



**Eğik Olarak atlamış Betonarme Yüksek Kirişlerin
Kullanılabilirlik Davranışının Deneysel ve Analitik Olarak
İncelenmesi**

Program Kodu: 3001

Proje No: 117M854

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Naci ÇAĞLAR

Araştırmaacı(lar):

Dr. Öğr. Üyesi Hakan ÖZTÜRK

Arş. Gör. Dr. Aydın DEMİR



ÖNSÖZ

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. Betonarme elemanlarda çatlağı tamamen önlemek mümkün olmadığı gibi, mevcut betonarme yüksek kirişler üzerinde de bu tür eğik çatlaklarla uygulamada sıklıkla karşılaşmaktadır.

Bu proje 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. Bu kapsamda; deneysel, nümerik ve analitik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, 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.

Çalışmada, GeneXproTools programının kullanılması ve analizlerinin gerçekleştirilmesinde her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen Sn. Dr. Esra DOBRUCALI'ya teşekkürlerimizi bir borç biliriz.

Ayrıca bu çalışmayı Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı (ARDEB 3001) kapsamında destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK) teşekkür ederiz.



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
TABLolar LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	v
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Projenin Tanımı.....	1
1.2 Konu ve Kapsam.....	2
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	8
3. GEREÇ ve YÖNTEM.....	17
3.1 Deneysel Çalışma.....	17
3.2 Nümerik Modelleme.....	27
3.3 Çatlak Genişliğinin Belirlenmesi.....	32
3.4 Parametrik Çalışma.....	33
4. BULGULAR.....	35
4.1 Eğik Çatlak Ölçüm Yönteminin Değerlendirmesi ve Nümerik Modeli.....	38
4.2 Deneysel Çalışma ve Nümerik Model Doğrulama Çalışması Sonuçları.....	40
4.2.1 DB60/1.86-C1 deney numunesi.....	40
4.2.2 DB60/1.86-C1/SR deney numunesi.....	42
4.2.3 DB60/1.51-C1 deney numunesi.....	46
4.2.4 DB55/1.67-C1 deney numunesi.....	47
4.2.5 DB50/1.86-C1 deney numunesi.....	49
4.2.6 DB50/1.86-C1/SR deney numunesi.....	51
4.2.7 DB50/1.63-C1 deney numunesi.....	54
4.2.8 DB50/1.40-C1 deney numunesi.....	56
4.2.9 DB40/1.86-C1 deney numunesi.....	57
4.2.10 DB40/1.86-C2 deney numunesi.....	59
4.2.11 DB40/1.86-C3 deney numunesi.....	61
4.2.12 DB40/1.86-C1/SR deney numunesi.....	63



4.3	Betonarme Yüksek Kirişlerde Eğik Kesme Çatlağı Davranışına Etki Eden Parametrelerin Deney Sonuçlarına Göre Değerlendirilmesi.....	69
4.4	Parametrik Çalışma Sonuçları.....	75
4.5	Literatürde Gerçekleştirilmiş Olan Çalışmaların Sonuçları.....	77
5.	ARTIK YÜK TAŞIMA KAPASİTESİNİN HESABI İÇİN ÖNERİLEN FORMÜL.....	80
6.	GENEL SONUÇLAR.....	86
KAYNAKÇA.....		92
EKLER.....		95
EK 1: Parametrik Çalışma Sonuçları.....		95
EK 2: GEP Analiz Verisi.....		104



TABLULAR LİSTESİ

Tablo 1. Yüksek kirişlerin malzeme ve en kesit özellikleri için önerilen sınır değerler (Birrcher vd., 2009).....	7
Tablo 2. Numunelerin boyut ve malzeme özellikleri.....	18
Tablo 3. Malzeme deneylerinin sonuçları.....	23
Tablo 4. BHP modeli temel parametreleri.....	29
Tablo 5. Betonun sayısal modelinde kullanılan diğer parametreler.....	30
Tablo 6. Parametrik çalışmada kullanılan numunelerin boyut ve malzeme özellikleri.....	34
Tablo 7. Deneysel ve nümerik çalışma sonuçları.....	67
Tablo 8. Deneysel ve nümerik çalışma sonuçlarının performansı.....	67
Tablo 9. Numunelerin deney ve hesap sonucu bulunan maksimum yük taşıma kapasiteleri.....	69
Tablo 10. İncelenecek parametreler için numune matrisi.....	70
Tablo 11. Parametrik çalışma sonuçları.....	76
Tablo 12. Literatürdeki çalışmalardan alınan numunelerin boyut ve malzeme özellikleri.....	77
Tablo 13. GEP çözüm mimarisini oluşturan parametreler ve seçilen değerleri.....	81
Tablo 14. Analizlerde kullanılan verinin sınır değerleri.....	81
Tablo 15. Önerilen formülün performansı.....	83
Tablo 16. Analizlerde kullanılan eğitim (training) datası.....	104
Tablo 17. Analizlerde kullanılan doğrulama (validation) datası.....	121

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Kesme etkisiyle eğik olarak çatlamış mevcut betonarme yüksek kiriş örnekleri.....	2
Şekil 2. Yüksek kirişlerde tek panel strut-and-tie modeli (STM) (Wight, 2016).....	3
Şekil 3. Betonarme yüksek kirişlerin artık yük taşıma kapasitelerinin tespiti için literatürde Birrcher vd. (2009) tarafından önerilen tablo.....	4
Şekil 4. Numune isimlendirilmesi.....	18
Şekil 5. DB40/1.86-C1, DB40/1.86-C2 ve DB40/1.86-C3 numunelerinin görünüş ve donatı çizimi.....	18
Şekil 6. DB40/1.86-C1/SR numunesinin görünüş ve donatı çizimi.....	19
Şekil 7. DB50/1.40-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi.....	19
Şekil 8. DB50/1.63-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi.....	19
Şekil 9. DB50/1.86-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi.....	19
Şekil 10. DB50/1.86-C1/SR numunesinin görünüş ve donatı çizimi.....	20
Şekil 11. DB55/1.67-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi.....	20
Şekil 12. DB60/1.51-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi.....	20
Şekil 13. DB60/1.86-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi.....	20
Şekil 14. DB60/1.86-C1/SR numunesinin görünüş ve donatı çizimi.....	21
Şekil 15. Donatıların hazırlanması (a) ve donatılara yapıştırılan gerinim pulları (b).....	21
Şekil 16. Betonun kalıba yerleştirilmesi.....	22
Şekil 17. Kalıbı sökülmüş deney numuneleri.....	22
Şekil 18. Betondan (a) ve donatılardan (b) alınan malzeme deneyi numuneleri.....	23
Şekil 19. Numunelerin kür havuzunda bekletilmesi.....	24
Şekil 20. Kükürt-grafit başlık uygulaması.....	24
Şekil 21. Malzeme deneyleri.....	24
Şekil 22. Deney düzeneği ve ölçüm cihazları.....	25
Şekil 23. Numunede oluşan düzlem dışı hareket ve mesnet çökmesinin ölçülmesi.....	25
Şekil 24. Çatlak ölçerler ve yerleşimleri.....	26
Şekil 25. Veri toplama cihazı.....	27
Şekil 26. Beton ve yük ve mesnet plakaları nümerik modeli.....	28
Şekil 27. Donatıların nümerik modeli.....	28
Şekil 28. Optimum mesh boyutu (sol) ve dilasyon açısının (sağ) belirlenmesi.....	29
Şekil 29. Betonun basınç (a) ve çekme (b) etkisindeki davranış grafikleri.....	31
Şekil 30. Betonun basınç (a) ve çekme (b) etkisindeki hasar parametresi grafikleri.....	31
Şekil 31. Donatı çeliği gerçek $\sigma_s - \epsilon_{sp}$ davranış grafiği.....	32
Şekil 32. Eşdeğer çekme plastik birim şekildeğiştirme (PEEQT).....	33

Şekil 33. Deney numunesinden ölçüm yapılan noktalar.....	35
Şekil 34. Yük – düşey yerdeğiştirme davranış grafiği.....	36
Şekil 35. Yük – yatay yerdeğiştirme davranış grafiği.....	37
Şekil 36. Yük – donatı birim şekildeğiştirme davranış grafikleri.....	37
Şekil 37. Yük – mesnet çökmesi davranış grafikleri.....	38
Şekil 38. Yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği.....	39
Şekil 39. Numunenin hasar sonrası göçme mekanizması.....	39
Şekil 40. Numunenin nümerik PEEQT davranışı.....	40
Şekil 41. DB60/1.86-C1 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.....	41
Şekil 42. DB60/1.86-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.....	42
Şekil 43. DB60/1.86-C1/SR numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.....	43
Şekil 44. DB60/1.86-C1/SR deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.....	43
Şekil 45. DB60/1.86-C1/SR deney numunesi orta ekseni hizasındaki donatıların birim şekildeğiştirme eğrileri.....	44
Şekil 46. DB60/1.86-C1/SR deney numunesi çatlak ekseni üzerinde bulunan donatıların davranışı.....	45
Şekil 47. DB60/1.51-C1 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.....	46
Şekil 48. DB60/1.51-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.....	47
Şekil 49. DB55/1.67-C1 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.....	48
Şekil 50. DB55/1.67-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.....	49
Şekil 51. DB50/1.86-C1 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.....	50
Şekil 52. DB50/1.86-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.....	50
Şekil 53. DB50/1.86-C1/SR numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.....	51
Şekil 54. DB50/1.86-C1/SR deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.....	52
Şekil 55. DB50/1.86-C1/SR deney numunesi orta noktadaki donatıların birim şekildeğiştirme eğrileri.....	53
Şekil 56. DB50/1.86-C1/SR deney numunesi çatlak ekseni üzerinde bulunan donatıların davranışı.....	54
Şekil 57. DB50/1.63-C1 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.....	55

Şekil 58. DB50/1.63-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.....	55
Şekil 59. DB50/1.40-C1 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.....	56
Şekil 60. DB50/1.40-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.....	57
Şekil 61. DB40/1.86-C1 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.....	58
Şekil 62. DB40/1.86-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.....	59
Şekil 63. DB40/1.86-C2 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.....	60
Şekil 64. DB40/1.86-C2 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.....	61
Şekil 65. DB40/1.86-C3 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.....	62
Şekil 66. DB40/1.86-C3 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.....	63
Şekil 67. DB40/1.86-C1/SR numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.....	64
Şekil 68. DB40/1.86-C1/SR deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.....	65
Şekil 69. DB40/1.86-C1/SR deney numunesi orta noktadaki donatıların birim şekildeğiştirme eğrileri.....	65
Şekil 70. DB40/1.86-C1/SR deney numunesi çatlak ekseninde bulunan donatıların davranışı.....	66
Şekil 71. Nümerik sonuçların performansı.....	69
Şekil 72. Kesit yüksekliğinin yüksek kirişlerin yük-yerdeğiştirme davranışına etkisi.....	71
Şekil 73. Kesit yüksekliğinin yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkisi.....	71
Şekil 74. <i>ad</i> oranının (a sabit) yüksek kirişlerin yük-yerdeğiştirme davranışına etkisi.....	72
Şekil 75. <i>ad</i> oranının (a sabit) yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkisi.....	72
Şekil 76. <i>ad</i> oranının (d sabit) yüksek kirişlerin yük-yerdeğiştirme davranışına etkisi.....	73
Şekil 77. <i>ad</i> oranının (d sabit) yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkisi.....	74
Şekil 78. Beton basınç dayanımının yüksek kirişlerin yük-yerdeğiştirme davranışına etkisi..	74
Şekil 79. Beton basınç dayanımının yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkisi.....	75
Şekil 80. DB50/1.84-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz sonucu.....	76
Şekil 81. DB50/1.75-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz sonucu.....	76
Şekil 82. S0M ve S1M numunesi yük – yerdeğiştirme davranış grafikleri (Mihaylov vd., 2010).	77
Şekil 83. S0M ve S1M numunesi yük – çatlak genişliği davranış grafikleri (Mihaylov vd., 2010).....	78

Şekil 84. B350-1-55, B500-1-55, B700-1-55 ve B1000-1-55 numunesi yük – yerdeğiştirme davranış grafikleri (El-Sayed ve Shuraim, 2015).....	78
Şekil 85. B350-1-55, B500-1-55, B700-1-55 ve B1000-1-55 numunesi yük – çatlak genişliği davranış grafikleri (El-Sayed ve Shuraim, 2015).....	78
Şekil 86. 00_00, 00_02 ve 00_03 numunesi yük – yerdeğiştirme davranış grafikleri (Tuchscherer ve Qesada, 2015).....	79
Şekil 87. 00_00, 00_02 ve 00_03 numunesi yük – çatlak genişliği davranış grafikleri (Tuchscherer ve Qesada, 2015).....	79
Şekil 88. Eğitim verisinin saçılım diyagramı (birim: kN).....	84
Şekil 89. Doğrulama verisinin saçılım diyagramı (birim: kN).....	84
Şekil 90. DB50/1.84-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.....	95
Şekil 91. DB50/1.75-C1/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.....	95
Şekil 92.DB50/1.75-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.....	96
Şekil 93. DB50/1.38-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.....	96
Şekil 94. DB50/1.32-C1/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.....	96
Şekil 95. DB50/1.32-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.....	97
Şekil 96. DB60/1.87-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.....	97
Şekil 97. DB60/1.80-C1/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.....	97
Şekil 98. DB60/1.80-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.....	98
Şekil 99. DB60/1.50-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.....	98
Şekil 100. DB60/1.44-C1/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.....	98
Şekil 101. DB60/1.44-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.....	99
Şekil 102. DB55/1.65-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.....	99
Şekil 103. DB55/1.58-C1/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.....	99
Şekil 104. DB55/1.58-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.....	100
Şekil 105. DB40/1.80-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.....	100
Şekil 106. DB40/1.68-C1/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.....	100
Şekil 107. DB40/1.68-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.....	101
Şekil 108. DB40/1.80-C2/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.....	101
Şekil 109. DB40/1.68-C2/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.....	101
Şekil 110. DB40/1.68-C2/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.....	102
Şekil 111. DB40/1.80-C3/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.....	102
Şekil 112. DB40/1.68-C3/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.....	102
Şekil 113. DB40/1.68-C3/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.....	103



ÖZET

Bu 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 kesme etkisi ön plana çıkmakta olup 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 proje 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. Proje 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.

Anahtar Kelimeler: Betonarme yüksek kiriş, Kesme çatlağı, Artık yük taşıma kapasitesi, Deneysel çalışma, Sonlu elemanlar yöntemi



ABSTRACT

The aim of the study is an 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. In RC deep beams, diagonal cracks stemming from principal tensile stresses may cause sudden and brittle failure. An accurate determination of residual load carrying capacity of diagonally cracked deep beams will enable to determine the critical members needing urgent response in advance. This information is very important to prevent loss of life and property. Therefore, new approaches are needed in practice to determine residual load carrying capacity of existing diagonally cracked deep beams. In literature, a chart was proposed to determine residual load carrying capacity of existing diagonally cracked 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. Secondly, a numerical study is performed by creating finite element models verified sufficiently considering the experimental study results. Later, new RC deep beams are designed by considering 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 the experimental study results. Lastly, 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 study. The proposed formulae diminishes deficiencies of the chart proposed in literature.

Keywords: Reinforced concrete deep beam, Shear crack, Residual load carrying capacity, Experimental study, Finite element method

1. GİRİŞ

1.1 Projenin Tanımı

Günümüzde yüksek kirişler; köprülerde kolon üstü başlık kirişi, yüksek yapılarda transfer kirişi ve temel kazıklarında kazık baş 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). Yüksek kirişler; eğik çatlakın 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. Literatürde, eğik olarak çatlama betonarme yüksek kirişlerin artık yük taşıma kapasitesinin tespit edilmesine yönelik bir tablo (Birrcher vd., 2009) önerilmekle birlikte, bu tablonun önemli eksiklikleri bulunmaktadır.

Bu proje çalışmasının amacı; eğik olarak çatlama 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. Proje 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.



(a) Köprü başlık kirişi (Young vd., 2002)



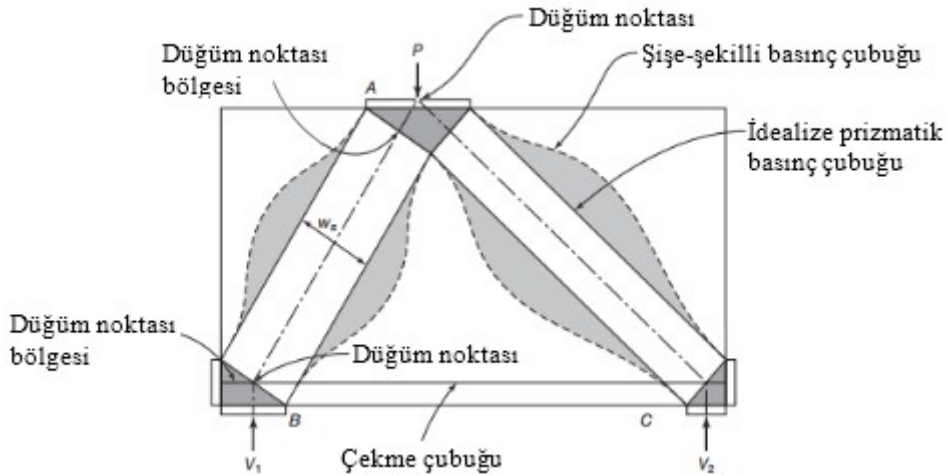
(b) Bir otobüs terminalindeki yüksek kiriş elemanı (EERI, 2018)

Şekil 1. Kesme etkisiyle eğik olarak çatlamış mevcut betonarme yüksek kiriş örnekleri.

1.2 Konu ve Kapsam

Günümüzde betonarme yüksek kirişlerin tasarımı, deneysel çalışma sonuçları kullanılarak elde edilmiş ampirik tasarım metotları ile 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 aksenel 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). 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 kesme etkisi nedeniyle asal çekme gerilmelerinden oluşan eğik çatlaklarla uygulamada sıklıkla karşılaşılmaktadır (Young vd., 2002). Yüksek kirişler; eğik çatlakın 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 çatlaklanmış 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, çatlaklanmış mevcut betonarme yüksek kirişlerin artık yük taşıma kapasitelerinin tespit edilebilmesine yardımcı olacak yaklaşımlara ihtiyaç bulunmaktadır.



Şekil 2. 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

betonarme yüksek kirişlerin kesme ve eğik çatlak davranışına olan etkisi ihmal edilmiştir. Farklı a/d oranlarına sahip yüksek kiriş numunelerinin de dikkate alınması, 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_t) 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 vd. (2009) tarafından önerilen tablonun, yukarıda belirtilen eksiklikleri ve kısıtları nedeniyle uygulamadaki ihtiyacı tam anlamıyla karşılayamayacağı değerlendirilmektedir. Bu proje çalışması kapsamında uygulamadaki ihtiyacı gidermek amacıyla, eğik olarak çatlamış 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 vd., 2012). Klasik kırışlerin eğik çatlak davranışına etkisi olduğu bilinen bu parametrelerin, yüksek kırışler içinde geçerliliğinin araştırılması gerekmektedir. Bu parametrelere ilave olarak başka önemli parametrelerin de olabileceği göz ardı edilmemelidir.

