584242 | |
| 129 | 100000 | 0,0221 | 1,40 | 0 | 18,1 | 0,45 | 606667 | |
| 130 | 100000 | 0,0221 | 1,40 | 0 | 18,1 | 0,48 | 624848 | |
| 131 | 100000 | 0,0221 | 1,40 | 0 | 18,1 | 0,52 | 644242 | |
| 132 | 100000 | 0,0221 | 1,40 | 0 | 18,1 | 0,54 | 644848 | |
| 133 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0 | 18,1 | 0,13 | 334545 | |
| 134 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0 | 18,1 | 0,16 | 335758 | |
| 135 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0 | 18,1 | 0,26 | 354545 | |
| 136 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0 | 18,1 | 0,37 | 372727 | |
| 137 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0 | 18,1 | 0,44 | 393333 | |
| 138 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0 | 18,1 | 0,51 | 415152 | |
| 139 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0 | 18,1 | 0,64 | 446667 | |
| 140 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0 | 18,1 | 0,69 | 464848 | |
| 141 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0 | 18,1 | 0,74 | 478182 | |
| 142 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0 | 18,1 | 0,79 | 486667 | |
| 143 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0 | 18,1 | 0,90 | 498788 | |
| 144 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0 | 18,1 | 0,94 | 501818 | |
| 145 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0,0037 | 18,1 | 0,11 | 332727 | DB50/1.86-C1/SR (Deneysel çalışma) |
| 146 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0,0037 | 18,1 | 0,14 | 355758 | |
| 147 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0,0037 | 18,1 | 0,18 | 376970 | |
| 148 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0,0037 | 18,1 | 0,21 | 383636 | |
| 149 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0,0037 | 18,1 | 0,24 | 398182 | |
| 150 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0,0037 | 18,1 | 0,28 | 422424 | |
| 151 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0,0037 | 18,1 | 0,35 | 468485 | |
| 152 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0,0037 | 18,1 | 0,39 | 489091 | |
| 153 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0,0037 | 18,1 | 0,43 | 512121 | |
| 154 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0,0037 | 18,1 | 0,47 | 531515 | |

Tablo Ek 2.1. (Devamı)

| # | A_c (mm ²) | ρ_l | a/d | ρ_w | f_{ck} (MPa) | w (mm) | P (N) | Numune | |
|-----|--------------------------|----------|------|----------|----------------|--------|--------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 155 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0,0037 | 18,1 | 0,56 | 566667 | DB50/1.86-C1/SR (Deneysel çalışma) | |
| 156 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0,0037 | 18,1 | 0,62 | 583636 | | |
| 157 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0,0037 | 18,1 | 0,67 | 596364 | | |
| 158 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0,0037 | 18,1 | 0,73 | 611515 | | |
| 159 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0,0037 | 18,1 | 0,88 | 632727 | | |
| 160 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0,0037 | 18,1 | 0,95 | 636364 | | |
| 161 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0,0037 | 18,1 | 1,01 | 638788 | | |
| 162 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0,0037 | 18,1 | 1,08 | 640000 | | |
| 163 | 110000 | 0,0237 | 1,67 | 0 | 18,1 | 0,18 | 373196 | DB55/1.67-C1 (Deneysel çalışma) | |
| 164 | 110000 | 0,0237 | 1,67 | 0 | 18,1 | 0,24 | 387629 | | |
| 165 | 110000 | 0,0237 | 1,67 | 0 | 18,1 | 0,31 | 404124 | | |
| 166 | 110000 | 0,0237 | 1,67 | 0 | 18,1 | 0,36 | 422165 | | |
| 167 | 110000 | 0,0237 | 1,67 | 0 | 18,1 | 0,45 | 456701 | | |
| 168 | 110000 | 0,0237 | 1,67 | 0 | 18,1 | 0,49 | 474227 | | |
| 169 | 110000 | 0,0237 | 1,67 | 0 | 18,1 | 0,54 | 489691 | | |
| 170 | 110000 | 0,0237 | 1,67 | 0 | 18,1 | 0,60 | 504124 | | |
| 171 | 110000 | 0,0237 | 1,67 | 0 | 18,1 | 0,70 | 530412 | | |
| 172 | 110000 | 0,0237 | 1,67 | 0 | 18,1 | 0,75 | 542268 | | |
| 173 | 110000 | 0,0237 | 1,67 | 0 | 18,1 | 0,79 | 552577 | | |
| 174 | 110000 | 0,0237 | 1,67 | 0 | 18,1 | 0,83 | 559794 | | |
| 175 | 120000 | 0,0215 | 1,51 | 0 | 18,1 | 0,14 | 379330 | | DB60/1.51-C1 (Deneysel çalışma) |
| 176 | 120000 | 0,0215 | 1,51 | 0 | 18,1 | 0,19 | 400000 | | |
| 177 | 120000 | 0,0215 | 1,51 | 0 | 18,1 | 0,25 | 422346 | | |
| 178 | 120000 | 0,0215 | 1,51 | 0 | 18,1 | 0,29 | 441341 | | |
| 179 | 120000 | 0,0215 | 1,51 | 0 | 18,1 | 0,36 | 489385 | | |
| 180 | 120000 | 0,0215 | 1,51 | 0 | 18,1 | 0,39 | 517318 | | |
| 181 | 120000 | 0,0215 | 1,51 | 0 | 18,1 | 0,41 | 536313 | | |
| 182 | 120000 | 0,0215 | 1,51 | 0 | 18,1 | 0,44 | 553073 | | |
| 183 | 120000 | 0,0215 | 1,51 | 0 | 18,1 | 0,54 | 583240 | | |
| 184 | 120000 | 0,0215 | 1,51 | 0 | 18,1 | 0,57 | 597207 | | |
| 185 | 120000 | 0,0215 | 1,51 | 0 | 18,1 | 0,60 | 613408 | | |
| 186 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0 | 18,1 | 0,13 | 331285 | DB60/1.86-C1 (Deneysel çalışma) | |
| 187 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0 | 18,1 | 0,20 | 351397 | | |
| 188 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0 | 18,1 | 0,29 | 355307 | | |
| 189 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0 | 18,1 | 0,35 | 372626 | | |
| 190 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0 | 18,1 | 0,43 | 393296 | | |
| 191 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0 | 18,1 | 0,58 | 443575 | | |
| 192 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0 | 18,1 | 0,62 | 469274 | | |
| 193 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0 | 18,1 | 0,66 | 491061 | | |
| 194 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0 | 18,1 | 0,71 | 497765 | | |
| 195 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0 | 18,1 | 0,79 | 515084 | | |
| 196 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0 | 18,1 | 0,83 | 527374 | | |
| 197 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0 | 18,1 | 0,86 | 538547 | | |
| 198 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0,00379 | 18,1 | 0,11 | 365363 | | DB60/1.86-C1/SR (Deneysel çalışma) |
| 199 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0,00379 | 18,1 | 0,16 | 416760 | | |
| 200 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0,00379 | 18,1 | 0,19 | 440223 | | |
| 201 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0,00379 | 18,1 | 0,22 | 456983 | | |
| 202 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0,00379 | 18,1 | 0,25 | 480447 | | |
| 203 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0,00379 | 18,1 | 0,29 | 525140 | | |
| 204 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0,00379 | 18,1 | 0,32 | 543017 | | |
| 205 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0,00379 | 18,1 | 0,34 | 558101 | | |
| 206 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0,00379 | 18,1 | 0,39 | 578771 | | |
| 207 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0,00379 | 18,1 | 0,50 | 611173 | | |
| 208 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0,00379 | 18,1 | 0,58 | 621788 | | |
| 209 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0,00379 | 18,1 | 0,64 | 634637 | | |
| 210 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0,00379 | 18,1 | 0,69 | 644134 | | |
| 211 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0,00379 | 18,1 | 0,84 | 650279 | | |

