

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

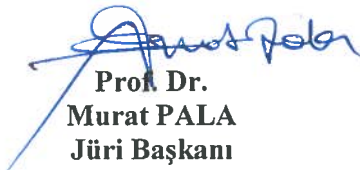

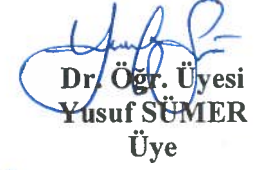


**BETONARME YÜKSEK KİRİŞLERDE KESME
ÇATLAĞININ ARTIK YÜK TAŞIMA KAPASİTESİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

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 şekildeğiştirme
ϵ_c^{in}	: Betonun inelastik birim şekildeğiştirme
ϵ_c^{pl}	: Betonun plastik birim şekil değiştirme
ϵ_{icr}	: Betonun maksimum çekme gerilmesine karşılık gelen birim şekildeğiştirme değeri
ϵ'_{icr}	: Maksimum çatlak genişliğine (w_0) karşılık gelen birim şekildeğiştirme değeri
ϵ_{scr}	: σ_s 'ye karşılık gelen birim şekildeğiştirme değeri
ϵ_t^{ck}	: Betonun çatlama sonrası inelastik birim şekil değiştirme
ϵ_s	: Donatı çeliğinin birim şekildeğiştirme
ϵ_t^{pl}	: Betonun asal plastik çekme birim şekildeğiştirme değeri
ϵ_t	: Betonun çekme birim şekildeğiştirme
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.

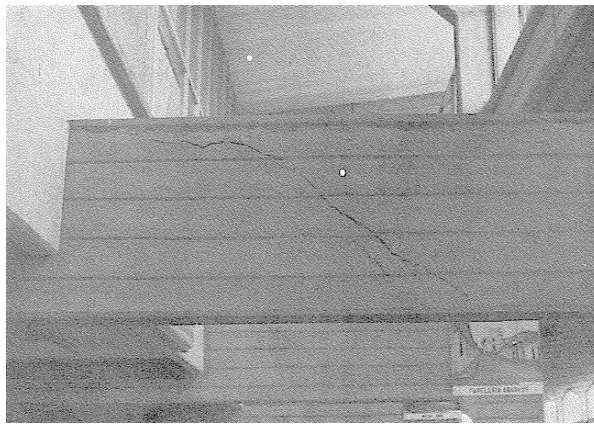
In the scope of the study, diagonal cracking behavior of RC deep beams under shear effect is investigated via a 3-phase study. In the first phase, an experimental study is conducted to investigate diagonal cracking behavior of deep beams in terms of section depth, a/d and characteristic compressive strength 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.

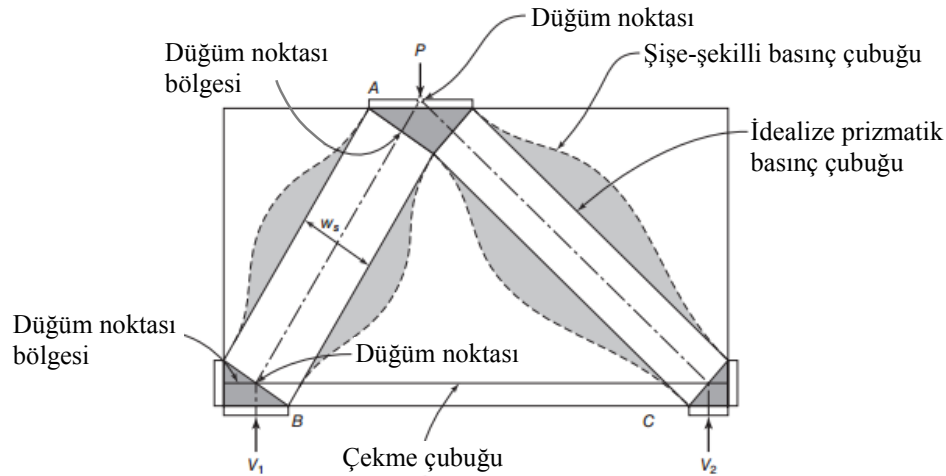
Bölüm 7’de; eğik olarak çatlamaş betonarme yüksek kirişlerin çatlak genişliğinden, eleman artık yük taşıma kapasitesinin hesaplanabilmesi için bir formül önerilmiştir. Önerilen formülün sınırları, performansı ve etkinliği bu bölümde ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

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 çatlama 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, çatlama mevcut betonarme yüksek kirişlerin artık yük taşıma kapasitelerinin tespit edilebilmesine yardımcı olacak yaklaşımlara ihtiyaç bulunmaktadır.



Şekil 2.1. Yüksek kirişlerde tek panel strut-and-tie modeli (STM) (Wight, 2016).

Uygulamadaki bu ihtiyacı giderebilecek literatürdeki çalışmaların tespiti için, betonarme yüksek kirişler üzerinde gerçekleştirilen mevcut bilimsel çalışmalar ve tasarım yönetmelikleri incelenmiştir. Literatür taraması sonucunda; betonarme yüksek kirişlerin eğik çatlak genişliği ile eleman artık yük taşıma kapasitesi arasındaki ilişkinin gösterildiği oldukça sınırlı sayıda çalışmaya rastlanılmıştır. Birrcher ve arkadaşları (2009) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada; betonarme yüksek kirişler üzerinde oluşmuş mevcut eğik çatlakların maksimum genişliğinden, elemandaki artık yük taşıma kapasitesinin hesaplanabildiği bir tablo (Şekil 2.2.) önerilmiştir. Bu tablonun amacı; “eğik olarak çatlama betonarme köprü başlık kirişlerinin artık yük taşıma kapasitelerinin değerlendirilmesinde saha mühendislerine yardımcı olmaktır” şeklinde belirtilmiştir. Çalışmada önerilen tablo kullanılarak; bir yüksek kirişin üzerindeki mevcut eğik çatlak genişliği ve kesme donatısı oranları (etriye ve gövde donatısı) dikkate alınarak, elemanın artık yük taşıma kapasite yüzdesi belirlenebilmektedir. Önerilen tablo; çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi ile oluşturulmuş ve a/d oranı $1 \sim 2$ arasında olan tüm betonarme yüksek kirişler için kullanılabilirliği belirtilmiştir.

Eleman üzerindeki yük, ortalama maksimum yük taşıma kapasite yüzdesi olarak hesaplanmaktadır (\pm saçılım)						
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_l) 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 kesimine 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. Deneysel sonuçlarda, etriyelerin eğik çatlak genişliklerini sınırlandırdığı ve eleman yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir. 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. Deneysel sonuçlarda, 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 çatlamış 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 doğrulanmıştır. 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 kullanılabilmekte, 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.

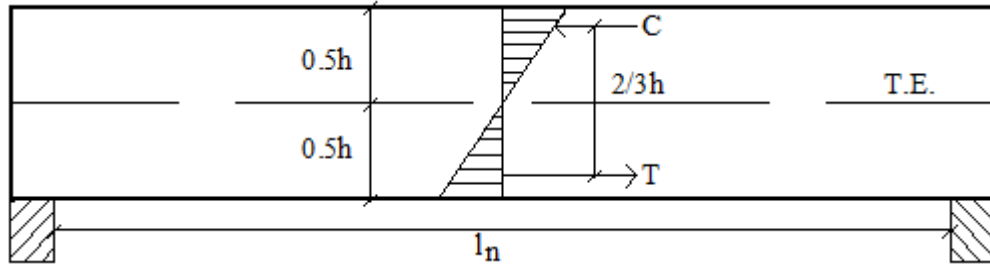
- SE modeli üzerinden çatlak genişliğinin belirlenmesi: Sonlu elemanlar metodu; zorluk, zaman, iş gücü ve maliyet açısından değerlendirildiğinde deneysel çalışmalara göre oldukça avantajları olan, güvenilirliği gerçekleştirilen pek çok bilimsel çalışma ile ispatlanmış ve bilim insanları tarafından sıklıkla 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.

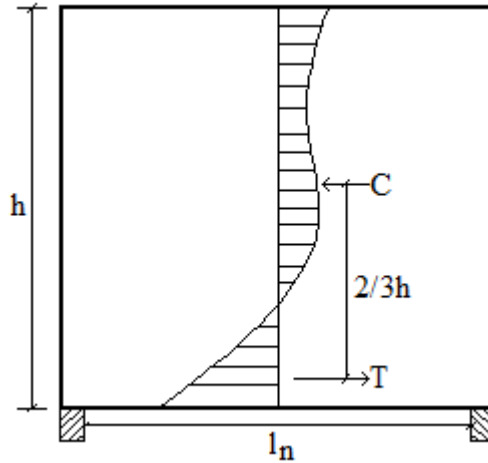
BÖLÜM 3. BETONARME YÜKSEK KİRİŞLERDE KESME HASARI DAVRANIŞI

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).



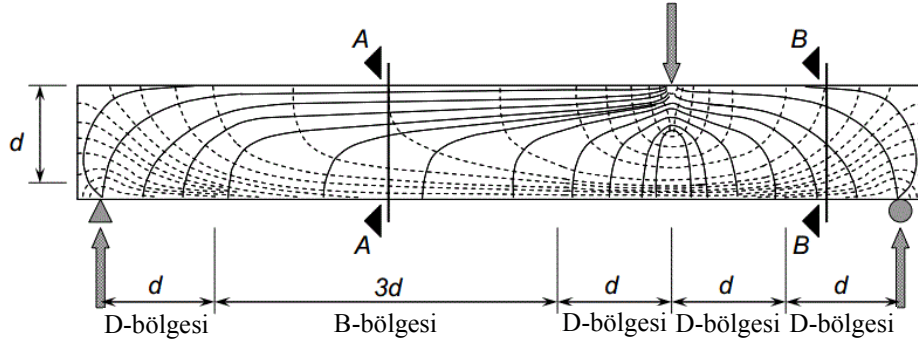
(a) Klasik kiriş B-bölgesi



(b) Yüksek kiriş D-bölgesi

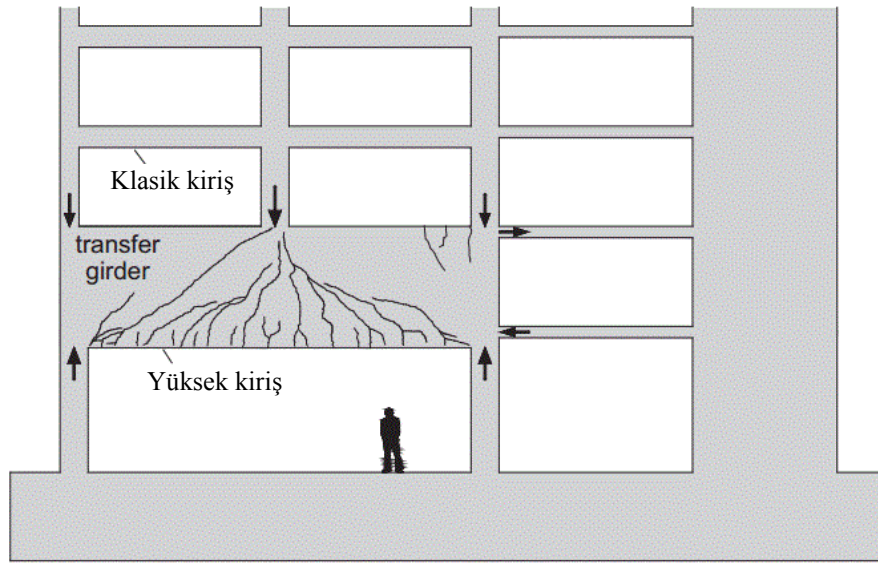
Şekil 3.1. B ve D-bölgelerinde birim şekil değiştirme dağılımı (Nawy, 2009).

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.



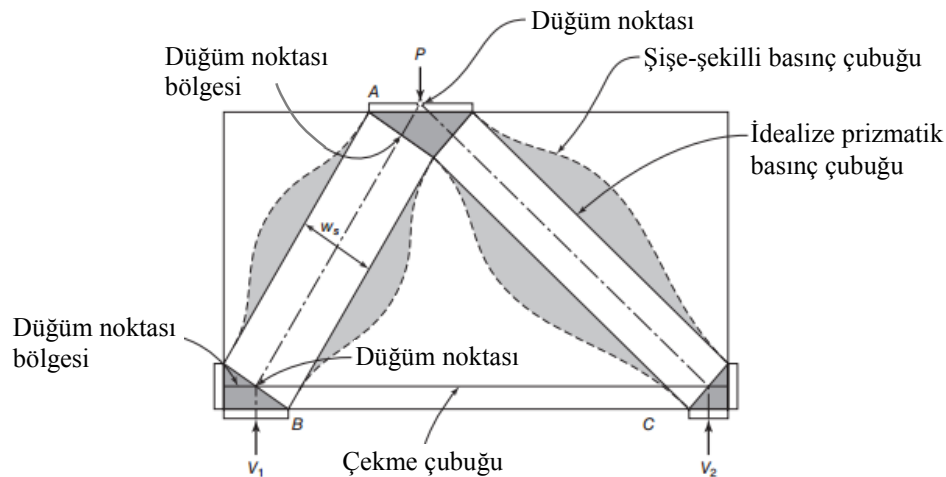
Şekil 3.3. Bir binadaki yüksek kiriş örneği (Mihaylov, 2015).

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 (Bircher ve ark., 2009). Tekil bir kuvvet etkisi altında basit mesnetli bir yüksek kirişte örnek bir STM modeli Şekil 3.4.’te gösterilmiştir.

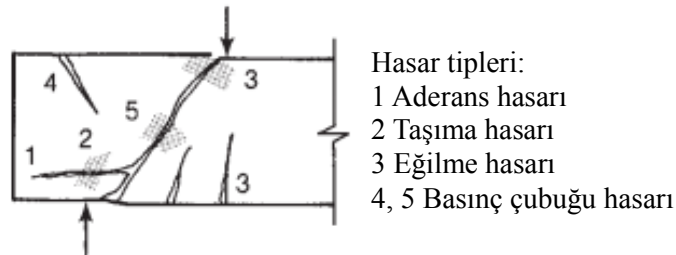


Şekil 3.4. Yüksek kirişlerde örnek bir strut-and-tie modeli (Wight, 2016).

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).

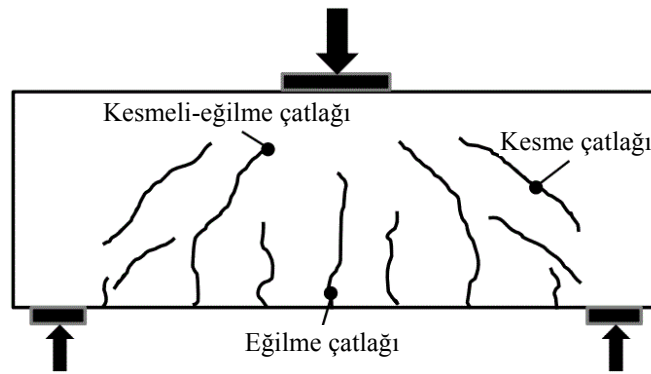


Şekil 3.5. Betonarme yüksek kirişlerde hasar mekanizmaları (Wight, 2016).

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).

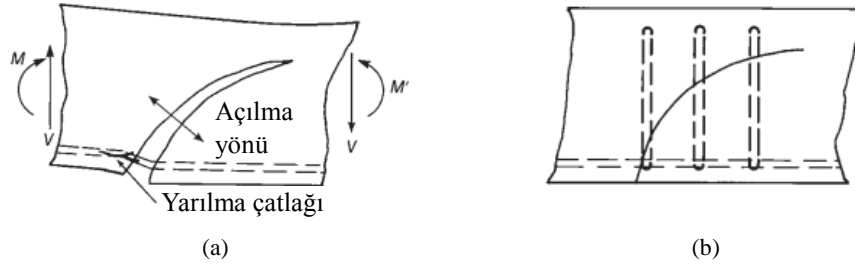
Bununla birlikte betonarme yüksek kirişlerde kesme etkisi, eğilmeye göre daha etkin ve kritiktir. Kesme etkisindeki bu elemanlar üzerinde; kesmeli-eğilme çatlakları (flexure-shear cracks) ve kesme çatlakları (web-shear / splitting cracks) olmak üzere iki temel eğik çatlak formu oluşur (Şekil 3.6.). Kesmeli-eğilme 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

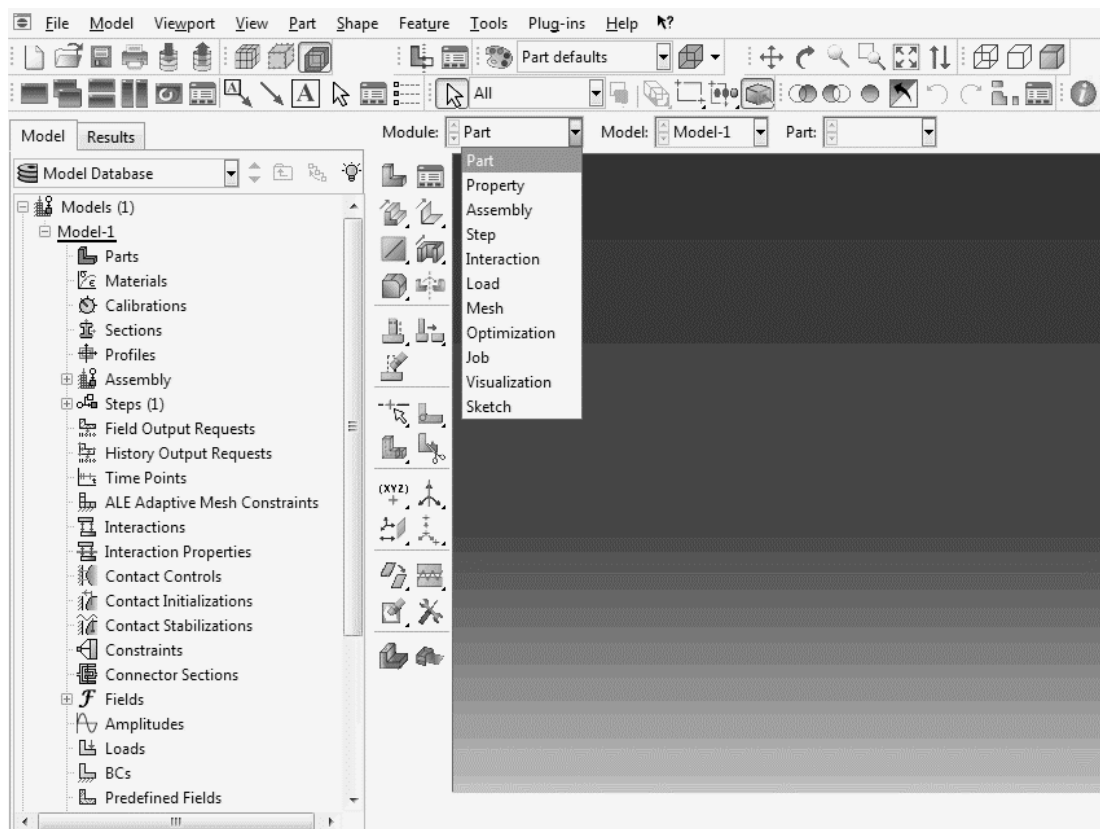
Sonlu elemanlar (SE) metodu, gelişen bilgisayar teknolojisi ile birlikte pek çok mühendislik problemlerine gerçekçi çözümler üreten sayısal/nümerik çözüm yöntemlerinden birisidir. SE metodu ilk olarak Courant (1943) tarafından 1943 yılında titreşim sistemlerine uygulanmıştır. Metot daha sonra farklı 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).

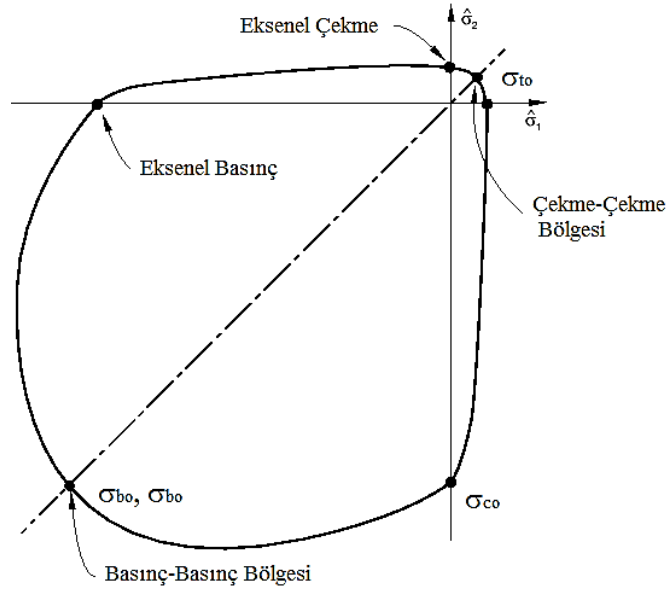
Ölçü Birimi	SI	SI (mm)
Uzunluk	m	mm
Kuvvet	N	N
Kütle	kg	ton
Zaman	S	s
Gerilme	Pa (N/m ²)	MPa (N/mm ²)
Enerji	J (N x m)	mJ (10 ⁻³ J)
Yoğunluk	kg/m ³	ton/m ³

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

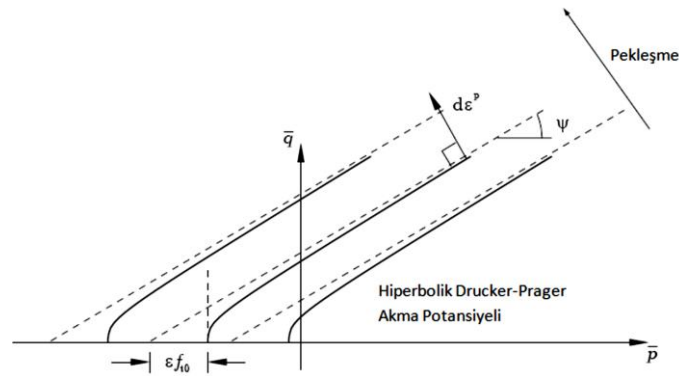
Kapalı (implicit) analiz yöntemlerinde doğrusal olmayan malzeme modelleri, malzemenin yumuşama ve rijitlik azalması davranışlarından dolayı büyük yakınsama problemleri (convergence) yaşayabilmektedir. Literatürde, malzeme modellerine vizkoplastik regülasyon uygulanmasının bu yakınsama problemlerini azaltacağı 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).

$$G = \sqrt{(\epsilon \cdot \sigma_{t0} \tan \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \cdot \tan \psi \quad (4.1)$$

Burada; ψ : dilasyon açısı, ϵ : akma yüzeyi eksantirisitesi, σ_{t0} : aksel çekme gerilmesi, \bar{q} : eşdeğer mises etkili gerilmesi ve \bar{p} : hidrostatik basınç gerilmesi olarak tanımlanmaktadır (Sümer, 2010).



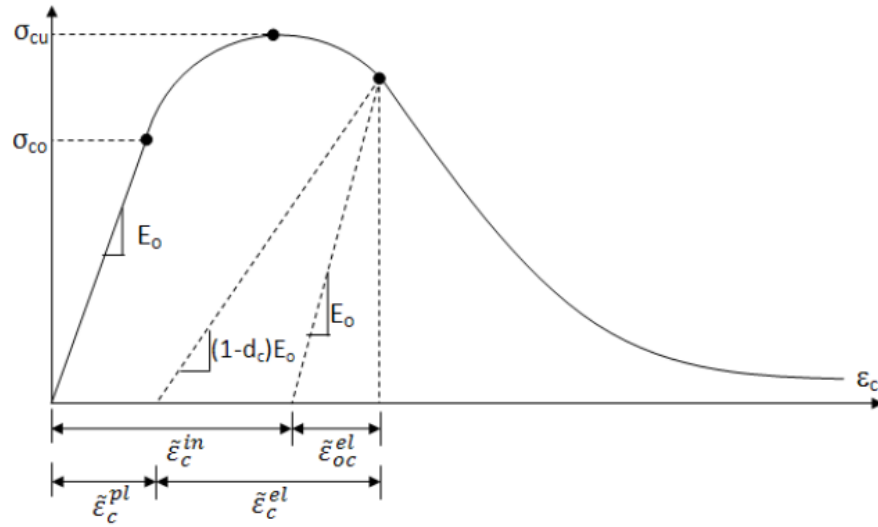
Şekil 4.3. Drucker-Prager plastik akma potansiyeli fonksiyonu (Sümer, 2010; Hibbitt ve ark., 2013).