Bu proje kapsamında, betonarme yüksek kırışlerin kesme etkisi altındaki hasar davranışının incelenmesi amacıyla literatürde gerçekleştirilen çalışmalar kapsamlı olarak araştırılmıştır. Literatür araştırması sonucunda yüksek kırışlerin 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 kırış davranışının nümerik olarak gerçekçi bir şekilde modellenebilmesi için gerekli modelleme tekniği ve malzeme modellerinin oluşturulması gösterilmiştir.

Sonuç olarak, bu proje çalışması kapsamında literatürde gerçekleştirilen çalışmalar ve bu proje çalışması kapsamında yapılan deneysel ve nümerik çalışma sonuçları bir bütün olarak değerlendirilerek, betonarme yüksek kırışlerin 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 kırışlerin kesme davranışının deneysel olarak incelendiği çalışmalarda birbirinden farklı boyut, donatı ve malzeme özelliklerine sahip numuneler kullanıldığı tespit edilmiştir. Bu numuneler ile uygulamada karşılaşılan yüksek kırış özelliklerinin gerçekçi olarak temsil edilmediğinin belirlenmesi oldukça önemli bir husustur. Bu kapsamda literatürde, Birrcher vd. (2009) hazırladıkları deneysel çalışma raporunda; betonarme yüksek kırışlerin uygulamada sıklıkla karşılaşılan boyut ve malzeme özellikleri dikkate alınarak, bu elemanlar için minimum malzeme ve en kesit özellikleri tanımlanmıştır (Tablo 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 proje 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 1. Yüksek kirişlerin malzeme ve en kesit özellikleri için önerilen sınır değerler (Bircher vd., 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 proje çalışması kapsamına girmeyen çalışmalar inceleme dışı bırakılmıştır. Bu bağlamda, bu proje 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 proje çalışması kapsamında, kiriş kesitine düşey doğrultuda yerleştirilen kesme donatısı “etriye”, yatay doğrultuda yerleştirilen kesme donatısı ise “gövde donatısı” olarak isimlendirilmiştir. Etriye oranı; ρ_v ve gövde donatısı oranı; ρ_h ile gösterilmiş olup, her ikisine birden “kesme donatısı (kesme donatısı oranı: ρ_w)” denilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

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 proje çalışması kapsamına giren çalışmalar ayrıntılı olarak aşağıda anlatılmıştır.

Kong vd. (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 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 vd. (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 1'de verilen sınır değerler ile karşılaştırıldığında; deneysel çalışmada kullanılan numune boyutlarının, uygulamada karşılaşılan minimum yüksek kiriş boyutlarından daha az olduğu tespit edilmiştir.

Mihaylov vd. (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 yükleme altında etriye ve a/d oranının eleman eğik çatlak davranışına etkisi araştırılmıştır. Deneylerde, etriyelerin eğik çatlak genişliklerini sınırlandırdığı ve eleman yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde arttırdığı gözlenmiştir. Çalışmada, numunelere sadece etriyeler kesme donatısı olarak konulmuştur. Ancak uygulamada ve yönetmeliklerde yüksek kirişlere etriyelerle birlikte gövde donatısı da konulduğu göz ardı edilmiştir.

El-Sayed ve Shuraim (2015) yaptıkları deneysel çalışmada; betonarme yüksek kirişlerde boyut etkisinin eleman kesme davranışına etkisini incelemiştir. Kesme donatısı içermeyen, 15 cm sabit genişlikli, yüksekliği 35 ~ 100 cm arasında değişen 12 adet yüksek kiriş numunesi 4 noktalı deney düzeneğinde test edilmiştir. Numunelerin karakteristik beton basınç dayanımları 26,10; 53,90; 70,10 MPa olarak 3 gruba ayrılmış olup, tüm numuneler için a/d oranı 1 olarak verilmiştir. Ayrıca deney esnasında çatlak genişlikleri ölçülerek kaydedilmiştir. 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 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 vd. (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 artırılması, 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 arttıkça 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. Deneyleerde 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 cm'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 vd. (2010; 2011) yaptıkları deneysel çalışmada; etriye kol sayısının ve basınç ve çekme çubuklarının birleştiği noktadaki 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 kesme donatılarının yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına olan etkileri bu proje 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 proje 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 vd. (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 vd. (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 proje 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 proje 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 proje 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 proje kapsamında f_{ck} 'nin, yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkisinin inceleneceği deneysel ve nümerik bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Özet olarak; bu proje 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 proje 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 proje 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 bir çalışma yapmıştır. Oluşturulan SE modeli, gerçekleştirilen deneysel bir çalışma ile doğrulamışlardır. Çalışmada ABAQUS yazılımı kullanılmış olup beton, beton hasar plastisite (BHP) malzeme modeli kullanılarak modellenmiştir. Başlangıçta, yüksek kiriş elemanlarına kesme donatısı konulmamış ve kesme çatlağının olduğu bölge tespit edilmiştir. Daha sonra kesme donatısı aşamalı olarak arttırılarak donatının eleman davranışına olan etkisi incelenmiştir.

Mohamed vd. (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 proje 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 vd., 2003; Cevik vd., 2010; Chen vd., 2012; Gandomi vd., 2013). Ayrıca bu proje yazarı ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiş bilimsel bir çalışmada da (Caglar vd., 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 etkiyen 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 proje çalışmasının özgün değerlerinden bir diğeri de yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışının araştırılmasında GEP'in kullanılmasıdır.

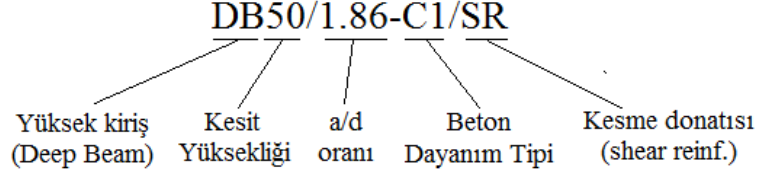
3. GEREÇ ve YÖNTEM

Bu proje 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. Proje çalışmanın son aşamasında ise, gerçekleştirmiş deneysel ve nümerik çalışmalar ile literatürde mevcut çalışma sonuçları birlikte kullanılarak, eğik olarak çatlakmış yüksek kirişlerin, çatlak genişliğinden eleman artık yük taşıma kapasitesinin hesaplanabileceği bir formül önerilmiştir.

3.1 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 proje 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

2'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 4'te gösterilmiştir.

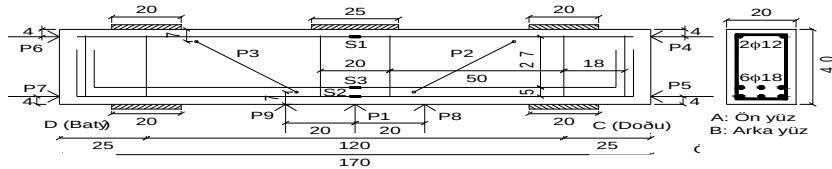


Şekil 4. Numune isimlendirilmesi.

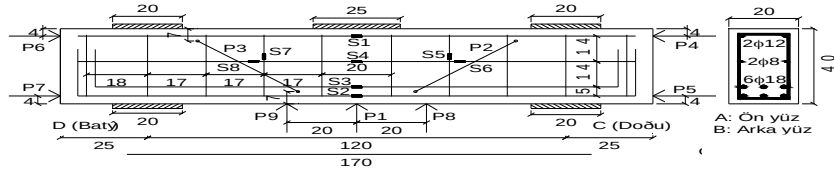
Tablo 2. Numunelerin boyut ve malzeme özellikleri.

#	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

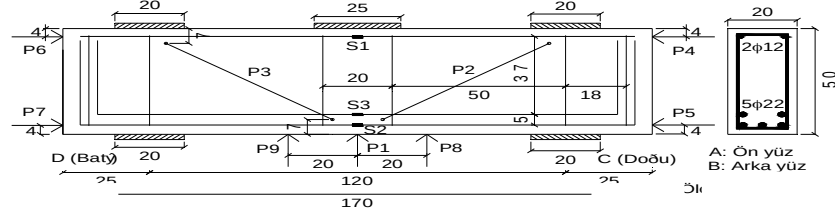
Tüm numunelerde; kiriş genişliği, $b_w=200$ mm, etriye ve gövde donatısı çapı $\varnothing 8$ mm, yük ve mesnet plakası genişlikleri sırasıyla 250 mm ve 200 mm ve paspayı, $c_c=25$ mm olacak şekilde sabit alınmıştır. Deney numunelerinin görünüş, kesit ve donatı çizimleri Şekil 5 ile Şekil 14 arasında gösterilmiştir.



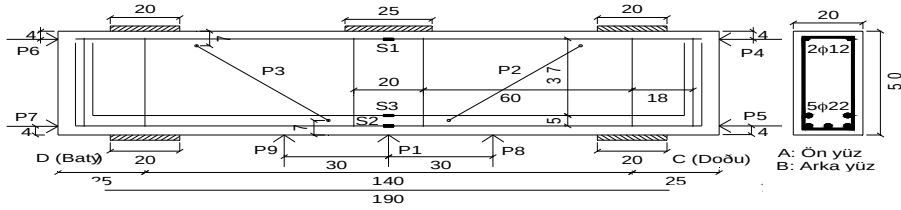
Şekil 5. DB40/1.86-C1, DB40/1.86-C2 ve DB40/1.86-C3 numunelerinin görünüş ve donatı çizimi.



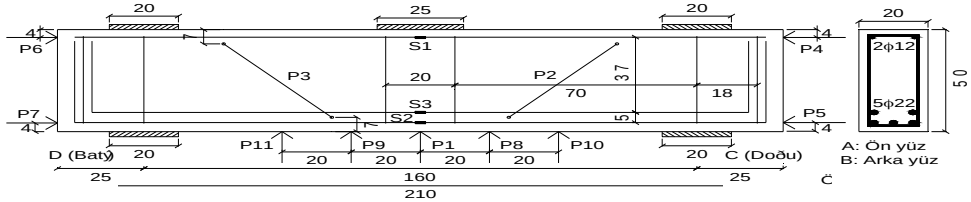
Şekil 6. DB40/1.86-C1/SR numunesinin görünüş ve donatı çizimi.



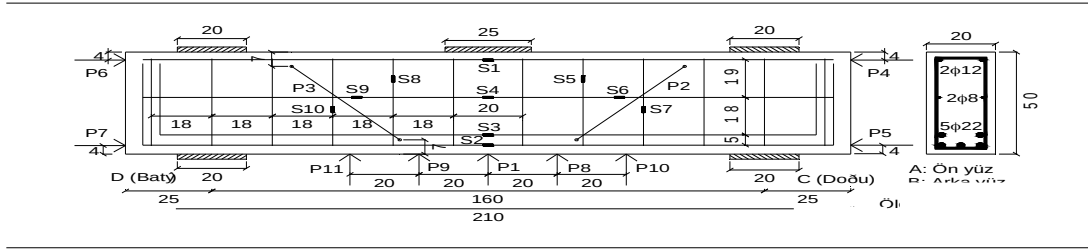
Şekil 7. DB50/1.40-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi.



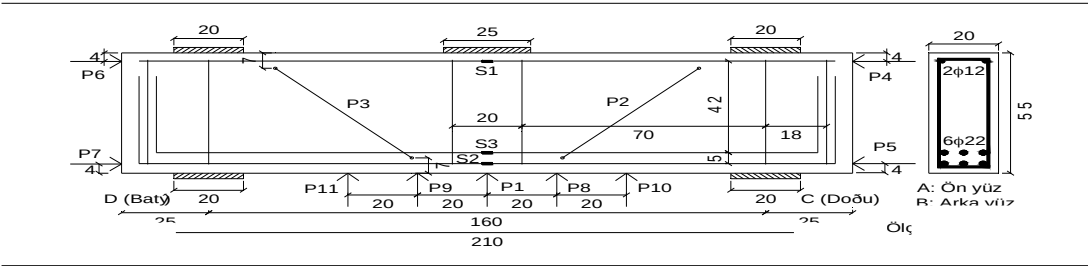
Şekil 8. DB50/1.63-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi.



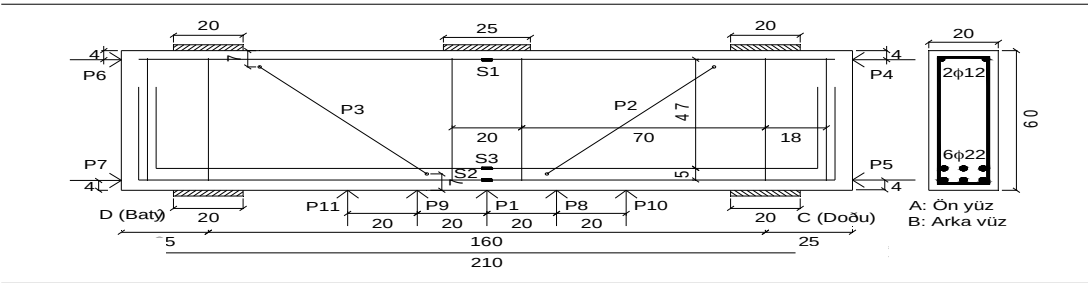
Şekil 9. DB50/1.86-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi.



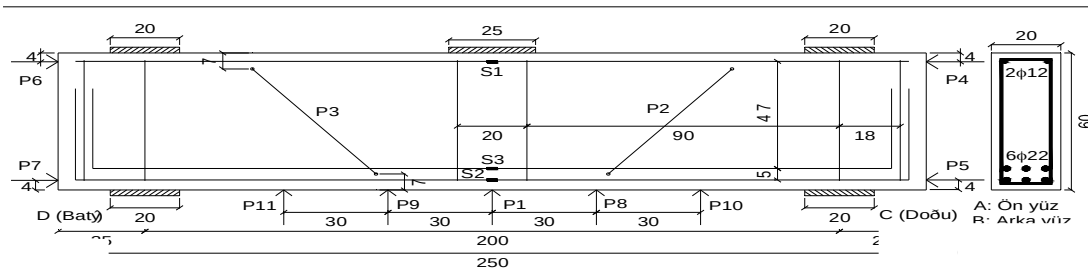
Şekil 10. DB50/1.86-C1/SR numunesinin görünüş ve donatı çizimi.



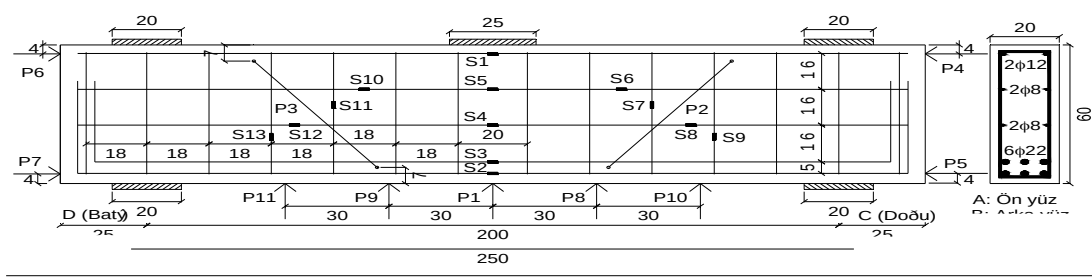
Şekil 11. DB55/1.67-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi.



Şekil 12. DB60/1.51-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi.



Şekil 13. DB60/1.86-C1 numunesinin görünüş ve donatı çizimi.



Şekil 14. DB60/1.86-C1/SR numunesinin görünüş ve donatı çizimi.

Deney numunelerinin üretimi aşamasında öncelikli olarak donatılar hazırlanmıştır (Şekil 15a). Hazırlanan donatılara deney esnasında donatılar üzerinde oluşacak birim şekildedğiştirme değerlerinin ölçülebilmesi için gerinim pulları (strain gauge) yapıştırılmıştır (Şekil 15b).



(a) 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 16).



Şekil 16. Betonun kalıba yerleştirilmesi.

Beton döküm işleminden sonra kalıplar sökülerek numunelere kür işlemi uygulanmıştır (Şekil 17). Betonun hedeflenen dayanıma ulaşması için 28 gün beklenmiş ve bu süre zarfında kür işlemine devam edilmiştir.

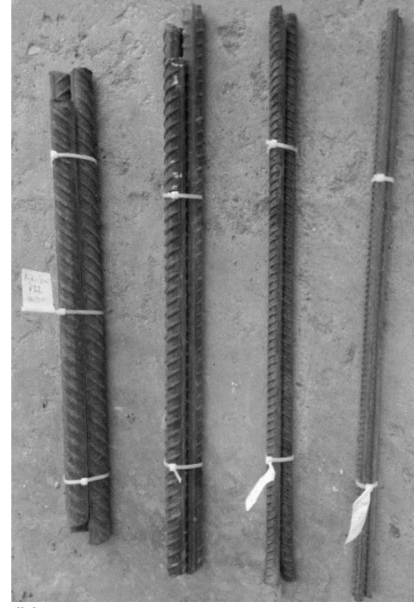


Şekil 17. Kalıbrı sökülmüş deney numuneleri.

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 18). Beton numunesi alınmasında 150 mm çap ve 300 mm yüksekliğe sahip silindirik kalıplar kullanılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 18. Betondan (a) ve donatılardan (b) alınan malzeme deneyi numuneleri.

Betondan alınan malzeme deney numuneleri 28 gün boyunca kür havuzunda 20°C de bekletilmiştir (Şekil 19). Bu süre sonunda numuneler kür havuzundan çıkartılarak kuruması için 1 gün bekletilmiştir. Kuruyan numunelerin alt ve üst yüzeylerine kükürt-grafit başlık yapılarak (Şekil 20) ve beton presinde test edilerek karakteristik basınç dayanımları belirlenmiştir. Donatı numuneleri ise donatı çekme cihazında test edilerek donatıların akma dayanımları tespit edilmiştir (Şekil 21). Malzeme deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 3'de verilmiştir. Malzeme dayanımları; her bir farklı malzeme için alınan 3'er numunenin aritmetik ortalaması olarak belirlenmiştir.

Tablo 3. Malzeme deneylerinin sonuçları.

Beton Dayanım Tipi	Ortalama basınç dayanımı
C1	18,1 MPa
C2	25,3 MPa
C3	32,0 MPa

Donatı çapı	Ortalama çekme dayanımı
Ø8 ve Ø12	421 MPa
Ø18	454 MPa
Ø22	482 MPa



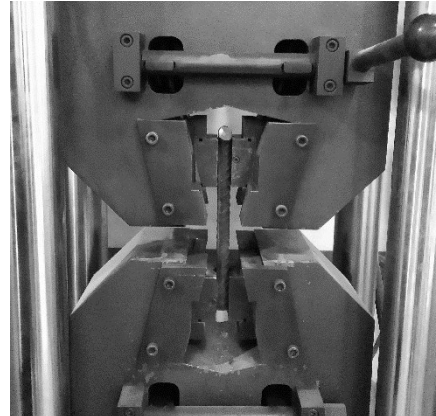
Şekil 19. Numunelerin kür havuzunda bekletilmesi.