Tablo Ek 2.1. (Devamı)

| # | A _c (mm ²) | ρ _l | a/d | ρ _v | f _{ck} (MPa) | w (mm) | P (N) | Numune |
|-----|-----------------------------------|----------------|------|----------------|-----------------------|--------|--------|--|
| 212 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 18,1 | 0,11 | 232880 | DB40/1.86-C1 (Deneyisel çalışma) |
| 213 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 18,1 | 0,13 | 244218 | |
| 214 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 18,1 | 0,15 | 261451 | |
| 215 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 18,1 | 0,21 | 292290 | |
| 216 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 18,1 | 0,23 | 304082 | |
| 217 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 18,1 | 0,25 | 316780 | |
| 218 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 18,1 | 0,29 | 335828 | |
| 219 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 18,1 | 0,35 | 356689 | |
| 220 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 18,1 | 0,38 | 365760 | |
| 221 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 18,1 | 0,41 | 371655 | |
| 222 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 18,1 | 0,44 | 378912 | |
| 223 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 18,1 | 0,50 | 390249 | |
| 224 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 18,1 | 0,54 | 396599 | |
| 225 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 18,1 | 0,58 | 405669 | |
| 226 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 18,1 | 0,63 | 415646 | |
| 227 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 18,1 | 0,72 | 434694 | |
| 228 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 18,1 | 0,77 | 442857 | |
| 229 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 18,1 | 0,81 | 450567 | |
| 230 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 18,1 | 0,84 | 455102 | |
| 231 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 25,3 | 0,11 | 278529 | DB40/1.86-C2 (Deneyisel çalışma) |
| 232 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 25,3 | 0,12 | 294433 | |
| 233 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 25,3 | 0,14 | 311133 | |
| 234 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 25,3 | 0,16 | 325447 | |
| 235 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 25,3 | 0,20 | 358847 | |
| 236 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 25,3 | 0,23 | 375547 | |
| 237 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 25,3 | 0,25 | 395427 | |
| 238 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 25,3 | 0,29 | 413718 | |
| 239 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 25,3 | 0,37 | 447117 | |
| 240 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 25,3 | 0,42 | 461431 | |
| 241 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 25,3 | 0,45 | 472167 | |
| 242 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 25,3 | 0,48 | 482903 | |
| 243 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 25,3 | 0,51 | 507157 | |
| 244 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 25,3 | 0,53 | 517097 | |
| 245 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 25,3 | 0,56 | 525050 | |
| 246 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 32,0 | 0,11 | 382993 | DB40/1.86-C3 (Deneyisel çalışma) |
| 247 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 32,0 | 0,14 | 414739 | |
| 248 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 32,0 | 0,16 | 433787 | |
| 249 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 32,0 | 0,17 | 448299 | |
| 250 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 32,0 | 0,18 | 460998 | |
| 251 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 32,0 | 0,23 | 480045 | |
| 252 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 32,0 | 0,24 | 492744 | |
| 253 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 32,0 | 0,25 | 505442 | |
| 254 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 32,0 | 0,27 | 522676 | |
| 255 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 32,0 | 0,31 | 556236 | |
| 256 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 32,0 | 0,32 | 574376 | |
| 257 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 32,0 | 0,34 | 599773 | |
| 258 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 32,0 | 0,36 | 617914 | |
| 259 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 32,0 | 0,39 | 633787 | |
| 260 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 32,0 | 0,41 | 636508 | |
| 261 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,12 | 285034 | DB40/1.86-C1/SR (Deneyisel çalışma) |
| 262 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,13 | 298639 | |
| 263 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,16 | 325850 | |
| 264 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,17 | 339456 | |
| 265 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,19 | 351247 | |
| 266 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,20 | 363039 | |
| 267 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,24 | 388435 | |
| 268 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,26 | 402948 | |
| 269 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,29 | 416553 | |
| 270 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,31 | 431066 | |
| 271 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,37 | 453288 | |
| 272 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,39 | 461905 | |

Tablo Ek 2.1. (Devamı)

| # | A_c (mm ²) | ρ_l | a/d | ρ_w | f_{ck} (MPa) | w (mm) | P (N) | Numune |
|-----|--------------------------|----------|------|----------|----------------|--------|--------|---|
| 273 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,42 | 469161 | DB40/1.86-CI/SR (Deneysel çalışma) |
| 274 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,46 | 477324 | |
| 275 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,51 | 490930 | |
| 276 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,55 | 501814 | |
| 277 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,58 | 512698 | |
| 278 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,60 | 525397 | |
| 279 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,65 | 550794 | |
| 280 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,68 | 561678 | |
| 281 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,70 | 565760 | |
| 282 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,73 | 566667 | |
| 283 | 100000 | 0,0147 | 1,84 | 0,00794 | 18,1 | 0,13 | 651749 | DB50/1.84-CI/SR-1 (Parametrik çalışma) |
| 284 | 100000 | 0,0147 | 1,84 | 0,00794 | 18,1 | 0,14 | 652790 | |
| 285 | 100000 | 0,0147 | 1,84 | 0,00794 | 18,1 | 0,17 | 650708 | |
| 286 | 100000 | 0,0147 | 1,84 | 0,00794 | 18,1 | 0,19 | 657996 | |
| 287 | 100000 | 0,0147 | 1,84 | 0,00794 | 18,1 | 0,23 | 675695 | |
| 288 | 100000 | 0,0147 | 1,84 | 0,00794 | 18,1 | 0,26 | 687148 | |
| 289 | 100000 | 0,0147 | 1,84 | 0,00794 | 18,1 | 0,28 | 697559 | |
| 290 | 100000 | 0,0147 | 1,84 | 0,00794 | 18,1 | 0,30 | 706929 | |
| 291 | 100000 | 0,0147 | 1,84 | 0,00794 | 18,1 | 0,35 | 725149 | |
| 292 | 100000 | 0,0147 | 1,84 | 0,00794 | 18,1 | 0,37 | 730355 | |
| 293 | 100000 | 0,0147 | 1,84 | 0,00794 | 18,1 | 0,39 | 731396 | |
| 294 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,10 | 313897 | DB50/1.75-CI/SR-2 (Parametrik çalışma) |
| 295 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,12 | 344736 | |
| 296 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,13 | 361257 | |
| 297 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,14 | 375575 | |
| 298 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,15 | 387690 | |
| 299 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,17 | 415225 | |
| 300 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,19 | 430644 | |
| 301 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,20 | 445513 | |
| 302 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,21 | 458179 | |
| 303 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,24 | 478004 | |
| 304 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,25 | 491221 | |
| 305 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,27 | 507191 | |
| 306 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,30 | 525915 | |
| 307 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,35 | 554000 | |
| 308 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,38 | 568318 | |
| 309 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,40 | 579332 | |
| 310 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,42 | 592549 | |
| 311 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,48 | 620634 | |
| 312 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,50 | 632750 | |
| 313 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,53 | 644314 | |
| 314 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,56 | 654227 | |
| 315 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,62 | 674052 | |
| 316 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,66 | 685066 | |
| 317 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,70 | 697181 | |
| 318 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,73 | 707094 | |
| 319 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,81 | 726919 | |
| 320 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,86 | 734629 | |
| 321 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,88 | 740136 | |
| 322 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,92 | 746744 | |
| 323 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,97 | 754454 | |
| 324 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,99 | 758309 | |
| 325 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 1,00 | 765468 | |
| 326 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 1,02 | 769873 | |

Tablo Ek 2.1. (Devamı)

| # | A_c (mm ²) | ρ_l | a/d | ρ_w | f_{ck} (MPa) | w (mm) | P (N) | Numune |
|-----|--------------------------|----------|------|----------|----------------|--------|--------|---|
| 327 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,11 | 287905 | DB50/1.75-C1/SR-3 (Parametrik çalışma) |
| 328 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,12 | 294643 | |
| 329 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,13 | 306770 | |
| 330 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,13 | 317998 | |
| 331 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,15 | 341354 | |
| 332 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,16 | 351235 | |
| 333 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,17 | 363812 | |
| 334 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,18 | 374591 | |
| 335 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,21 | 398396 | |
| 336 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,23 | 410972 | |
| 337 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,24 | 420405 | |
| 338 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,26 | 430286 | |
| 339 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,30 | 451396 | |
| 340 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,32 | 459031 | |
| 341 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,34 | 468464 | |
| 342 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,36 | 477896 | |
| 343 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,41 | 498557 | |
| 344 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,44 | 506192 | |
| 345 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,46 | 513828 | |
| 346 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,48 | 521014 | |
| 347 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,52 | 534938 | |
| 348 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,55 | 541675 | |
| 349 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,57 | 549760 | |
| 350 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,59 | 557845 | |
| 351 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,64 | 575811 | |
| 352 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,67 | 582997 | |
| 353 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,70 | 589285 | |
| 354 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,73 | 597370 | |
| 355 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,80 | 609497 | |
| 356 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,83 | 614887 | |
| 357 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,86 | 618929 | |
| 358 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,89 | 622522 | |
| 359 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,93 | 628361 | |
| 360 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,95 | 629709 | |
| 361 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,97 | 631056 | |
| 362 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,10 | 396106 | DB50/1.38-C1/SR-1 (Parametrik çalışma) |
| 363 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,13 | 413873 | |
| 364 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,14 | 427460 | |
| 365 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,15 | 440001 | |
| 366 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,17 | 452543 | |
| 367 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,20 | 471355 | |
| 368 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,22 | 480761 | |
| 369 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,24 | 490168 | |
| 370 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,26 | 501664 | |
| 371 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,31 | 528837 | |
| 372 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,34 | 543469 | |
| 373 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,37 | 554966 | |
| 374 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,39 | 561237 | |
| 375 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,43 | 574301 | |
| 376 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,45 | 581617 | |
| 377 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,46 | 589455 | |
| 378 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,48 | 596771 | |
| 379 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,52 | 615584 | |
| 380 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,55 | 622899 | |