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 modellenebilmesi 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.

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

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

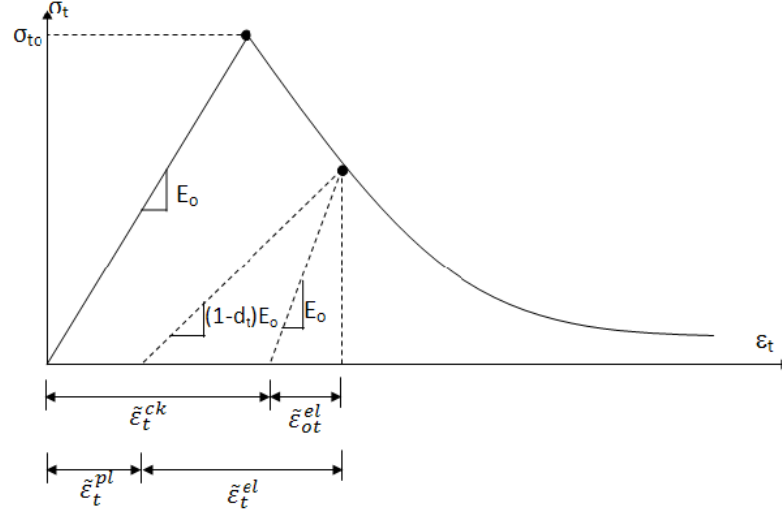
Denklemlerde; d_c : betonun basınç etkisi altındaki hasar parametresini göstermektedir. Bu parametre betonun, maksimum gerilme değerinden sonraki davranışında, gerilmenin zayıfladığı kısımdaki herhangi bir noktadan geri yükleme (unloading) yapıldığı durumlardaki elastik rijitlikteki azalmayı temsil etmektedir. 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 çatlağı oluşmaktadır. Çatlakların oluşması ve ilerlemesi ile birlikte, gerilme değerleri hızla azalmakta ve elemanda ani ve gevrek bir davranış gözlenmektedir. (Hibbitt ve

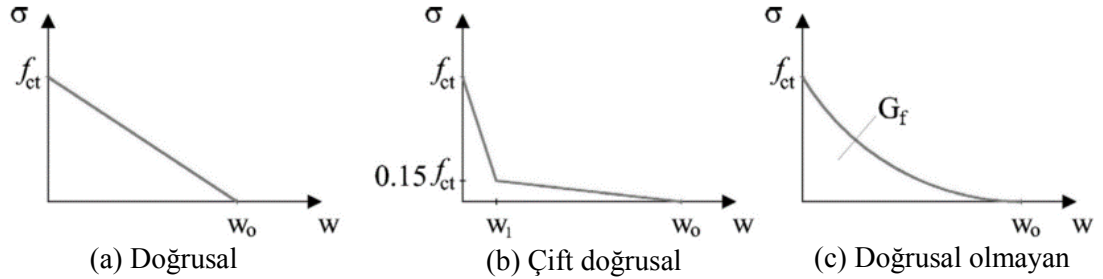
ark., 2013). Betonun bu davranışı çekme yumuşaması (tension softening) olarak isimlendirilmektedir.



Şekil 4.5. Betonun çekme davranışı (Hibbitt ve ark., 2013).

Geçmişte Saint Venant elastik teorisine göre betonun maksimum gerilme değeri sonrası davranışı ihmal edilmekteydi. Ancak bu kabul elemanın hasar dayanımının düşük hesaplanmasına yol açmaktadır. Bununla birlikte, doğrusal olmayan SE modellemesinde, elemanların çatlaklar arasındaki; şekildeğiştirme, aderans, kesme transferi ve çekme rijitliği gibi davranışlarının gerçekçi olarak modellenebilmesi için betonun çekme etkisi altındaki maksimum gerilme değeri sonrası davranışının dikkate alınması önemlidir (Gopalaratnam ve Shah, 1985). Betonun bu çekme yumuşaması davranışı, SE modeline yayılı çatlak modeli (smeared crack model) olarak tanımlanabilmektedir. Bu modelde çatlaklar sonlu parçalar üzerine yayılan paralel mikro çatlaklar olarak ifade edilmektedir. Bu yaklaşım çatlakların, malzeme modelindeki değişim ile tanımlanması ve çatlağın istediği doğrultuda ilerleyebilmesine imkân sağlaması sebebiyle betonarme elemanların nümerik olarak modellenmesinde oldukça kullanışlı ve gerçekçi bir yöntemdir (Karayannis, 2000). Betonun aksenal çekme etkisi altındaki maksimum gerilme sonrası davranışı, doğrusal, çift doğrusal ve doğrusal olmayan (üstel) olmak üzere 3 farklı şekilde tanımlanabilmektedir (Şekil 4.6.). Bu tez çalışmasında, literatürde doğrusal olmayan modelin daha gerçekçi sonuçlar verdiğinin belirtilmesi (Karayannis, 2000) sebebiyle üstel model kullanılmıştır. Bununla birlikte, Şekil 4.6.'da verilen G_f , çatlama enerjisi

(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 şekildeğiştirme 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).

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

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

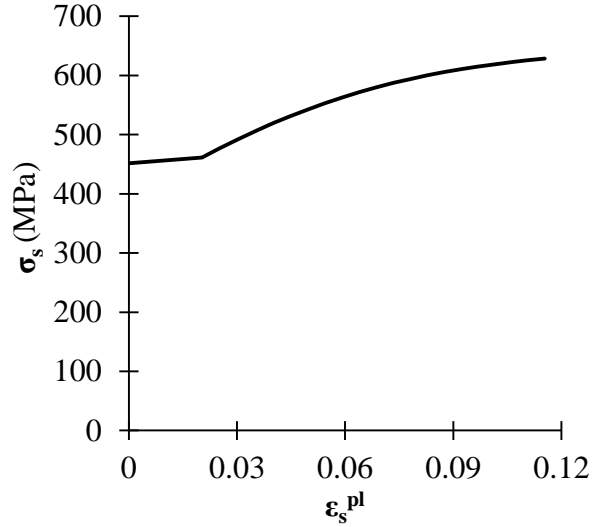
$$\varepsilon_t = \varepsilon_{t0} - w/l_{eq} \quad (4.10)$$

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 denklemler çözümü 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 aksenal 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 modellenebilmesi 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).

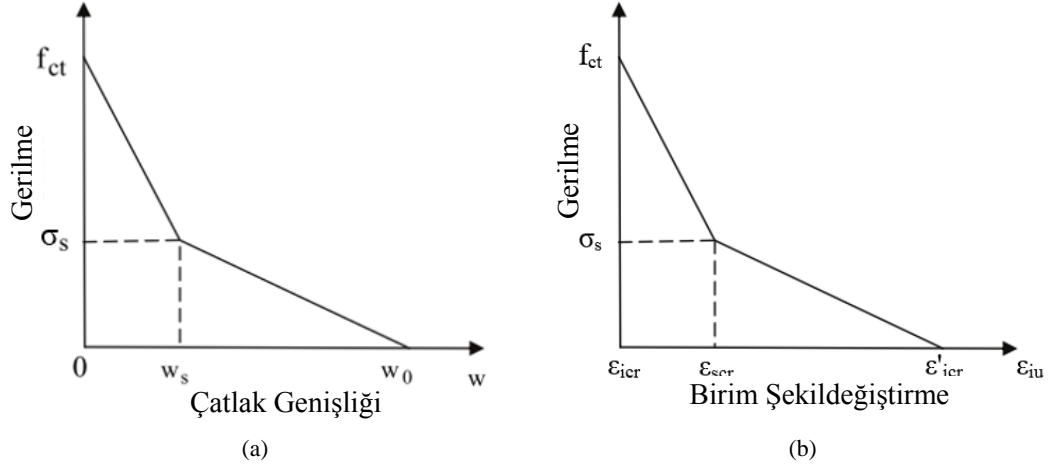
Gopinath ve arkadaşları (2009) tarafından önerilen yöntemde, betonun çekme yumuşaması davranış modeli olarak Petersson (1981) tarafından önerilen iki parçalı (bilinear) davranış modeli (Şekil 4.8.) temel alınmıştır. Bu davranış “gerilme – çatlak genişliği ($\sigma_t - w$)” cinsinden tanımlanmış olup, 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.

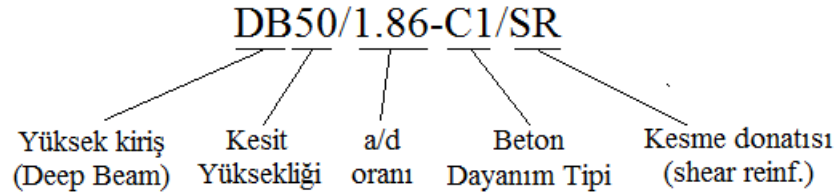
BÖLÜM 5. MATERYAL VE YÖNTEM

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

sıyrılmasını 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.

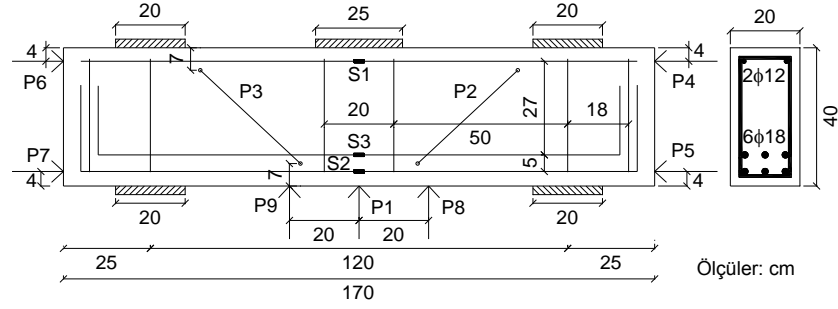


Şekil 5.1. Numune isimlendirilmesi.

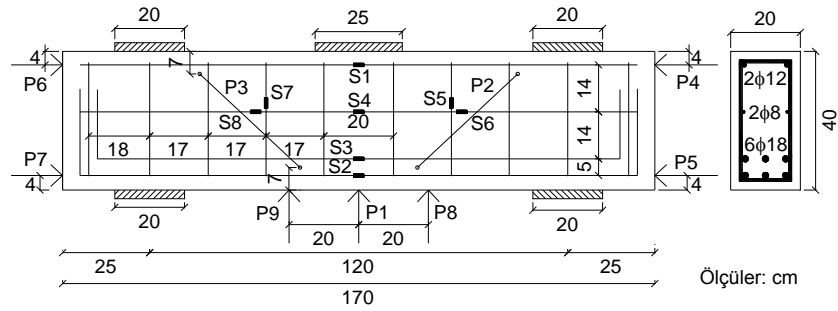
Tablo 5.1. Numunelerin boyut ve malzeme özellikleri.

#	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

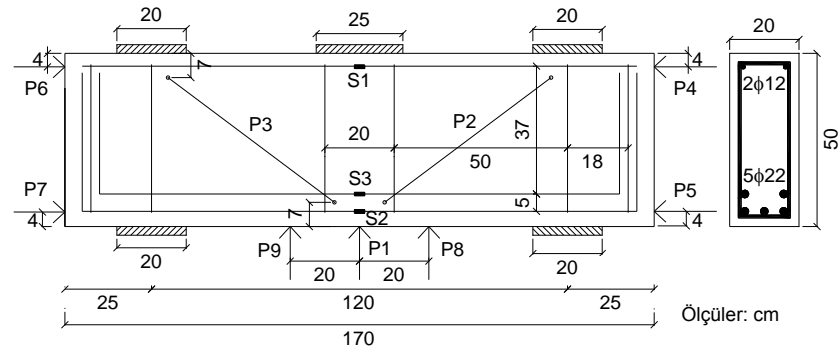
Tüm numunelerde; kiriş genişliği, $b_w=200$ mm, etriye ve gövde donatısı çapı $\varnothing 8$ mm, yük ve mesnet plakası genişlikleri sırasıyla 250 mm ve 200 mm, ve paspayı, $c_c=25$ mm olacak şekilde sabit alınmıştır. Deney numunelerinin görünüş, kesit ve donatı çizimleri Şekil 5.2. ile Şekil 5.11. arasında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



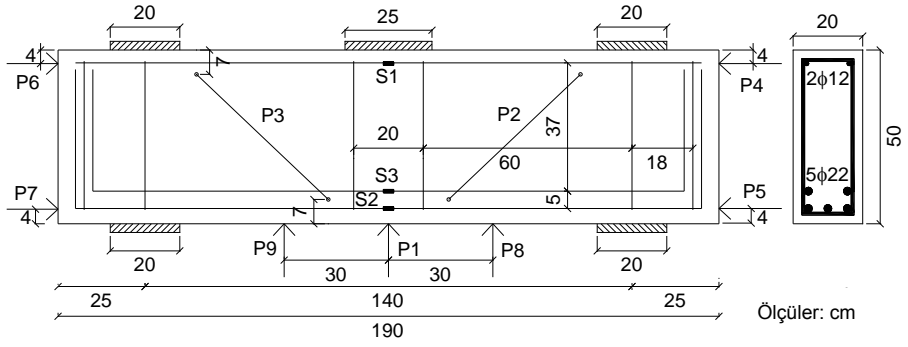
Şekil 5.2. DB40/1.86-C1, DB40/1.86-C2 ve DB40/1.86-C3 numunelerinin görünüş ve donatı çizimi.



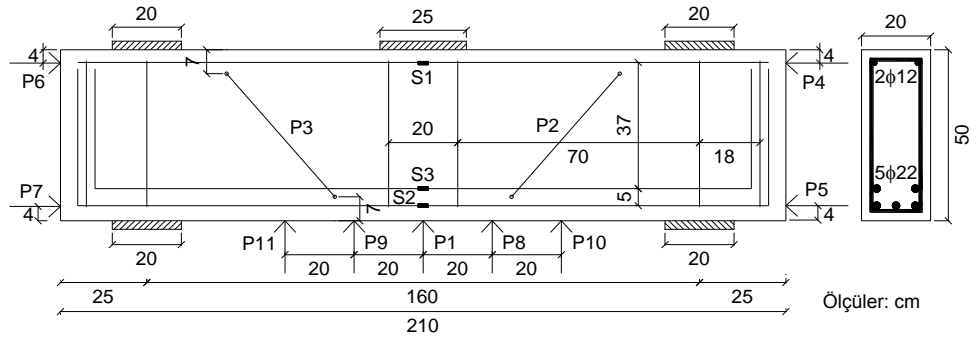
Şekil 5.3. DB40/1.86-C1/SR numunesinin görünüş ve donatı çizimi.



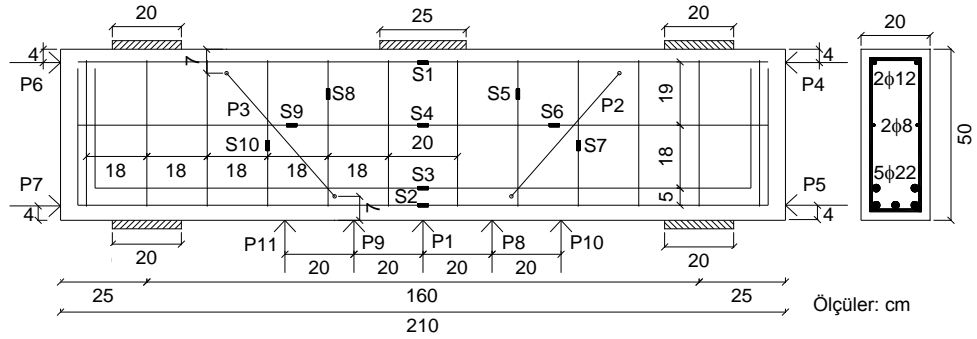
Şekil 5.4. DB50/1.40-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi.



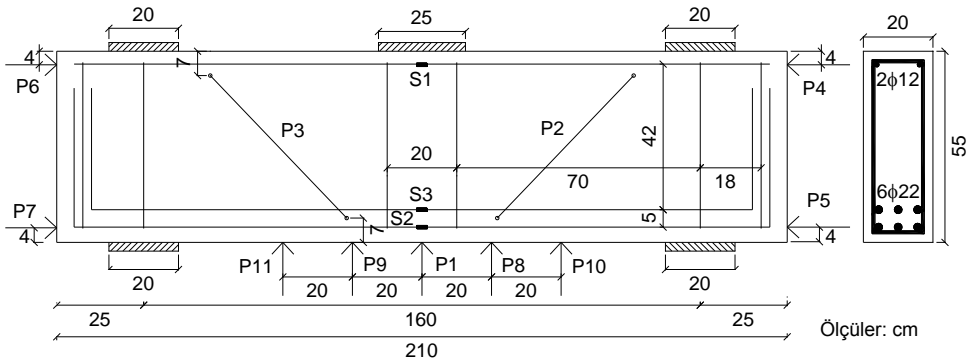
Şekil 5.5. DB50/1.63-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi.



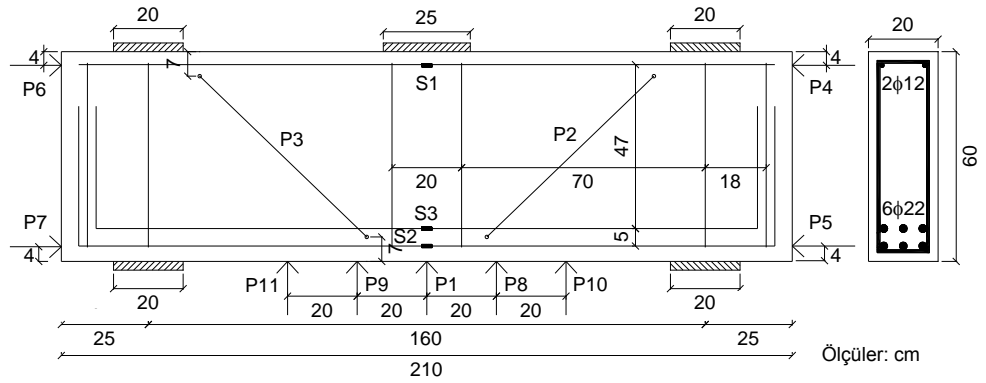
Şekil 5.6. DB50/1.86-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi.



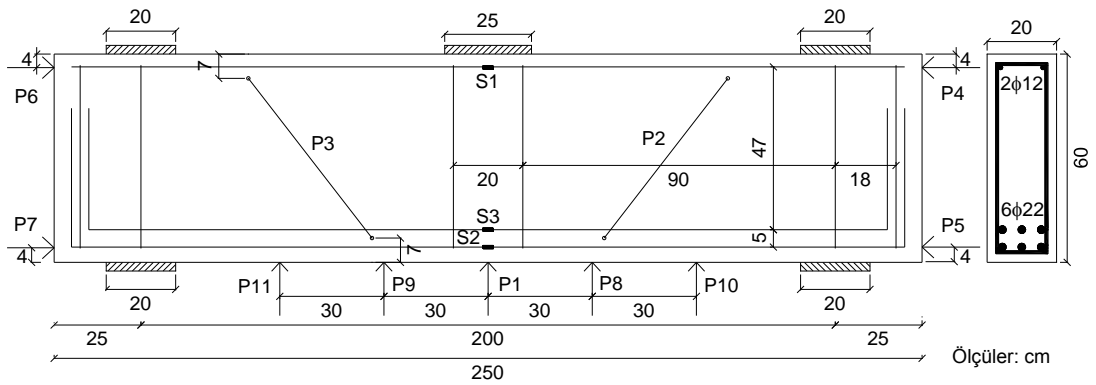
Şekil 5.7. DB50/1.86-C1/SR numunesinin görünüş ve donatı çizimi.



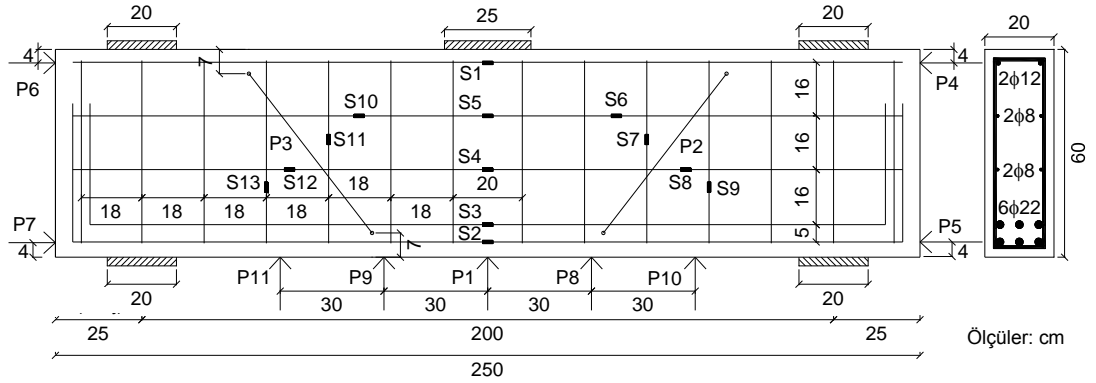
Şekil 5.8. DB55/1.67-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi.



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.).



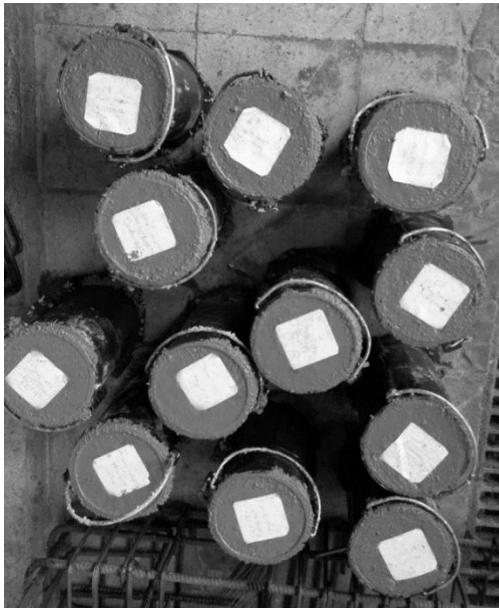
Şekil 5.13. Betonun kalıba yerleştirilmesi.

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.

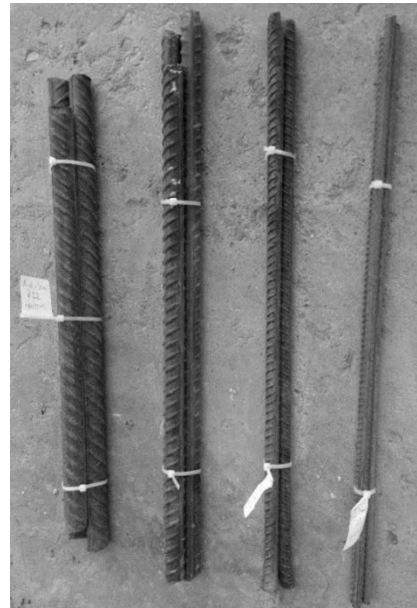


Şekil 5.14. Kalıbı sökülmüş deney numuneleri.

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.

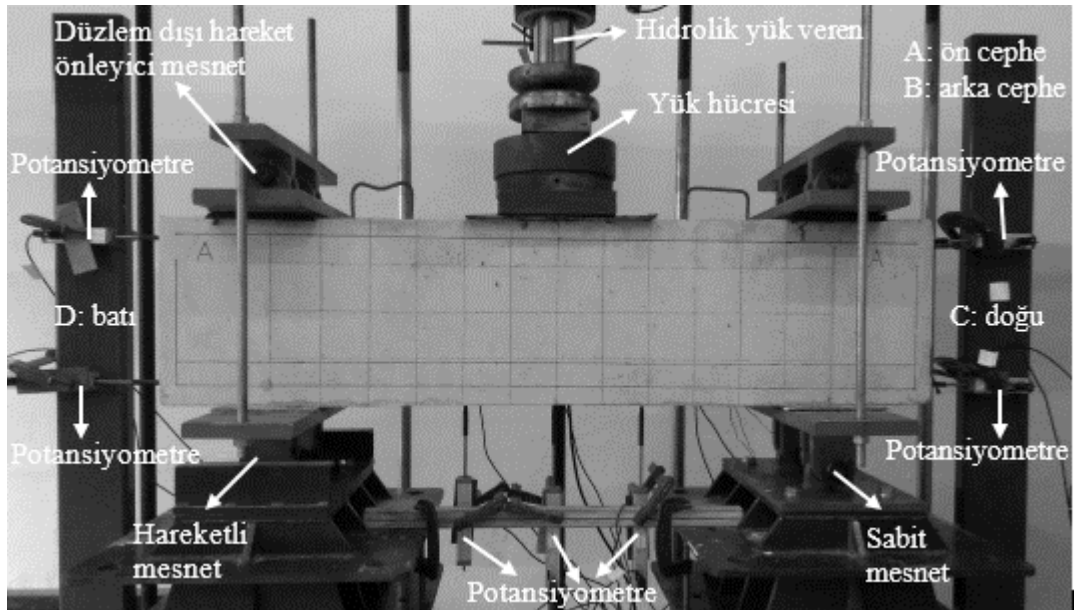


(a) Beton presi

(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.