Şekil 20. Kükürt-grafit başlık uygulaması.



(a) Beton presi

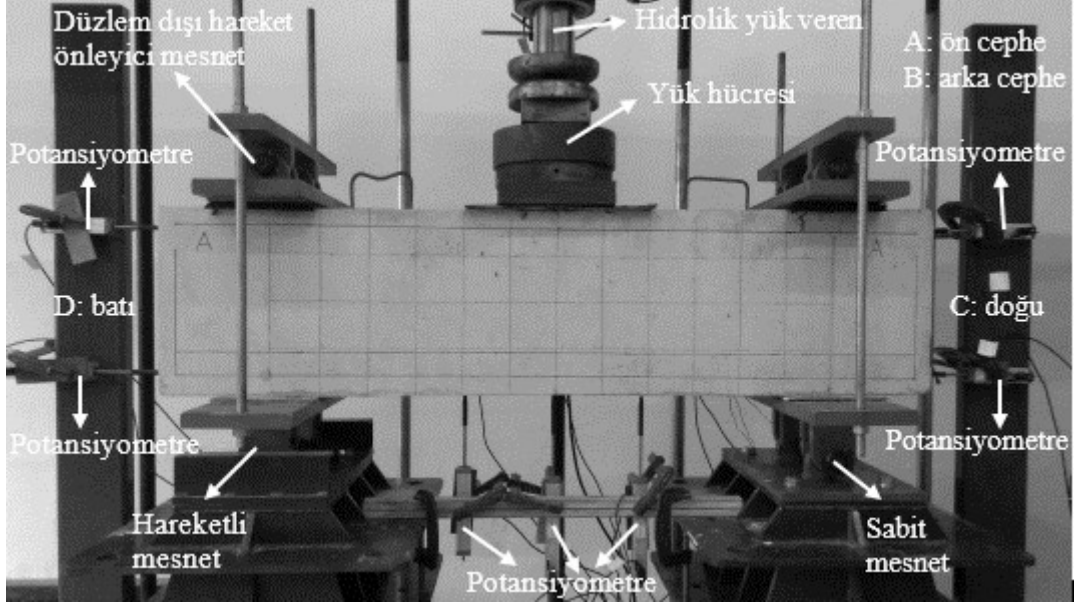


(b) Donatı çekme cihazı

Şekil 21. 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 22). 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 23).



Şekil 22. Deney düzeneği ve ölçüm cihazları.

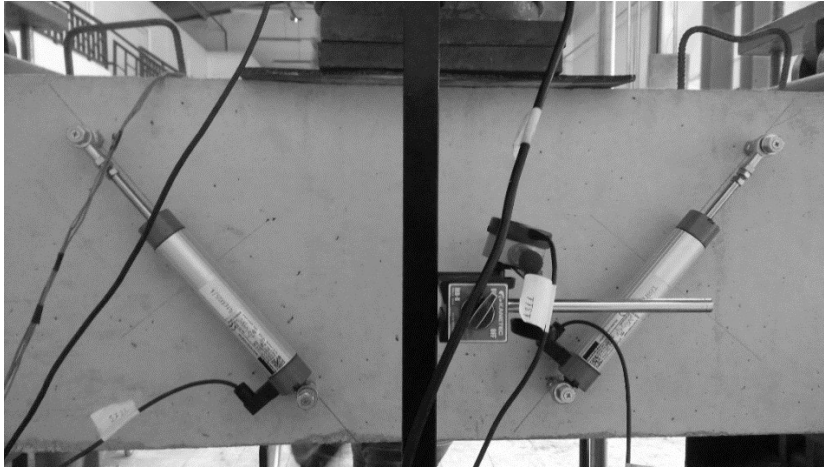
Numunenin çelik mesnet plakasına düzgün bir şekilde oturması ve yükün eşit bir şekilde numuneye aktarılabilmesi için yük ve mesnet plakaları ile numune arasında kalınlığı yaklaşık 5 mm olan kauçuk malzemeden üretilmiş plakalar yerleştirilmiştir. Bu şekilde numune yüzeyinde bulunabilecek pürüzlülük nedeniyle 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 23).



Şekil 23. 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 22). Deney esnasında yük, numuneye hidrolik bir yük veren ile sabit hızla manuel olarak uygulanmıştır. Uygulanan yük, numune ile yük veren arasına yerleştirilen bir yük hücresi (load cell) ile okunmuştur. Numune alt bölgesinde, eleman açıklığının orta ve yan noktalarına yerleştirilen potansiyometreler yardımıyla, numunede oluşan düşey yer değiştirme değerleri ölçülmüştür. Ayrıca numune C ve D cephelerindeki yan yüzeylerine, alt ve üst noktalarda da potansiyometreler yerleştirilerek yatay yerdeğiştirme değerleri de okunmuştur (Şekil 22). Her bir numuneye yerleştirilen potansiyometrelerin adedi ve konumları Şekil 5 ile Şekil 14 arasında ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Çizimler üzerinde potansiyometreler “P” harfi ile belirtilmiş ve sıra numaraları da yanlarına yazılmıştır.

Numunede oluşacak eğik kesme çatlakları genişliklerinin ölçülebilmesi amacıyla, numunelerin B cephesindeki (arka yüzey) 2 adet çatlak ölçer cihaz yerleştirilmiştir (Şekil 24). 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 çatlakları oluşması beklenen doğrultuya (yük ve mesnet plakası uçları arasında kalan eksen) dik bir şekilde kesme bölgesinin ortasına gelecek şekilde belirlenmiştir.

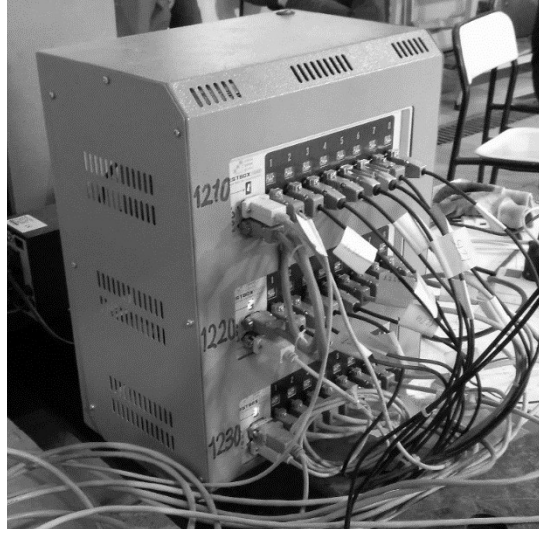


Şekil 24. Çatlak ölçerler ve yerleşimleri.

Bununla birlikte, çekme donatılarına, etriyelere ve gövde donatılarına yapıştırılan gerinim pulları (strain gauge) ile bu donatılarda oluşan birim şekildeğiştirme değerleri okunmuştur. Oluşacak eğik çatlakların; 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 ile Şekil 14 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 25). 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.

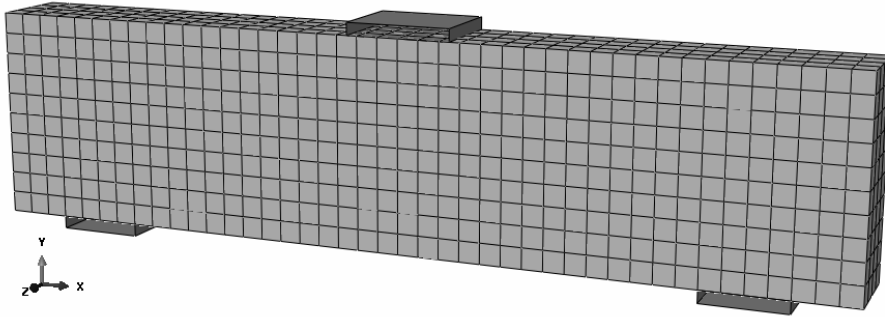


Şekil 25. Veri toplama cihazı.

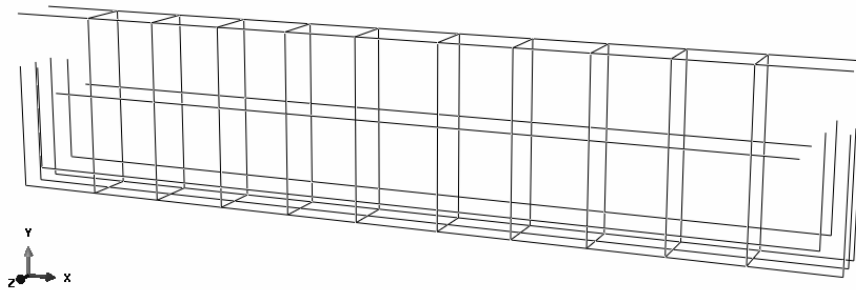
3.2 Nümerik Modelleme

Nümerik modelleme için ABAQUS (2018) sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Öncelikle 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. 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, 33, 50 ve 65 mm lik mesh boyutları parametrik olarak denenmiştir. DB60/1.86-C1 numunesinin uygun mesh boyutunun tespiti için gerçekleştirilen parametrik çalışma sonuçları örnek olarak Şekil 28’de gösterilmiştir. Analizlerde, mesh boyutu küçüldükçe analiz süresinin arttığı ve mesh boyutunun 20 mm seçildiği durumda programın analizi tamamlayamadığı görülmüştür. Parametrik çalışma sonucunda optimum mesh boyutunun 50 mm olduğu tespit edilmiştir. Bu boyut, literatürde betonun nümerik olarak modellenmesinde, büyük/kaba (coarse) mesh boyutu kullanılmasının daha gerçekçi sonuçlar verdiği bulgusu ile de örtüşmektedir (Demir vd., 2016b). 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 26 ve Şekil 27’de gösterilmiştir.

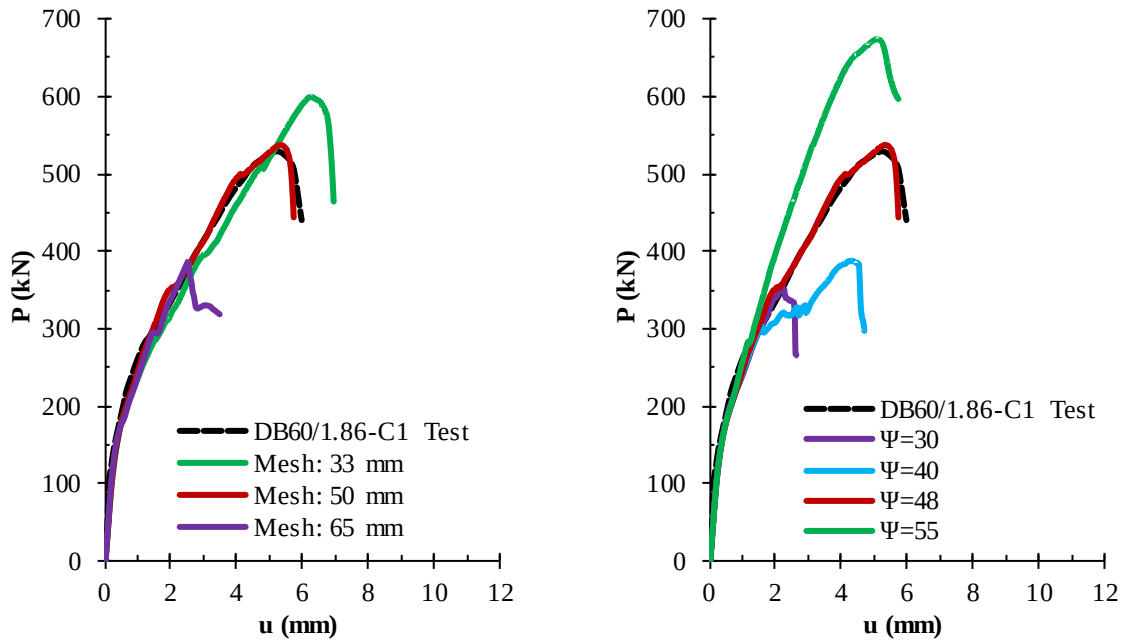


Şekil 26. Beton ve yük ve mesnet plakaları nümerik modeli.



Şekil 27. Donatıların nümerik modeli.

Daha sonra 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 4'te verilmiştir. Literatürde betonarme yüksek kirişlerin nümerik olarak doğrusal olmayan davranışlarının modellenmesinde dilasyon açısının (ψ), 50° civarında alınması önerilmiştir (Demir vd., 2016b; 2017). Bu çalışmada da ψ 'nin optimum değerinin tespiti için, SE modellerinde parametrik bir çalışma yapılarak 48° 52° arasında değişen değerler elde edilmiştir. DB60/1.86-C1 numunesi için gerçekleştirilen parametrik çalışma sonuçları Şekil 28'de örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 28. Optimum mesh boyutu (sol) ve dilasyon açısının (sağ) belirlenmesi

Tablo 4. BHP modeli temel parametreleri.

Parametre	Değer
ψ	48° 52°
ϵ	0,10
σ_{b0}/σ_{c0}	1,16
K	0,6667
μ	0,0001

Betonun basınç altındaki davranışı; gerilme – inelastik birim şekildeğiştirme ($\sigma_c - \varepsilon_c$) cinsinden, çekme etkisi altındaki davranışı ise gerilme – çatlak genişliği ($\sigma_t - w$) cinsinden tanımlanmıştır (Şekil 29). Eksenel basınç durumunda inelastik gerilmenin başladığı 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. Betonun σ_{c0} ile maksimum gerilmesi olan σ_{cu} arasında kalan $\sigma_c - \varepsilon_c$ davranış grafiği FIB MC2010 (2010) kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca, 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. Eksenel çekme durumunda ise gerilme – birim şekildeğiştirme ($\sigma_t - \varepsilon_t$) davranışı maksimum çekme gerilmesi (f_{ctk}) değerine kadar elastik bir davranış göstermektedir. f_{ctk} değerine karşılık gelen birim şekildeğiştirme değeri (ε_{t0}), maksimum gerilmenin başlangıç elastisite modülüne (E_0) bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Maksimum çekme gerilmesi değerine ulaşıldığında betonda çekme çatlakları oluşmaktadır. Çatlakların oluşması ve ilerlemesi ile birlikte, gerilme değerleri hızla azalmakta ve elemanda ani ve gevrek bir davranış gözlenmektedir (ABAQUS Documentation, 2018). Betonun bu davranışı çekme yumuşaması (tension softening) olarak isimlendirilmektedir. Betonun basınç davranışında olduğu gibi, çekme yumuşaması davranışı da mesh özelliklerine oldukça hassastır. Bu hassasiyetin giderilmesi için literatürde betonun çekme davranışının $\sigma_t - \varepsilon_t$ yerine, gerilme – çatlak genişliği ($\sigma_t - w$) davranışının tanımlanması tavsiye edilmektedir. Bu sayede modelin mesh hassasiyeti azaltılabilmektedir (Hillerborg vd., 1976; Karayannis, 2000). Bu çalışmada betonun f_{ctk} 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.

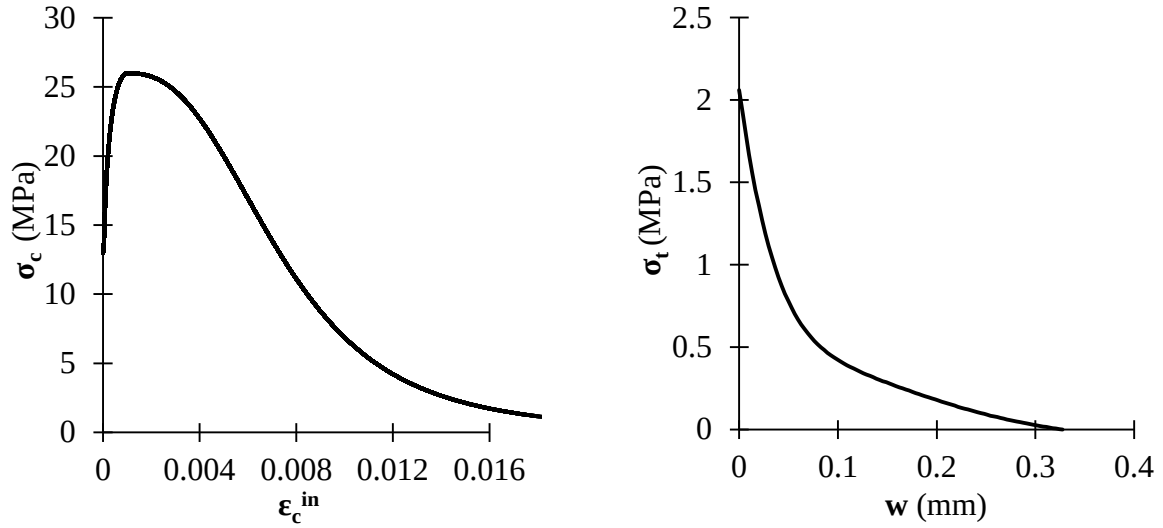
Bununla birlikte, basınç ve çekme etkisi altındaki hasar parametresi davranışını gösteren grafikler Şekil 30'da gösterilmiştir. Farklı beton sınıfına ait, beton malzeme modelleri oluşturulurken hesaplamalarda kullanılan diğer parametreler Tablo 5'te verilmiştir. Tabloda,

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.

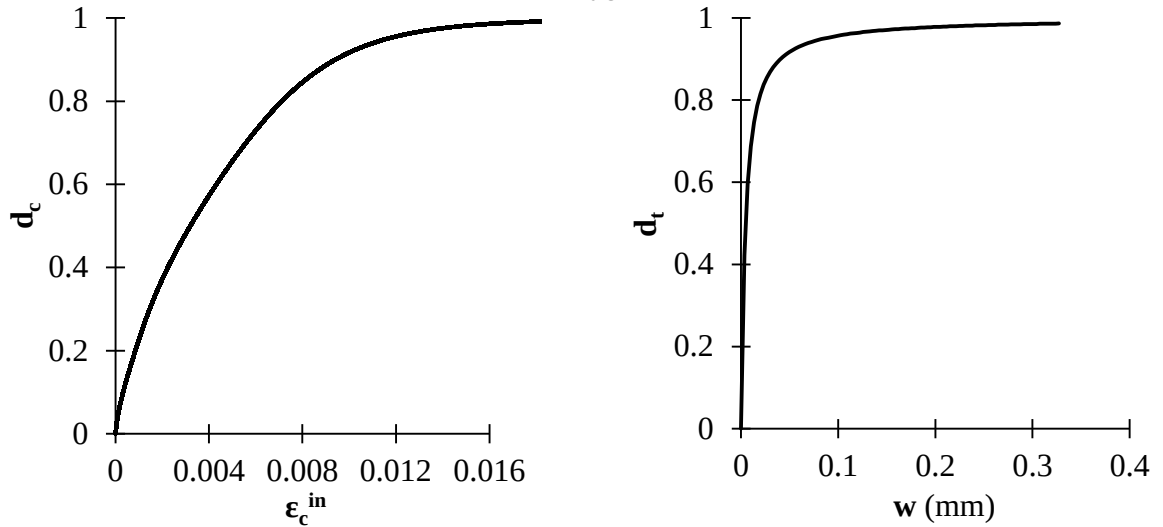
Tablo 5. Betonun sayısal modelinde kullanılan diğer parametreler.