Tablo Ek 2.1. (Devamı)

| # | A_c (mm ²) | ρ_l | a/d | ρ_w | f_{ck} (MPa) | w (mm) | P (N) | Numune |
|-----|--------------------------|----------|------|----------|----------------|--------|--------|---|
| 381 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,57 | 630738 | DB50/1.38-C1/SR-1 (Parametrik çalışma) |
| 382 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,59 | 637531 | |
| 383 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,65 | 652686 | |
| 384 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,68 | 660524 | |
| 385 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,71 | 666795 | |
| 386 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,74 | 671498 | |
| 387 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,79 | 679337 | |
| 388 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,81 | 680904 | |
| 389 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,83 | 681427 | |
| 390 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,10 | 408604 | |
| 391 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,12 | 439274 | |
| 392 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,12 | 453125 | |
| 393 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,13 | 466976 | |
| 394 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,14 | 483795 | |
| 395 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,17 | 517433 | |
| 396 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,19 | 530790 | |
| 397 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,21 | 543651 | |
| 398 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,22 | 554039 | |
| 399 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,26 | 560965 | |
| 400 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,28 | 559976 | |
| 401 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,29 | 557007 | |
| 402 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,31 | 555029 | |
| 403 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,33 | 560965 | |
| 404 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,35 | 567890 | |
| 405 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,36 | 574816 | |
| 406 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,37 | 584709 | |
| 407 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,41 | 605981 | |
| 408 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,42 | 619337 | |
| 409 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,44 | 630220 | |
| 410 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,46 | 636156 | |
| 411 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,49 | 644071 | |
| 412 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,50 | 647039 | |
| 413 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,12 | 374052 | DB50/1.32-C1/SR-3 (Parametrik çalışma) |
| 414 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,13 | 381881 | |
| 415 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,15 | 401019 | |
| 416 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,17 | 411458 | |
| 417 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,17 | 417547 | |
| 418 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,18 | 424506 | |
| 419 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,20 | 444513 | |
| 420 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,21 | 452342 | |
| 421 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,23 | 461911 | |
| 422 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,24 | 471045 | |
| 423 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,27 | 488443 | |
| 424 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,27 | 496707 | |
| 425 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,28 | 505841 | |
| 426 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,29 | 514105 | |
| 427 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,32 | 520194 | |
| 428 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,33 | 524543 | |
| 429 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,34 | 531502 | |
| 430 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,35 | 541071 | |
| 431 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,37 | 558469 | |
| 432 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,38 | 563688 | |
| 433 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,39 | 567603 | |
| 434 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,41 | 571082 | |
| 435 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,43 | 574127 | |

Tablo Ek 2.1. (Devamı)

| # | A _c (mm ²) | ρ _l | a/d | ρ _w | f _{ck} (MPa) | w (mm) | P (N) | Numune | |
|-----|-----------------------------------|----------------|------|----------------|-----------------------|--------|--------|---|---|
| 436 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,10 | 614432 | DB60/1.87-C1/SR-1 (Parametrik çalışma) | |
| 437 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,12 | 617651 | | |
| 438 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,13 | 625164 | | |
| 439 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,16 | 647702 | | |
| 440 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,18 | 655751 | | |
| 441 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,19 | 660044 | | |
| 442 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,20 | 663264 | | |
| 443 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,24 | 674533 | | |
| 444 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,26 | 681509 | | |
| 445 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,28 | 687412 | | |
| 446 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,30 | 693315 | | |
| 447 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,35 | 705657 | | |
| 448 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,37 | 709950 | | |
| 449 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,40 | 713706 | | |
| 450 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,42 | 716390 | | |
| 451 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,47 | 724439 | | |
| 452 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,50 | 730342 | | |
| 453 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,53 | 733025 | | |
| 454 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,56 | 737318 | | |
| 455 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,61 | 743221 | | |
| 456 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,63 | 745904 | | |
| 457 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,66 | 748587 | | |
| 458 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,68 | 749660 | | |
| 459 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,72 | 751270 | | |
| 460 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,10 | 487356 | | DB60/1.80-C1/SR-2 (Parametrik çalışma) |
| 461 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,12 | 495248 | | |
| 462 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,13 | 502613 | | |
| 463 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,16 | 528919 | | |
| 464 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,16 | 544702 | | |
| 465 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,17 | 560486 | | |
| 466 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,18 | 571008 | | |
| 467 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,20 | 595209 | | |
| 468 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,20 | 606784 | | |
| 469 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,21 | 616254 | | |
| 470 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,21 | 626776 | | |
| 471 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,22 | 649925 | | |
| 472 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,24 | 664656 | | |
| 473 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,26 | 676231 | | |
| 474 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,29 | 682018 | | |
| 475 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,33 | 697801 | | |
| 476 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,35 | 702010 | | |
| 477 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,38 | 703589 | | |
| 478 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,40 | 705693 | | |
| 479 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,44 | 709376 | | |
| 480 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,46 | 711480 | | |
| 481 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,48 | 713059 | | |
| 482 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,50 | 714111 | | |
| 483 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,53 | 716741 | | |
| 484 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,54 | 718320 | | |
| 485 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,56 | 721476 | | |
| 486 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,58 | 725685 | | |
| 487 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,61 | 734629 | | |
| 488 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,62 | 738312 | | |
| 489 | 120000 | 0,0143 | 1,50 | 0,00692 | 18,1 | 0,10 | 490543 | DB60/1.50-C1/SR-1 (Parametrik çalışma) | |
| 490 | 120000 | 0,0143 | 1,50 | 0,00692 | 18,1 | 0,11 | 498063 | | |
| 491 | 120000 | 0,0143 | 1,50 | 0,00692 | 18,1 | 0,13 | 522358 | | |
| 492 | 120000 | 0,0143 | 1,50 | 0,00692 | 18,1 | 0,14 | 540291 | | |
| 493 | 120000 | 0,0143 | 1,50 | 0,00692 | 18,1 | 0,15 | 558224 | | |
| 494 | 120000 | 0,0143 | 1,50 | 0,00692 | 18,1 | 0,16 | 572107 | | |
| 495 | 120000 | 0,0143 | 1,50 | 0,00692 | 18,1 | 0,18 | 603923 | | |
| 496 | 120000 | 0,0143 | 1,50 | 0,00692 | 18,1 | 0,19 | 620120 | | |
| 497 | 120000 | 0,0143 | 1,50 | 0,00692 | 18,1 | 0,19 | 634582 | | |