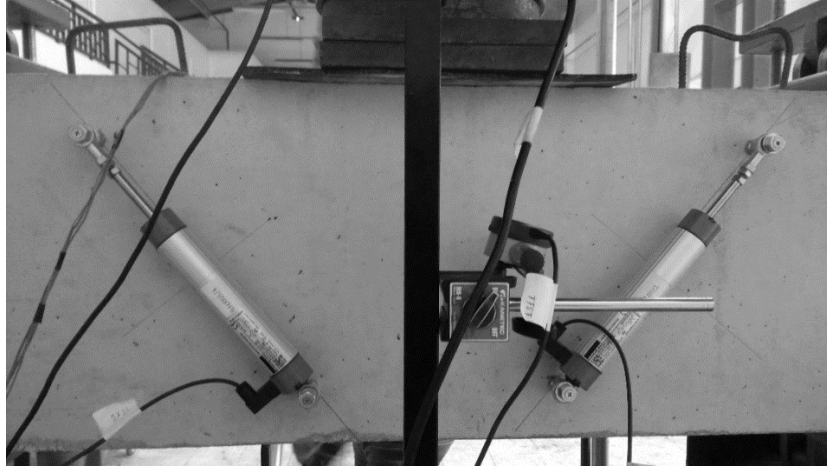
Numunenin çelik mesnet plakasına düzgün bir şekilde oturması ve yükün eşit bir şekilde numuneye aktarılabilmesi için yük ve mesnet plakaları ile numune arasında kalınlığı yaklaşık 5 mm olan kauçuk malzemeden üretilmiş plakalar yerleştirilmiştir. Bu şekilde numune yüzeyinde bulunabilecek pürüzlülük nedeniyle 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 yer değiştirme 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.

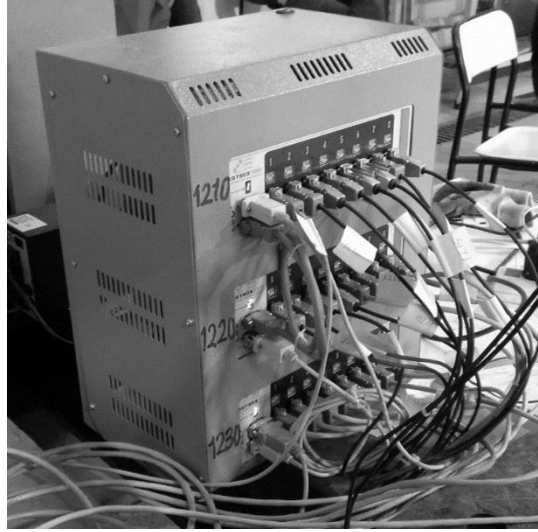


Şekil 5.21. Çatlak ölçerler ve yerleşimleri.

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.



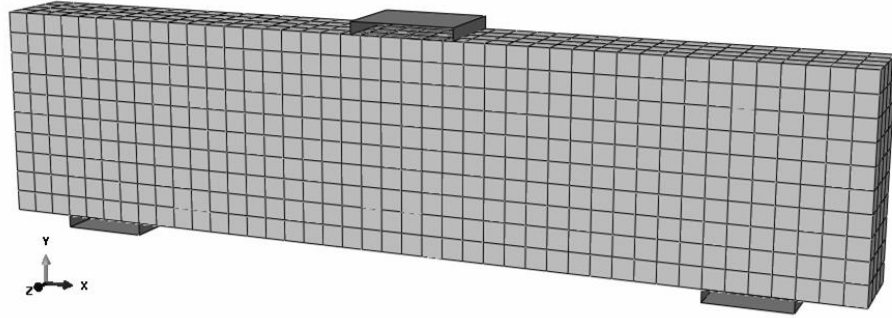
Şekil 5.22. Veri toplama cihazı.

5.2. Nümerik Modelleme

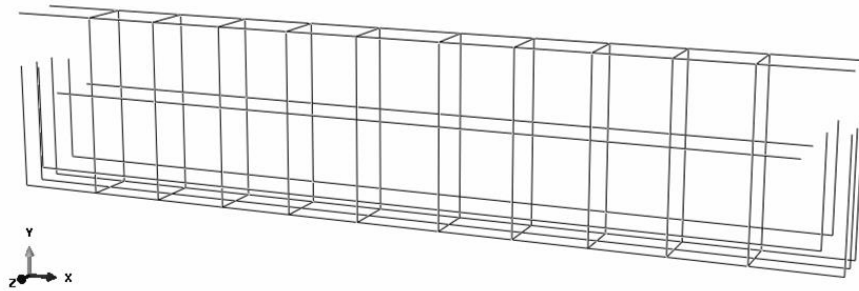
Nümerik modelleme için ABAQUS (2013) sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Öncelikle programın part (parça) modülü altında modeli oluşturan beton, donatı, yük ve mesnet plakaları modellenmiştir. Beton ve donatılar sırasıyla 3D katı (solid) ve çubuk elemanlar (truss) kullanılarak oluşturulmuştur. Daha 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.

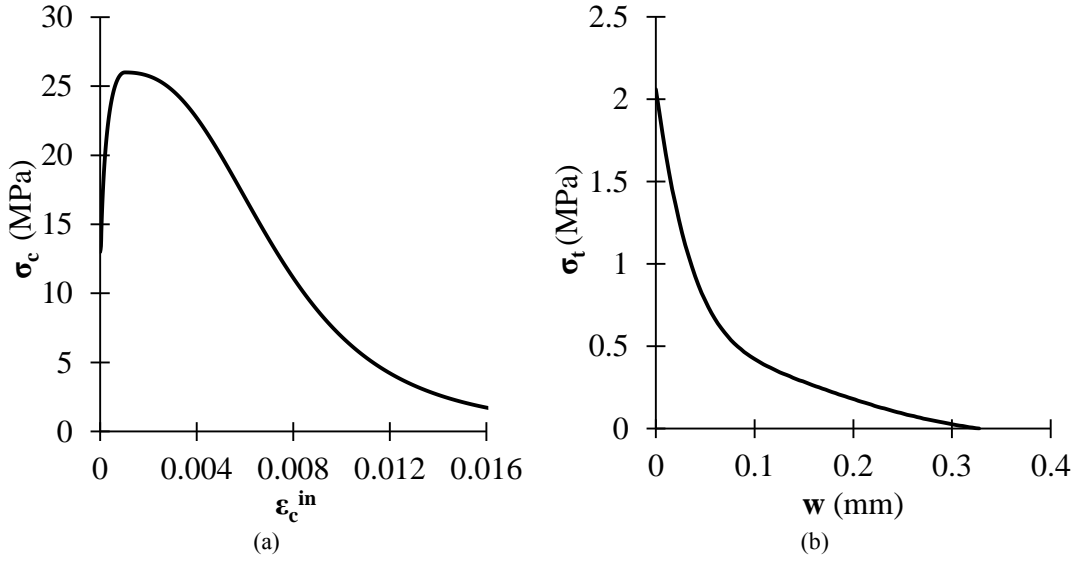
Tablo 5.3. BHP modeli temel parametreleri.

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

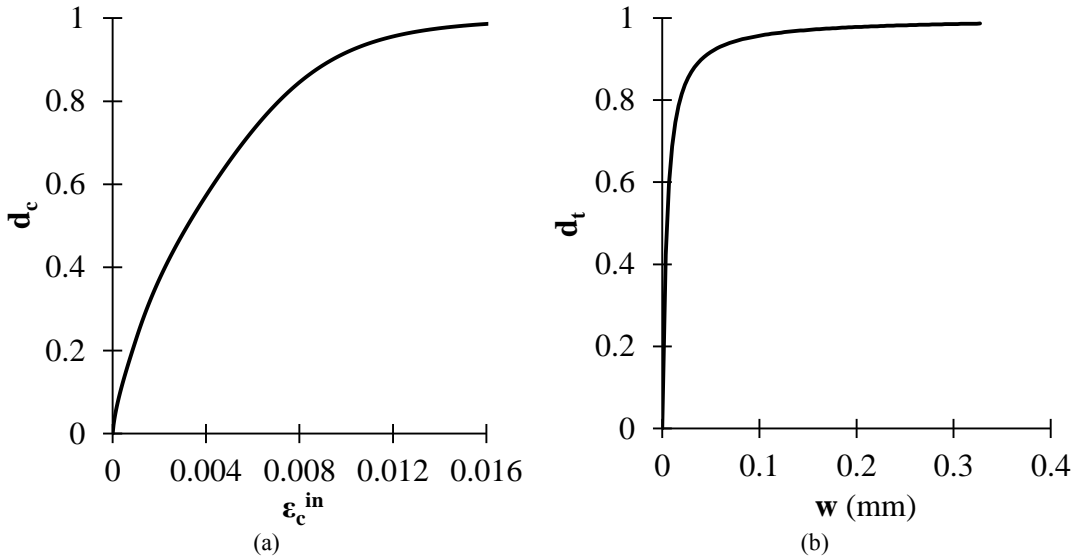
Betonun basınç altındaki davranışı; gerilme – inelastik birim şekildeğiştirme ($\sigma_c - \epsilon_c^{in}$) cinsinden, çekme etkisi altındaki davranışı ise gerilme – çatlak genişliği ($\sigma_t - w$) cinsinden tanımlanmıştır (Şekil 5.25.). Ayrıca basınç ve çekme etkisi altındaki hasar parametresi davranışını 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.

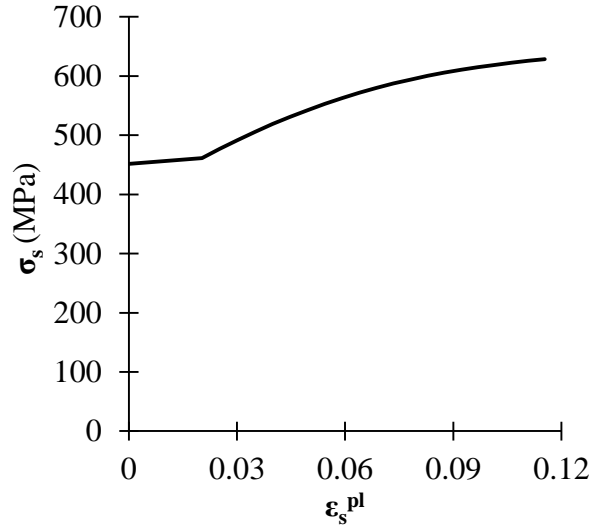


Şekil 5.26. Betonun basınç (a) ve çekme (b) etkisindeki hasar parametresi grafikleri.

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.

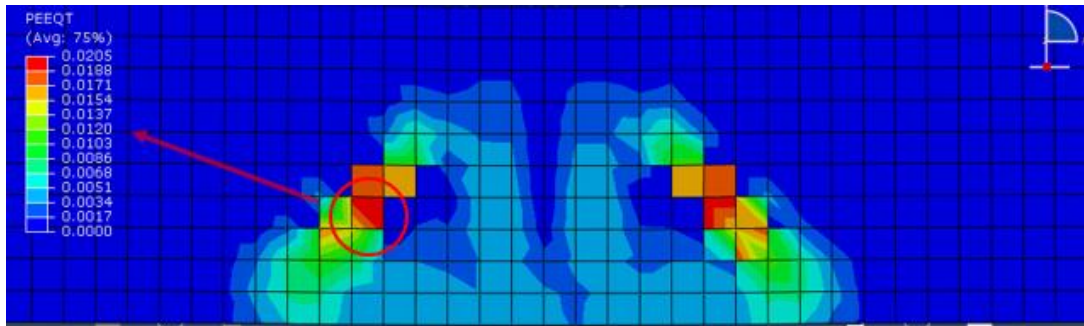
5.3. Çatlak Genişliğinin Belirlenmesi

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.

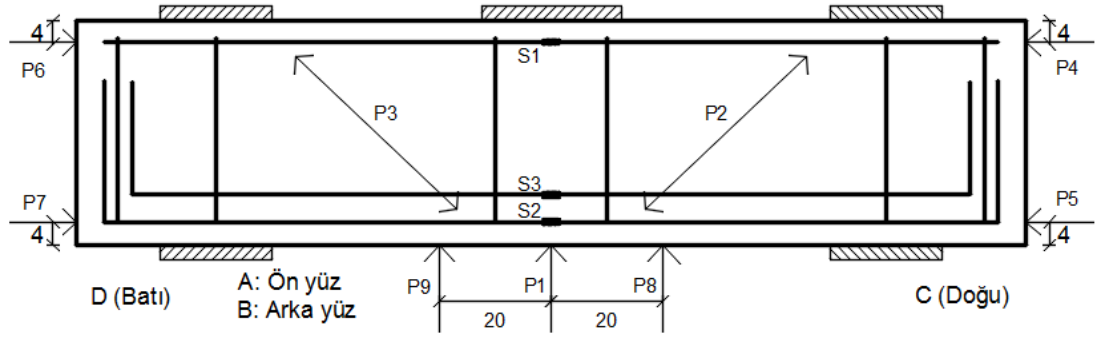
#	Numune Adı	h mm	a mm	a/d	l_t mm	ρ_l	Çekme donat.	ρ_v	Etriye	ρ_h	Gövde donat.	f_{ck} MPa
1	DB50/1.84- C1/SR-1	500	800	1.84	1600	0.0146	5 ϕ 18	0.0057	ϕ 8/87	0.0064	ϕ 8/79	18.1
2	DB50/1.75- C1/SR-2	500	800	1.75	1600	0.0125	3 ϕ 22	0.0057	ϕ 8/87	0.0060	ϕ 8/83	18.1
3	DB50/1.75- C1/SR-3	500	800	1.75	1600	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.

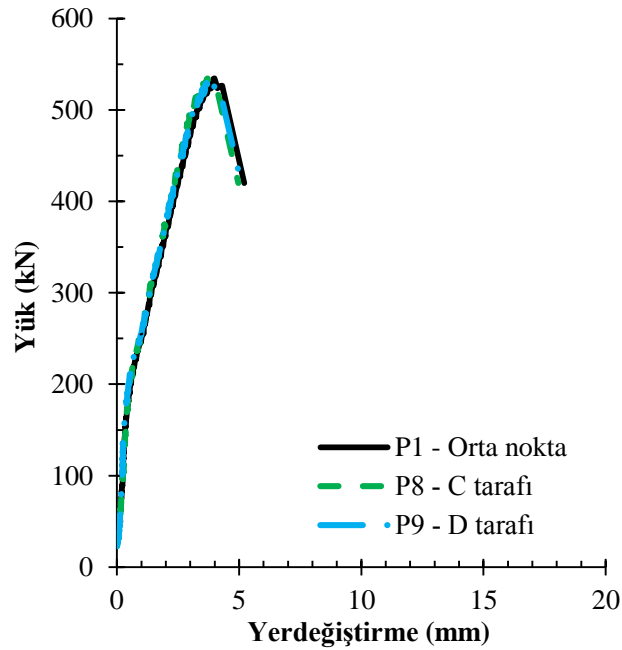
BÖLÜM 6. DENEYSEL VE NÜMERİK ÇALIŞMA SONUÇLARI

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 şekildeğiştirmesi değerleri ölçülmüştür. Bununla birlikte numune, deney düzeneğine alt ve üst mesnet plakası arasında yerleştirilmiş olup bu iki mesnet plakası miller vasıtalıyla 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.



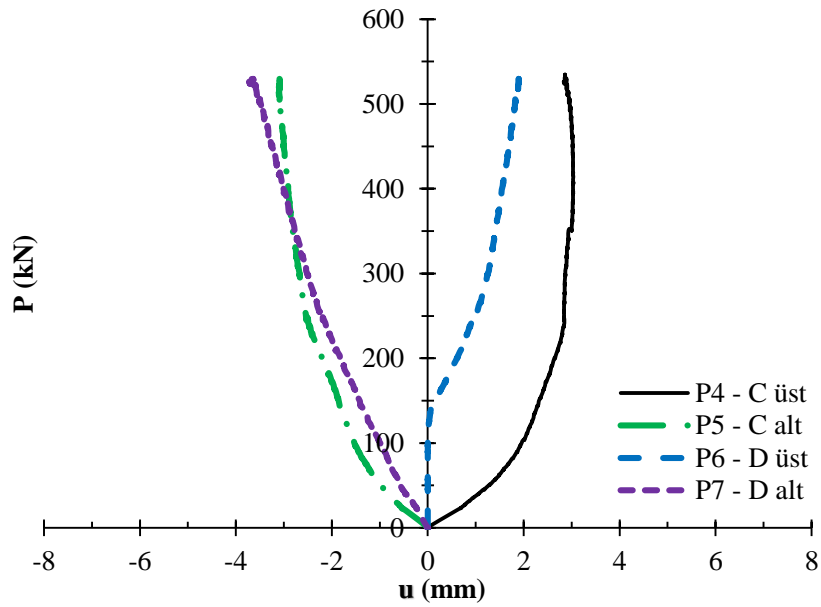
Şekil 6.1. Deney numunesinden ölçüm yapılan noktalar.

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.



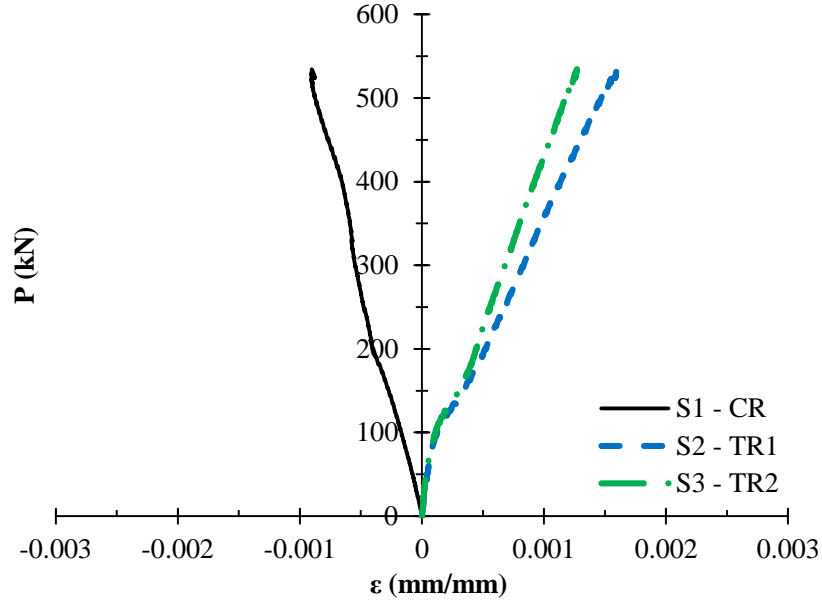
Şekil 6.2. Yük – düşey yerdeğiştirme davranış grafiği.

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.

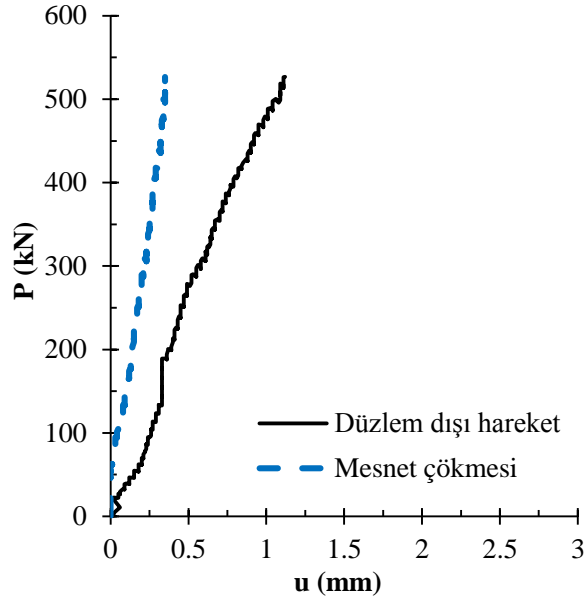
Çekme ve basınç donatılarına yapıştırılan gerinim pullarından ölçülen “yük – birim şekildeğiştirme” davranış grafikleri Şekil 6.4.’te verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi, basınç ve çekme donatılarında akma gözlenmemiştir. Maksimum donatı birim şekildeğiştirmesi % 0,10 mertebesinde elde edilmiştir.



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.

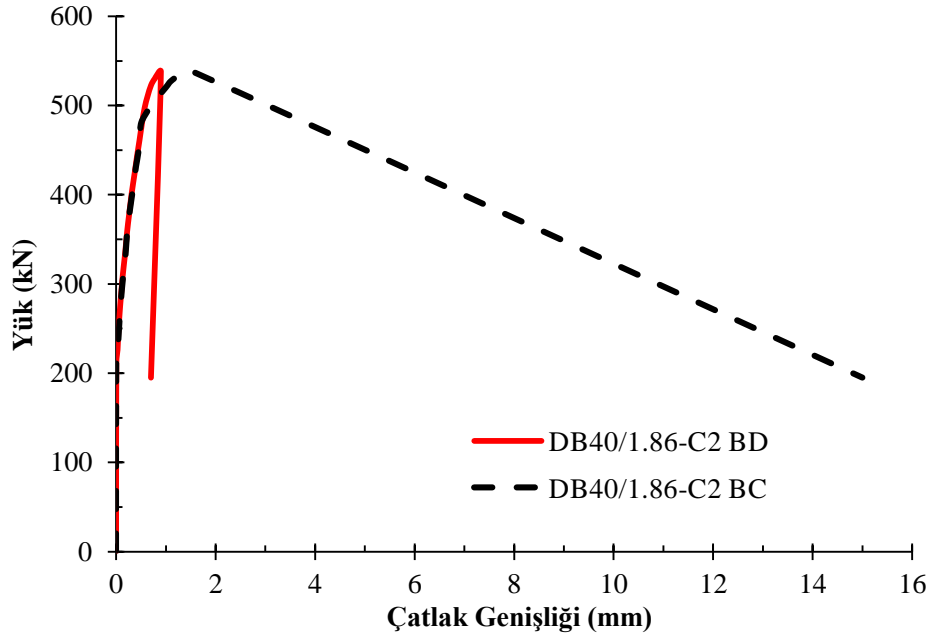
Sonuç olarak, numune üzerinde düşey ve yatayda ölçülen yük – yer değiştirme, donatılardan ölçülen yük – birim şekil değiştirme, kiriş gövdesinden ölçülen yük – düzlem dışı yer değiştirme ve mesnetten ölçülen yük – mesnet çökmesi davranış grafikleri bir bütün olarak incelendiğinde; elde edilen yer değiştirme 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

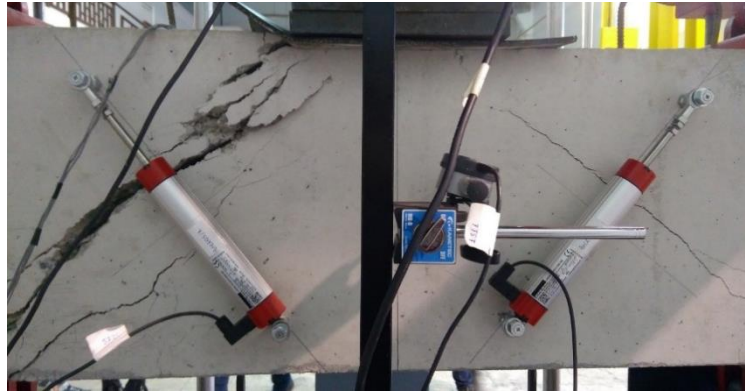
DB40/1.86-C2 deney numunesi üzerinde, eğik kesme çatlak genişliklerinin ölçülmesi amacıyla yerleştirilen çatlak ölçerlerden elde edilen sonuçlar Şekil 6.6.'da örnek olarak gösterilmiştir. Numunede deney sonucunda elde edilen hasar mekanizması A yüzü (ön) ve çatlak ölçerlerin yerleştirildiği B yüzü (arka) 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).