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

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.



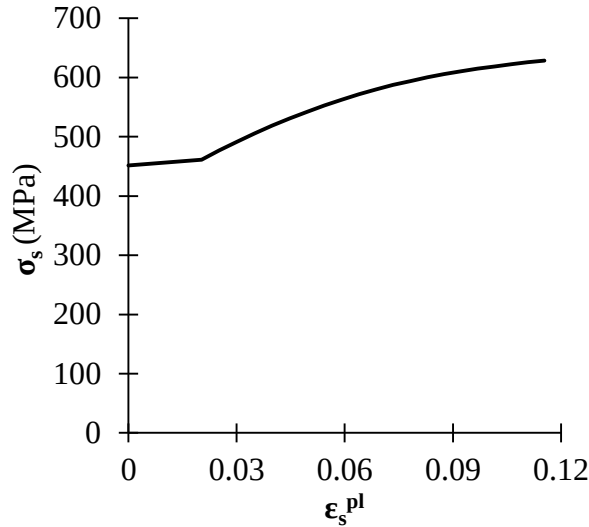
(a) (b)
Şekil 29. Betonun basınç (a) ve çekme (b) etkisindeki davranış grafikleri.



(a) (b)
Şekil 30. 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 ($\sigma_s - \varepsilon_s^{pl}$) davranışı olarak tanımlanmıştır. Donatı çeliğinin malzeme davranışının elde edilmesi için literatürde Mander vd. (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). Donatıların poisson oranı ise sabit 0,30 alınmıştır. Nümerik modelde tanımlanan örnek bir $\sigma_s - \varepsilon_s^{pl}$ eğrisi Şekil 31’da 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 31. Donatı çeliği gerçek $\sigma_s - \varepsilon_s^{pl}$ davranış grafiği.

3.3 Çatlak Genişliğinin Belirlenmesi

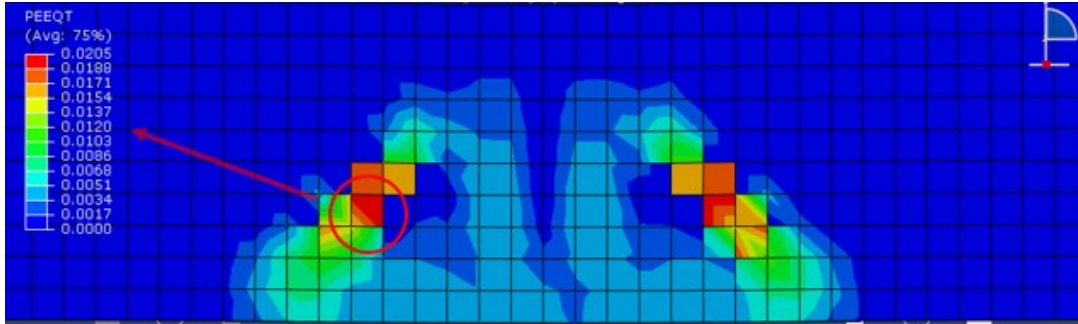
Bu proje çalışması kapsamında, Gopinath vd. (2009) önerdikleri metoda benzer bir yaklaşım kullanılarak, SE modeli üzerinden çatlak genişliklerinin ölçülebilmesi için yeni bir bağıntı önerilmiştir (Denk. 1). Bağıntının oluşturulmasında, betonun çatlama sonrası çekme yumuşaması davranışı için Hordijk (1992) 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 1 elde edilmiştir. Bu denklem ile nümerik model üzerinde istenilen adımda, bir sonlu parça üzerinde asal çekme birim şekildeğiştirme 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.

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

Denklemde; 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 32). 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 1 kullanılarak çatlak genişliği hesaplanmaktadır.



Şekil 32. Eşdeğer çekme plastik birim şekildeğiştirme (PEEQT).

3.4 Parametrik Çalışma

Bu proje 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 6). 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.

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.

Tablo 6. Parametrik çalışmada kullanılan numunelerin boyut ve malzeme özellikleri.

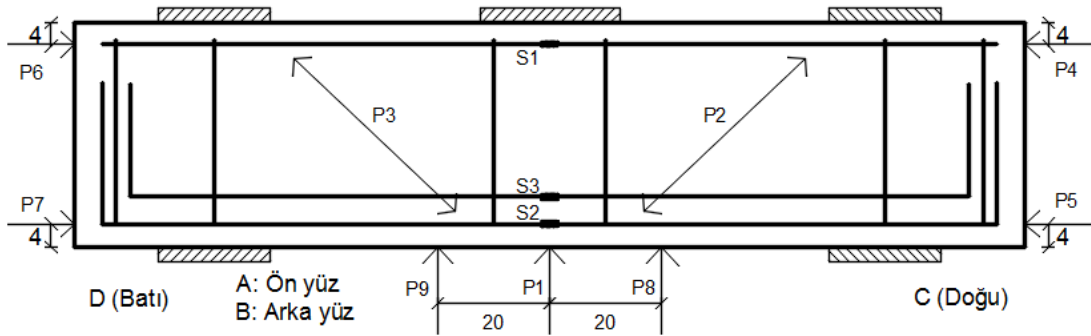
#	Numune Adı	h mm	a mm	a/d	l_t mm	ρ_l	Çekme donat.	ρ_v	Etriye	ρ_h	Gövde donat.	f_{ck} MPa
1	DB50/1.84-C1/SR-1	500	800	1.84	1600	0.0146	5 ϕ 18	0.0057	ϕ 8/87	0.0064	ϕ 8/79	18.1
2	DB50/1.75-C1/SR-2	500	800	1.75	1600	0.0125	3 ϕ 22	0.0057	ϕ 8/87	0.0060	ϕ 8/83	18.1
3	DB50/1.75-C1/SR-3	500	800	1.75	1600	0.0125	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	3φ18	0.0070	φ8/71	0.0079	φ8/63	25.3
21	DB40/1.68-C2/SR-3	400	600	1.68	1200	0.0107	3φ18	0.0050	φ8/100	0.0047	φ8/106	25.3
22	DB40/1.80-C3/SR-1	400	600	1.80	1200	0.0229	6φ18	0.0070	φ8/71	0.0085	φ8/59	32.0
23	DB40/1.68-C3/SR-2	400	600	1.68	1200	0.0107	3φ18	0.0070	φ8/71	0.0079	φ8/63	32.0
24	DB40/1.68-C3/SR-3	400	600	1.68	1200	0.0107	3φ18	0.0050	φ8/100	0.0047	φ8/106	32.0

Parametrik çalışmada uygulanan yöntemin doğruluğu ve performansı, bu proje yazarı ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bilimsel bir nümerik çalışmada da (Demir vd., 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 proje 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.

4. BULGULAR

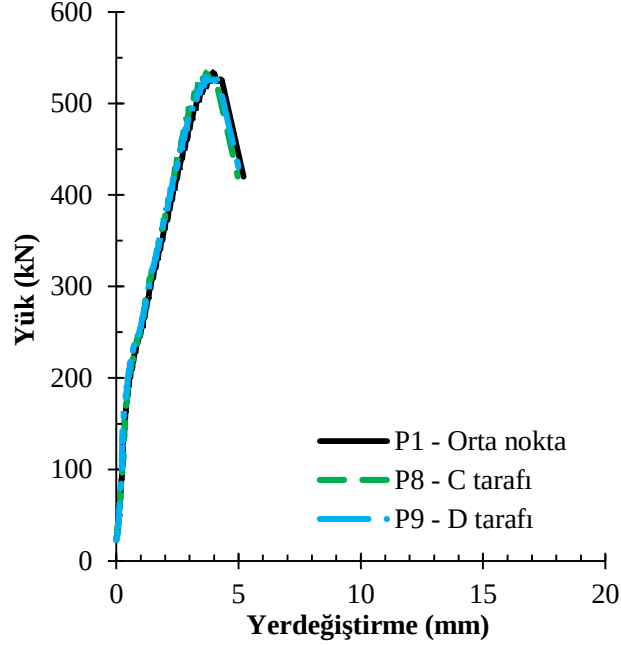
Bu proje çalışması kapsamında, betonarme yüksek kirişlerin kesme etkisi altındaki eğik çatlak davranışının gerçekçi olarak incelenebilmesi amacıyla gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışma için üretilen numuneler, kesme kritik davranış sergileyecek şekilde tasarlanmıştır. Bundan dolayı, deney esnasında numune üzerinde düşey ve yatayda oluşacak yerdeğiştirme miktarlarının oldukça sınırlı seviyede kalması ve çekme donatılarında oluşacak gerilme değerlerinin ise donatı akma dayanımlarına ulaşmaması beklenmektedir. Elemanlarda, mesnetlerde oluşan dönme miktarlarının oldukça sınırlı seviyede kalacak olması sebebiyle sünek bir davranış beklenmemektedir. Hedeflenen tasarıma ulaşıp ulaşılmadığının kontrolü için deney esnasında numune üzerinde belirli noktalardan düşey ve yatay yerdeğiştirme ile donatı birim şekildeğiştirme değerleri ölçülmüştür. Bununla birlikte numune, deney düzeneğine alt ve üst mesnet plakası arasında yerleştirilmiş olup bu iki mesnet plakası miller ile 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 33’de verilmiştir.



Şekil 33. 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 34’te 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 34 üzerinde numune altından 3 farklı noktadan ölçülen düşey yerdeğiştirme grafikleri karşılaştırıldığında (P1, P8 ve P9), eleman davranışının oldukça

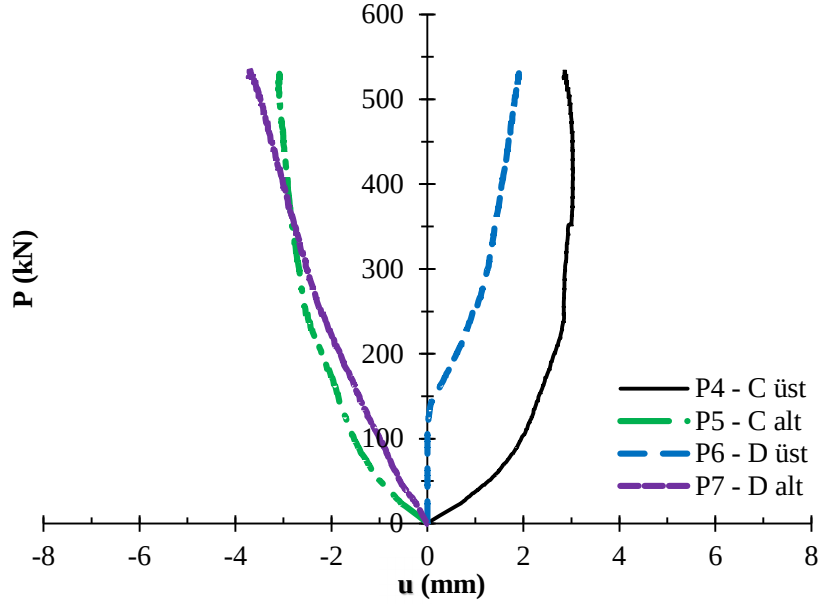
birbirlerine benzer olduğu görülmektedir. Numunelerin tasarımından beklenildiği gibi, elemanda eğilme hasarı oluşmamış ve numune altından ölçülen düşey yerdeğiştirme miktarları her üç potansiyometrede de oldukça benzer ve sınırlı seviyede kalmıştır.



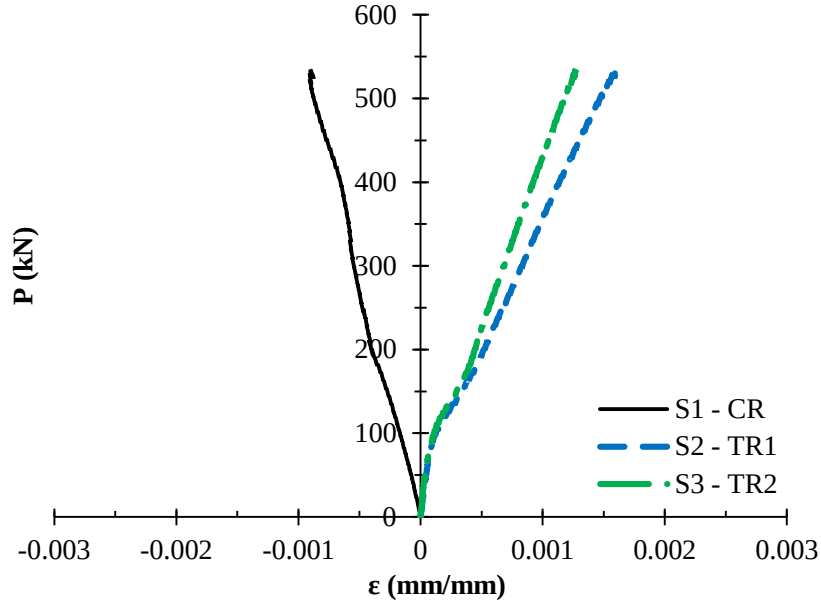
Şekil 34. Yük – düşey yerdeğiştirme davranış grafiği.

Deney esnasında numunenin C ve D yan yüzeylerinde; P4, P5, P6 ve P7 noktalarından ölçülen “yük – yatay yerdeğiştirme” davranış grafikleri Şekil 35’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.

Çekme ve basınç donatılarına yapıştırılan gerinim pullarından ölçülen “yük – birim şekildeğiştirme” davranış grafikleri Şekil 36’de verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi, basınç ve çekme donatılarında akma gözlenmemiştir. Maksimum donatı birim şekildeğiştirmesi %0,10 mertebesinde elde edilmiştir.



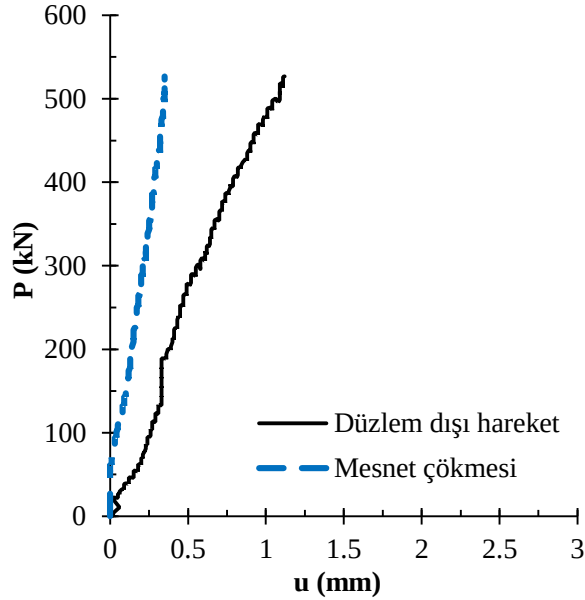
Şekil 35. Yük – yatay yerdeğiştirme davranış grafiği.



Şekil 36. Yük – donatı birim şekildeğiştirme davranış grafikleri.

Deney esnasında sabit mesnet ekseninde ölçülen “yük – mesnet çökmesi” grafiği Şekil 37’da verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi, mesnette oluşan çökme miktarı maksimum 0,30 mm mertebesinde olup oldukça sınırlı seviyededir. Bununla birlikte, deney sonucunda elde edilen yük – düzlem dışı yerdeğiştirme grafiği de Şekil 37’da gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, elemanda oluşan maksimum düzlem dışı hareketin 1,10 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 – 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 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.

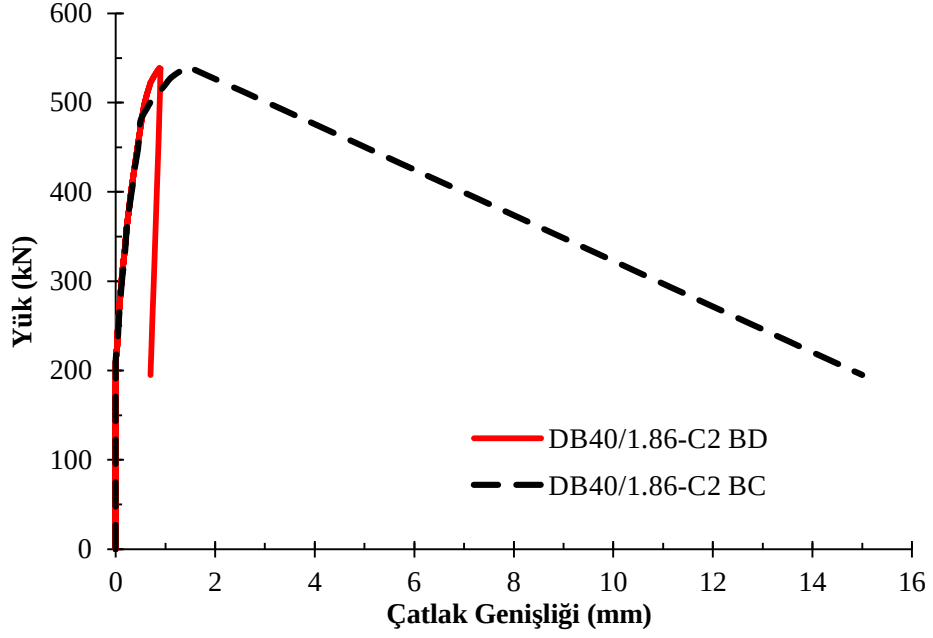


Şekil 37. Yük – mesnet çökmesi davranış grafikleri.

4.1 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 38'de örnek olarak gösterilmiştir. Numunede deney sonucunda elde edilen hasar mekanizması A yüzü (ön) ve çatlak ölçerlerin yerleştirildiği B yüzü (arka) için Şekil 39'de gösterilmiştir. Deney sırasında uygulanan yükün artışı ile birlikte her iki kesme açıklığındaki kesme çatlakları eş zamanlı olarak oluşmuş ve yüklenme 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 proje çalışması kapsamında, önerilen formülde kullanılan çatlak genişliği, eleman üzerindeki bir adet çatlakla ait maksimum çatlak

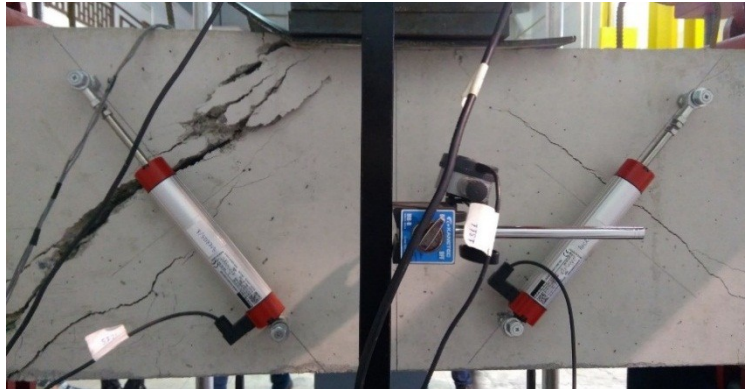
genişliğidir. Bu sebeple, deneysel çalışmanın çatlak genişliği ölçüm sonuçlarından tek çatlığa ait maksimum çatlak genişliği sonuçları dikkate alınmıştır.