Tablo Ek 2.1. (Devamı)

| # | A_c (mm ²) | ρ_l | a/d | ρ_w | f_{ck} (MPa) | w (mm) | P (N) | Numune |
|-----|--------------------------|----------|------|----------|----------------|--------|--------|---|
| 498 | 120000 | 0,0143 | 1,50 | 0,00692 | 18,1 | 0,20 | 648465 | DB60/1.50-CI/SR-1 (Parametrik çalışma) |
| 499 | 120000 | 0,0143 | 1,50 | 0,00692 | 18,1 | 0,20 | 695899 | |
| 500 | 120000 | 0,0143 | 1,50 | 0,00692 | 18,1 | 0,20 | 719038 | |
| 501 | 120000 | 0,0143 | 1,50 | 0,00692 | 18,1 | 0,20 | 745069 | |
| 502 | 120000 | 0,0143 | 1,50 | 0,00692 | 18,1 | 0,20 | 763580 | |
| 503 | 120000 | 0,0143 | 1,50 | 0,00692 | 18,1 | 0,20 | 789612 | |
| 504 | 120000 | 0,0143 | 1,50 | 0,00692 | 18,1 | 0,21 | 798867 | |
| 505 | 120000 | 0,0143 | 1,50 | 0,00692 | 18,1 | 0,22 | 804652 | |
| 506 | 120000 | 0,0143 | 1,50 | 0,00692 | 18,1 | 0,23 | 808123 | |
| 507 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00688 | 18,1 | 0,11 | 577338 | DB60/1.44-CI/SR-2 (Parametrik çalışma) |
| 508 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00688 | 18,1 | 0,13 | 572659 | |
| 509 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00688 | 18,1 | 0,13 | 571620 | |
| 510 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00688 | 18,1 | 0,15 | 573699 | |
| 511 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00688 | 18,1 | 0,18 | 586176 | |
| 512 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00688 | 18,1 | 0,19 | 593455 | |
| 513 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00688 | 18,1 | 0,21 | 603333 | |
| 514 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00688 | 18,1 | 0,22 | 613211 | |
| 515 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00688 | 18,1 | 0,23 | 636606 | |
| 516 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00688 | 18,1 | 0,25 | 650643 | |
| 517 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00688 | 18,1 | 0,26 | 661041 | |
| 518 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00688 | 18,1 | 0,27 | 668319 | |
| 519 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00688 | 18,1 | 0,30 | 675078 | |
| 520 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00688 | 18,1 | 0,32 | 679237 | |
| 521 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00688 | 18,1 | 0,33 | 683396 | |
| 522 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00688 | 18,1 | 0,33 | 694834 | |
| 523 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00688 | 18,1 | 0,34 | 714070 | |
| 524 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00688 | 18,1 | 0,34 | 720308 | |
| 525 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00688 | 18,1 | 0,35 | 721276 | |
| 526 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00688 | 18,1 | 0,36 | 721348 | |
| 527 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,12 | 316839 | DB60/1.80-CI/SR-3 (Parametrik çalışma) |
| 528 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,13 | 324915 | |
| 529 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,14 | 333465 | |
| 530 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,14 | 341540 | |
| 531 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,15 | 364341 | |
| 532 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,16 | 376692 | |
| 533 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,18 | 388093 | |
| 534 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,19 | 400443 | |
| 535 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,21 | 419444 | |
| 536 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,23 | 427044 | |
| 537 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,25 | 433695 | |
| 538 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,27 | 438445 | |
| 539 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,31 | 448895 | |
| 540 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,33 | 456971 | |
| 541 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,35 | 465521 | |
| 542 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,37 | 473121 | |
| 543 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,40 | 488322 | |
| 544 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,41 | 495922 | |
| 545 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,43 | 502098 | |
| 546 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,45 | 511598 | |
| 547 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,48 | 518248 | |
| 548 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,49 | 517773 | |
| 549 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,51 | 521099 | |
| 550 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,54 | 524424 | |
| 551 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,59 | 538199 | |
| 552 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,61 | 546750 | |
| 553 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,63 | 553875 | |
| 554 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,66 | 563850 | |
| 555 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,73 | 585701 | |
| 556 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,75 | 592827 | |

Tablo Ek 2.1. (Devamı)

| # | A_c (mm ²) | ρ_l | a/d | ρ_w | f_{ck} (MPa) | w (mm) | P (N) | Numune |
|-----|--------------------------|----------|------|----------|----------------|--------|--------|---|
| 557 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,79 | 602802 | DB60/1.80-C1/SR-3 (Parametrik çalışma) |
| 558 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,81 | 609452 | |
| 559 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,88 | 626078 | |
| 560 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,92 | 633679 | |
| 561 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,95 | 637954 | |
| 562 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,97 | 640804 | |
| 563 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 1,03 | 648404 | |
| 564 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 1,05 | 651254 | |
| 565 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 1,07 | 653154 | |
| 566 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 1,08 | 656480 | |
| 567 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 1,11 | 662655 | |
| 568 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 1,13 | 665030 | |
| 569 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,10 | 430645 | DB60/1.44-C1/SR-3 (Parametrik çalışma) |
| 570 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,11 | 443891 | |
| 571 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,13 | 473916 | |
| 572 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,14 | 487162 | |
| 573 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,15 | 496876 | |
| 574 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,16 | 503940 | |
| 575 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,18 | 514537 | |
| 576 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,20 | 518511 | |
| 577 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,22 | 520277 | |
| 578 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,24 | 522926 | |
| 579 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,27 | 529108 | |
| 580 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,29 | 535731 | |
| 581 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,32 | 545445 | |
| 582 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,33 | 552068 | |
| 583 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,35 | 568405 | |
| 584 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,37 | 579885 | |
| 585 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,39 | 589599 | |
| 586 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,40 | 595780 | |
| 587 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,44 | 603728 | |
| 588 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,45 | 605494 | |
| 589 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,47 | 606818 | |
| 590 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,49 | 608143 | |
| 591 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,53 | 609026 | |
| 592 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,56 | 609026 | |
| 593 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,59 | 608585 | |
| 594 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,60 | 607702 | |
| 595 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,65 | 605052 | |
| 596 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,68 | 603728 | |
| 597 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,70 | 602403 | |
| 598 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,73 | 603286 | |
| 599 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,78 | 603728 | |
| 600 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,79 | 604611 | |
| 601 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,81 | 607260 | |
| 602 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,83 | 609909 | |
| 603 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,87 | 615649 | |
| 604 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,88 | 617415 | |
| 605 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,90 | 619623 | |
| 606 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,11 | 404097 | DB55/1.65-C1/SR-1 (Parametrik çalışma) |
| 607 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,15 | 430277 | |
| 608 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,17 | 437828 | |
| 609 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,18 | 447897 | |
| 610 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,20 | 459980 | |
| 611 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,24 | 495724 | |
| 612 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,25 | 510828 | |
| 613 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,27 | 533986 | |
| 614 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,29 | 550096 | |
| 615 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,33 | 578289 | |

Tablo Ek 2.1. (Devamı)

| # | A_c (mm ²) | ρ_l | a/d | ρ_w | f_{ck} (MPa) | w (mm) | P (N) | Numune |
|-----|--------------------------|----------|------|----------|----------------|--------|--------|---|
| 616 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,34 | 588358 | DB55/1.65-C1/SR-1 (Parametrik çalışma) |
| 617 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,36 | 594399 | |
| 618 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,40 | 593392 | |
| 619 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,45 | 606482 | |
| 620 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,49 | 620578 | |
| 621 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,52 | 631654 | |
| 622 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,54 | 642226 | |
| 623 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,62 | 668405 | |
| 624 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,65 | 676460 | |
| 625 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,69 | 682502 | |
| 626 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,72 | 687536 | |
| 627 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,77 | 695088 | |
| 628 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,81 | 696598 | |
| 629 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,85 | 699115 | |
| 630 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,88 | 701129 | |
| 631 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,92 | 702640 | |
| 632 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,94 | 703143 | |
| 633 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00707 | 18,1 | 0,10 | 389730 | DB55/1.58-C1/SR-2 (Parametrik çalışma) |
| 634 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00707 | 18,1 | 0,12 | 399762 | |
| 635 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00707 | 18,1 | 0,17 | 420282 | |
| 636 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00707 | 18,1 | 0,20 | 431226 | |
| 637 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00707 | 18,1 | 0,24 | 445362 | |
| 638 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00707 | 18,1 | 0,27 | 458130 | |
| 639 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00707 | 18,1 | 0,33 | 487314 | |
| 640 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00707 | 18,1 | 0,35 | 505554 | |
| 641 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00707 | 18,1 | 0,37 | 520146 | |
| 642 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00707 | 18,1 | 0,39 | 537475 | |
| 643 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00707 | 18,1 | 0,43 | 567115 | |
| 644 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00707 | 18,1 | 0,46 | 575779 | |
| 645 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00707 | 18,1 | 0,50 | 584443 | |
| 646 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00707 | 18,1 | 0,54 | 593107 | |
| 647 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00707 | 18,1 | 0,60 | 610435 | |
| 648 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00707 | 18,1 | 0,63 | 618643 | |
| 649 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00707 | 18,1 | 0,67 | 624115 | |
| 650 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00707 | 18,1 | 0,71 | 629131 | |
| 651 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00707 | 18,1 | 0,77 | 636883 | |
| 652 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,12 | 298633 | DB55/1.58-C1/SR-3 (Parametrik çalışma) |
| 653 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,13 | 310280 | |
| 654 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,15 | 325510 | |
| 655 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,18 | 359555 | |
| 656 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,19 | 373889 | |
| 657 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,21 | 386432 | |
| 658 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,23 | 398078 | |
| 659 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,27 | 423164 | |
| 660 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,29 | 433018 | |
| 661 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,31 | 435706 | |
| 662 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,33 | 439290 | |
| 663 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,37 | 456312 | |
| 664 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,40 | 468407 | |
| 665 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,42 | 482293 | |
| 666 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,45 | 494836 | |
| 667 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,52 | 514545 | |
| 668 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,55 | 527088 | |