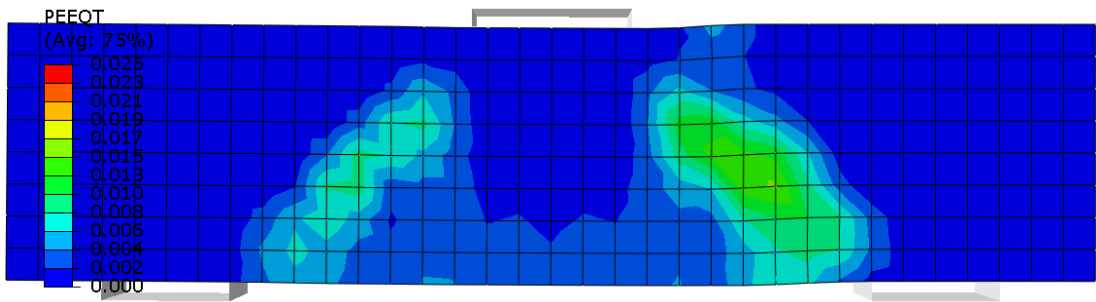


(b) B yüzeyi (arka).

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.).



(a)

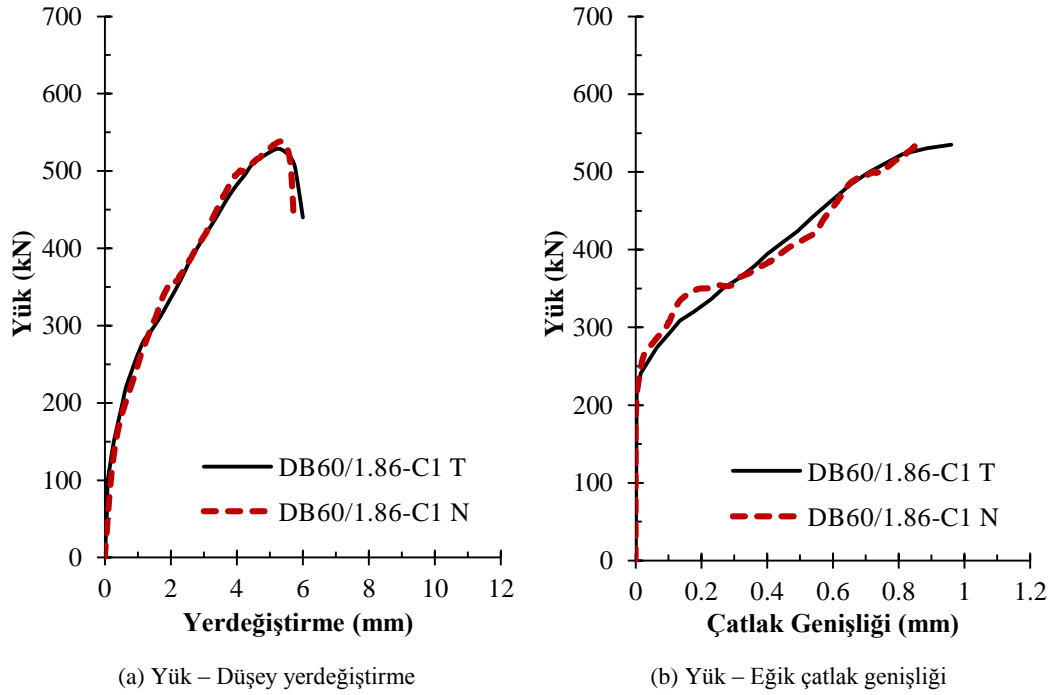


(b)

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.



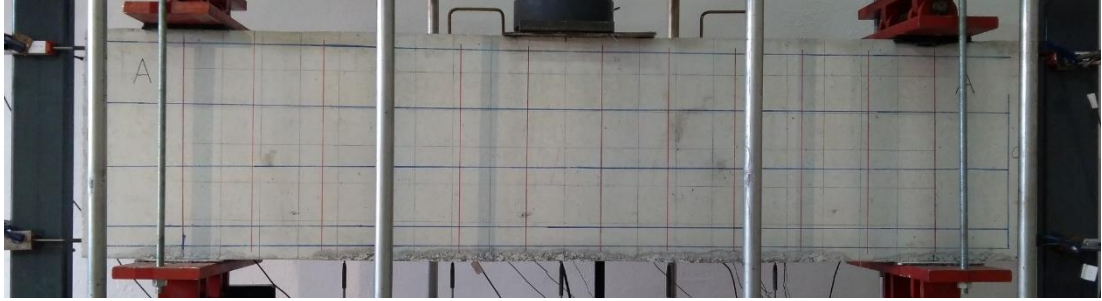
Şekil 6.10. DB60/1.86-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

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.).



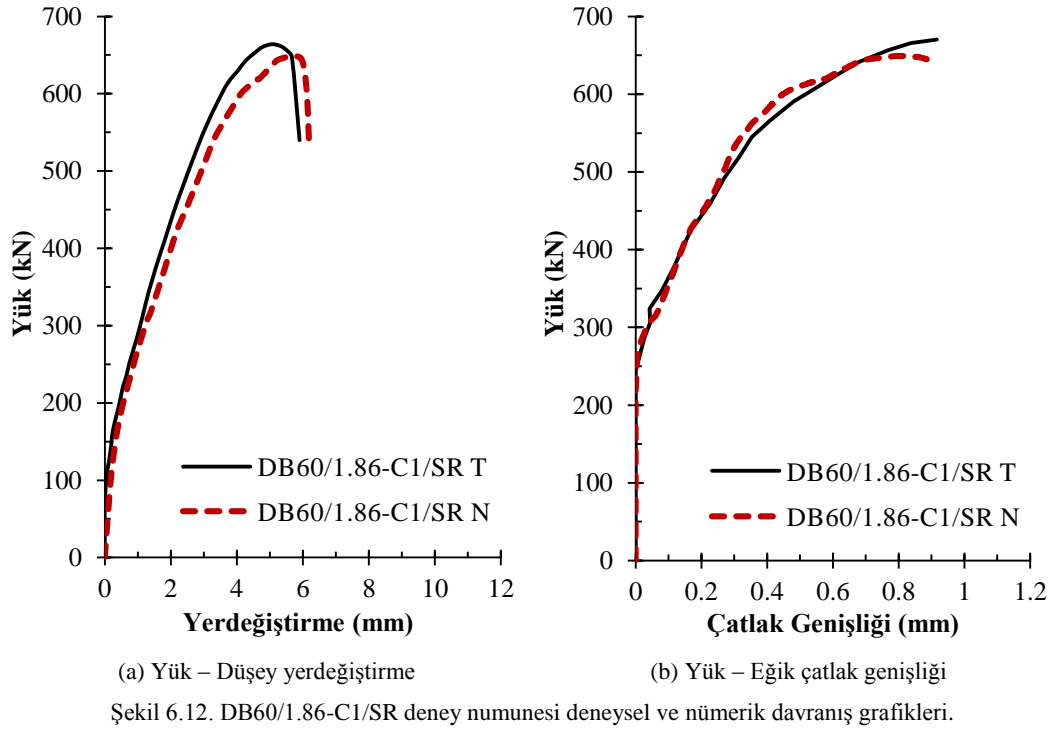
(a)



(b)

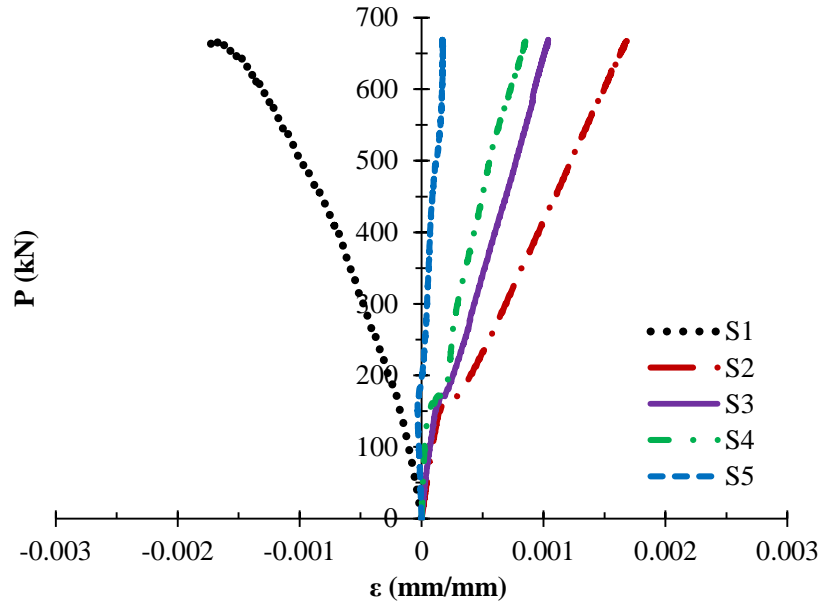
Şekil 6.11. DB60/1.86-C1/SR numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.

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.



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.

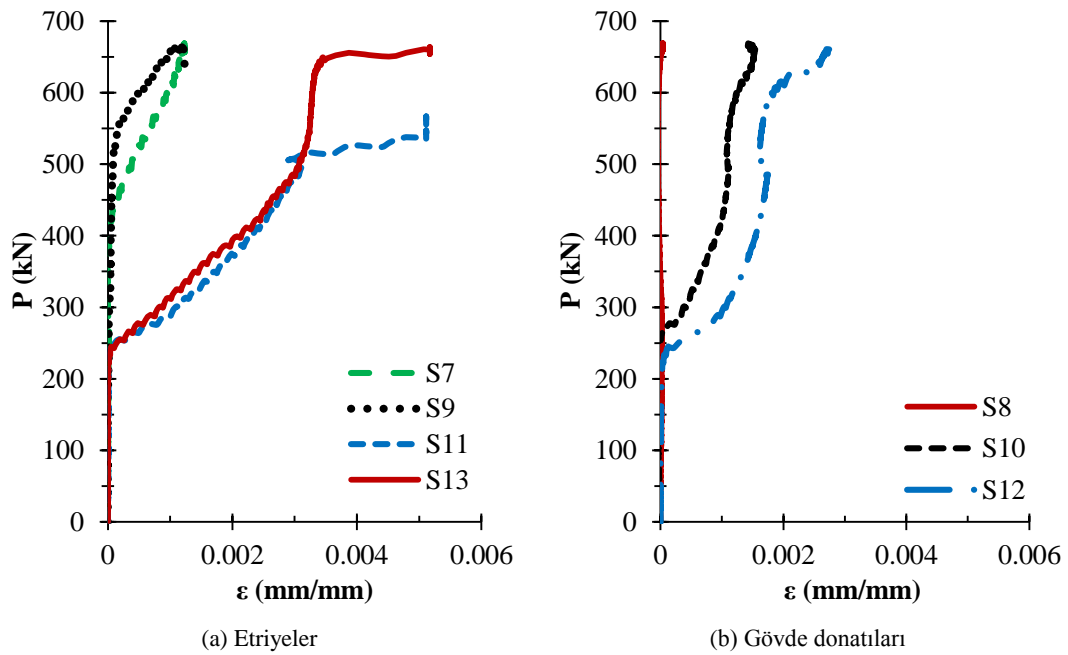


Şekil 6.13. DB60/1.86-C1/SR deney numunesi orta ekseni hizasındaki donatıların birim şekildeğiştirme eğrileri.

Deney esnasında numunenin çatlak (basınç çubuğu) eksenine denk gelen etriyelere yapıştırılan gerinim pullarından (Şekil 5.11.) ölçülen $P - \varepsilon_s$ 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.

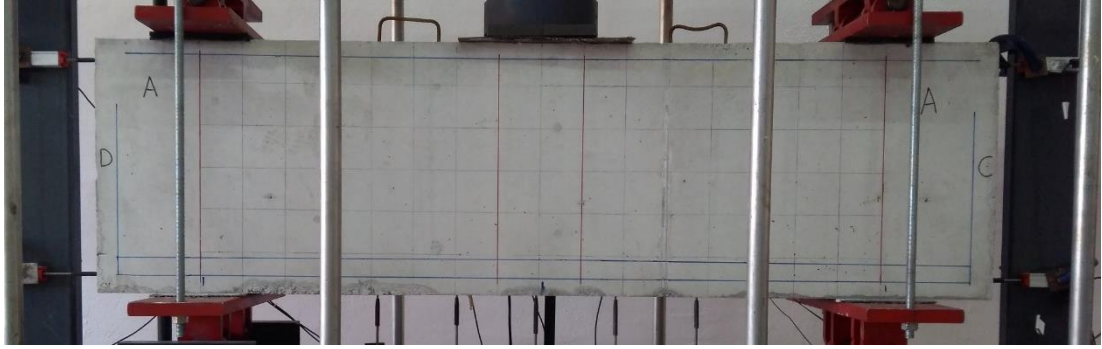


Şekil 6.14. DB60/1.86-C1/SR deney numunesi çatlak eksenine paralel bulunan donatıların davranışı.

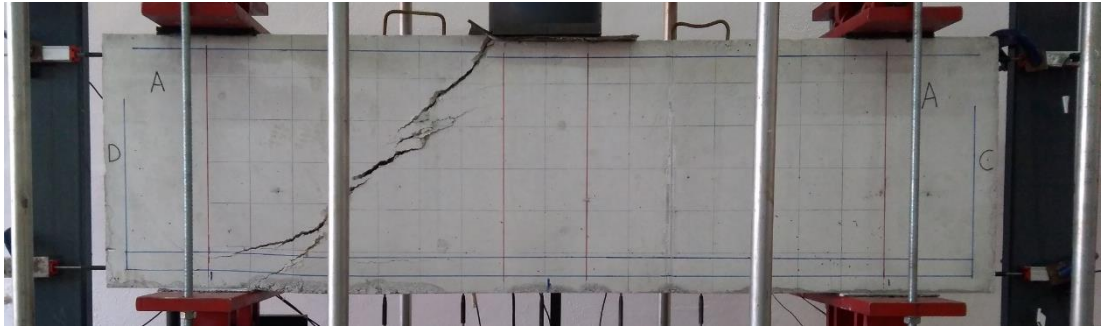
Son olarak, nümerik modelden elde edilen yük – düşey yerdeğiştirme ve yük – çatlak genişliği davranış grafikleri (Şekil 6.12.) deney sonuçları ile karşılaştırıldığında, nümerik modelin deney sonucunu oldukça başarılı ve etkin bir şekilde temsil ettiği görülmüştür.

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.).



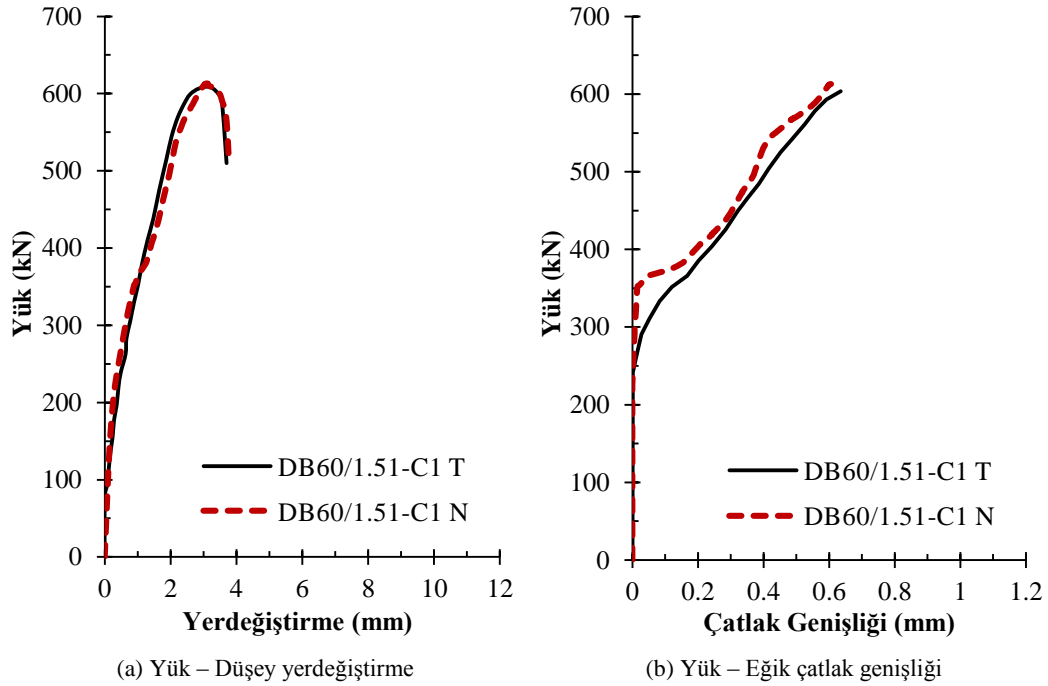
(a)



(b)

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.

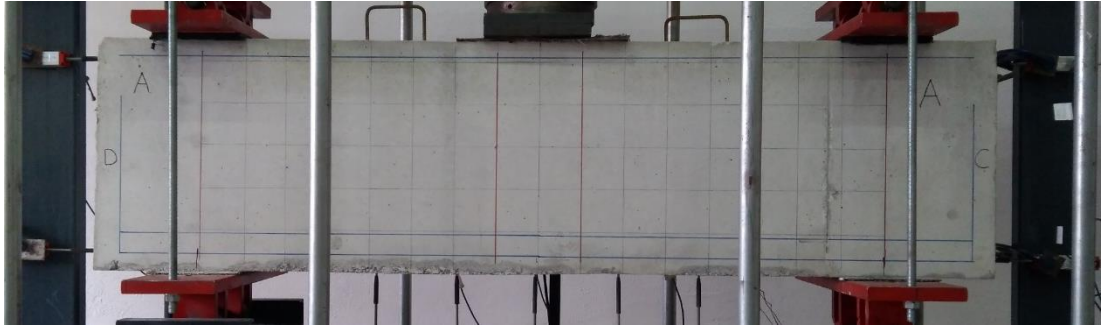
Yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği (Şekil 6.16.) incelendiğinde, P_{cr} aşıldığında elemanda kesme çatlakları oluşmuş ve uygulanan yükün artışı ile birlikte çatlak genişliği de giderek artmıştır. Maksimum yüke karşılık gelen maksimum çatlak genişliği 0,64 mm olarak elde edilmiştir.

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.

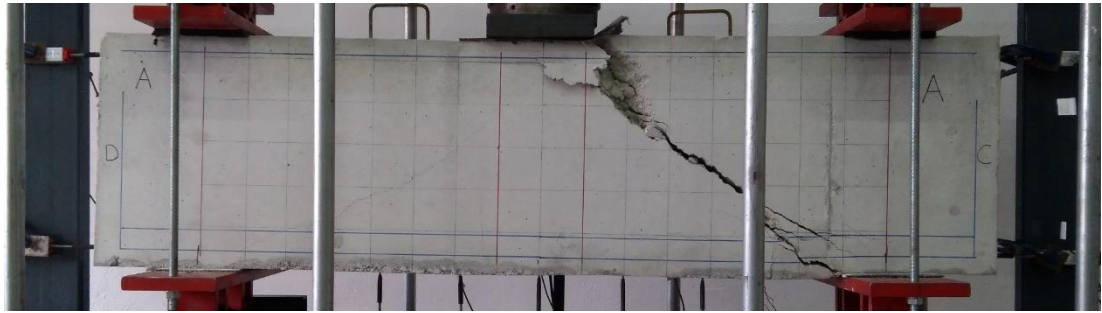
6.2.4. DB55/1.67-C1 deney numunesi

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 eksenini (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.).



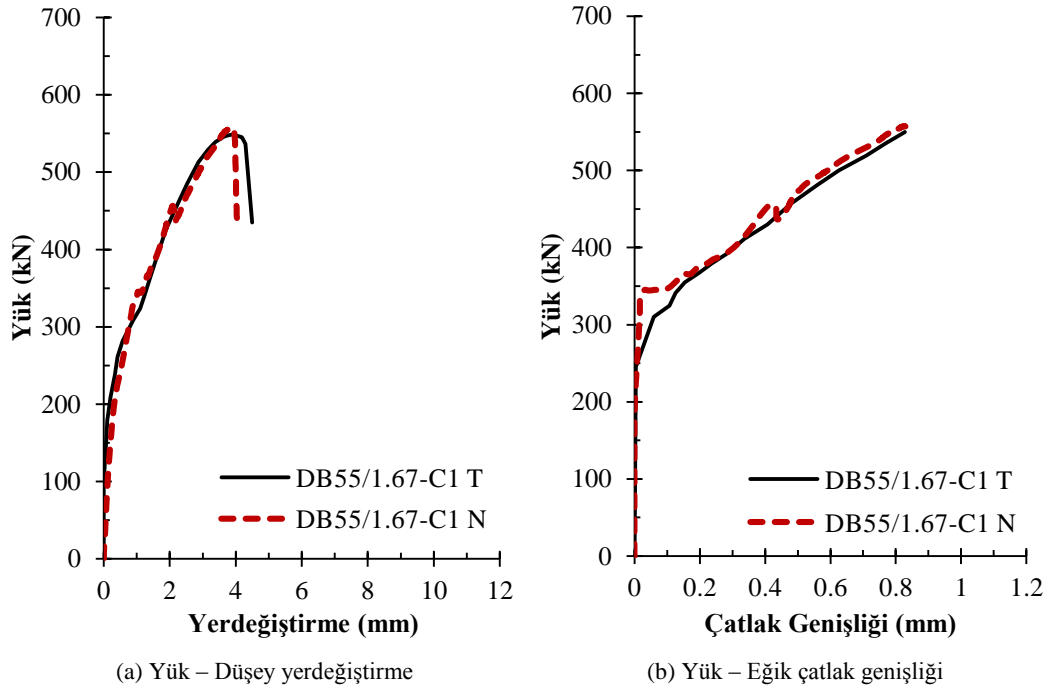
(a)



(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.



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.

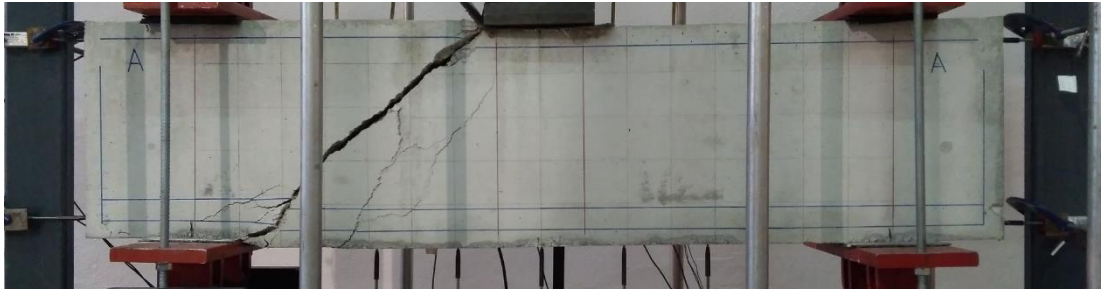
6.2.5. DB50/1.86-C1 deney numunesi

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.).



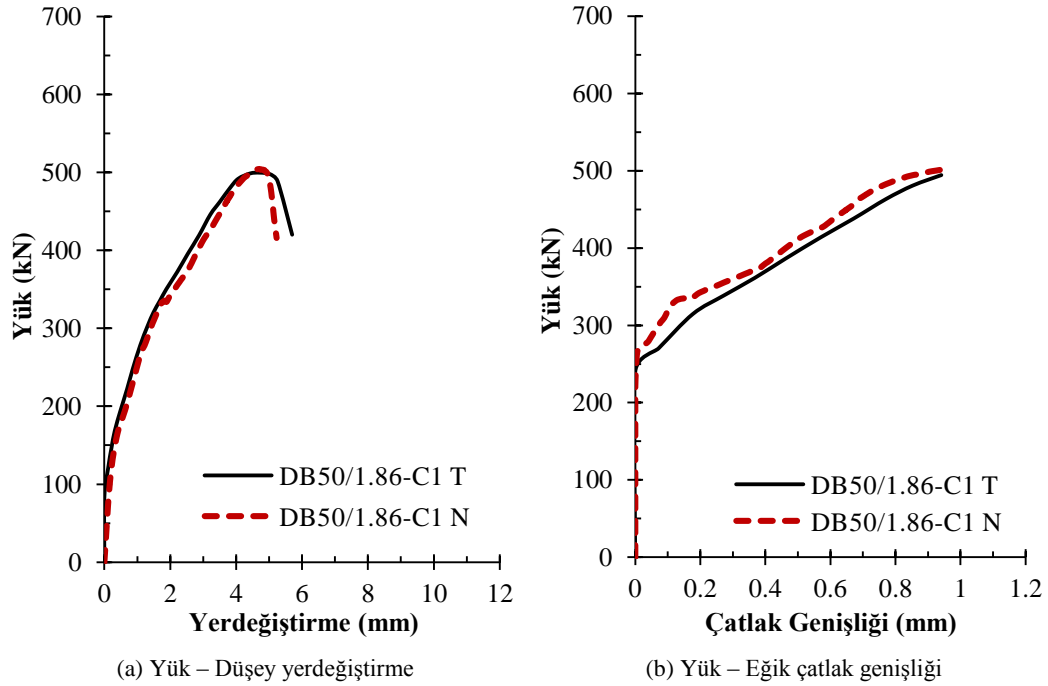
(a)



(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.