Şekil 38. Yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği.



(a) A yüzeyi (ön).

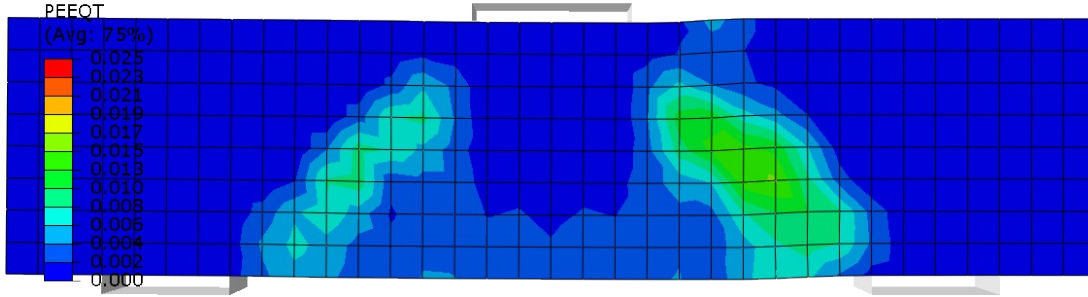


(b) B yüzeyi (arka).

Şekil 39. 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

40'da gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, nümerik modelde elemanın basınç çubuğu eksenini 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 40. Numunenin nümerik PEEQT davranışı.

4.2 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.

4.2.1 DB60/1.86-C1 deney numunesi

Deney numunesinin deney öncesi hasarsız ve deney sonrası hasarlı durumu Şekil 41'da gösterilmiştir. Numunede ilk eğik kesme çatlaklarının oluştuğu kritik çatlama yükü ($P_{cr}=235$ kN) aşılanaya kadar herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiş olup bu değerini aşılmasıyla elemanda basınç çubuğu eksenini (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 41).



(a)



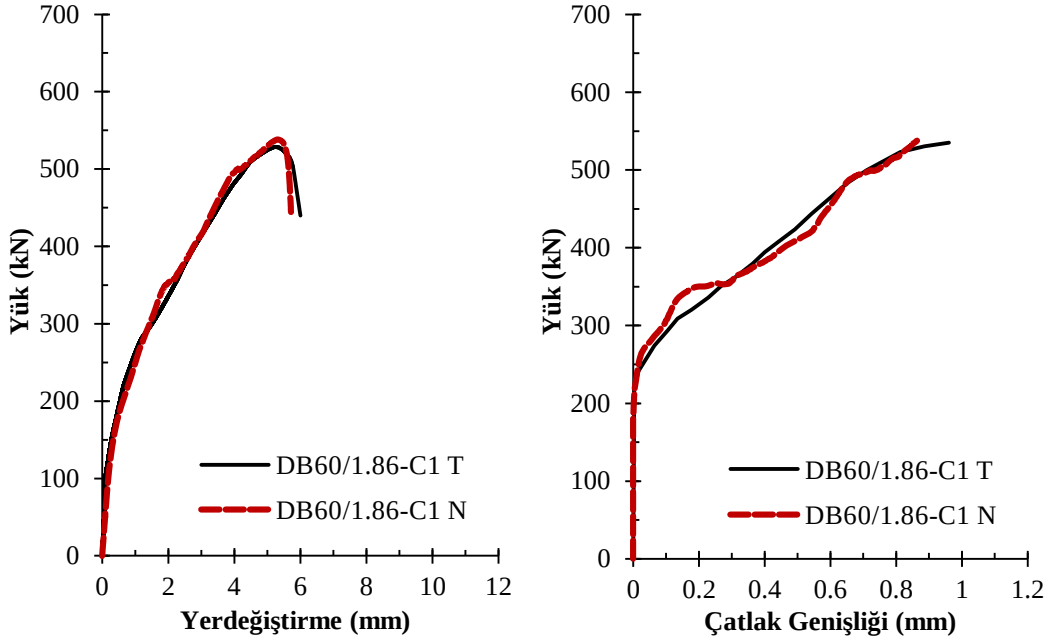
(b)

Şekil 41. 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 42’de 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 42) 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.

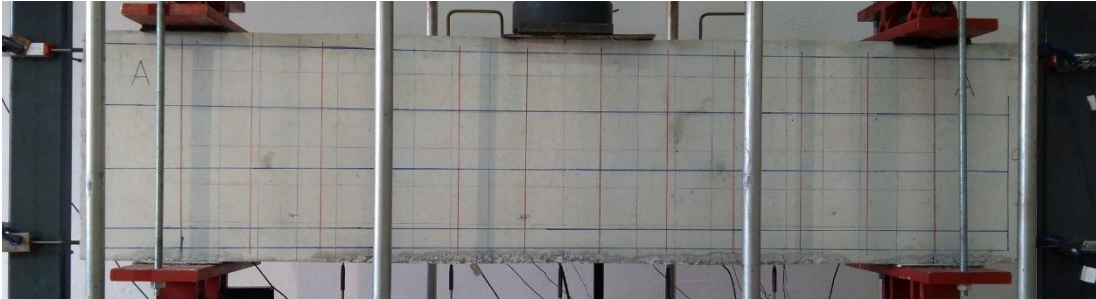
Doğrusal olmayan SE modeli üzerinden elde edilen yük – düşey yerdeğiştirme ve yük – eğik çatlak genişliği davranış grafikleri deney sonuçları ile karşılaştırıldığında (Şekil 42), nümerik modelin deney sonuçları ile oldukça başarılı bir şekilde örtüştüğü görülmüştür. Bu sebeple, oluşturulan nümerik model ile deney sonuçlarının oldukça etkin bir şekilde doğrulandığı düşünülmektedir.



Şekil 42. DB60/1.86-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

4.2.2 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 43'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 43).



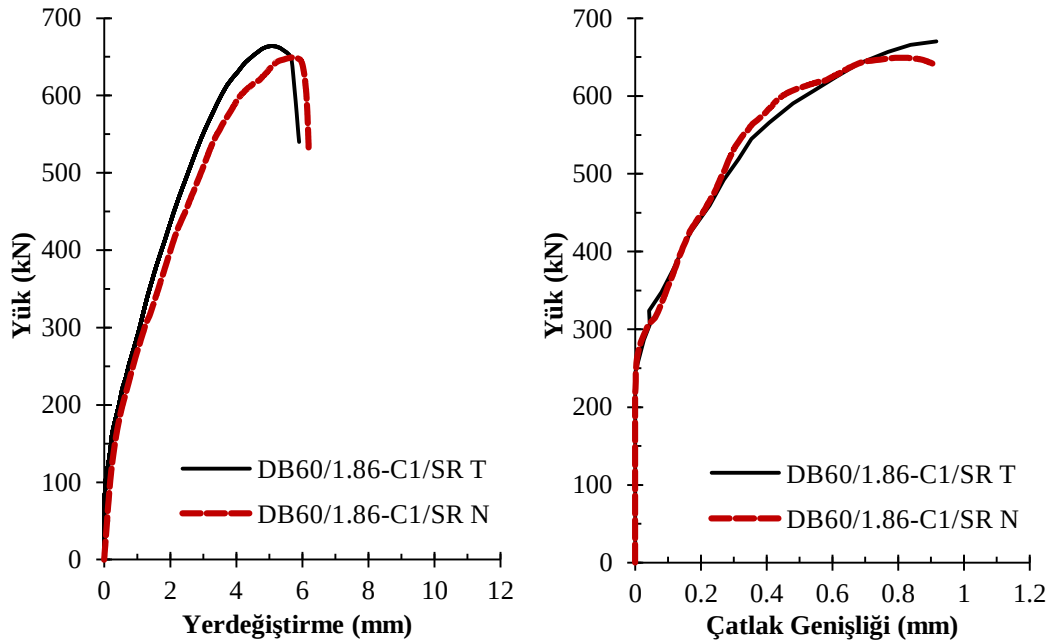
(a)



(b)

Şekil 43. 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 44'te 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 çatlak 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.



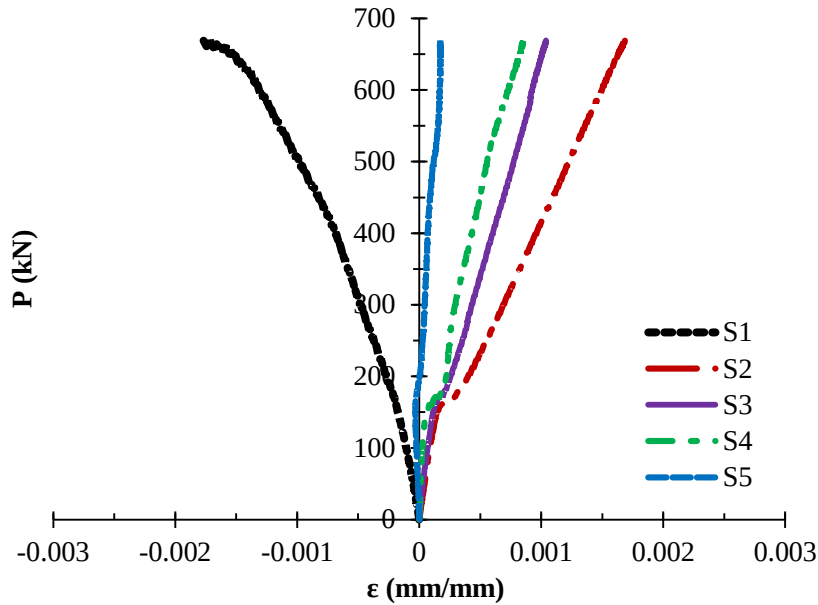
(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme

(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

Şekil 44. DB60/1.86-C1/SR deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

Numunenin yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği (Şekil 44) incelendiğinde, P_{cr} aşıldığında elemanda kesme çatlak 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 14) yapıştırılmıştır. Elemanın, uygulanan yükün altında kalan orta ekseni 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 45'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.

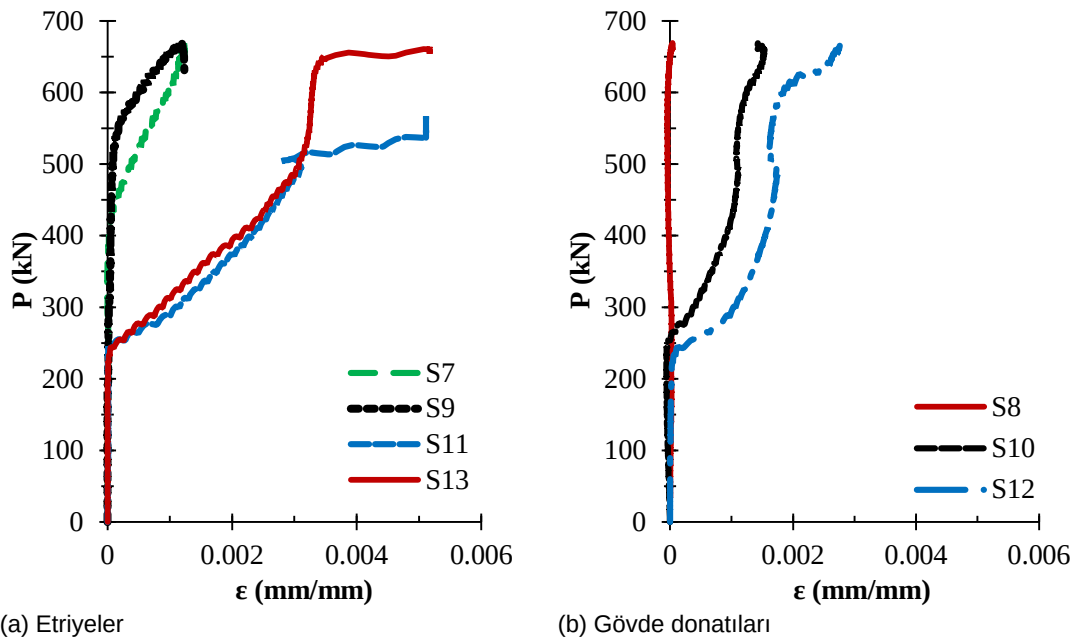


Şekil 45. DB60/1.86-C1/SR deney numunesi orta ekseni hizasındaki donatıların birim şekildeğiştirme eğrileri.

Deney esnasında numunenin çatlak (basınç çubuğu) eksenine denk gelen etriyelere yapıştırılan gerinim pullarından (Şekil 14) ölçülen $P-\epsilon_s$ davranış grafikleri Şekil 46'de verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi, etriyelerin yük taşımaya başladığı nokta; P_{cr} değerine karşılık gelmektedir. Bu noktada, betonda kesme çatlak oluşmakta ve donatılarda birim

uzamalar oluşmaya başlamaktadır. Bu nokta ayrıca çatlak ölçerlerde, çatlak genişliği değerlerinin oluşmaya başladığı noktaya da karşılık gelmektedir (Şekil 38). Kesme çatlağının 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 46). 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 14) sonuçları incelendiğinde (Şekil 46); 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 çatlağı 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 numunenin a/d oranı 1,86 olduğu için benzer davranış burada da gözlenmiştir.

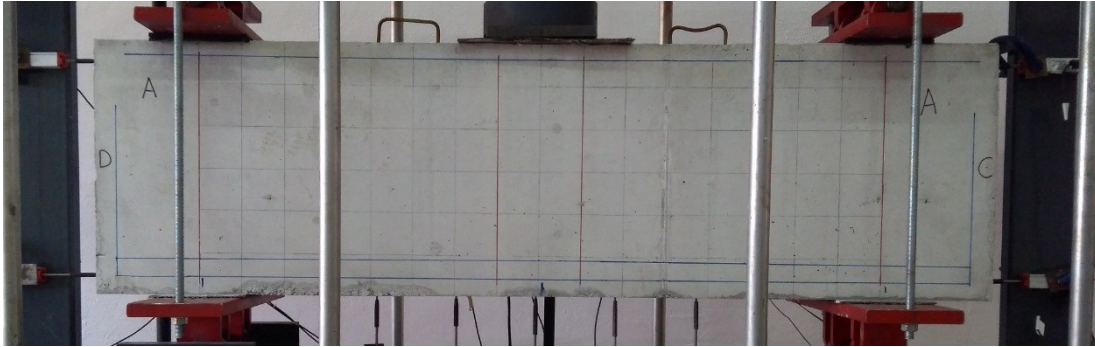


Şekil 46. DB60/1.86-C1/SR deney numunesi çatlak ekseninde bulunan donatıların davranışı.

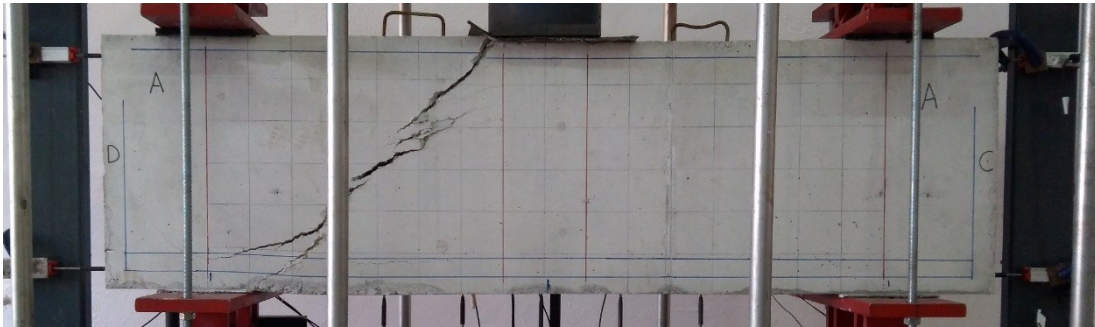
Son olarak, nümerik modelden elde edilen yük – düşey yerdeğiştirme ve yük – çatlak genişliği davranış grafikleri (Şekil 44) deney sonuçları ile karşılaştırıldığında, nümerik modelin deney sonucunu oldukça başarılı ve etkin bir şekilde temsil ettiği görülmüştür.

4.2.3 DB60/1.51-C1 deney numunesi

Deney numunesinin düzenek üzerinde, deney öncesi hasarsız durumu Şekil 47’da gösterilmiştir. Deney esnasında uygulana yük 255 kN değerine ulaşmasıyla birlikte elemanda mesnet plakasından yükleme plakası arasında kalan eksen (basınç çubuğu eksen) üzerinde eğik kesme çatlağı oluşmuştur. Bu çatlak her iki kesme açıklığında eş zamanlı olarak gözlenmiştir. Yükün artışı ile birlikte oluşan kesme çatlağı genişlikleri giderek artmış ve basınç çubuğu (strut) maksimum dayanımına ulaşarak numune ani ve gevrek bir şekilde güç tükenmesine ulaşmıştır (Şekil 47).



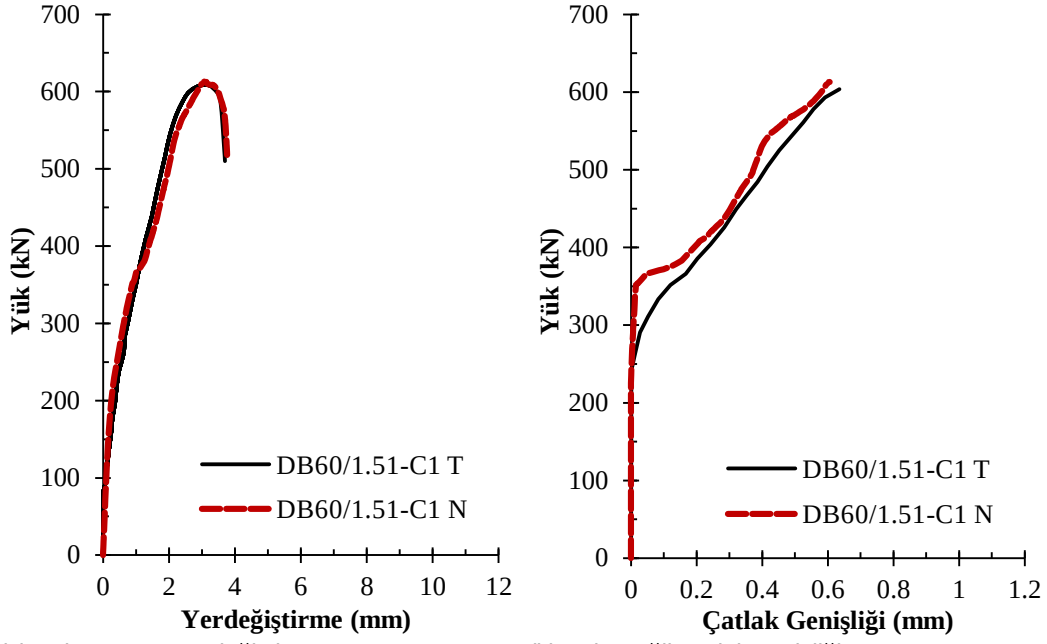
(a)



(b)

Şekil 47. 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 48’de 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 çatlağı genişliklerinin hızlıca artması ile birlikte yükte ani bir düşüş gerçekleşmiştir.