Tablo Ek 2.1. (Devamı)

| # | A_c (mm ²) | ρ_l | a/d | ρ_w | f_{ck} (MPa) | w (mm) | P (N) | Numune |
|-----|--------------------------|----------|------|----------|----------------|--------|--------|---|
| 669 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,58 | 536943 | DB55/1.58-C1/SR-3 (Parametrik çalışma) |
| 670 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,62 | 548590 | |
| 671 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,71 | 576362 | |
| 672 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,75 | 586217 | |
| 673 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,79 | 594280 | |
| 674 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,81 | 600552 | |
| 675 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,85 | 616678 | |
| 676 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,86 | 621157 | |
| 677 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,88 | 625637 | |
| 678 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,11 | 355749 | DB40/1.80-C1/SR-1 (Parametrik çalışma) |
| 679 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,14 | 374888 | |
| 680 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,15 | 385414 | |
| 681 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,16 | 399290 | |
| 682 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,17 | 410295 | |
| 683 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,19 | 434698 | |
| 684 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,21 | 448574 | |
| 685 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,22 | 461014 | |
| 686 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,23 | 471541 | |
| 687 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,26 | 491637 | |
| 688 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,28 | 501206 | |
| 689 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,29 | 510297 | |
| 690 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,30 | 516518 | |
| 691 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,33 | 537571 | |
| 692 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,34 | 547140 | |
| 693 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,36 | 558624 | |
| 694 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,38 | 569150 | |
| 695 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,40 | 583983 | |
| 696 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,41 | 590682 | |
| 697 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,42 | 598816 | |
| 698 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,44 | 608385 | |
| 699 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,46 | 625611 | |
| 700 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,46 | 636137 | |
| 701 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,47 | 645707 | |
| 702 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,48 | 652884 | |
| 703 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,50 | 663889 | |
| 704 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,11 | 222804 | DB40/1.68-C1/SR-2 (Parametrik çalışma) |
| 705 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,12 | 232865 | |
| 706 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,13 | 244602 | |
| 707 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,15 | 268497 | |
| 708 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,15 | 276881 | |
| 709 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,16 | 289876 | |
| 710 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,17 | 301613 | |
| 711 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,19 | 325088 | |
| 712 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,19 | 332634 | |
| 713 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,20 | 341018 | |
| 714 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,21 | 349402 | |
| 715 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,24 | 364493 | |
| 716 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,25 | 372039 | |
| 717 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,26 | 377908 | |
| 718 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,28 | 384615 | |
| 719 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,31 | 400544 | |
| 720 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,32 | 405994 | |
| 721 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,33 | 411863 | |
| 722 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,35 | 419827 | |
| 723 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,38 | 436595 | |
| 724 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,40 | 444979 | |
| 725 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,42 | 453363 | |
| 726 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,43 | 463424 | |
| 727 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,46 | 481030 | |
| 728 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,48 | 490672 | |
| 729 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,49 | 495283 | |

Tablo Ek 2.1. (Devamı)

| # | A_c (mm ²) | ρ_l | a/d | ρ_w | f_{ck} (MPa) | w (mm) | P (N) | Numune |
|-----|--------------------------|----------|------|----------|----------------|--------|--------|---|
| 730 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,50 | 498637 | DB40/1.68-C1/SR-2 (Parametrik çalışma) |
| 731 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,53 | 507021 | |
| 732 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,55 | 509955 | |
| 733 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,58 | 515405 | |
| 734 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,60 | 522112 | |
| 735 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,66 | 536784 | |
| 736 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,69 | 543072 | |
| 737 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,72 | 549779 | |
| 738 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,75 | 556067 | |
| 739 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,79 | 564032 | |
| 740 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,79 | 571577 | |
| 741 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,80 | 575769 | |
| 742 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,81 | 578704 | |
| 743 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,84 | 581638 | |
| 744 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 25,3 | 0,10 | 350067 | DB40/1.80-C2/SR-1 (Parametrik çalışma) |
| 745 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 25,3 | 0,11 | 356473 | |
| 746 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 25,3 | 0,12 | 365282 | |
| 747 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 25,3 | 0,13 | 385304 | |
| 748 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 25,3 | 0,14 | 397321 | |
| 749 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 25,3 | 0,14 | 405332 | |
| 750 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 25,3 | 0,14 | 413344 | |
| 751 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 25,3 | 0,14 | 435777 | |
| 752 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 25,3 | 0,14 | 449397 | |
| 753 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 25,3 | 0,14 | 462216 | |
| 754 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 25,3 | 0,14 | 477439 | |
| 755 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 25,3 | 0,14 | 505880 | |
| 756 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 25,3 | 0,14 | 521503 | |
| 757 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 25,3 | 0,14 | 532719 | |
| 758 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 25,3 | 0,14 | 542332 | |
| 759 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 25,3 | 0,15 | 554345 | |
| 760 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 25,3 | 0,16 | 559148 | |
| 761 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 25,3 | 0,17 | 565152 | |
| 762 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 25,3 | 0,19 | 565638 | |
| 763 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,10 | 278396 | DB40/1.68-C2/SR-2 (Parametrik çalışma) |
| 764 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,10 | 286683 | |
| 765 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,11 | 293169 | |
| 766 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,11 | 301095 | |
| 767 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,12 | 322714 | |
| 768 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,13 | 331361 | |
| 769 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,13 | 336766 | |
| 770 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,13 | 350818 | |
| 771 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,13 | 370995 | |
| 772 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,13 | 383966 | |
| 773 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,13 | 394054 | |
| 774 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,13 | 405584 | |
| 775 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,13 | 422879 | |
| 776 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,14 | 431886 | |
| 777 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,14 | 445938 | |
| 778 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,14 | 456747 | |
| 779 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,14 | 471880 | |
| 780 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,15 | 481969 | |
| 781 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,15 | 492057 | |
| 782 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,15 | 499984 | |
| 783 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,15 | 510433 | |

Tablo Ek 2.1. (Devamı)

| # | A _c (mm ²) | ρ _l | a/d | ρ _w | f _{ck} (MPa) | w (mm) | P (N) | Numune | |
|-----|-----------------------------------|----------------|------|----------------|-----------------------|--------|--------|---|---|
| 784 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 32,0 | 0,10 | 517840 | DB40/1.80-C3/SR-1 (Parametrik çalışma) | |
| 785 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 32,0 | 0,11 | 533120 | | |
| 786 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 32,0 | 0,12 | 546602 | | |
| 787 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 32,0 | 0,13 | 569072 | | |
| 788 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 32,0 | 0,14 | 585250 | | |
| 789 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 32,0 | 0,15 | 594238 | | |
| 790 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 32,0 | 0,16 | 601425 | | |
| 791 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 32,0 | 0,18 | 611753 | | |
| 792 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 32,0 | 0,19 | 616692 | | |
| 793 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 32,0 | 0,21 | 624777 | | |
| 794 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 32,0 | 0,22 | 631065 | | |
| 795 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 32,0 | 0,23 | 634783 | | |
| 796 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,10 | 209448 | | DB40/1.68-C3/SR-2 (Parametrik çalışma) |
| 797 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,11 | 219046 | | |
| 798 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,12 | 229518 | | |
| 799 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,12 | 249154 | | |
| 800 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,12 | 256574 | | |
| 801 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,12 | 267049 | | |
| 802 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,12 | 275778 | | |
| 803 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,13 | 296726 | | |
| 804 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,13 | 308945 | | |
| 805 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,14 | 320289 | | |
| 806 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,15 | 332505 | | |
| 807 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,16 | 353450 | | |
| 808 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,16 | 363049 | | |
| 809 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,17 | 374394 | | |
| 810 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,18 | 384864 | | |
| 811 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,21 | 408418 | | |
| 812 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,22 | 419758 | | |
| 813 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,23 | 430226 | | |
| 814 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,25 | 440692 | | |
| 815 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,28 | 461625 | | |
| 816 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,30 | 473838 | | |
| 817 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,31 | 484307 | | |
| 818 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,32 | 495647 | | |
| 819 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,36 | 520943 | | |
| 820 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,37 | 531411 | | |
| 821 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,38 | 539260 | | |
| 822 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,40 | 547980 | | |
| 823 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,43 | 562804 | | |
| 824 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,45 | 568906 | | |
| 825 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,46 | 575881 | | |
| 826 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,48 | 581983 | | |
| 827 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,50 | 589825 | | |
| 828 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,52 | 594181 | | |
| 829 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,53 | 598539 | | |
| 830 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,54 | 602024 | | |
| 831 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,57 | 611175 | | |
| 832 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,58 | 614226 | | |
| 833 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,59 | 616287 | | |
| 834 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,11 | 232907 | DB40/1.68-C1/SR-3 (Parametrik çalışma) | |
| 835 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,13 | 251366 | | |
| 836 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,14 | 263671 | | |
| 837 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,16 | 277515 | | |
| 838 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,17 | 289820 | | |
| 839 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,18 | 312124 | | |
| 840 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,19 | 321353 | | |
| 841 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,19 | 333659 | | |
| 842 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,20 | 347502 | | |
| 843 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,22 | 375190 | | |
| 844 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,23 | 382881 | | |