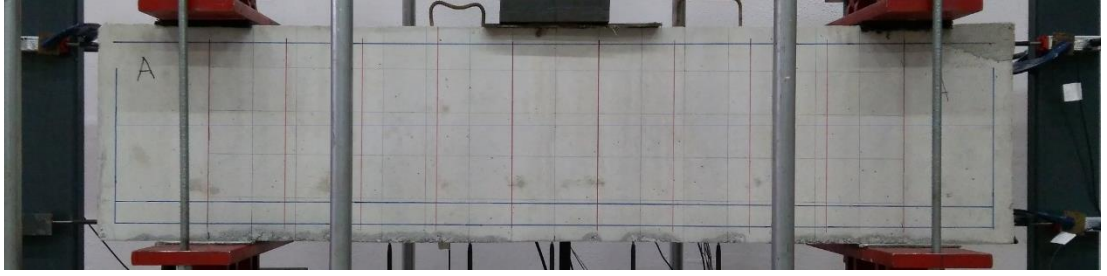
Numunenin yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği incelendiğinde, kritik kesme yükü aşıldığında elemanda kesme çatlakları oluşmuş olup uygulanan yükün artışı ile birlikte çatlak genişliği giderek artmıştır. Maksimum yüke karşılık gelen maksimum çatlak genişliği 0,94 mm olarak elde edilmiştir.

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.

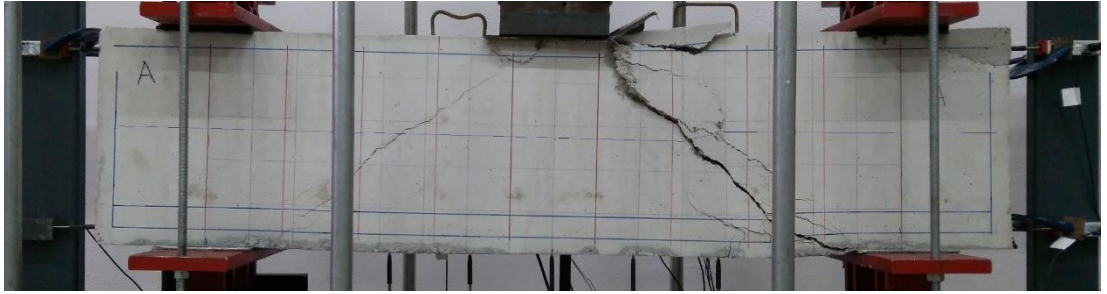
6.2.6. DB50/1.86-C1/SR deney numunesi

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 ekseninde eğik kesme çatlak oluşumu gözlenmiştir. Yükün artışı ile birlikte oluşan kesme çatlak genişlikleri giderek artmış ancak eğilme çatlak oluşmamıştır. Deney sonucunda, basınç çubuğu (strut) maksimum dayanımına ulaşarak kırılması ile numunede ani ve gevrek kesme hasarı oluşmuştur (Şekil 6.21.).



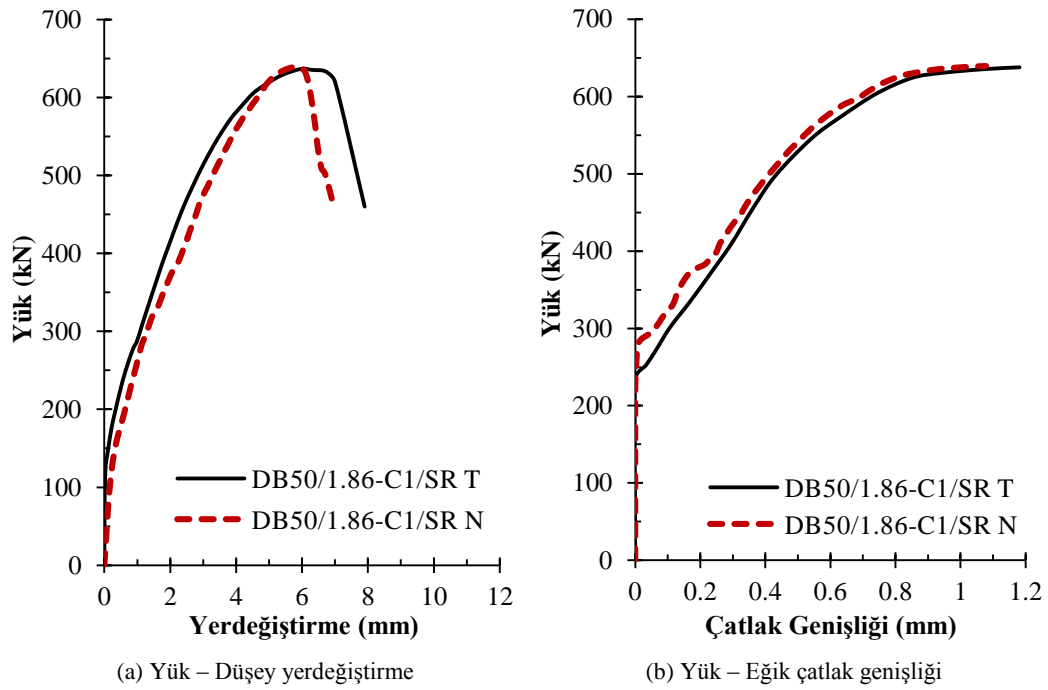
(a)



(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 çatlak 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.

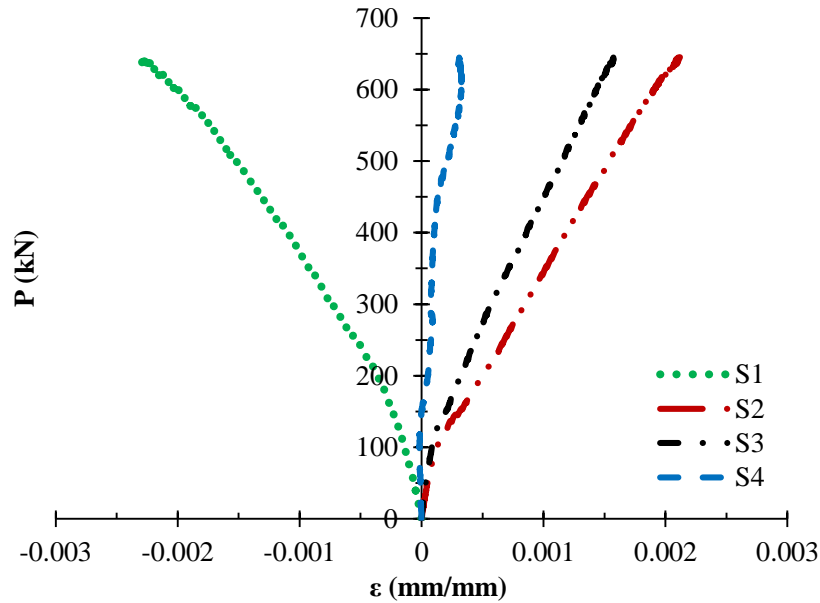


Şekil 6.22. DB50/1.86-C1/SR deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

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.

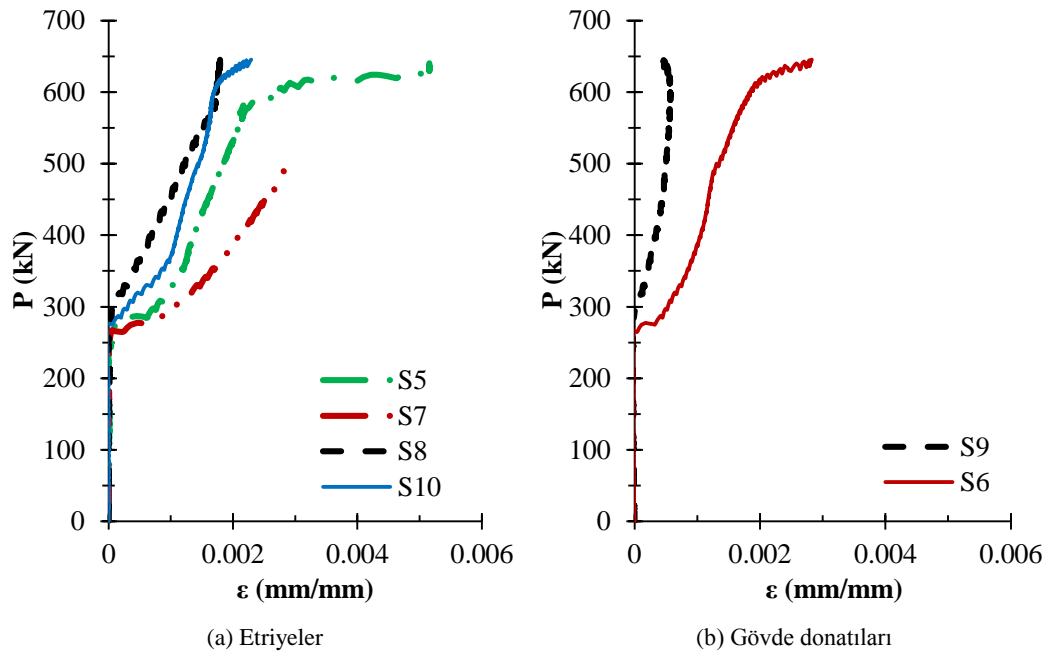
Kesme donatısı içeren bu numunede, çekme ve basınç donatılarına ilave olarak etriye ve gövde donatılarına da gerinim pulları yapıştırılmıştır (Şekil 5.7.). Elemanın, uygulanan yükün altında kalan orta noktası eksenine hizasına denk gelen basınç (S1), çekme (S2 ve S3) ve gövde (S4) donatılarına yapıştırılan 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.



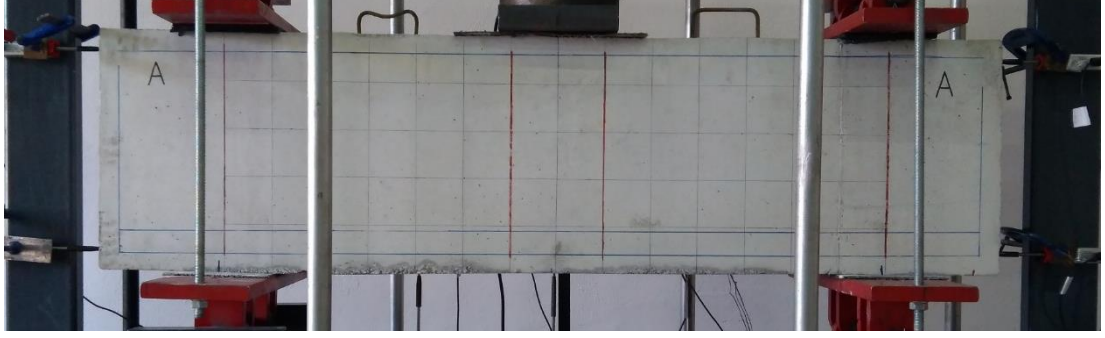
Şekil 6.24. DB50/1.86-C1/SR deney numunesi çatlak eksenine paralel bulunan donatıların davranışı.

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.

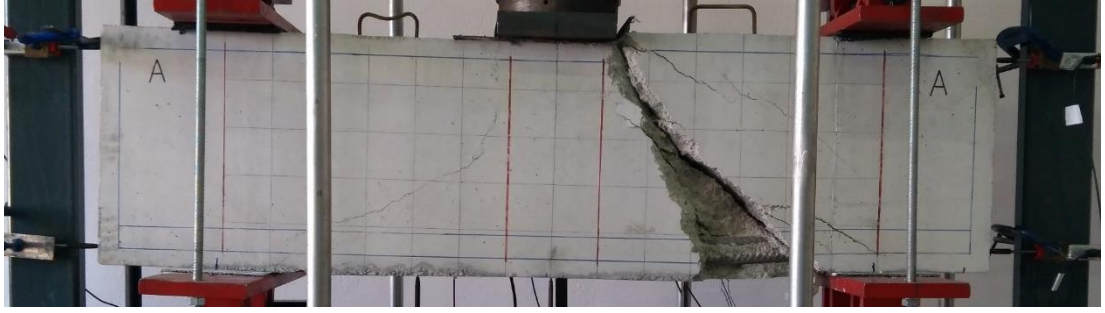
6.2.7. DB50/1.63-C1 deney numunesi

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.).



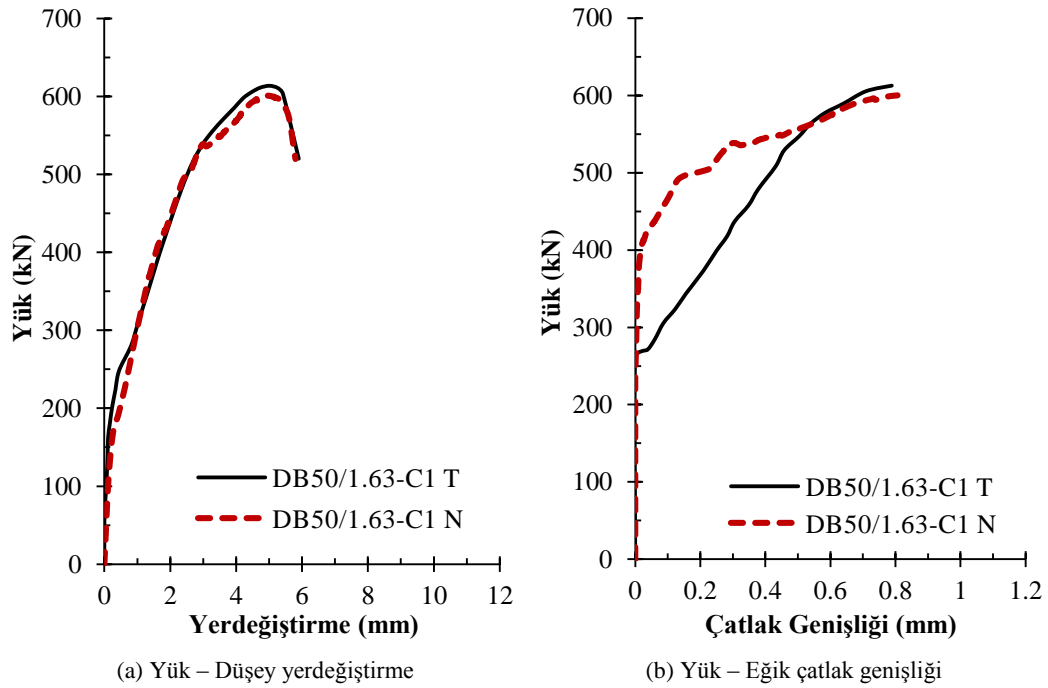
(a)



(b)

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 elemanda 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.

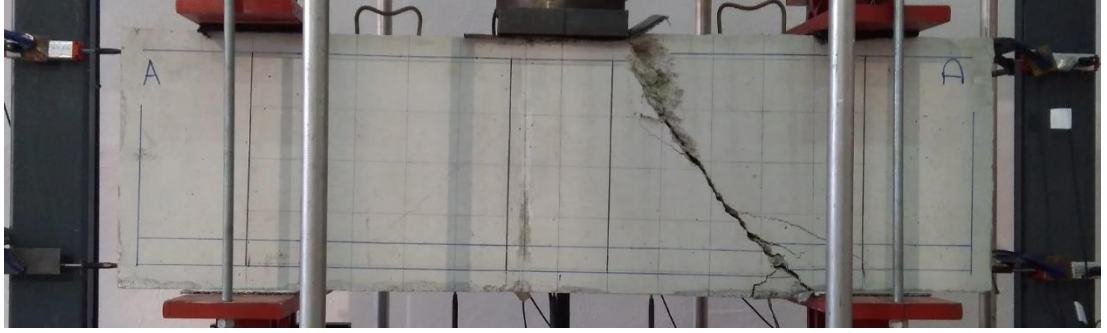
6.2.8. DB50/1.40-C1 deney numunesi

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.).



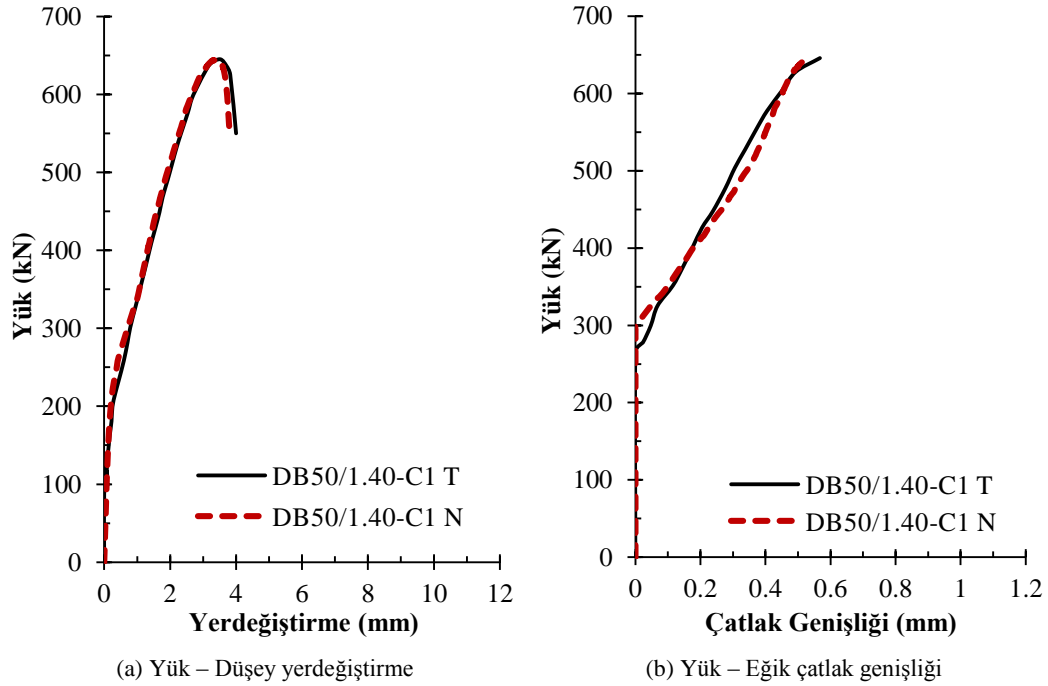
(a)



(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.

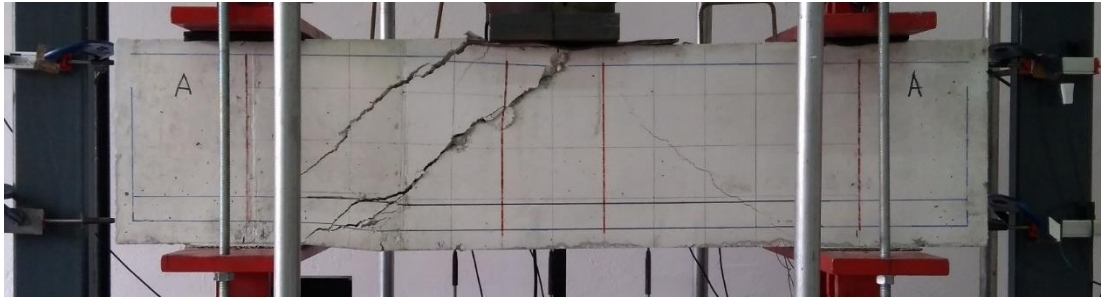
6.2.9. DB40/1.86-C1 deney numunesi

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)



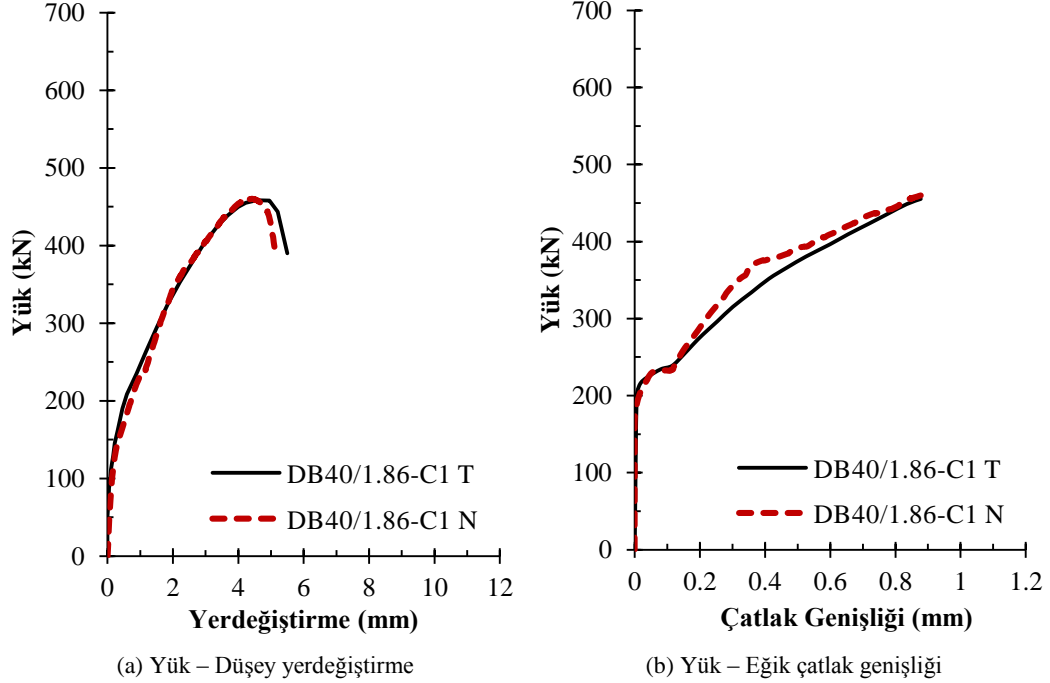
(b)

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.