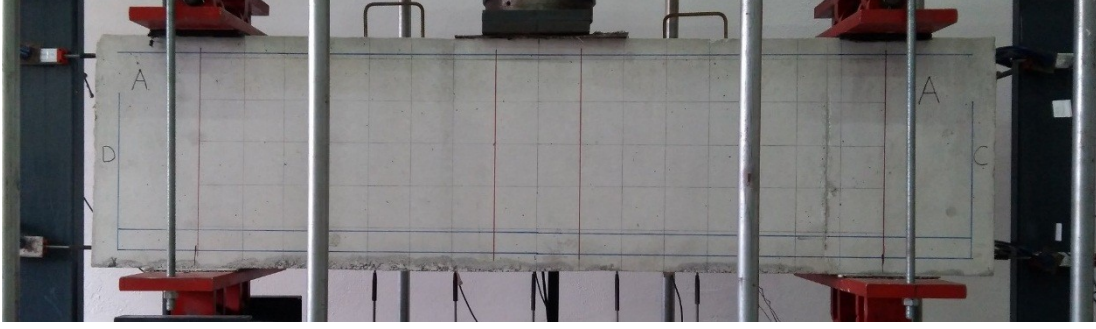
(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme (b) Yük – Eğik çatlak genişliği
Şekil 48. DB60/1.51-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

Yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği (Şekil 48) incelendiğinde, P_{cr} aşıldığında elemenda kesme çatlak oluşmuş ve uygulanan yükün artışı ile birlikte çatlak genişliği de giderek artmıştır. Maksimum yüke karşılık gelen maksimum çatlak genişliği 0,64 mm olarak elde edilmiştir.

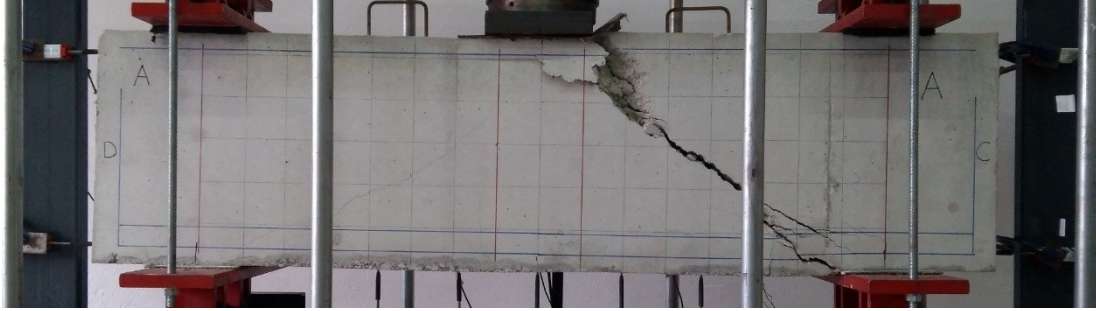
Nümerik modelden elde edilen $P-u$ davranış grafiği Şekil 48’da verilmiştir. Nümerik modelin hem yük hem de yerdeğiştirme davranışı açısından deney sonuçları ile oldukça başarılı bir şekilde örtüştüğü görülmüştür. Bununla birlikte, $P-w$ davranışı (Şekil 48) incelendiğinde ise; nümerik modelden elde 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.

4.2.4 DB55/1.67-C1 deney numunesi

DB55/1.67-C1 numunesinin deney düzeneği üzerindeki, deney öncesi durumu Şekil 49’de gösterilmiştir. Numunede P_{cr} (225 kN) aşılanaya kadar herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Bu değerin aşılmasıyla elemenda basınç çubuğu eksenini (strut) üzerinde eğik kesme çatlak oluşmuştur. Bu çatlakların oluşumu her iki kesme açıklığında eş zamanlı olarak gözlenmiştir. Uygulanan yükün artışı ile birlikte kesme çatlak genişlikleri giderek artmıştır. Deney sonucunda, basınç çubuğunun maksimum dayanımına ulaşarak kırılması ile numunede ani ve gevrek kesme hasarı oluşmuştur (Şekil 49).



(a)



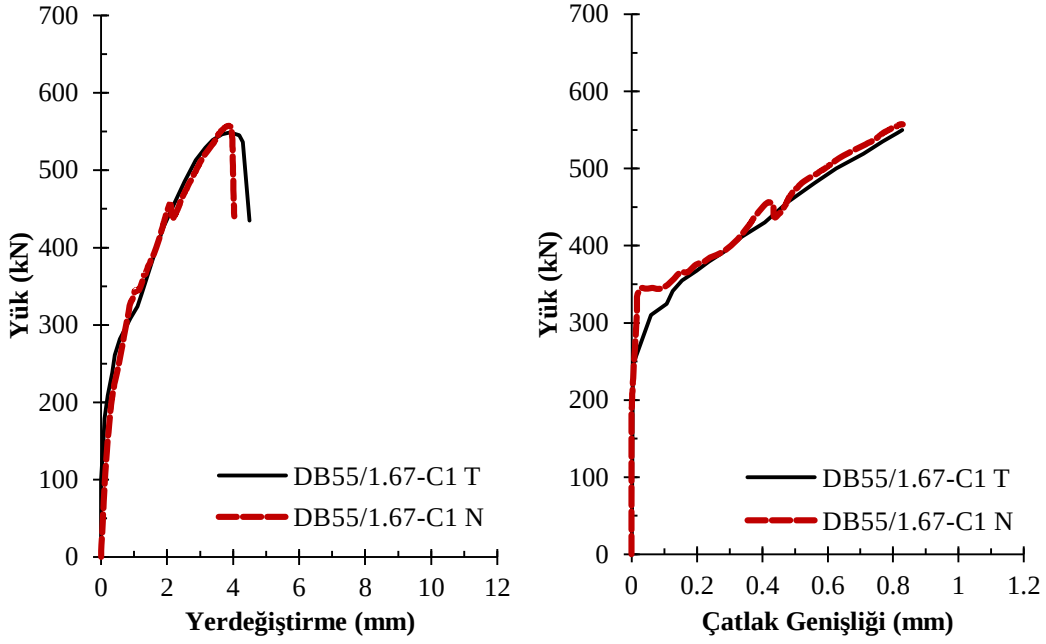
(b)

Şekil 49. 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 50’da 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 olmuştur. Numunede sünek davranış gözlenmemiştir. Uygulanan yükün maksimum değerine ulaşıldığında kesme çatlak genişliğinin hızlıca artması ile birlikte yükte ani bir düşüş gözlenmiştir.

Numunenin yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği incelendiğinde, kritik kesme yükü aşıldığında elemanda kesme çatlak 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 50) incelendiğinde, nümerik modelin hem yük hem de yerdeğiştirme açısından deney sonucu ile oldukça başarılı bir şekilde örtüştüğü görülmüştür. Yük – eğik çatlak genişliği davranışı (Şekil 50) 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.



(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme (b) Yük – Eğik çatlak genişliği
Şekil 50. DB55/1.67-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

4.2.5 DB50/1.86-C1 deney numunesi

Deney numunesinin düzenek üzerindeki, deney öncesi hasarsız ve deney sonrası hasar almış durumları Şekil 51'de gösterilmiştir. Uygulanan yük 240 kN değerine ulaştığında numunede her iki kesme açıklığında eş zamanlı olarak kesme çatlakları 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 çubuğuunda oluşan kesme hasarının artışı ile birlikte ani ve gevrek güç tükenmesine ulaşmıştır (Şekil 51).

Deney sonucunda numuneden elde edilen $P-u$ ve $P-w$ davranış grafikleri Şekil 52'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 çatlakları genişliğinin hızlıca arttığı ve yükün ani olarak düştüğu gözlenmiştir.

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.



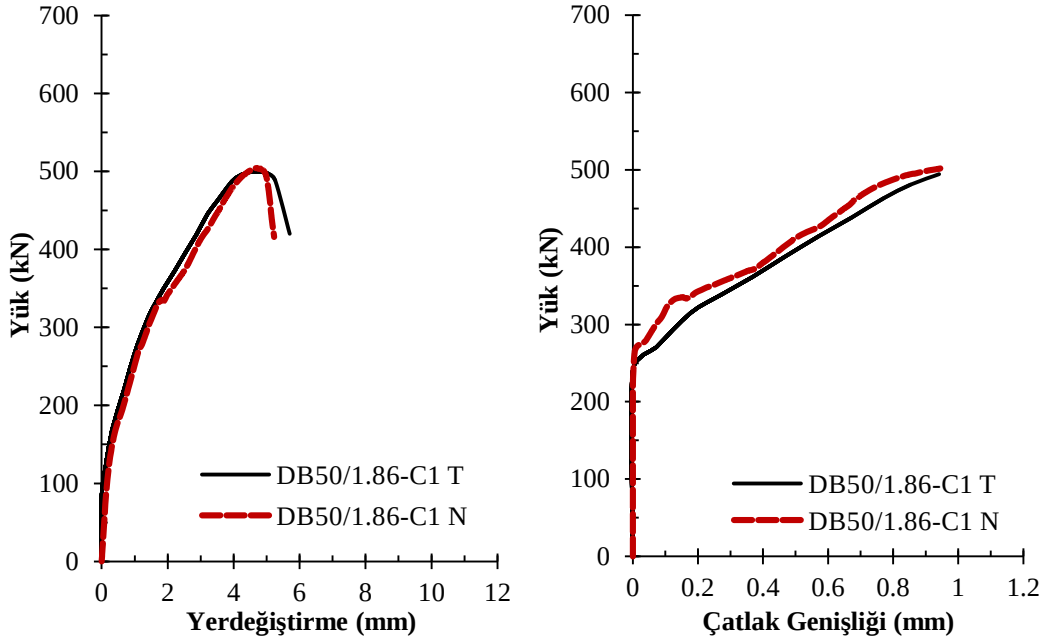
(a)



(b)

Şekil 51. DB50/1.86-C1 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.

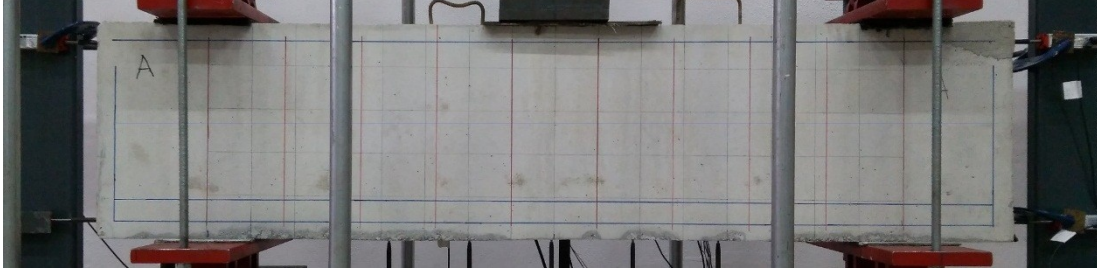
Nümerik modelden elde edilen yük – düşey yerdeğiştirme ve yük – eğik çatlak genişliği davranış grafikleri (Şekil 52) incelendiğinde, nümerik modelin hem yük hem de yerdeğiştirme ve çatlak genişlikleri davranışları açısından deney sonucu ile oldukça başarılı bir şekilde örtüştüğü görülmüştür. Sonuç olarak, deney sonucunun nümerik olarak oldukça etkin bir şekilde doğrulandığı değerlendirilmiştir.



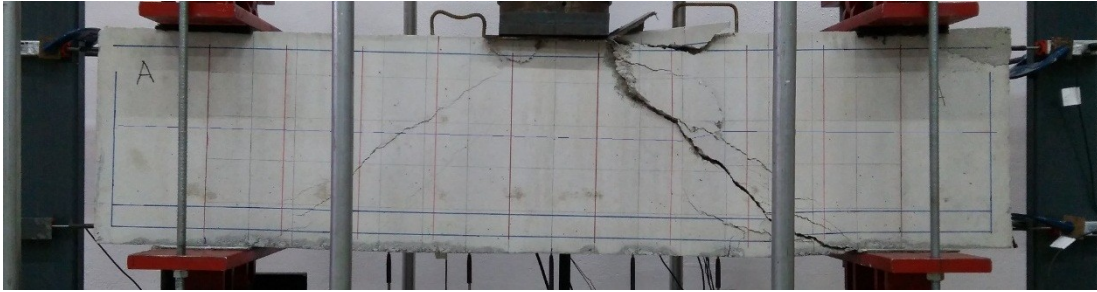
Şekil 52. DB50/1.86-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

4.2.6 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 53'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 53).



(a)

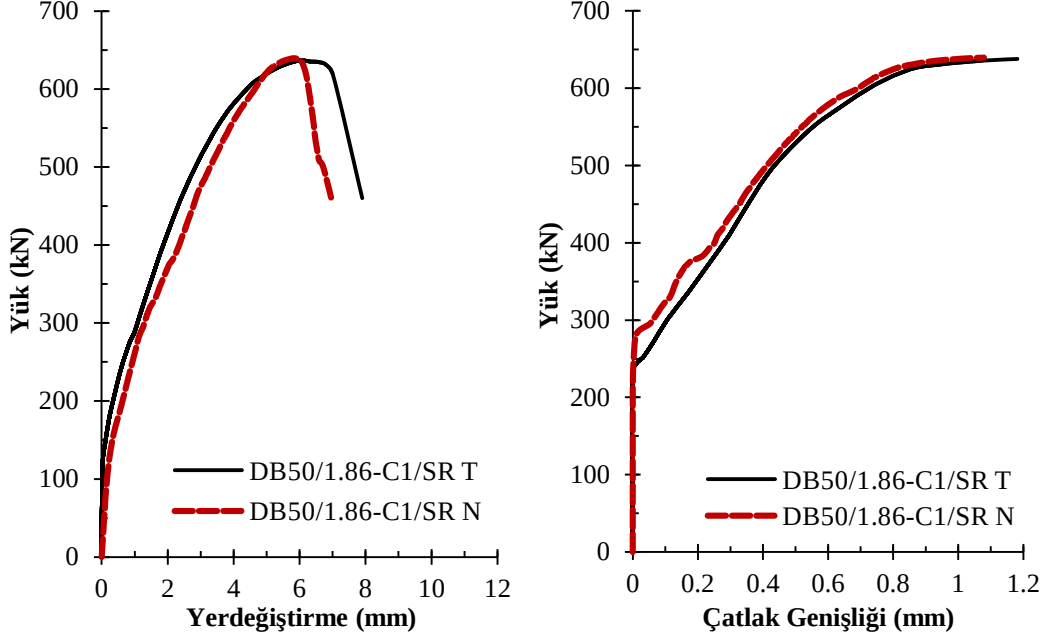


(b)

Şekil 53. 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 54'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

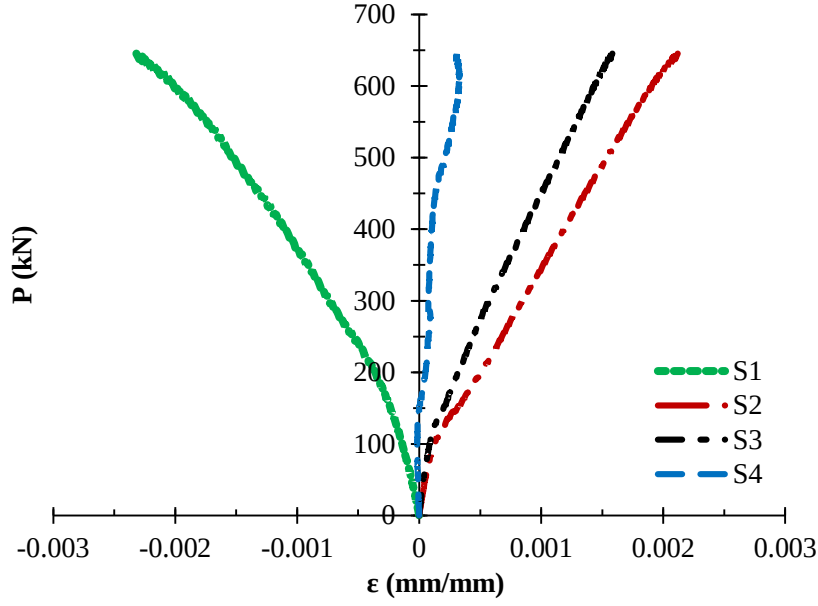
genişliğinin hızlıca artması ile birlikte yükte ani bir düşüş gerçekleşmiştir. Burada kesme donatıları süneklik olarak beklenen katkıyı sağlamamasına rağmen yük taşıma kapasitesinde önemli artışa yol açmıştır.



Şekil 54. DB50/1.86-C1/SR deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

Yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği (Şekil 54) 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 10). 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 55'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.

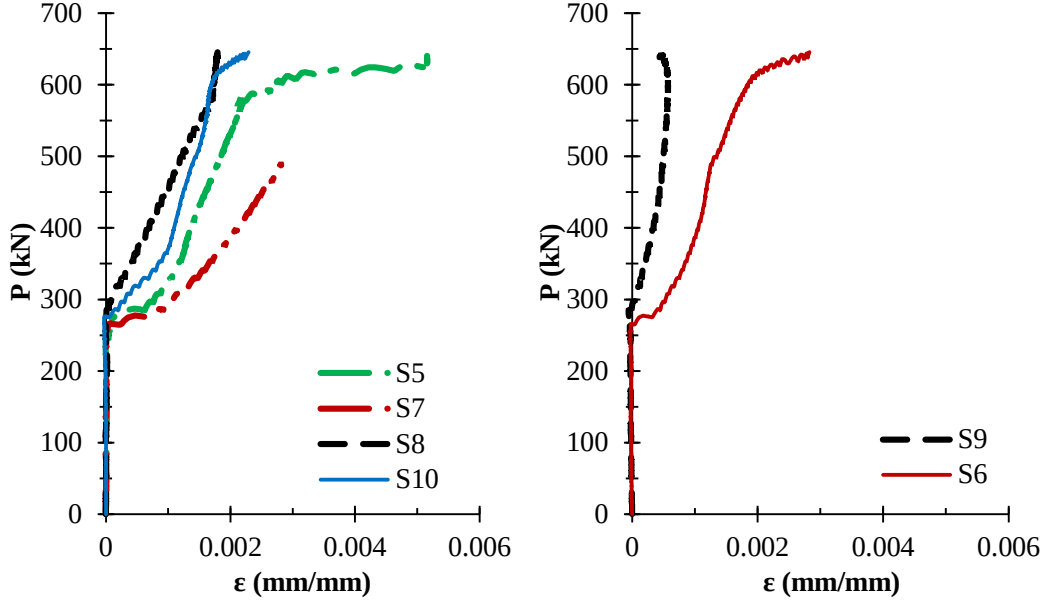


Şekil 55. DB50/1.86-C1/SR deney numunesi orta noktadaki donatıların birim şekildeğiştirme eğrileri.