Tablo Ek 2.1. (Devamı)

| # | A _c (mm ²) | ρ _l | a/d | ρ _w | f _{ck} (MPa) | w (mm) | P (N) | Numune | |
|-----|-----------------------------------|----------------|------|----------------|-----------------------|--------|--------|---|---|
| 845 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,24 | 389803 | DB40/1.68-C1/SR-3 (Parametrik çalışma) | |
| 846 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,26 | 395186 | | |
| 847 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,29 | 404031 | | |
| 848 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,31 | 408261 | | |
| 849 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,34 | 412106 | | |
| 850 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,35 | 417105 | | |
| 851 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,38 | 428257 | | |
| 852 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,40 | 434025 | | |
| 853 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,41 | 437486 | | |
| 854 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,44 | 437102 | | |
| 855 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,47 | 437871 | | |
| 856 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,49 | 439409 | | |
| 857 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,51 | 443255 | | |
| 858 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,53 | 448254 | | |
| 859 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,58 | 461328 | | |
| 860 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,61 | 466712 | | |
| 861 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,63 | 471327 | | |
| 862 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,65 | 475557 | | |
| 863 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,70 | 485170 | | |
| 864 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,72 | 489016 | | |
| 865 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,74 | 492092 | | |
| 866 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,77 | 496707 | | |
| 867 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,82 | 509012 | | |
| 868 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,85 | 514396 | | |
| 869 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,87 | 519010 | | |
| 870 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,90 | 522856 | | |
| 871 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,95 | 531316 | | |
| 872 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,98 | 534392 | | |
| 873 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 1,00 | 536700 | | |
| 874 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 1,03 | 539776 | | |
| 875 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 1,08 | 543237 | | |
| 876 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 1,10 | 543621 | | |
| 877 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 1,12 | 544390 | | |
| 878 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 1,14 | 544390 | | |
| 879 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,11 | 243522 | | DB40/1.68-C2/SR-3 (Parametrik çalışma) |
| 880 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,12 | 251576 | | |
| 881 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,13 | 259629 | | |
| 882 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,13 | 267063 | | |
| 883 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,15 | 281000 | | |
| 884 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,16 | 287815 | | |
| 885 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,17 | 292770 | | |
| 886 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,18 | 299274 | | |
| 887 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,19 | 313521 | | |
| 888 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,21 | 320954 | | |
| 889 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,21 | 328387 | | |
| 890 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,22 | 335201 | | |
| 891 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,25 | 350065 | | |
| 892 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,26 | 355018 | | |
| 893 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,28 | 358421 | | |
| 894 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,29 | 359345 | | |
| 895 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,31 | 368013 | | |
| 896 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,32 | 373587 | | |
| 897 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,33 | 377922 | | |
| 898 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,34 | 380398 | | |
| 899 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,38 | 384102 | | |
| 900 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,40 | 386572 | | |
| 901 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,42 | 389043 | | |
| 902 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,44 | 390274 | | |
| 903 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,49 | 395524 | | |

Tablo Ek 2.1. (Devamı)

| # | A_c (mm ²) | ρ_l | a/d | ρ_w | f_{ck} (MPa) | w (mm) | P (N) | Numune |
|-----|--------------------------|----------|------|----------|----------------|--------|--------|---|
| 904 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,51 | 397684 | DB40/1.68-C2/SR-3 (Parametrik çalışma) |
| 905 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,54 | 399225 | |
| 906 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,55 | 401388 | |
| 907 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,59 | 407571 | |
| 908 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,61 | 411282 | |
| 909 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,63 | 416230 | |
| 910 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,66 | 420560 | |
| 911 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,70 | 427049 | |
| 912 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,72 | 429211 | |
| 913 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,74 | 431063 | |
| 914 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,76 | 432914 | |
| 915 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,80 | 435069 | |
| 916 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,82 | 436300 | |
| 917 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,84 | 436912 | |
| 918 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,85 | 437217 | |
| 919 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,88 | 437547 | |
| 920 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,11 | 254813 | DB40/1.68-C3/SR-3 (Parametrik çalışma) |
| 921 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,12 | 256102 | |
| 922 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,13 | 260416 | |
| 923 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,14 | 272505 | |
| 924 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,15 | 281141 | |
| 925 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,15 | 290641 | |
| 926 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,16 | 298843 | |
| 927 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,18 | 310064 | |
| 928 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,20 | 316105 | |
| 929 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,21 | 320420 | |
| 930 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,22 | 327326 | |
| 931 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,23 | 345462 | |
| 932 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,24 | 354962 | |
| 933 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,24 | 366190 | |
| 934 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,25 | 375689 | |
| 935 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,27 | 392959 | |
| 936 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,28 | 401594 | |
| 937 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,28 | 409366 | |
| 938 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,29 | 418002 | |
| 939 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,30 | 432685 | |
| 940 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,30 | 443051 | |
| 941 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,30 | 455145 | |
| 942 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,31 | 463782 | |
| 943 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,32 | 480191 | |
| 944 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,33 | 487530 | |
| 945 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,34 | 495299 | |
| 946 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,35 | 503500 | |
| 947 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,38 | 516876 | |
| 948 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,39 | 522486 | |
| 949 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,41 | 528958 | |
| 950 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,42 | 535863 | |
| 951 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,45 | 555286 | |
| 952 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,46 | 563055 | |
| 953 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,47 | 568233 | |
| 954 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,48 | 574274 | |
| 955 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,51 | 587218 | |
| 956 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,52 | 591964 | |
| 957 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,54 | 597142 | |
| 958 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,55 | 601888 | |
| 959 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,57 | 609221 | |
| 960 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,57 | 609958 | |

Tablo Ek 2.2. Analizlerde kullanılan doğrulama (validation) datası.