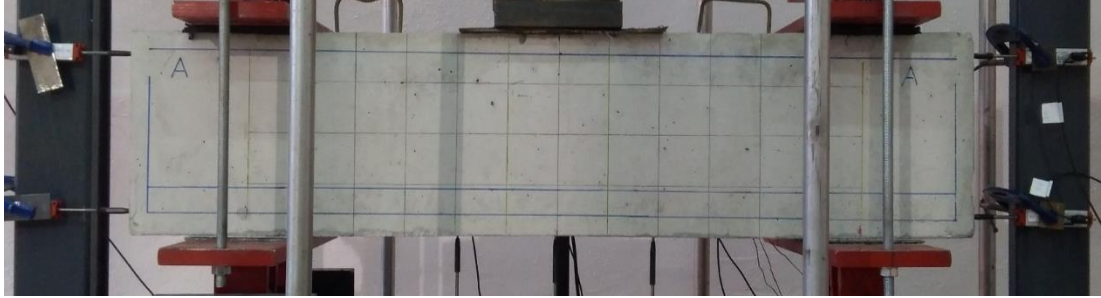
Şekil 6.30. DB40/1.86-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

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 aşılmamasıyla 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)

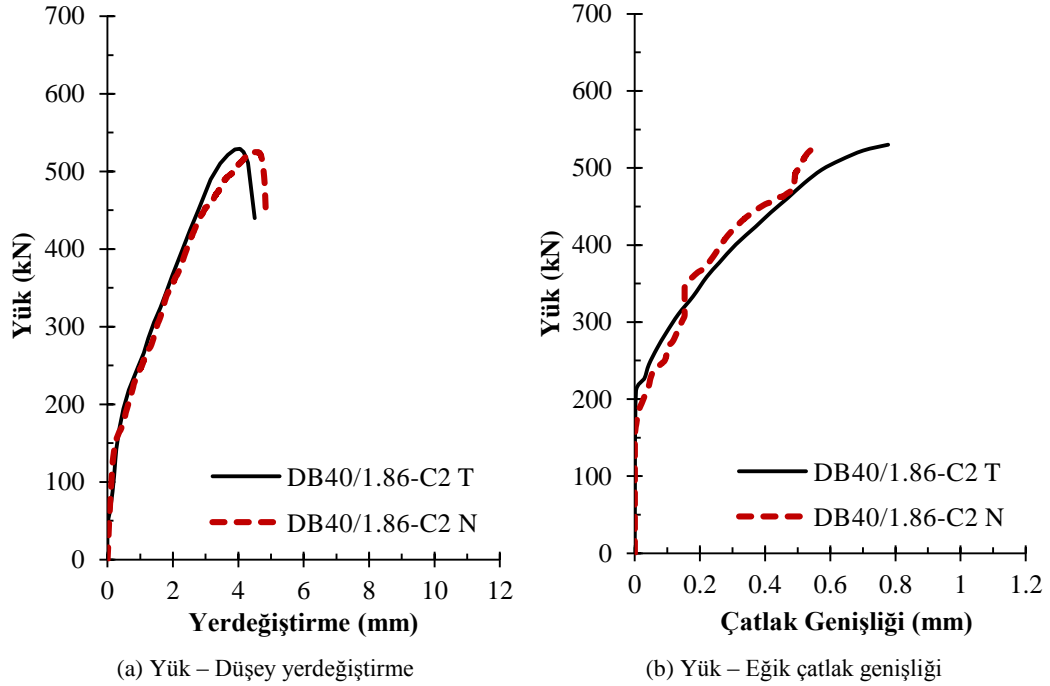


(b)

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)

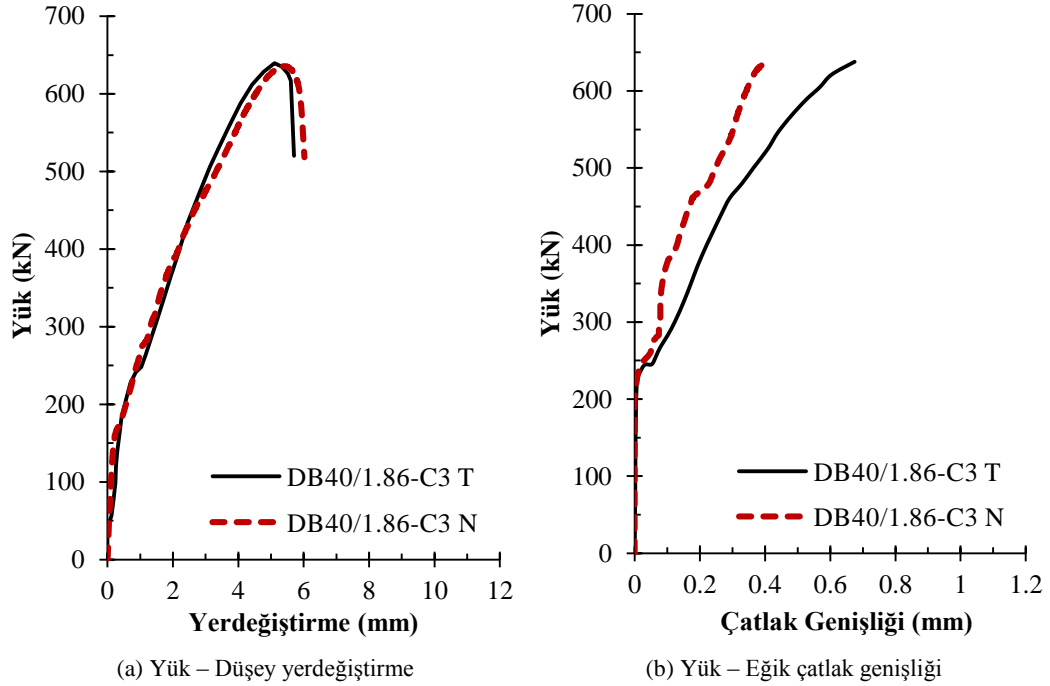


(b)

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.



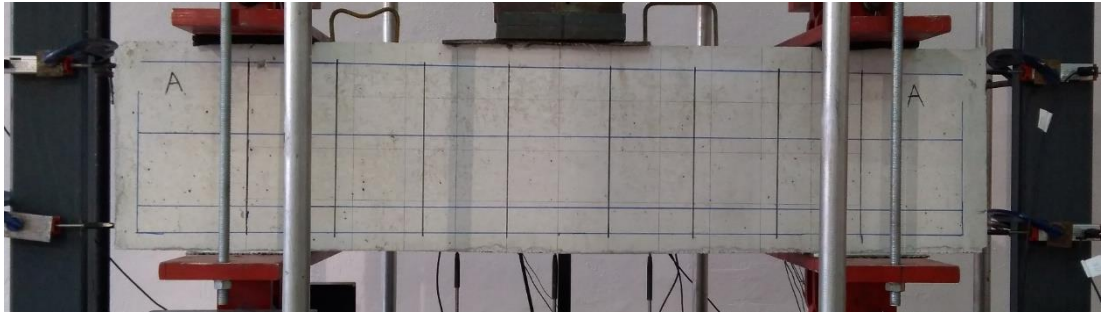
Şekil 6.34. DB40/1.86-C3 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

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.

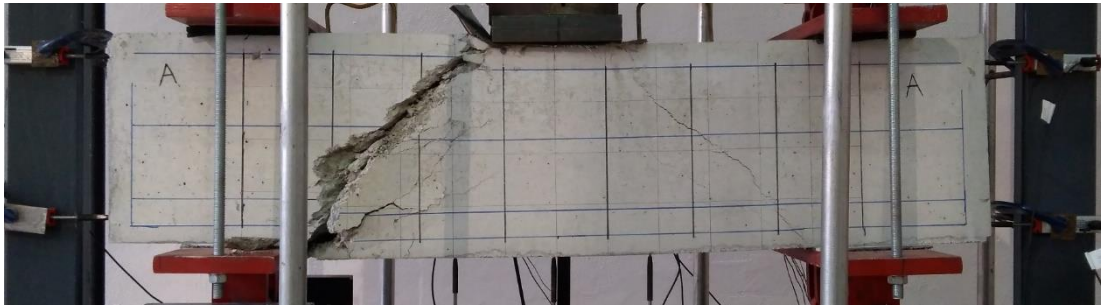
6.2.12. DB40/1.86-C1/SR deney numunesi

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)

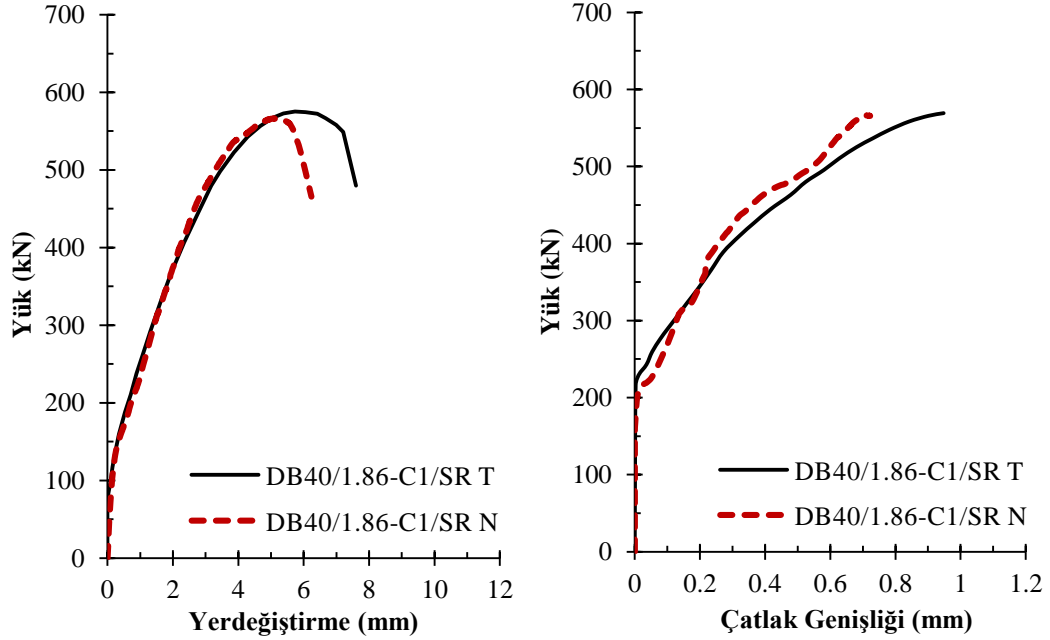


(b)

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.



(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

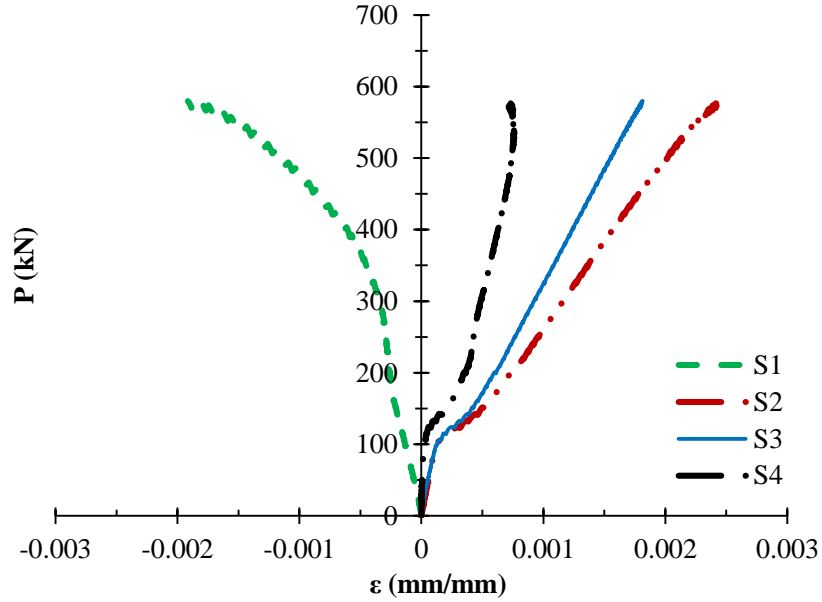
(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

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.

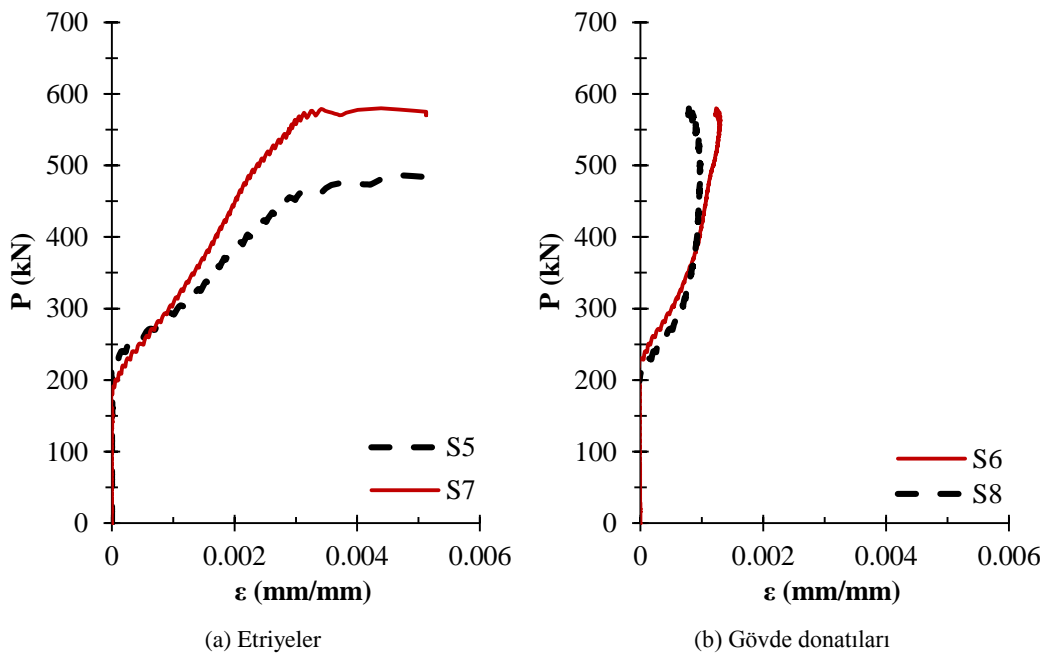


Şekil 6.37. DB40/1.86-C1/SR deney numunesi orta noktadaki donatıların birim şekildeğiştirme eğrileri.

Deney esnasında, numunenin çatlak (basınç çubuğu) ekseninde bulunan etriyelere yapıştırılan gerinim pullarından (Şekil 5.3.) ölçülen $P - \varepsilon_s$ 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

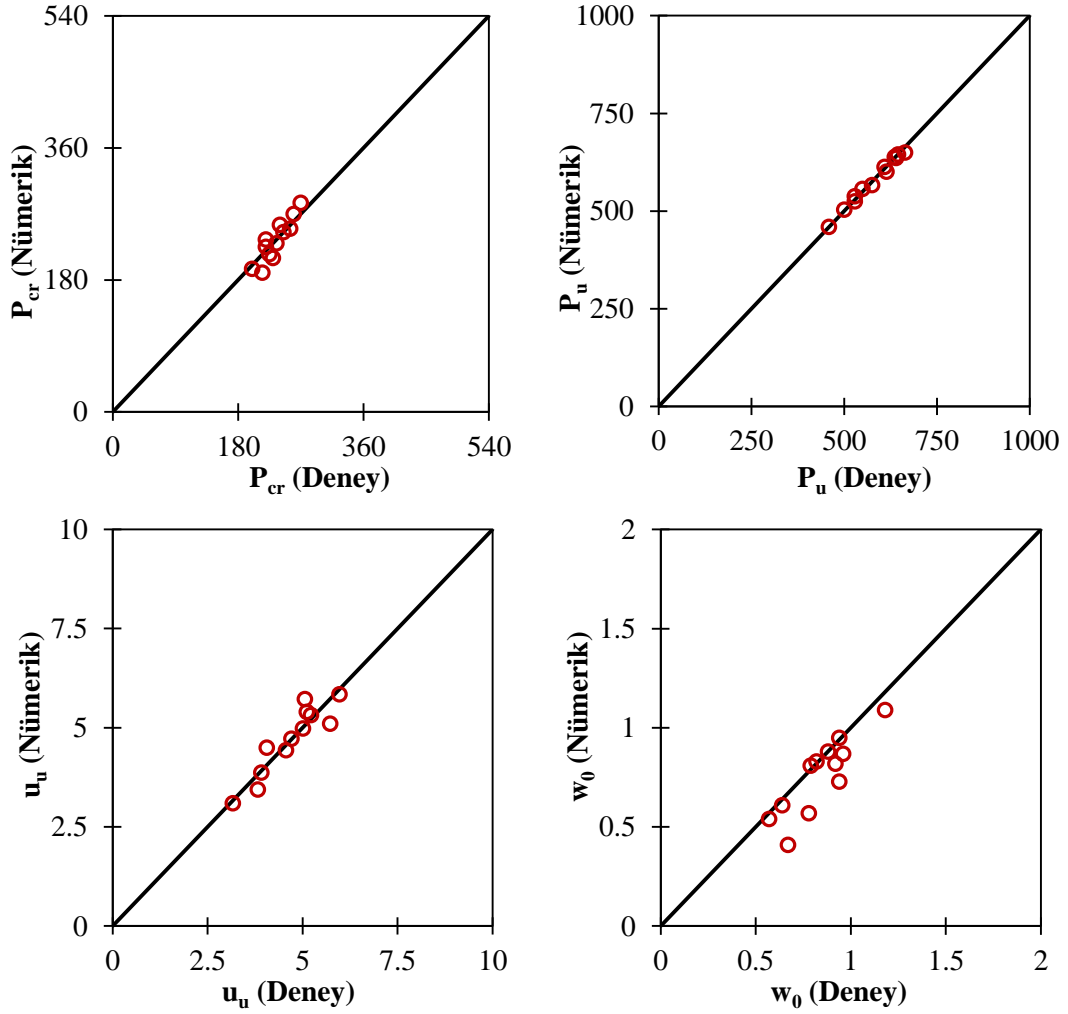
Tablo 6.2. Deneysel ve nümerik çalışma sonuçlarının performansı.

#	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.

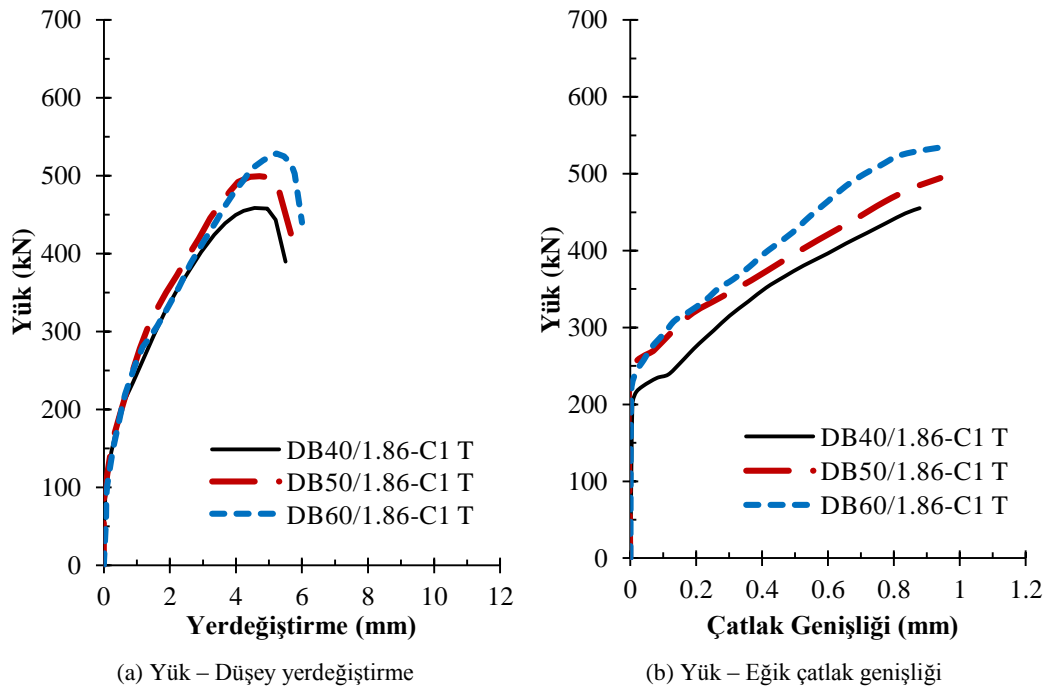
6.3. Betonarme Yüksek Kirişlerde Eğik Kesme Çatlağı Davranışına Etki Eden Parametrelerin Deney Sonuçlarına Göre Değerlendirilmesi

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.

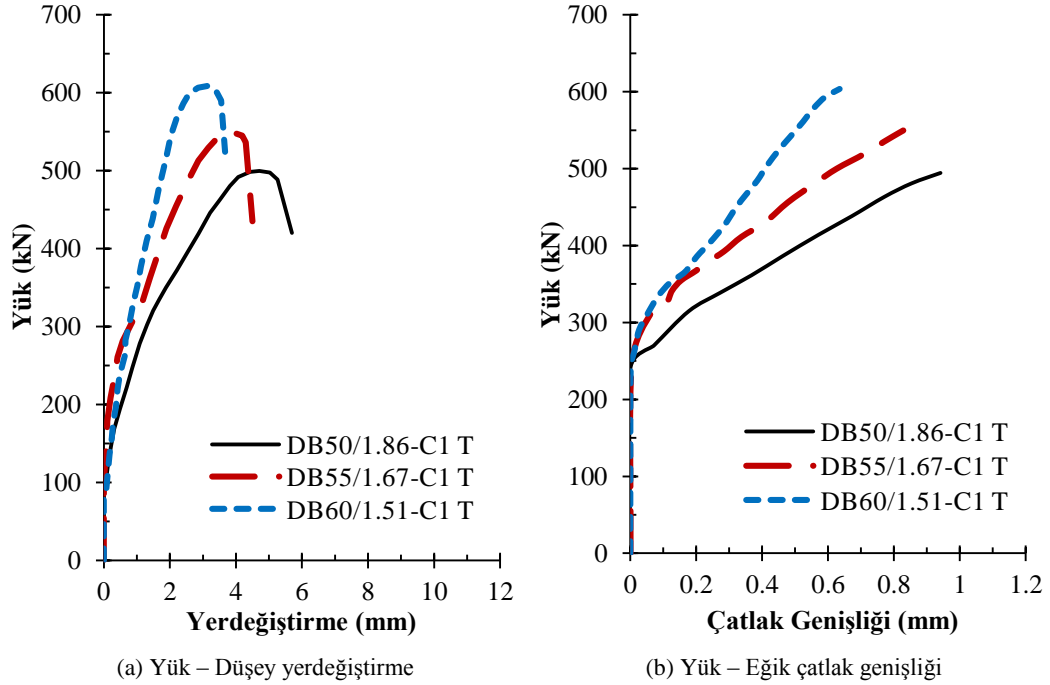


Şekil 6.40. Kesit yüksekliğinin yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkisi.

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.



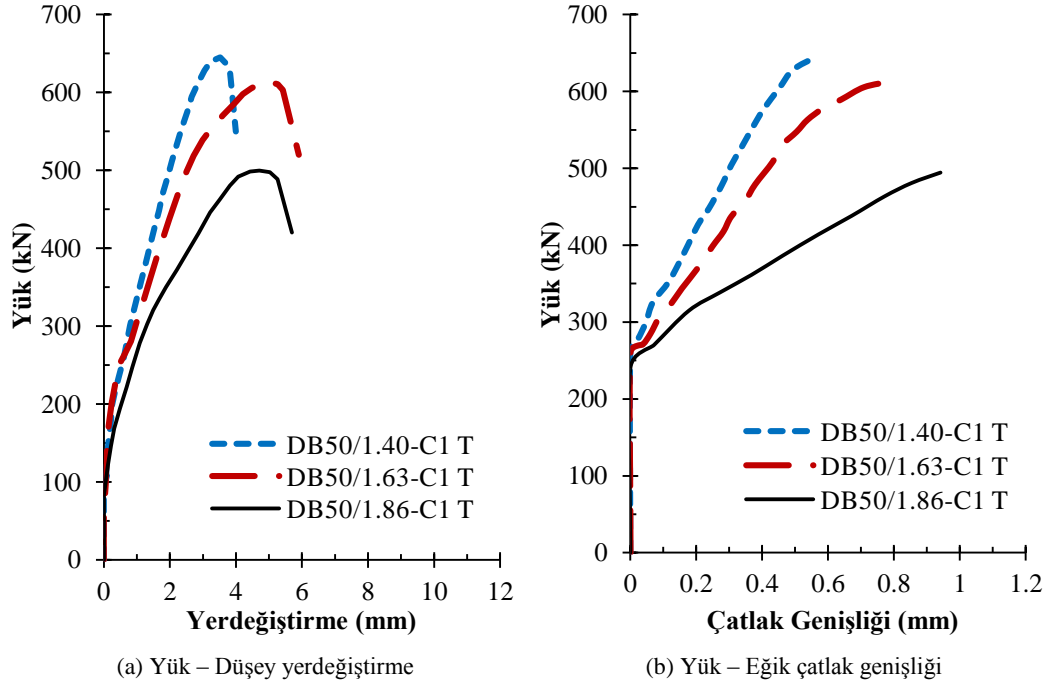
Şekil 6.41. a/d oranının (a sabit) yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkisi.