Deney esnasında numunenin çatlak (basınç çubuğu) ekseninde bulunan etriyelere yapıştırılan gerinim pullarından (Şekil 10) ölçülen $P-\varepsilon_s$ davranış grafikleri Şekil 56'de 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 şekildeğiştirme değerleri giderek artmıştır. Şekil 56 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 şekildeğiştirme olduğu görülmektedir. Göçmenin olduğu taraftaki etriyeler yaklaşık 0,002 birim şekildeğiştirme değerinde akmıştır. Diğer taraftaki etriyeler (S8 ve S10) ise sadece elastik bölgede çalışmış, donatılar akmamıştır. Bununla birlikte, gövde donatılarına yapıştırılan gerinim pullarının (Şekil 10) sonuçları incelendiğinde etriyelere benzer şekilde, göçme hasarının olduğu taraftaki gövde donatısının (S6) daha fazla birim şekil değıştirme yaptığı ve aktığı gözlenmiştir (Şekil 56). Kesme hasarı oluşan ancak göçme oluşmayan diğer taraftaki (S9) gövde donatısında önemli bir birim şekildeğiştirme değeri elde edilmemiştir.

Nümerik modelden elde edilen yük – düşey yerdeğiştirme davranış grafiğı (Şekil 54) 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 genişliğı sonucunda da gözlenmiştir (Şekil 54). 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 numerik olarak oldukça başarılı ve etkin bir şekilde doğrulandığı değerlendirilmektedir.

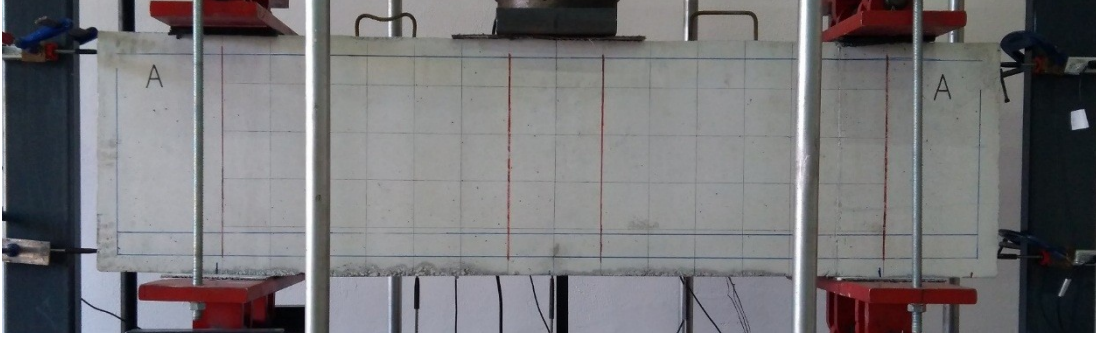


(a) Etriyeler (b) Gövde donatıları
Şekil 56. DB50/1.86-C1/SR deney numunesi çatlak ekseninde bulunan donatıların davranışı.

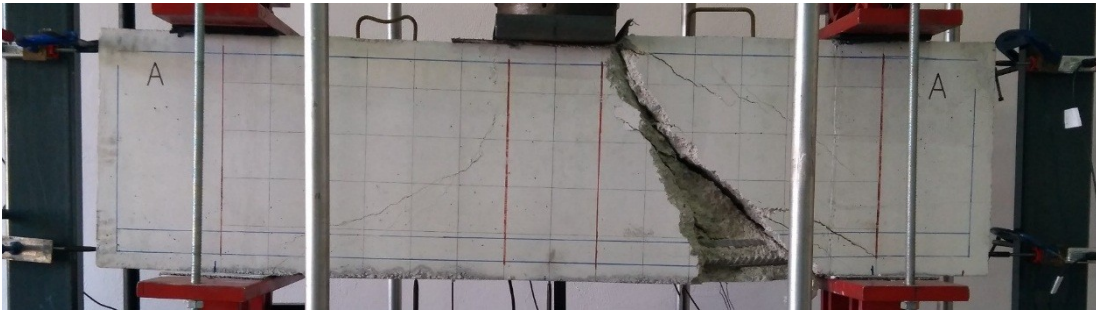
4.2.7 DB50/1.63-C1 deney numunesi

Numunenin deney düzeneği üzerinde, deney öncesi ve sonrası hasar almış durumları Şekil 57'da 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 eksen) üzerinde eğik kesme çatlakları oluşmuştur. Bu çatlak her iki kesme açıklığında da eş zamanlı olarak gözlenmiştir. Yükün artışı ile birlikte oluşan kesme çatlakları genişlikleri giderek artmıştır. Deney sonucunda, basınç çubuğunun (strut) maksimum dayanıma ulaşarak kırılması ile numunede ani ve gevrek kesme hasarı oluşmuştur (Şekil 57).

Deney sonucunda numuneden elde edilen yük – orta nokta düşey yerdeğiştirme ve yük – çatlak genişliği davranış grafikleri Şekil 58'de 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 çatlakları genişliğinin hızlı artışı ile birlikte yükte ani bir düşüş gerçekleşmiştir.



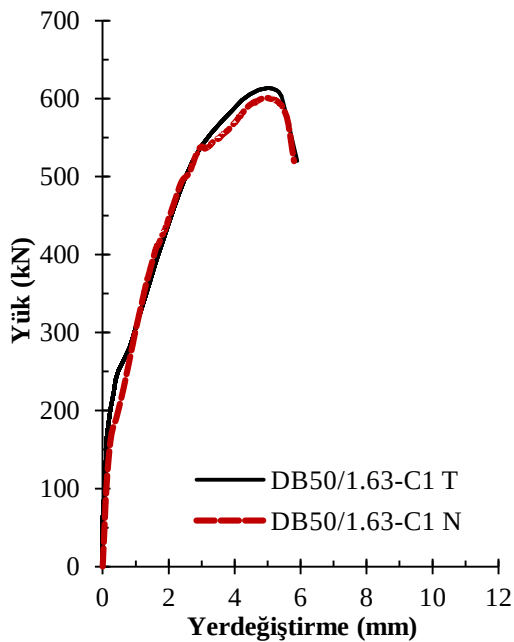
(a)



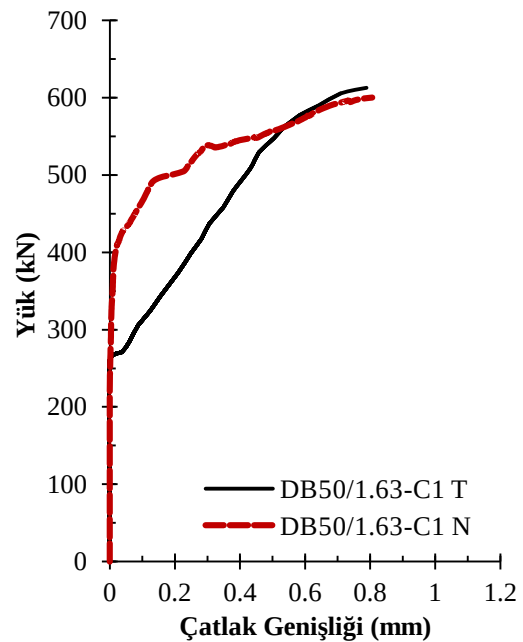
(b)

Şekil 57. DB50/1.63-C1 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.

Numunenin yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği 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 0,79 mm olarak elde edilmiştir.



(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme



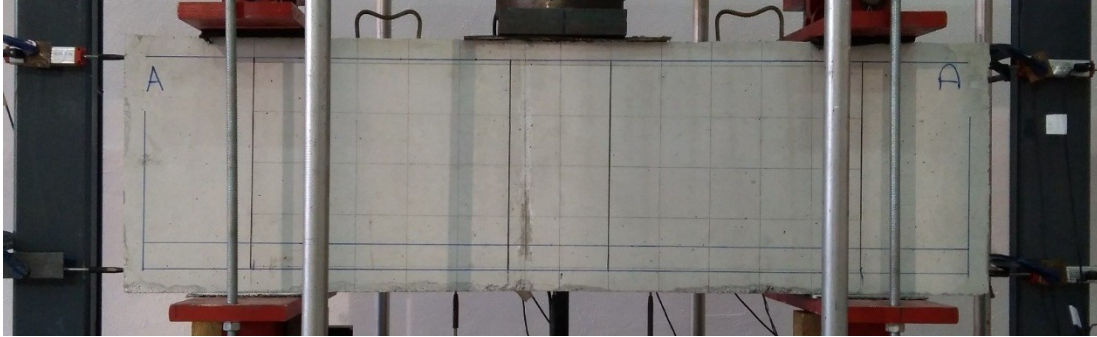
(b) Yük – Eğik çatlak genişliği

Şekil 58. DB50/1.63-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

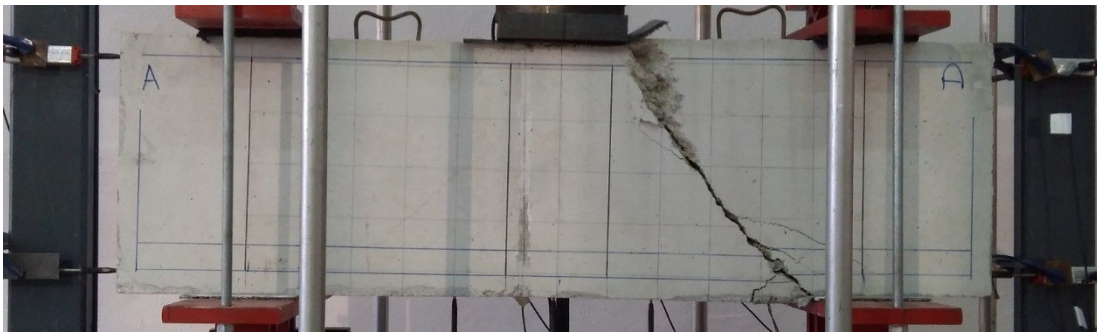
Nümerik modelden elde edilen $P-u$ davranış grafiği (Şekil 58) incelendiğinde, nümerik modelin hem yük hem de yerdeğiştirme açısından deney sonucu ile oldukça başarılı bir şekilde örtüştüğü görülmüştür. Ancak $P-w$ davranışı (Şekil 58) incelendiğinde ise; nümerik modelden elde edilen çatlak genişliği, çatlağın 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.

4.2.8 DB50/1.40-C1 deney numunesi

Deney numunesinin deney öncesi düzenek üzerindeki durumu Şekil 59'de gösterilmiştir. Numunede $P=270$ kN değerine ulaşılmasıyla birlikte basınç çubuğu ekseninde 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 59).



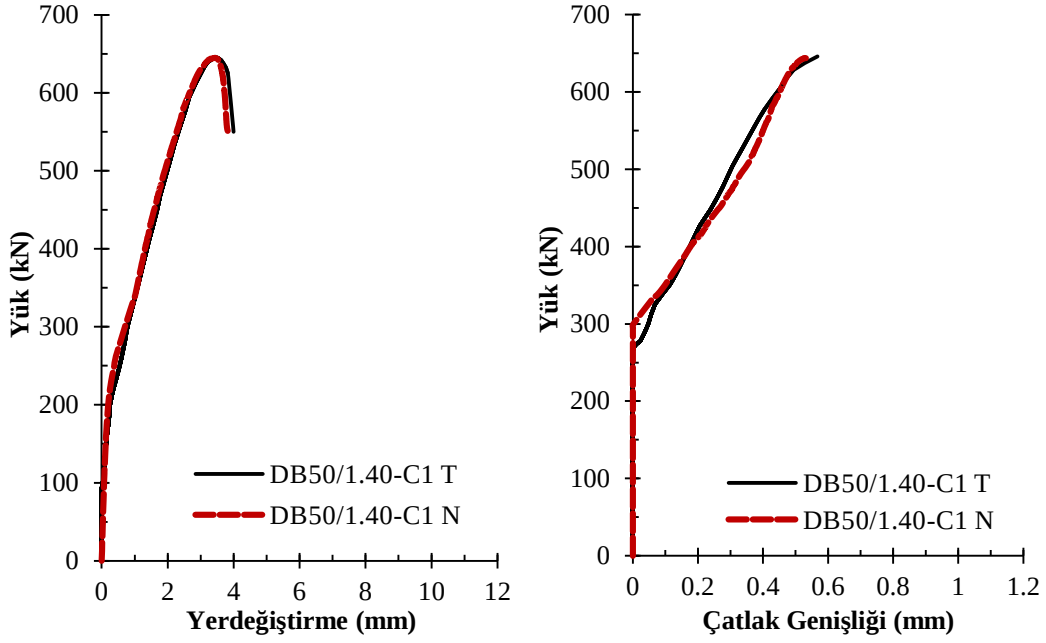
(a)



(b)

Şekil 59. 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 60'da 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 çatlak genişliğinde hızlı bir artış ve yükte de ani bir düşüş gözlenmiştir. Numune basınç çubuğu üzerindeki kesme hasarı nedeniyle güç tükenmesine ulaşmıştır.



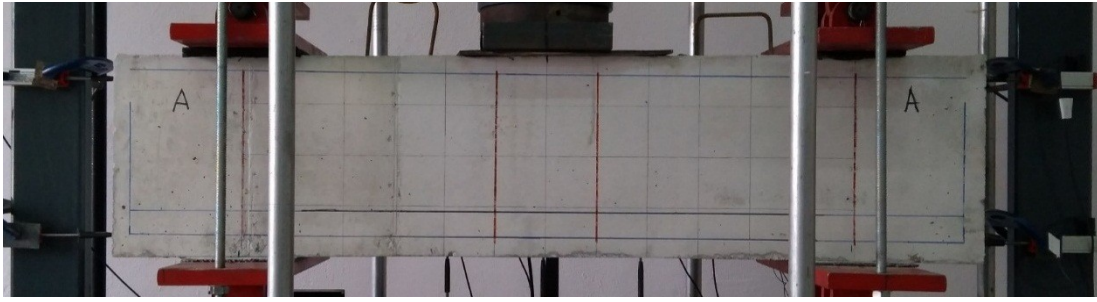
Şekil 60. DB50/1.40-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

Numunenin $P-w$ davranış grafiği (Şekil 60) incelendiğinde, kritik kesme yükü aşıldığında elemanda kesme çatlak oluşmuş olup uygulanan yükün artışı ile birlikte çatlak genişliği giderek artmıştır. Maksimum yüke karşılık gelen maksimum çatlak genişliği 0,57 mm olarak elde edilmiştir.

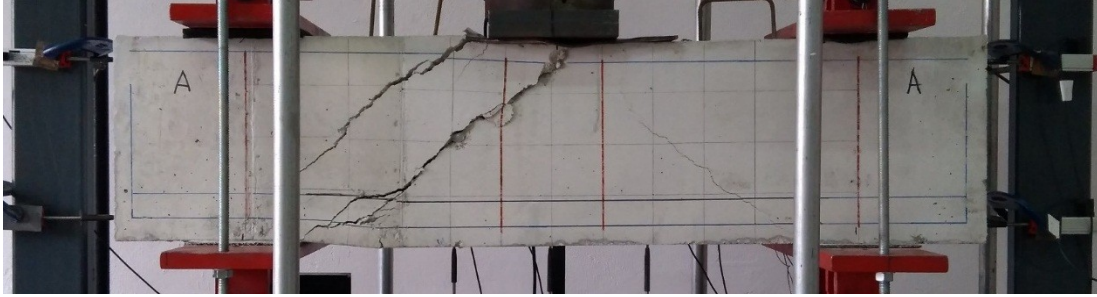
Nümerik modelden elde edilen yük – düşey yerdeğiştirme davranış grafiği (Şekil 60) incelendiğinde, nümerik modelin hem yük hem de yerdeğiştirme açısından deney sonucu ile oldukça başarılı bir şekilde örtüştüğü görülmüştür. Yük – eğik çatlak genişliği davranışı (Şekil 60) incelendiğinde ise; nümerik modelden elde edilen çatlak genişliği, çatlak 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.

4.2.9 DB40/1.86-C1 deney numunesi

Deney numunesinin düzeneğe üzerindeki, deney öncesi hasarsız durumu Şekil 61'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 61).



(a)



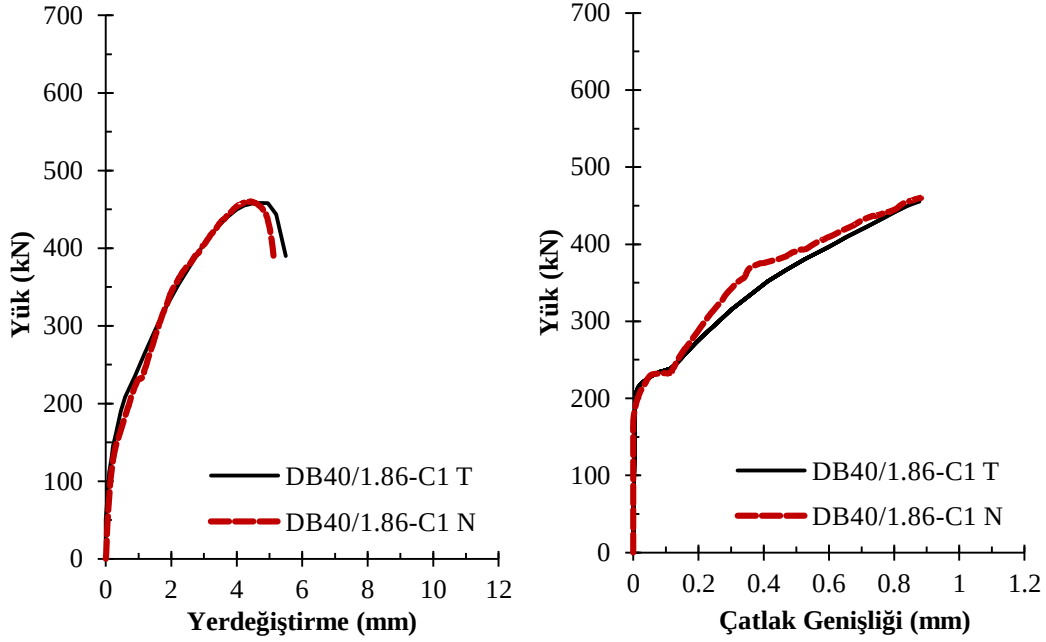
(b)

Şekil 61. 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 62'de 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 62) 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.



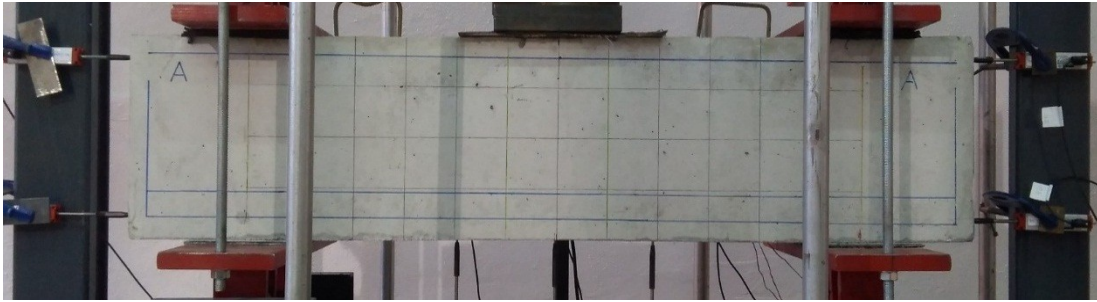
Şekil 62. DB40/1.86-C1 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

Doğrusal olmayan SE modeli üzerinden elde edilen $P-u$ ve $P-w$ davranış grafikleri (Şekil 62) incelendiğinde, nümerik modelin deney sonucu ile oldukça başarılı bir şekilde örtüştüğü görülmüştür. Sonuç olarak, deney sonucunun nümerik olarak oldukça etkin bir şekilde doğrulandığı değerlendirilmektedir.