| # | A_c (mm ²) | ρ_l | a/d | ρ_w | f_{ck} (MPa) | w (mm) | P (N) | Deney | |
|----|-----------------------------|----------|------|----------|-------------------|-----------|---------|--|---------------------------------------|
| 1 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0 | 34,2 | 0,147 | 668627 | | |
| 2 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0 | 34,2 | 0,302 | 900000 | | |
| 3 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0 | 34,2 | 0,797 | 1009804 | S0M (Mihaylov ve ark., 2010) | |
| 4 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0 | 34,2 | 1,289 | 1115686 | | |
| 5 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0 | 34,2 | 1,797 | 1194118 | | |
| 6 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0 | 34,2 | 2,332 | 1274510 | | |
| 7 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0,001 | 33,0 | 0,194 | 627451 | | |
| 8 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0,001 | 33,0 | 0,280 | 823529 | | |
| 9 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0,001 | 33,0 | 0,336 | 974510 | S1M (Mihaylov ve ark., 2010) | |
| 10 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0,001 | 33,0 | 0,534 | 1160784 | | |
| 11 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0,001 | 33,0 | 0,888 | 1323529 | | |
| 12 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0,001 | 33,0 | 1,276 | 1521569 | | |
| 13 | 480000 | 0,0070 | 1,55 | 0,001 | 33,0 | 1,849 | 1621569 | | |
| 14 | 52500 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,106 | 394966 | | B350-1-55 (El-Sayed ve Shuraim, 2015) |
| 15 | 52500 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,199 | 507084 | | |
| 16 | 52500 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,384 | 653791 | | |
| 17 | 52500 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,659 | 737457 | | |
| 18 | 75000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,183 | 400724 | B500-1-55 (El-Sayed ve Shuraim, 2015) | |
| 19 | 75000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,365 | 577665 | | |
| 20 | 75000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,616 | 783490 | | |
| 21 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,313 | 585555 | | |
| 22 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,624 | 761274 | B700-1-55 (El-Sayed ve Shuraim, 2015) | |
| 23 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,913 | 915833 | | |
| 24 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 1,229 | 1049380 | | |
| 25 | 105000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 1,649 | 1159130 | | |
| 26 | 150000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,202 | 553803 | B1000-1-55 (El-Sayed ve Shuraim, 2015) | |
| 27 | 150000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,466 | 711046 | | |
| 28 | 150000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 0,905 | 953789 | | |
| 29 | 150000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 1,343 | 1196531 | | |
| 30 | 150000 | 0,0147 | 1,00 | 0 | 53,9 | 1,943 | 1497957 | | |
| 31 | 100000 | 0,0221 | 1,40 | 0 | 18,1 | 0,163 | 394545 | | DB50/1.40-C1 (Deneysel çalışma) |
| 32 | 100000 | 0,0221 | 1,40 | 0 | 18,1 | 0,372 | 526667 | | |
| 33 | 100000 | 0,0221 | 1,40 | 0 | 18,1 | 0,500 | 638182 | | |
| 34 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0 | 18,1 | 0,199 | 343636 | DB50/1.86-C1 (Deneysel çalışma) | |
| 35 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0 | 18,1 | 0,577 | 429697 | | |
| 36 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0 | 18,1 | 0,841 | 493939 | | |
| 37 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0,0037 | 18,1 | 0,154 | 369091 | DB50/1.86-C1/SR (Deneysel çalışma) | |
| 38 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0,0037 | 18,1 | 0,315 | 446667 | | |
| 39 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0,0037 | 18,1 | 0,516 | 549697 | | |
| 40 | 100000 | 0,0221 | 1,86 | 0,0037 | 18,1 | 0,793 | 623636 | | |
| 41 | 110000 | 0,0237 | 1,67 | 0 | 18,1 | 0,119 | 355155 | DB55/1.67-C1 (Deneysel çalışma) | |
| 42 | 110000 | 0,0237 | 1,67 | 0 | 18,1 | 0,402 | 438144 | | |
| 43 | 110000 | 0,0237 | 1,67 | 0 | 18,1 | 0,648 | 519072 | | |
| 44 | 120000 | 0,0215 | 1,51 | 0 | 18,1 | 0,106 | 374302 | DB60/1.51-C1 (Deneysel çalışma) | |
| 45 | 120000 | 0,0215 | 1,51 | 0 | 18,1 | 0,320 | 463687 | | |
| 46 | 120000 | 0,0215 | 1,51 | 0 | 18,1 | 0,498 | 570950 | | |
| 47 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0 | 18,1 | 0,158 | 342458 | DB60/1.86-C1 (Deneysel çalışma) | |
| 48 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0 | 18,1 | 0,532 | 418994 | | |
| 49 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0 | 18,1 | 0,742 | 502235 | | |
| 50 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0,00379 | 18,1 | 0,134 | 392179 | DB60/1.86-C1/SR (Deneysel çalışma) | |
| 51 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0,00379 | 18,1 | 0,271 | 503911 | | |
| 52 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0,00379 | 18,1 | 0,441 | 599441 | | |
| 53 | 120000 | 0,0215 | 1,89 | 0,00379 | 18,1 | 0,755 | 648603 | | |
| 54 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 18,1 | 0,184 | 277778 | DB40/1.86-C1 (Deneysel çalışma) | |
| 55 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 18,1 | 0,317 | 348073 | | |
| 56 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 18,1 | 0,470 | 384354 | | |
| 57 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 18,1 | 0,680 | 425624 | | |
| 58 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 18,1 | 0,882 | 460091 | | |

Tablo Ek 2.2. (Devamı)

| # | A_c (mm ²) | ρ_l | a/d | ρ_w | f_{ck} (MPa) | w (mm) | P (N) | Deney |
|-----|-----------------------------|----------|------|----------|-------------------|-----------|--------|--|
| 59 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 25,3 | 0,177 | 340557 | DB40/1.86-C2 (Deneysel çalışma) |
| 60 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 25,3 | 0,326 | 430417 | |
| 61 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 25,3 | 0,499 | 495626 | |
| 62 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 32,0 | 0,127 | 396599 | DB40/1.86-C3 (Deneysel çalışma) |
| 63 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 32,0 | 0,206 | 471429 | |
| 64 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 32,0 | 0,293 | 538095 | |
| 65 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0 | 32,0 | 0,374 | 627891 | |
| 66 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,142 | 313152 | DB40/1.86- C1/SR (Deneysel çalışma) |
| 67 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,220 | 377551 | |
| 68 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,337 | 441950 | |
| 69 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,485 | 483673 | |
| 70 | 80000 | 0,0228 | 1,80 | 0,00426 | 18,1 | 0,621 | 537188 | |
| 71 | 100000 | 0,0147 | 1,84 | 0,00794 | 18,1 | 0,110 | 647585 | DB50/1.84- C1/SR-1 (Parametrik çalışma) |
| 72 | 100000 | 0,0147 | 1,84 | 0,00794 | 18,1 | 0,209 | 667366 | |
| 73 | 100000 | 0,0147 | 1,84 | 0,00794 | 18,1 | 0,327 | 717341 | |
| 74 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,113 | 330418 | DB50/1.75- C1/SR-2 (Parametrik çalışma) |
| 75 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,162 | 403110 | |
| 76 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,225 | 468092 | |
| 77 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,327 | 539131 | |
| 78 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,452 | 607968 | |
| 79 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,588 | 664139 | |
| 80 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,776 | 718658 | |
| 81 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 0,946 | 752251 | |
| 82 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00789 | 18,1 | 1,040 | 773728 | |
| 83 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,144 | 330125 | DB50/1.75- C1/SR-3 (Parametrik çalışma) |
| 84 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,196 | 386269 | |
| 85 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,277 | 440167 | |
| 86 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,387 | 488675 | |
| 87 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,506 | 528650 | |
| 88 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,620 | 567726 | |
| 89 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,763 | 603658 | |
| 90 | 100000 | 0,0125 | 1,75 | 0,00486 | 18,1 | 0,910 | 626115 | |
| 91 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,114 | 401331 | DB50/1.38- C1/SR-1 (Parametrik çalışma) |
| 92 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,181 | 462472 | |
| 93 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,285 | 514206 | |
| 94 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,409 | 568030 | |
| 95 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,503 | 605132 | |
| 96 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,620 | 645370 | |
| 97 | 100000 | 0,0147 | 1,38 | 0,00855 | 18,1 | 0,766 | 675679 | |
| 98 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,110 | 426412 | DB50/1.32- C1/SR-2 (Parametrik çalışma) |
| 99 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,157 | 499625 | |
| 100 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,242 | 559976 | |
| 101 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,321 | 557997 | |
| 102 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,392 | 594603 | |
| 103 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00842 | 18,1 | 0,478 | 639124 | |
| 104 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,141 | 391450 | DB50/1.32- C1/SR-3 (Parametrik çalışma) |
| 105 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,195 | 435815 | |
| 106 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,258 | 478439 | |
| 107 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,310 | 518454 | |
| 108 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,358 | 550640 | |
| 109 | 100000 | 0,0125 | 1,32 | 0,00538 | 18,1 | 0,418 | 573257 | |
| 110 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,146 | 637506 | DB60/1.87- C1/SR-1 (Parametrik çalışma) |
| 111 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,221 | 667557 | |
| 112 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,327 | 700828 | |
| 113 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,445 | 719609 | |
| 114 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,582 | 740001 | |
| 115 | 120000 | 0,0143 | 1,87 | 0,0067 | 18,1 | 0,698 | 750733 | |