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;

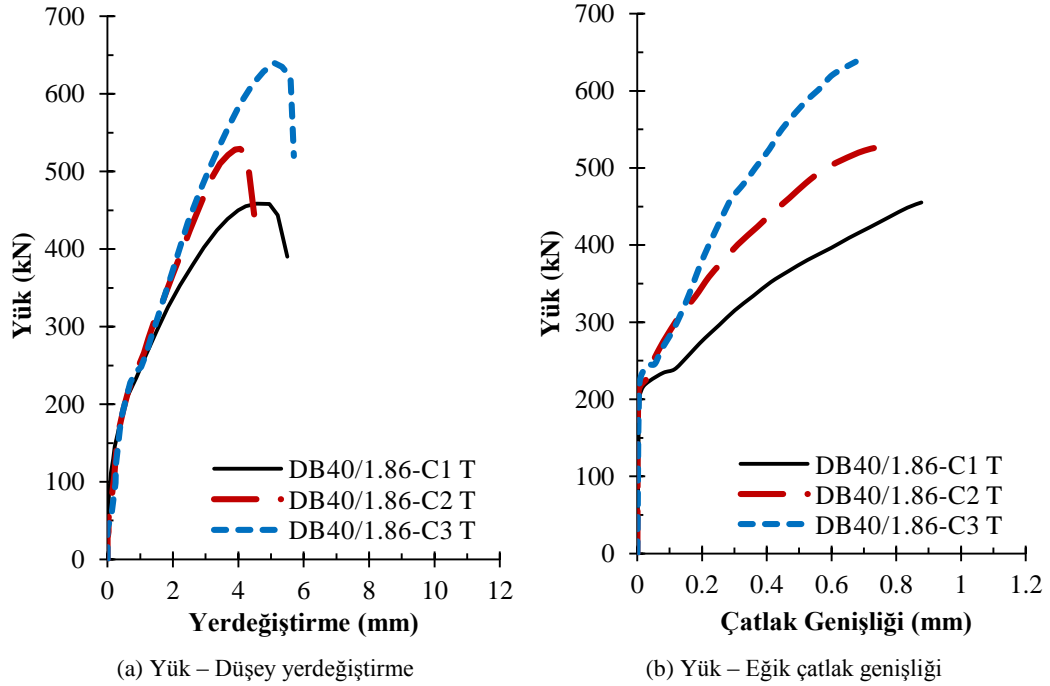
a/d oranının artışının betonarme yüksek kirişlerin yük taşıma kapasitesini azalttığı ve maksimum çatlak genişliklerinde ise önemli artışlara yol açtığı görülmüştür. Ayrıca bu davranış, literatürde Bircher ve arkadaşları (2009) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları ile de örtüşmektedir.



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.

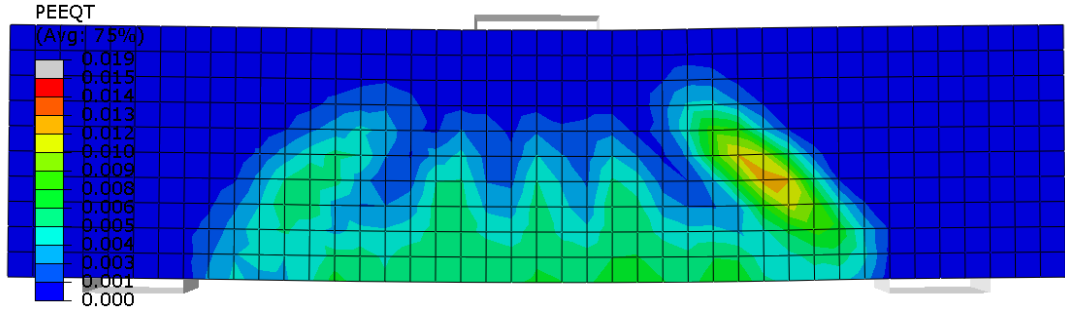
6.4. Parametrik Çalışma Sonuçları

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.

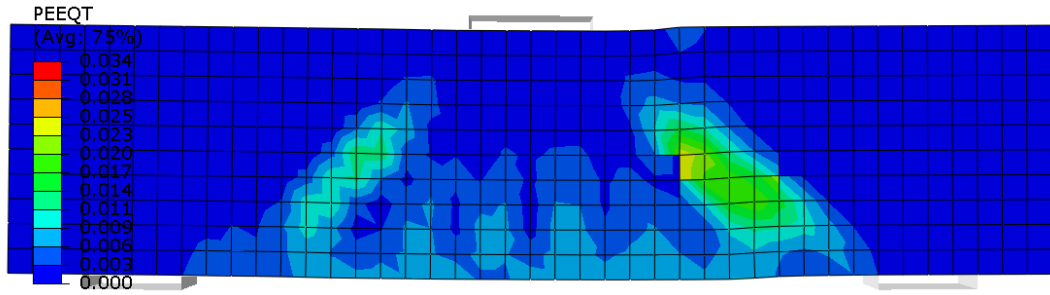
Tablo 6.5. Parametrik çalışma sonuçları.

#	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.



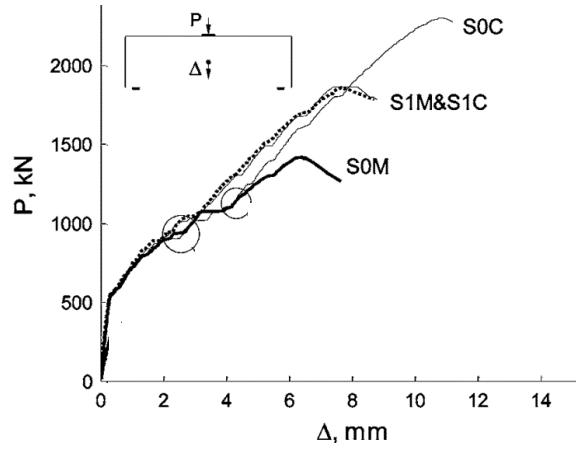
Şekil 6.45. DB50/1.75-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz sonucu.

6.5. Literatürde Gerçekleştirilmiş Olan Çalışmaların Sonuçları

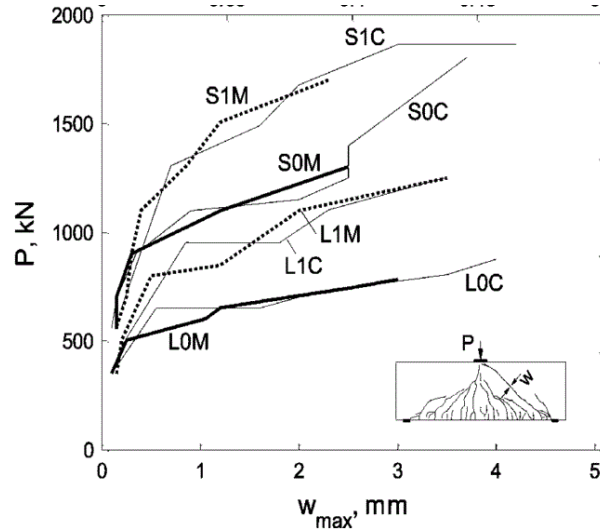
Literatürde, betonarme yüksek kirişlerin çatlak davranışının incelenip eğik çatlak genişliklerinin ölçüldüğü deneysel çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Bununla birlikte, bu tez çalışması kapsamında, betonarme yüksek kirişlerin eğik çatlak genişliği davranışından artık yük taşıma kapasitesinin hesaplanabilmesi 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.

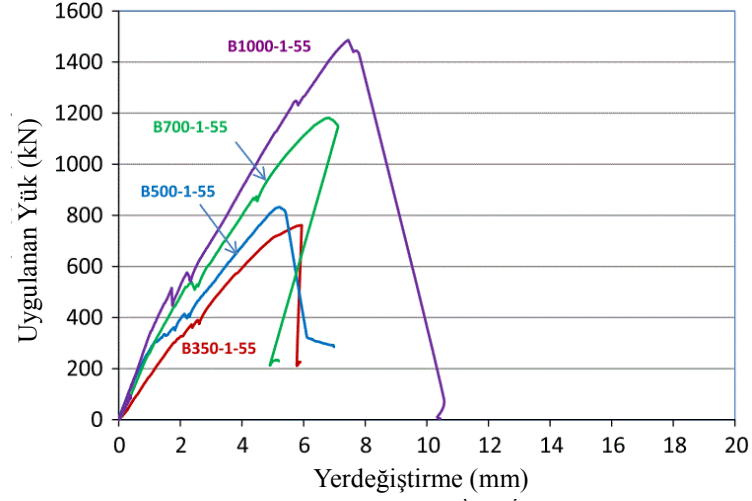
Çalışma	Numune Adı	h (mm)	a (mm)	a/d	b _w (mm)	l _n (mm)	ρ _l	ρ _v	ρ _h	f _{ck} (MPa)
Mihaylov ve ark. (2010)	S0M	1200	1700	1,55	400	3400	0,0070	0	0	34,2
	S1M	1200	1700	1,55	400	3400	0,0070	0,001	0	33
	B350-1-55	350	293	1,00	150	1586	0,0147	0	0	53,9
El-Sayed ve Shuraim (2015)	B500-1-55	500	419	1,00	150	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



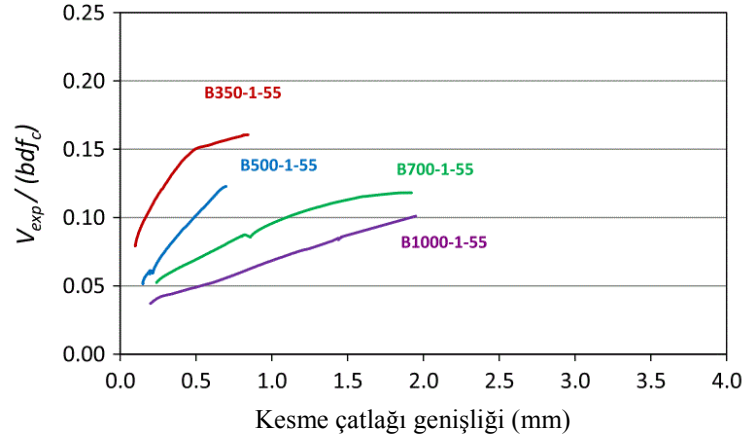
Şekil 6.46. SOM ve S1M numunesi yük – yerdeğiştirme davranış grafikleri (Mihaylov ve ark., 2010).



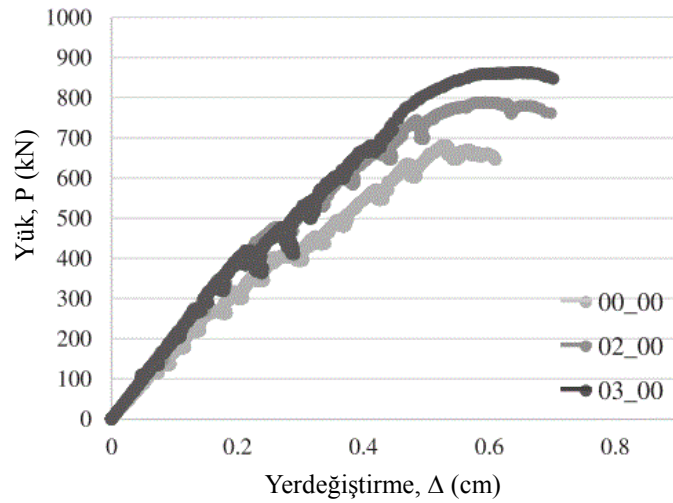
Şekil 6.47. SOM ve S1M numunesi yük – çatlak genişliği davranış grafikleri (Mihaylov ve ark., 2010).



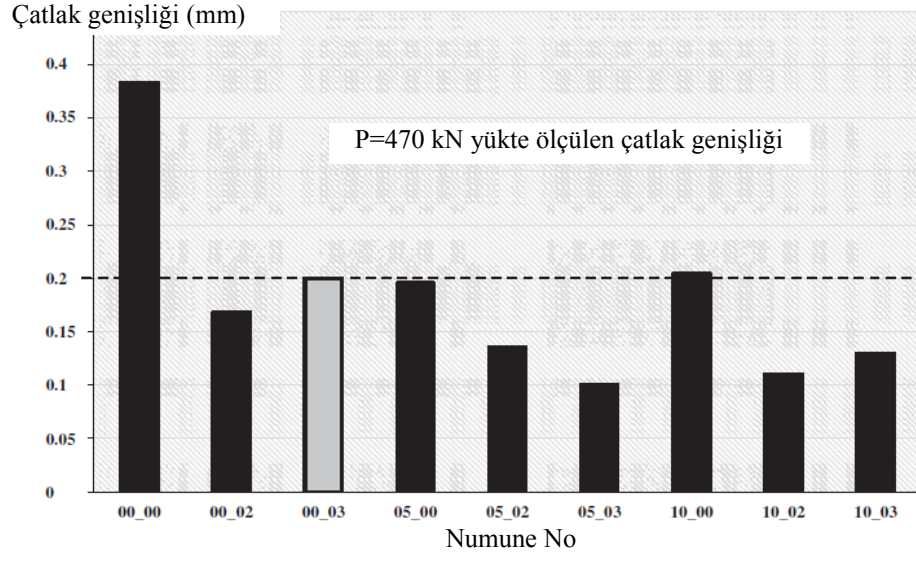
Şekil 6.48. B350-1-55, B500-1-55, B700-1-55 ve B1000-1-55 numunesi yük – yerdeğiştirme davranış grafikleri (El-Sayed ve Shuraim, 2015).



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.

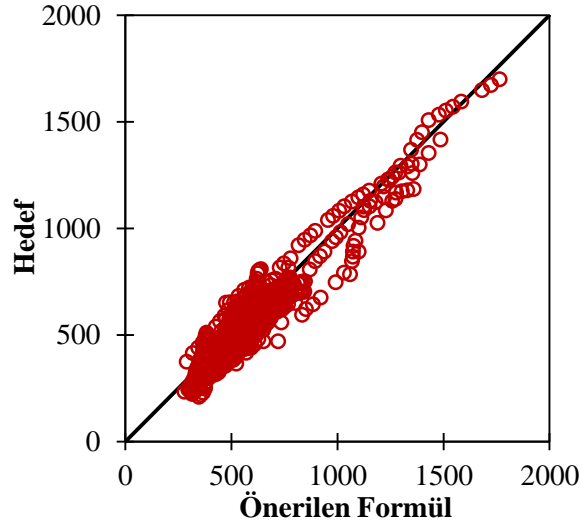
Denklemden görüldüğü gibi önerilen formül oldukça basit, anlaşılır ve kullanımı kolaydır. Formül için gerekli hesaplamalar basit bir hesap makinası yardımıyla veya yaygın olarak kullanılan tablolama programları (Excel vb.) ile kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. Bununla birlikte önerilen formülde 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.

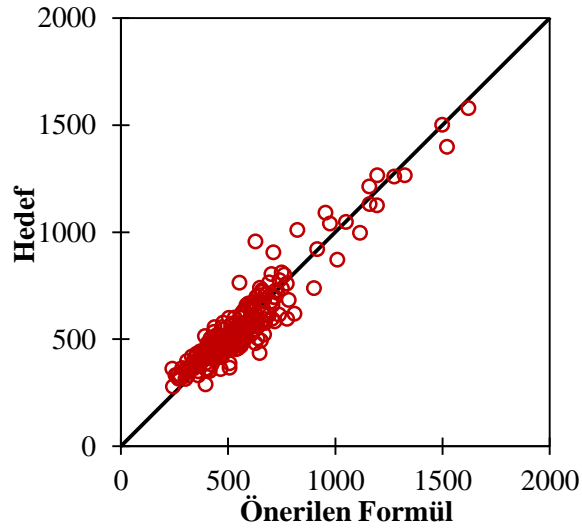
Tablo 7.3. Önerilen formülün performansı.

	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 öncelikte, 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 inceleyebilir.

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.

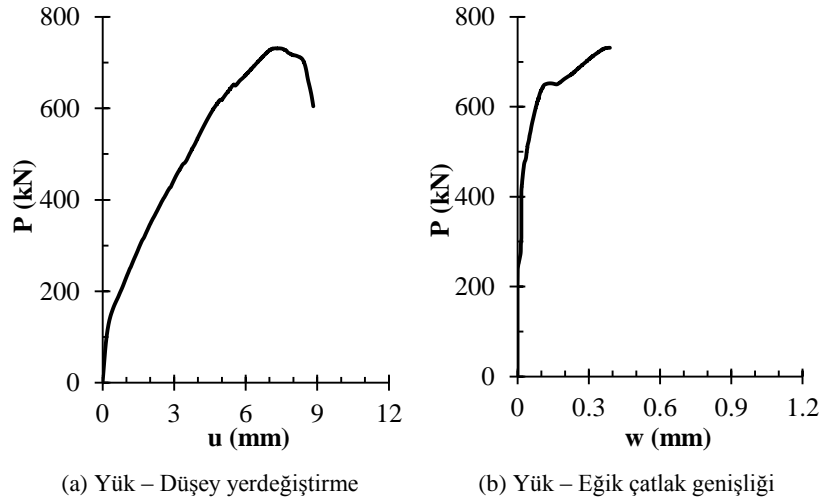
- Mohamed, A. R., Shoukry, M. S., Saeed, J. M. 2014. Prediction of the behavior of reinforced concrete deep beams with web openings using the finite element method. *Alexandria Engineering Journal*, 53:329-339.
- Myh, B. 1989. *Concrete and Concrete Structures: Numerical Modelling and Applications*. 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.
- Petersson, 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.

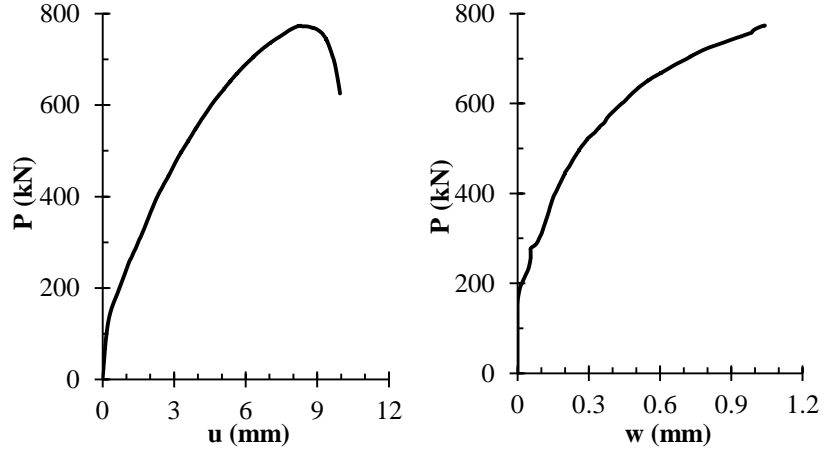
EKLER

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.



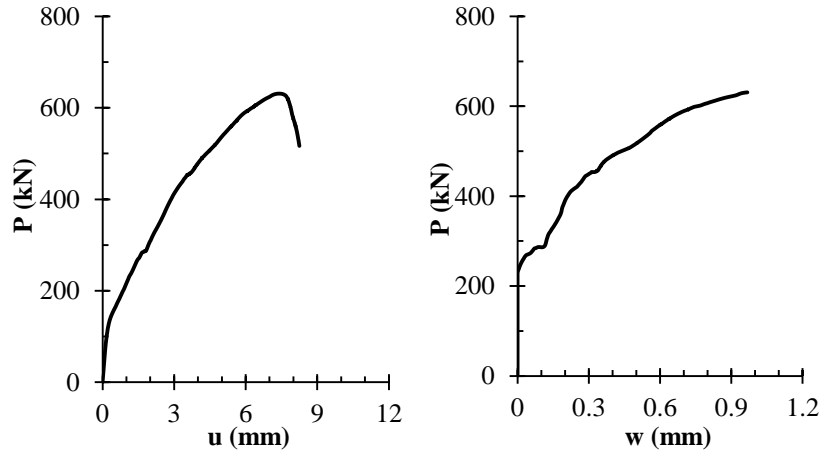
Şekil Ek 1.1. DB50/1.84-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

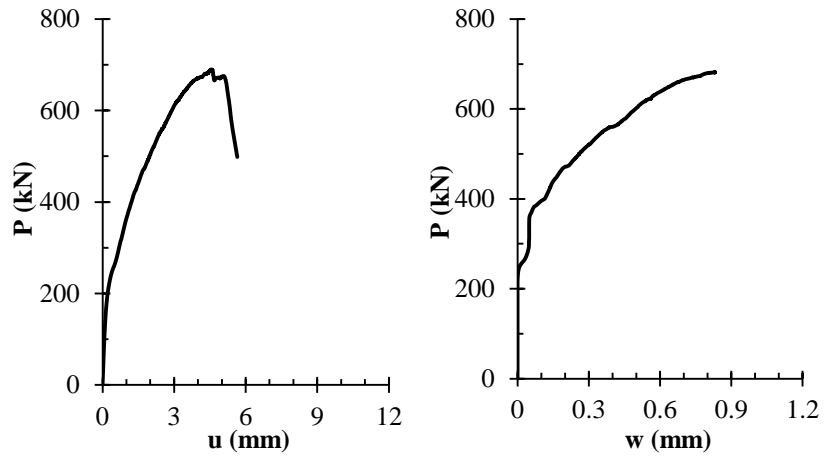
Şekil Ek 1.2. DB50/1.75-C1/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

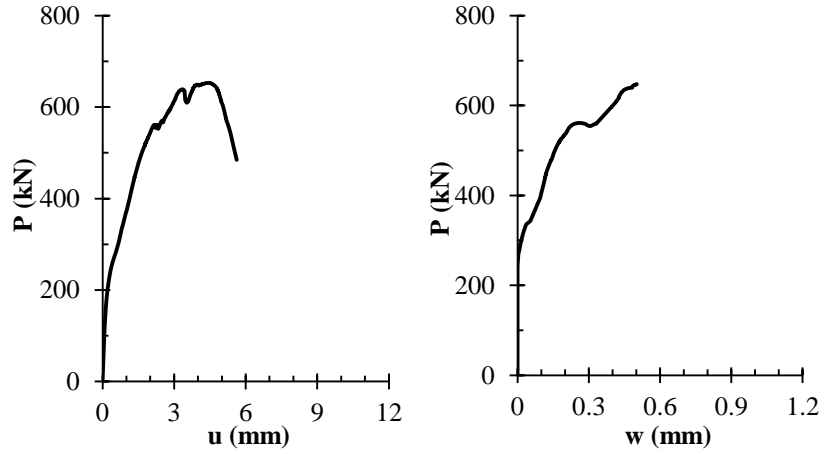
Şekil Ek 1.3. DB50/1.75-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

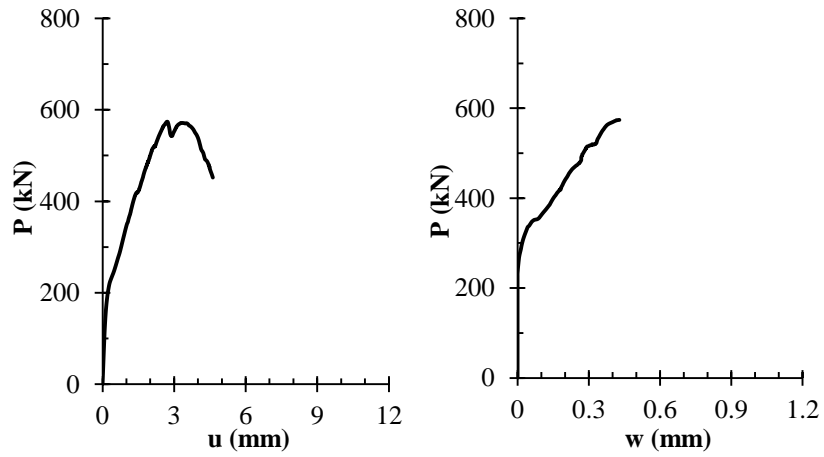
Şekil Ek 1.4. DB50/1.38-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük – Eğik atlak genişliği

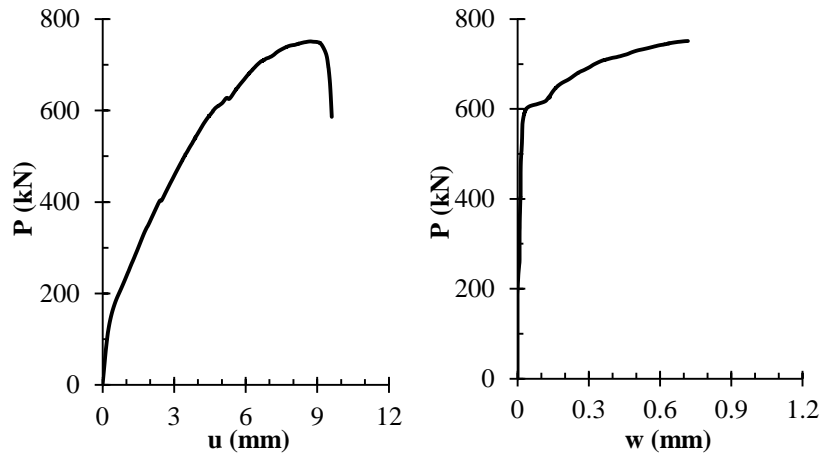
şekil Ek 1.5. DB50/1.32-C1/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yk – Dşey yerdeğiştirme