Tablo Ek 2.2. (Devamı)

| # | A_c (mm ²) | ρ_l | a/d | ρ_w | f_{ck} (MPa) | w (mm) | P (N) | Deney |
|-----|-----------------------------|----------|------|----------|-------------------|-----------|--------|--|
| 116 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,147 | 512609 | DB60/1.80- C1/SR-2 (Parametrik çalışma) |
| 117 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,190 | 582583 | |
| 118 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,215 | 638351 | |
| 119 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,309 | 689910 | |
| 120 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,418 | 706745 | |
| 121 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,518 | 715689 | |
| 122 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,0067 | 18,1 | 0,596 | 730946 | |
| 123 | 120000 | 0,0143 | 1,50 | 0,00692 | 18,1 | 0,120 | 507318 | DB60/1.50- C1/SR-1 (Parametrik çalışma) |
| 124 | 120000 | 0,0143 | 1,50 | 0,00692 | 18,1 | 0,168 | 588304 | |
| 125 | 120000 | 0,0143 | 1,50 | 0,00692 | 18,1 | 0,197 | 672761 | |
| 126 | 120000 | 0,0143 | 1,50 | 0,00692 | 18,1 | 0,199 | 775728 | |
| 127 | 120000 | 0,0143 | 1,50 | 0,00692 | 18,1 | 0,239 | 809858 | |
| 128 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00688 | 18,1 | 0,168 | 580978 | DB60/1.44- C1/SR-2 (Parametrik çalışma) |
| 129 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00688 | 18,1 | 0,226 | 626728 | |
| 130 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00688 | 18,1 | 0,288 | 672478 | |
| 131 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00688 | 18,1 | 0,335 | 704712 | |
| 132 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,105 | 308289 | |
| 133 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,143 | 352941 | DB60/1.80- C1/SR-3 (Parametrik çalışma) |
| 134 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,202 | 409943 | |
| 135 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,284 | 442245 | |
| 136 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,379 | 479297 | |
| 137 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,466 | 517298 | |
| 138 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,565 | 530599 | |
| 139 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,696 | 575726 | |
| 140 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,848 | 618003 | |
| 141 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 0,994 | 644604 | |
| 142 | 120000 | 0,0103 | 1,80 | 0,00477 | 18,1 | 1,097 | 659330 | |
| 143 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,121 | 457138 | |
| 144 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,170 | 509239 | |
| 145 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,257 | 524251 | |
| 146 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,340 | 559132 | |
| 147 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,418 | 600637 | |
| 148 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,508 | 608143 | |
| 149 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,632 | 606377 | |
| 150 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,752 | 603286 | |
| 151 | 120000 | 0,0103 | 1,44 | 0,00514 | 18,1 | 0,851 | 612558 | |
| 152 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,126 | 417187 | DB55/1.65- C1/SR-1 (Parametrik çalışma) |
| 153 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,220 | 476593 | |
| 154 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,311 | 567213 | |
| 155 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,418 | 594399 | |
| 156 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,583 | 657330 | |
| 157 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,746 | 691564 | |
| 158 | 110000 | 0,0158 | 1,65 | 0,00708 | 18,1 | 0,896 | 702136 | |
| 159 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00707 | 18,1 | 0,145 | 411618 | DB55/1.58- C1/SR-2 (Parametrik çalışma) |
| 160 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00707 | 18,1 | 0,297 | 470898 | |
| 161 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00707 | 18,1 | 0,414 | 554803 | |
| 162 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00707 | 18,1 | 0,564 | 601315 | |
| 163 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00707 | 18,1 | 0,742 | 632779 | |
| 164 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,162 | 344324 | DB55/1.58- C1/SR-3 (Parametrik çalışma) |
| 165 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,246 | 409725 | |
| 166 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,346 | 446009 | |
| 167 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,481 | 503347 | |
| 168 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,666 | 562924 | |
| 169 | 110000 | 0,0113 | 1,58 | 0,00474 | 18,1 | 0,839 | 607719 | |

Tablo Ek 2.2. (Devamı)

| # | A_c (mm ²) | ρ_l | a/d | ρ_w | f_{ck} (MPa) | w (mm) | P (N) | Deney |
|-----|-----------------------------|----------|------|----------|-------------------|-----------|--------|--|
| 170 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,126 | 366275 | DB40/1.80- C1/SR-1 (Parametrik çalışma) |
| 171 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,181 | 421779 | |
| 172 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,249 | 483024 | |
| 173 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,317 | 528958 | |
| 174 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,390 | 576806 | |
| 175 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,448 | 617477 | |
| 176 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 18,1 | 0,489 | 660061 | |
| 177 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,136 | 254663 | DB40/1.68- C1/SR-2 (Parametrik çalışma) |
| 178 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,179 | 314189 | |
| 179 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,226 | 357786 | |
| 180 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,292 | 392579 | |
| 181 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,368 | 428631 | |
| 182 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,450 | 472646 | |
| 183 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,518 | 503248 | |
| 184 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,635 | 530496 | |
| 185 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,773 | 560678 | |
| 186 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 18,1 | 0,824 | 580380 | |
| 187 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 25,3 | 0,128 | 375693 | DB40/1.80- C2/SR-1 (Parametrik çalışma) |
| 188 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 25,3 | 0,138 | 424560 | |
| 189 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 25,3 | 0,138 | 491860 | |
| 190 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 25,3 | 0,147 | 548740 | |
| 191 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,100 | 269028 | DB40/1.68- C2/SR-2 (Parametrik çalışma) |
| 192 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,112 | 311184 | |
| 193 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,132 | 360186 | |
| 194 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,133 | 414231 | |
| 195 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,143 | 465395 | |
| 196 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 25,3 | 0,150 | 506830 | |
| 197 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 32,0 | 0,128 | 560084 | |
| 198 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 32,0 | 0,172 | 606364 | |
| 199 | 80000 | 0,0229 | 1,80 | 0,00989 | 32,0 | 0,224 | 634208 | |
| 200 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,123 | 240425 | DB40/1.68- C3/SR-2 (Parametrik çalışma) |
| 201 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,125 | 286252 | |
| 202 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,152 | 342978 | |
| 203 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,189 | 396206 | |
| 204 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,264 | 448541 | |
| 205 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,342 | 511350 | |
| 206 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,415 | 554956 | |
| 207 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,491 | 586340 | |
| 208 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,01007 | 32,0 | 0,557 | 606818 | |
| 209 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,119 | 242906 | DB40/1.68- C1/SR-3 (Parametrik çalışma) |
| 210 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,178 | 301357 | |
| 211 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,211 | 361346 | |
| 212 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,277 | 400570 | |
| 213 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,367 | 422874 | |
| 214 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,459 | 437486 | |
| 215 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,553 | 454791 | |
| 216 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,675 | 479787 | |
| 217 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,792 | 502859 | |
| 218 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 0,935 | 528239 | |
| 219 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 1,052 | 541699 | |
| 220 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 18,1 | 1,152 | 544775 | |

Tablo Ek 2.2. (Devamı)

| # | A_c (mm ²) | ρ_l | a/d | ρ_w | f_{ck} (MPa) | w (mm) | P (N) | Deney |
|-----|-----------------------------|----------|------|----------|-------------------|-----------|--------|--|
| 221 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,143 | 273567 | DB40/1.68- C2/SR-3 (Parametrik çalışma) |
| 222 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,183 | 305469 | |
| 223 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,236 | 343253 | |
| 224 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,305 | 361819 | |
| 225 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,362 | 382869 | |
| 226 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,464 | 392745 | |
| 227 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,569 | 404480 | |
| 228 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,677 | 423650 | |
| 229 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,778 | 434147 | |
| 230 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 25,3 | 0,870 | 437543 | |
| 231 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,136 | 266028 | DB40/1.68- C3/SR-3 (Parametrik çalışma) |
| 232 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,174 | 304453 | |
| 233 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,223 | 335098 | |
| 234 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,259 | 384756 | |
| 235 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,295 | 424047 | |
| 236 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,314 | 472851 | |
| 237 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,370 | 510835 | |
| 238 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,436 | 547517 | |
| 239 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,499 | 580314 | |
| 240 | 80000 | 0,0107 | 1,68 | 0,00673 | 32,0 | 0,557 | 606202 | |

ÖZGEÇMİŞ

Aydın DEMİR, 1981 yılında Bolu/Gerede’de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Bolu’da tamamladı. 1999 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü 2003 yılında bitirdi. Boğaziçi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde 2003 yılında 1 yıl İngilizce hazırlık okuyarak başladığı yüksek lisans eğitimini 2006 yılında tamamladı. 2005-2012 yılları arasında özel sektör ve kamu kurumlarında proje ve şantiye mühendisi olarak çalıştı. 2012 yılında Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı (ÖYP) kapsamında Sakarya Üniversitesi’nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2012 yılında başladığı doktora eğitimine Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde devam etti. Halen Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.