(b) Yk – Eğik atlak genişliği

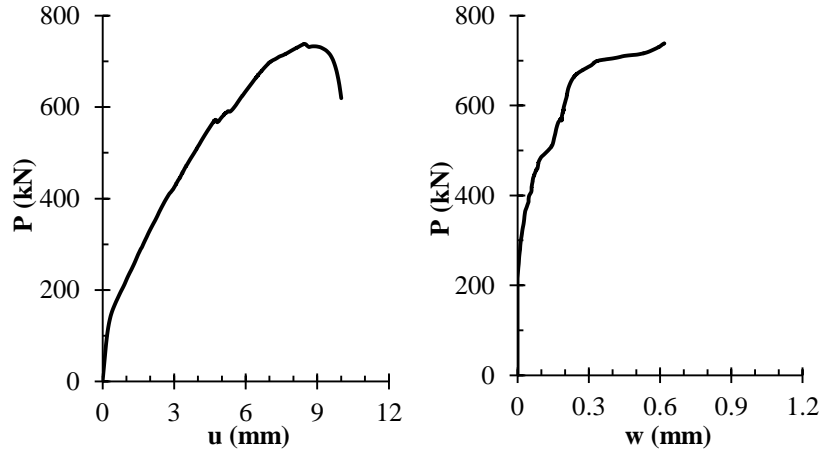
şekil Ek 1.6. DB50/1.32-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yk – Dşey yerdeğiştirme

(b) Yk – Eğik atlak genişliği

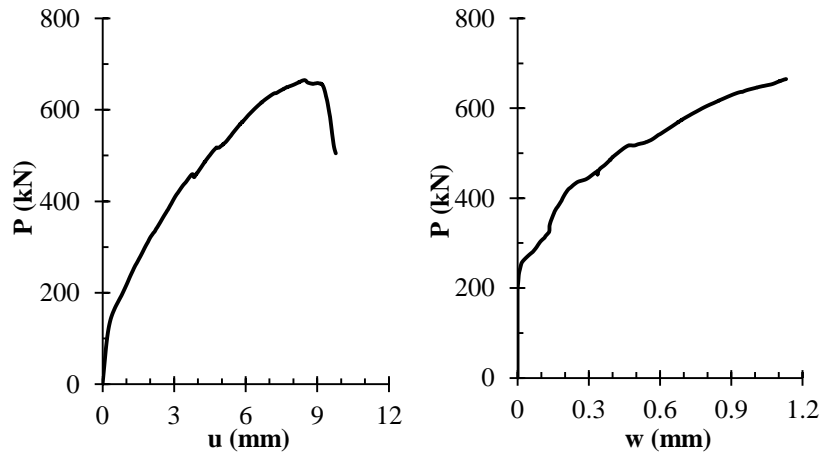
şekil Ek 1.7. DB60/1.87-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

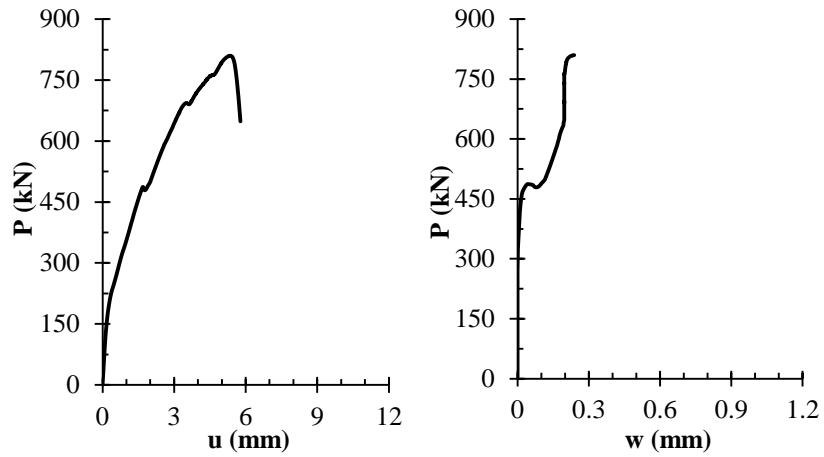
Şekil Ek 1.8. DB60/1.80-C1/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

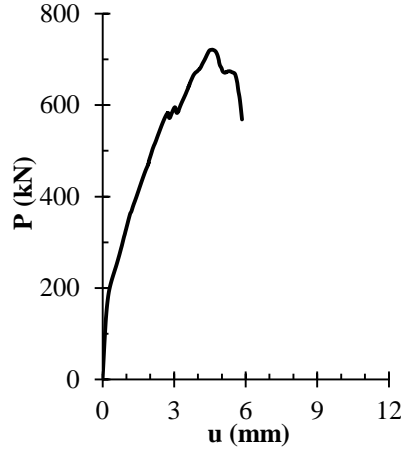
Şekil Ek 1.9. DB60/1.80-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



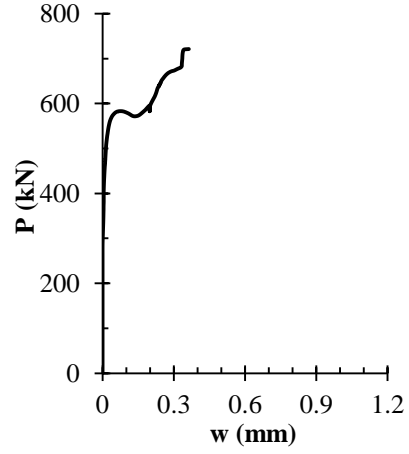
(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

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

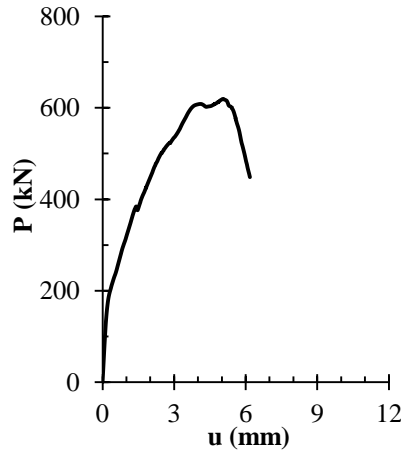


(a) Yk – Dşey yerdeğiştirme

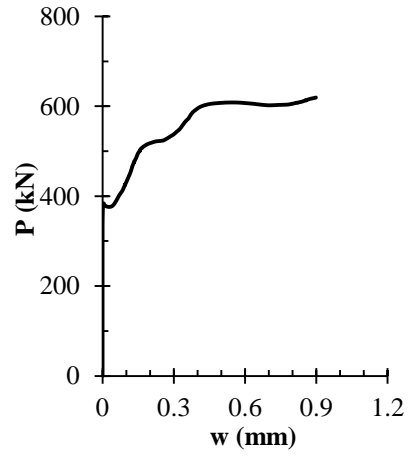


(b) Yk – Eğik atlak genişliği

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

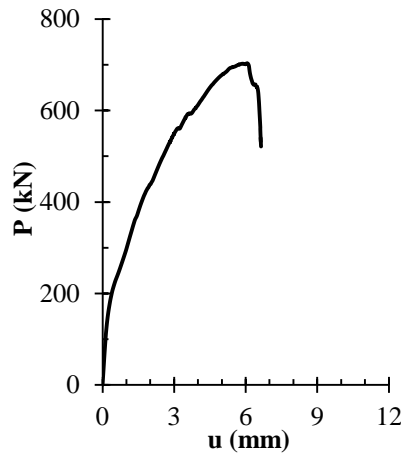


(a) Yk – Dşey yerdeğiştirme

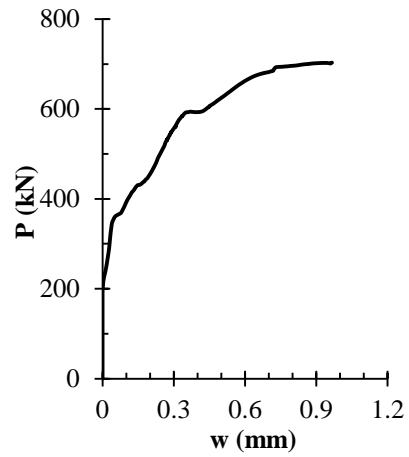


(b) Yk – Eğik atlak genişliği

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

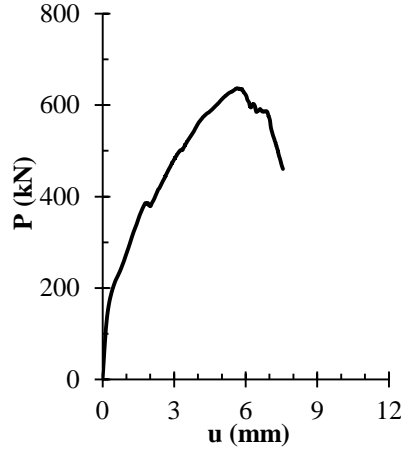


(a) Yk – Dşey yerdeğiştirme

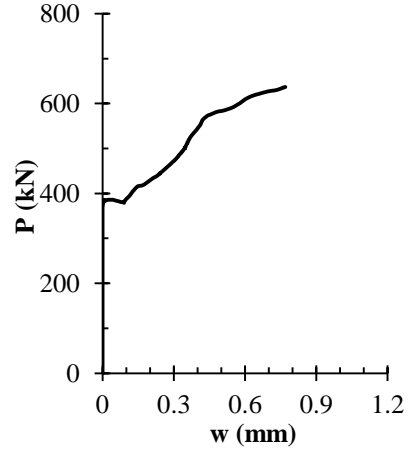


(b) Yk – Eğik atlak genişliği

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

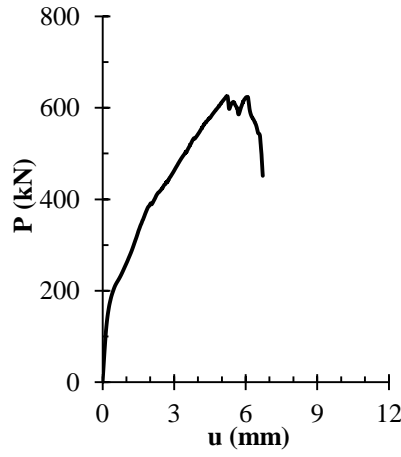


(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

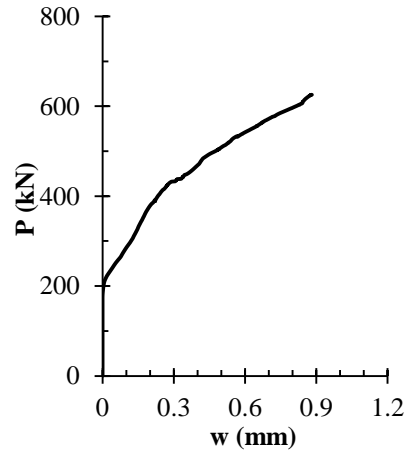


(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

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

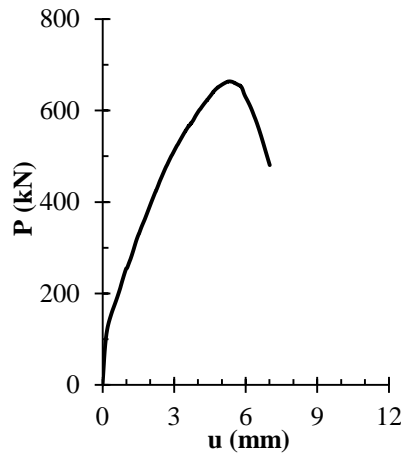


(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

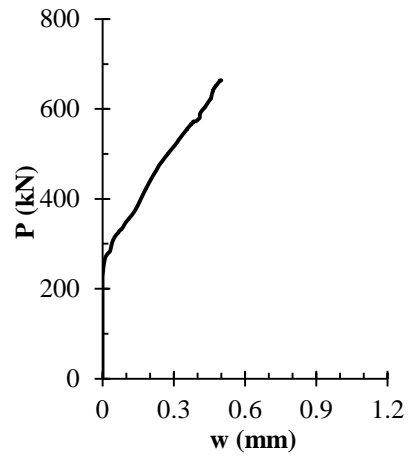


(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

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

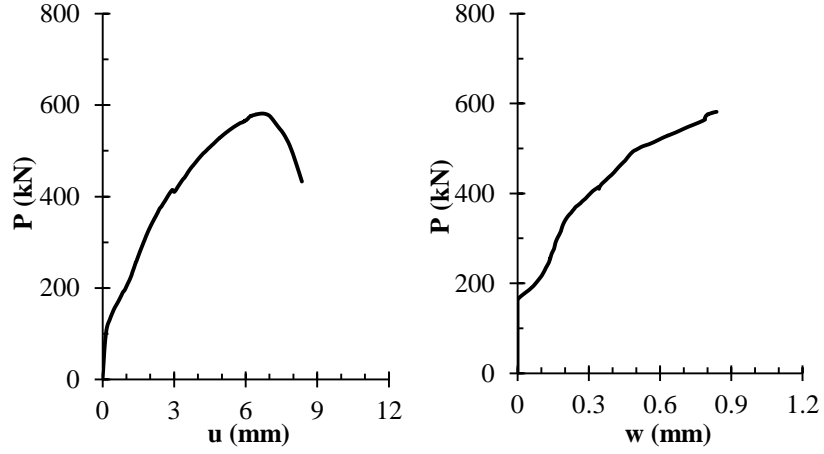


(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme



(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

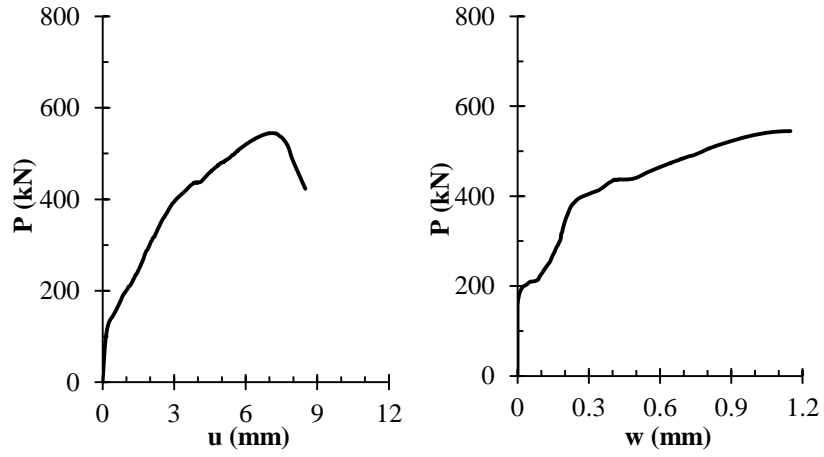
Şekil Ek 1.16. DB40/1.80-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

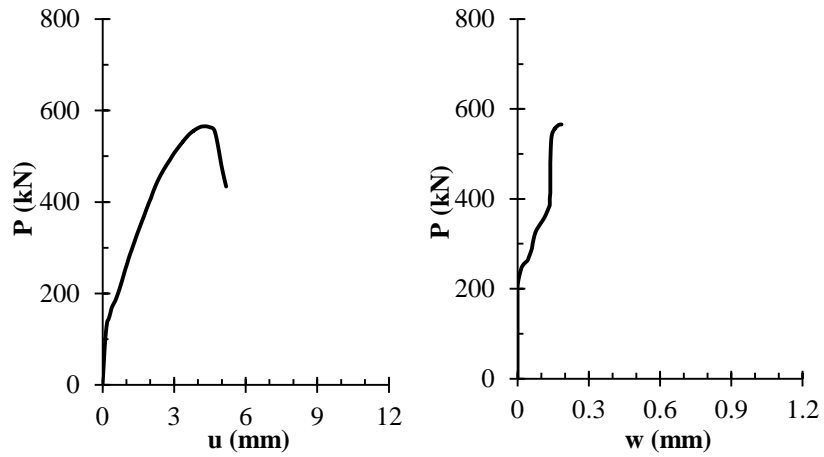
Şekil Ek 1.17. DB40/1.68-C1/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

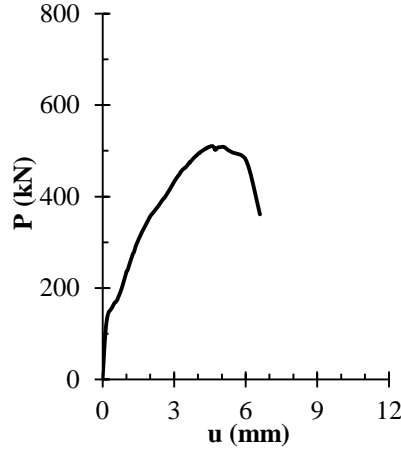
Şekil Ek 1.18. DB40/1.68-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



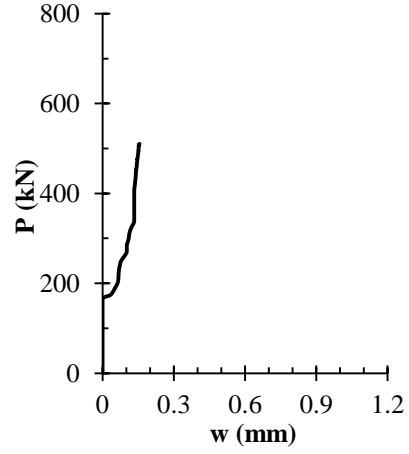
(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

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

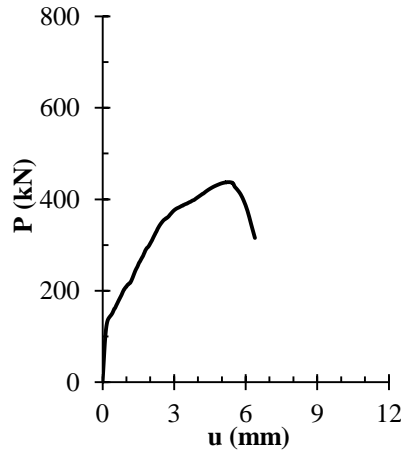


(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

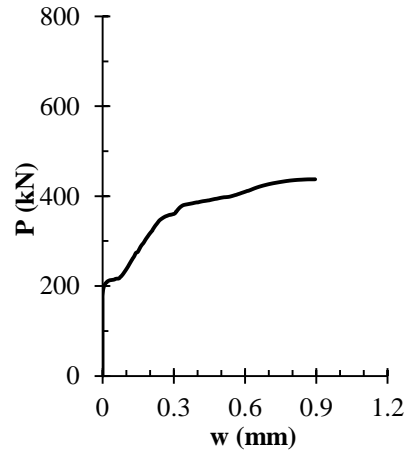


(b) Yk – Eğik atlak genişliği

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

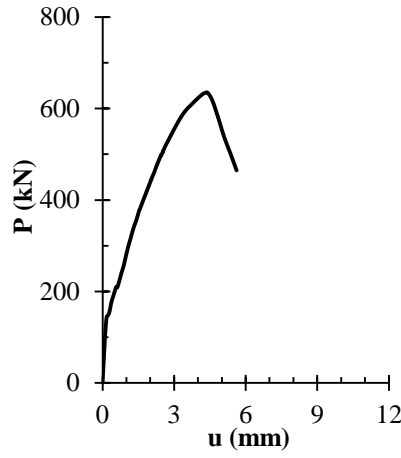


(a) Yk – Dşey yerdeğiştirme

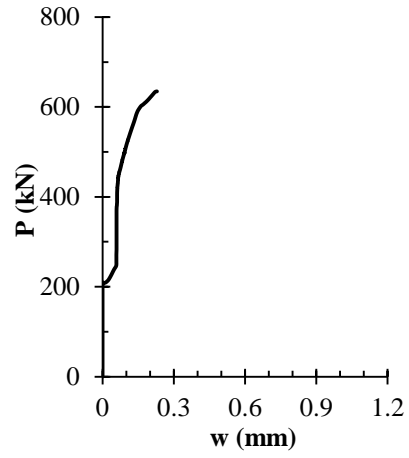


(b) Yk – Eğik atlak genişliği

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

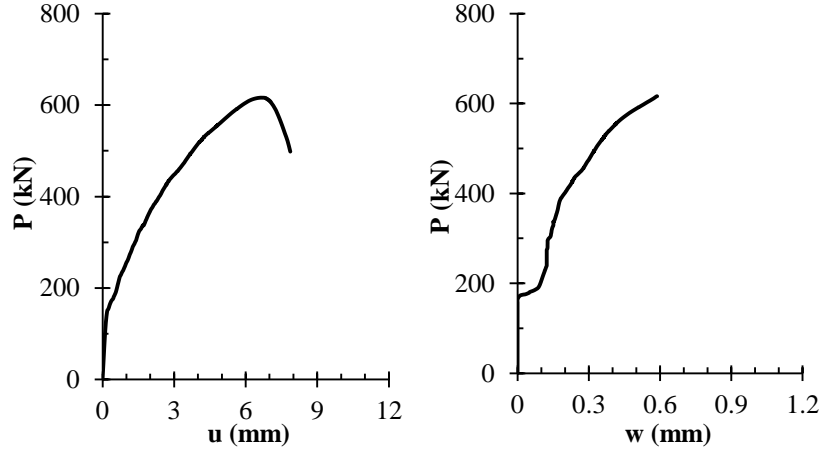


(a) Yk – Dşey yerdeğiştirme



(b) Yk – Eğik atlak genişliği

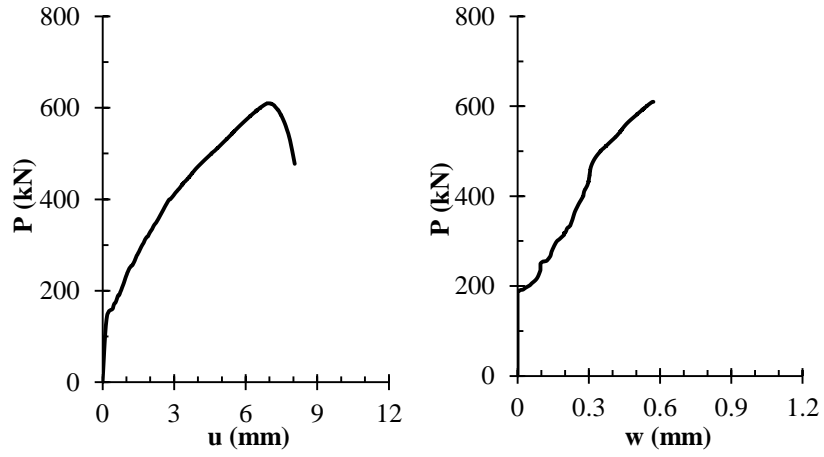
şekil Ek 1.22. DB40/1.80-C3/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yk – Dşey 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 (Deneyisel 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	
10	480000	0,0070	1,55	0,001	33,0	0,534	1160784	S1M (Mihaylov ve ark., 2010)
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	
15	52500	0,0147	1,00	0	53,9	0,199	507084	B350-1-55 (El-Sayed ve Shuraim, 2015)
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	
19	75000	0,0147	1,00	0	53,9	0,365	577665	B500-1-55 (El-Sayed ve Shuraim, 2015)
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	
23	105000	0,0147	1,00	0	53,9	0,913	915833	B700-1-55 (El-Sayed ve Shuraim, 2015)
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	
27	150000	0,0147	1,00	0	53,9	0,466	711046	
28	150000	0,0147	1,00	0	53,9	0,905	953789	B1000-1-55 (El-Sayed ve Shuraim, 2015)
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
32	100000	0,0221	1,40	0	18,1	0,372	526667	(Deneyssel çalışma)
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
35	100000	0,0221	1,86	0	18,1	0,577	429697	(Deneyssel çalışma)
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	
38	100000	0,0221	1,86	0,0037	18,1	0,315	446667	DB50/1.86-C1/SR (Deneyssel çalışma)
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
42	110000	0,0237	1,67	0	18,1	0,402	438144	(Deneyssel çalışma)
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
45	120000	0,0215	1,51	0	18,1	0,320	463687	(Deneyssel çalışma)
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
48	120000	0,0215	1,89	0	18,1	0,532	418994	(Deneyssel çalışma)
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	
51	120000	0,0215	1,89	0,00379	18,1	0,271	503911	DB60/1.86-C1/SR (Deneyssel çalışma)
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	
55	80000	0,0228	1,80	0	18,1	0,317	348073	DB40/1.86-C1
56	80000	0,0228	1,80	0	18,1	0,470	384354	(Deneyssel çalışma)
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	
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	DB60/1.44- C1/SR-3 (Parametrik çalışma)
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	
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	DB40/1.68-
225	80000	0,0107	1,68	0,00673	25,3	0,362	382869	C2/SR-3
226	80000	0,0107	1,68	0,00673	25,3	0,464	392745	(Parametrik
227	80000	0,0107	1,68	0,00673	25,3	0,569	404480	çalışma)
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	
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	DB40/1.68-
235	80000	0,0107	1,68	0,00673	32,0	0,295	424047	C3/SR-3
236	80000	0,0107	1,68	0,00673	32,0	0,314	472851	(Parametrik
237	80000	0,0107	1,68	0,00673	32,0	0,370	510835	çalışma)
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.