4.2.10 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 düzenerk üzerindeki, deney öncesi ve sonrası durumları Şekil 63'de gösterilmiştir. Numunede P_{cr} (215 kN) aşılana kadar herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiş olup bu değer aşılmasıyla elemanda basınç çubuğu eksenini (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 63).

Deney sonucunda numuneden elde edilen yük – orta nokta düşey yerdeğiştirme ve yük – çatlak genişliği davranış grafikleri Şekil 64'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 çatlak genişliğinin hızlıca artışı ile birlikte yükte ani bir düşüş gözlenmiştir.



(a)



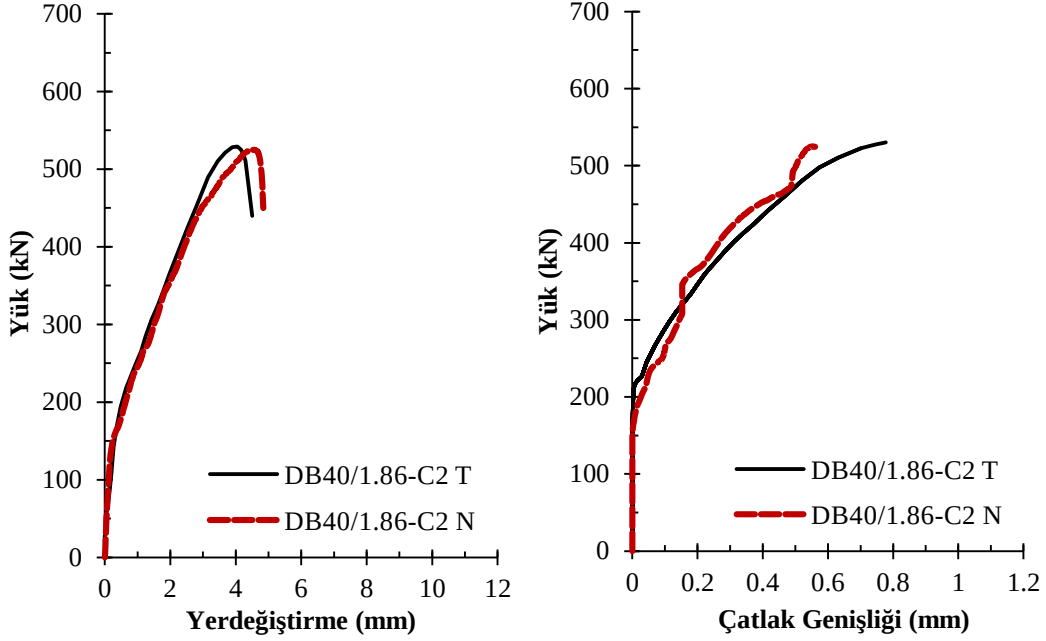
(b)

Şekil 63. DB40/1.86-C2 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.

Numunenin yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği (Şekil 64) incelendiğinde, kritik kesme yükü aşıldığında elemanda kesme çatlak oluşmuş olup uygulanan yükün artışı ile birlikte çatlak genişliği giderek artmıştır. Maksimum yüke karşılık gelen maksimum çatlak genişliği 0,78 mm olarak elde edilmiştir.

Nümerik modelden elde edilen yük – düşey yerdeğiştirme davranış grafiği (Şekil 64) 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 64) 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 numerik olarak yeterli bir şekilde doğrulandığı düşünülmektedir.



Şekil 64. DB40/1.86-C2 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

4.2.11 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 düzenerk üzerindeki, deney öncesi ve deney sonrası durumları Şekil 65'te gösterilmiştir. Numune üzerinde, uygulanan 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 65).

Deney sonucunda numuneden elde edilen yük – orta nokta düşey yerdeğiştirme ve yük – çatlak genişliği davranış grafikleri Şekil 66'de 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 çatlak genişliğinin hızlı artışı ve daha sonra yükte ani bir düşüş gözlenmiştir.



(a)

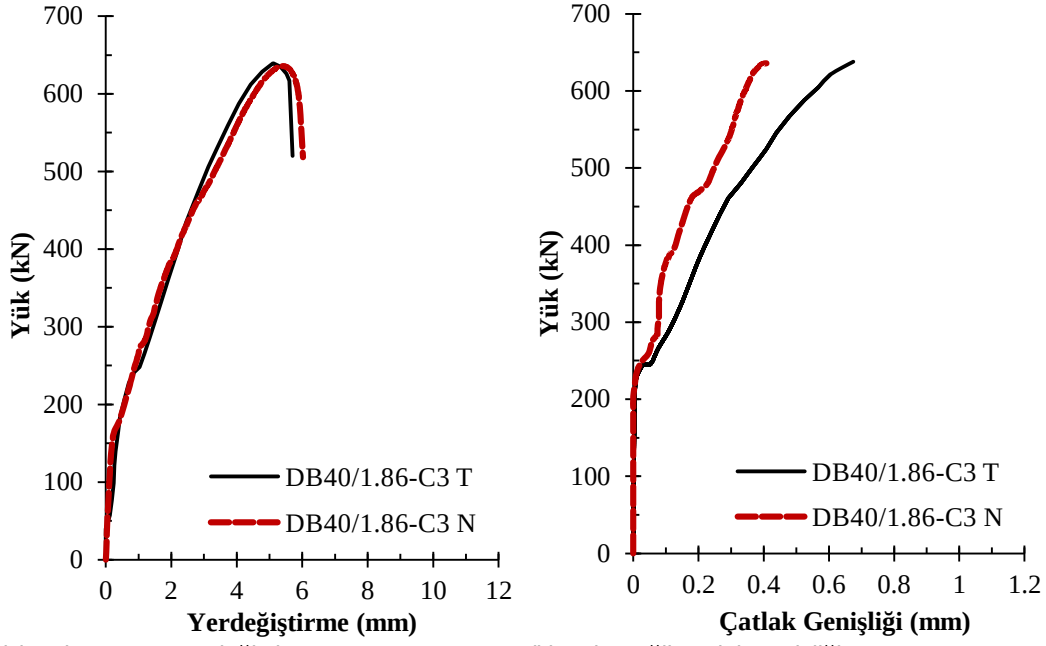


(b)

Şekil 65. DB40/1.86-C3 numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.

Numunenin yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği (Şekil 66) incelendiğinde, kritik kesme yükü aşıldığında elemanda kesme çatlak oluşmuş olup uygulanan yükün artışı ile birlikte çatlak genişliği giderek artmıştır. Maksimum yüke karşılık gelen maksimum çatlak genişliği 0,67 mm olarak elde edilmiştir.

Nümerik modelden elde edilen yük – düşey yerdeğiştirme davranış grafiği (Şekil 66) incelendiğinde, nümerik modelin hem yük hem de yerdeğiştirme açısından deney sonucu ile oldukça başarılı bir şekilde örtüşmüştür. Yük – eğik çatlak genişliği davranışı (Şekil 66) 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.



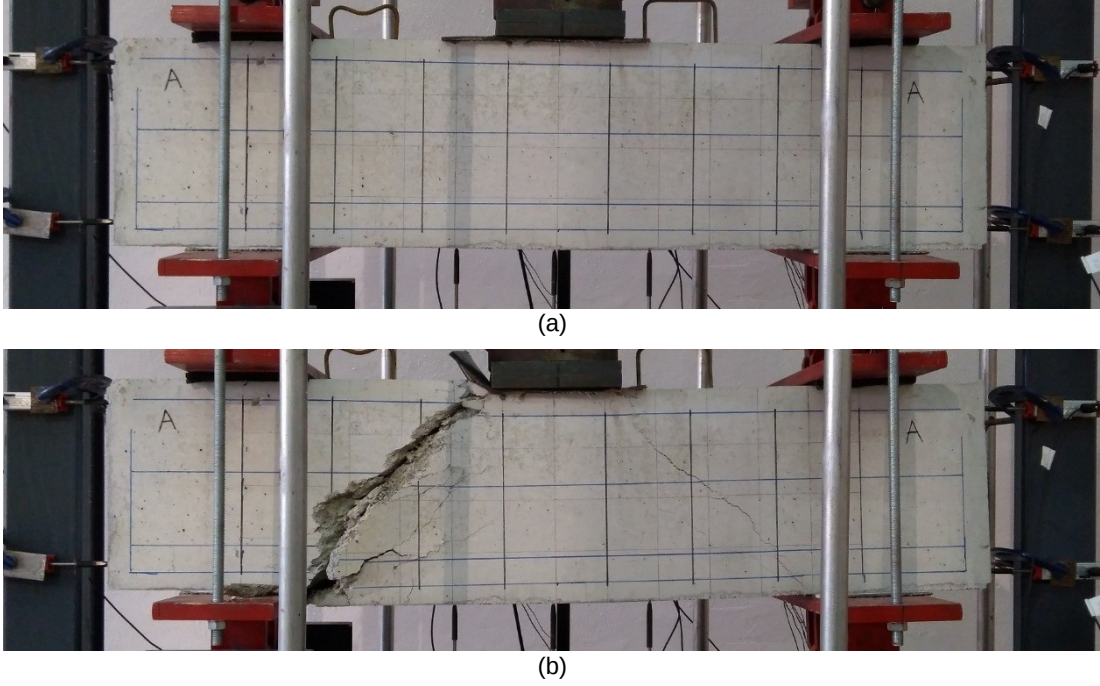
(a) Yük – Düşey yerdeğiştirme (b) Yük – Eğik çatlak genişliği
Şekil 66. DB40/1.86-C3 deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

4.2.12 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 67’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 çatlak oluşmuştur. Bu çatlak her iki kesme açıklığında da eş zamanlı olarak gözlenmiştir. Yükün artışı ile birlikte oluşan kesme çatlak genişlikleri giderek artmış ancak eğilme çatlak oluşmamıştır. Deney sonucunda, basınç çubuğu maksimum dayanıma ulaşarak kırılması ile numunede ani ve gevrek kesme hasarı oluşmuştur (Şekil 67).

Deney sonucunda numuneden elde edilen yük – orta nokta düşey yerdeğiştirme ve yük – çatlak genişliği davranış grafikleri ise Şekil 68’de 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 çatlak genişliğinin hızlıca artması ile birlikte

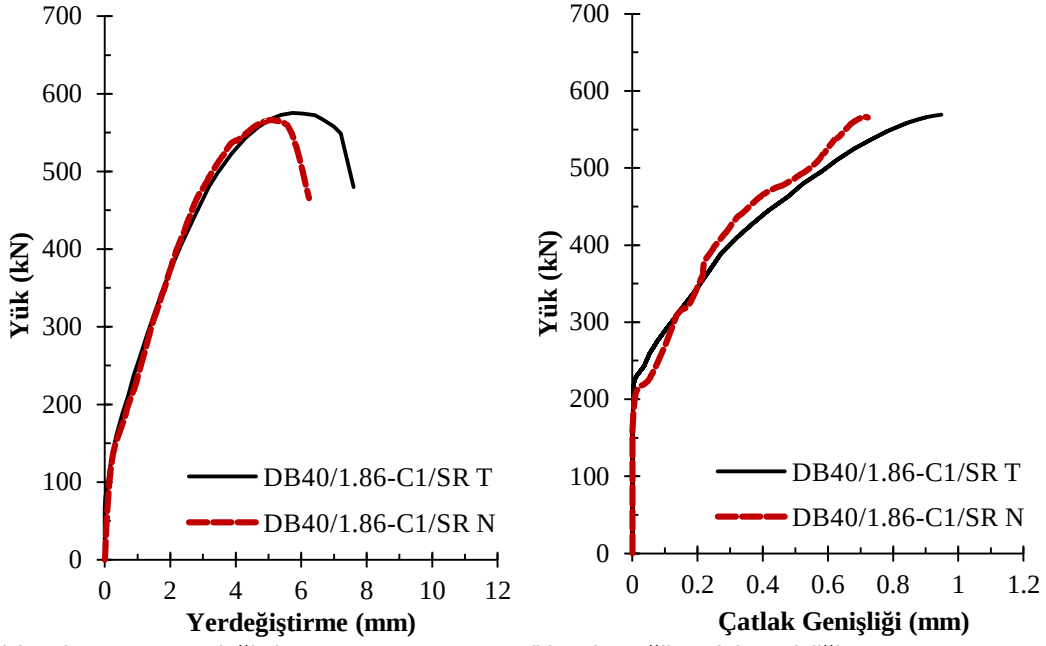
yükte ani bir düşüş gerçekleşmiştir. Burada kesme donatıları süneklik olarak beklenen katkıyı sağlamamasına rağmen yük taşıma kapasitesinde önemli bir artışa yol açmıştır.



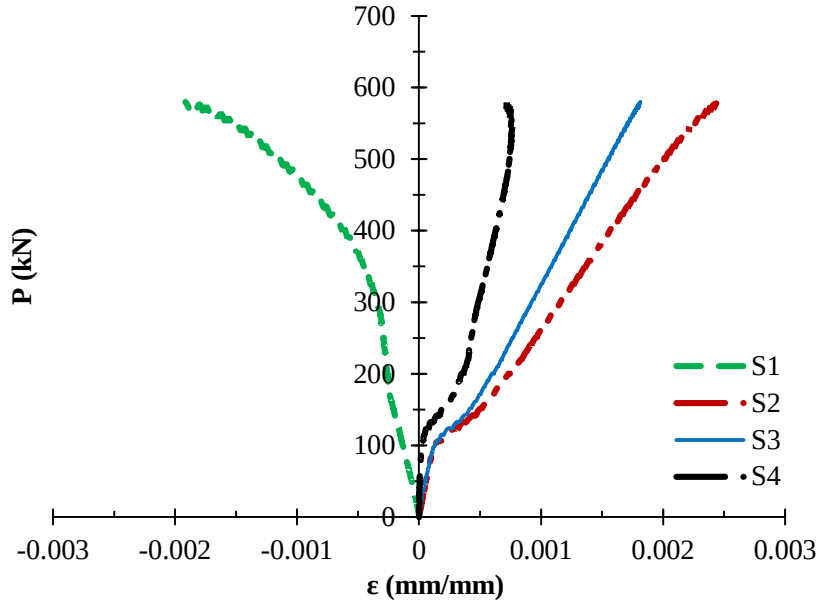
Şekil 67. DB40/1.86-C1/SR numunesinin deney öncesi (a) ve deney sonrası hasar almış (b) durumları.

Numunenin yük – eğik çatlak genişliği davranış grafiği (Şekil 68) 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 0,94 mm olarak elde edilmiştir.

Kesme donatısı içeren bu numunede, çekme ve basınç donatılarına ilave olarak etriye ve gövde donatılarına da gerinim pulları (Şekil 6) yapıştırılmıştır. Elemanın, uygulanan yükün altında kalan orta noktası ekseni hizasına denk gelen basınç (S1), çekme (S2 ve S3) ve gövde (S4) donatılarına yapıştırılan gerinim pullarından ölçülen birim şekildeğiştirme eğrileri Şekil 69'de verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi uygulanan yükün artışı ile birlikte basınç donatısında birim kısalmaya, 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.



Şekil 68. DB40/1.86-C1/SR deney numunesi deneysel ve nümerik davranış grafikleri.

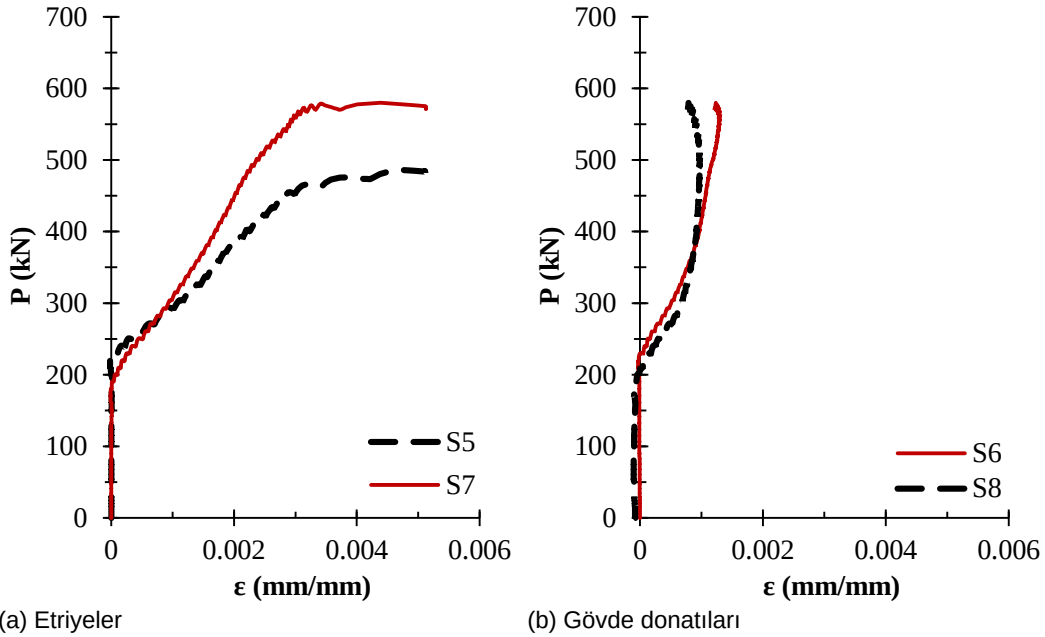


Şekil 69. DB40/1.86-C1/SR deney numunesi orta noktadaki donatıların birim şekildeğiştirme eğrileri.

Deney esnasında, numunenin çatlak (basınç çubuğu) ekseninde bulunan etriyelere yapıştırılan gerinim pullarından (Şekil 6) ölçülen $P-\varepsilon_s$ davranış grafikleri Şekil 70'da 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 70 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 70) 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 68) 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 68). 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 nümerik olarak oldukça başarılı ve etkin bir şekilde doğrulandığı değerlendirilmektedir.



Şekil 70. DB40/1.86-C1/SR deney numunesi çatlak ekseninde 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 yük taşıma kapasitesine karşılık gelen maksimum çatlak genişliği (w_0), ve hasar mekanizması Tablo 7’de verilmiştir. Nümerik modelin deney sonuçlarını doğrulama performansı Tablo 8’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 7. Deneysel ve nümerik çalışma sonuçları.

#	Numune Adı	Deneysel Çalışma				Nümerik Çalışma				Hasar
		P_{cr} (kN)	P_u (kN)	u_u (mm)	w_0 (mm)	P_{cr} (kN)	P_u (kN)	u_u (mm)	w_0 (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 8. Deneysel ve nümerik çalışma sonuçlarının performansı.

#	Numune Adı	Hata Oranı			
		P_{cr}	P_u	u_u	w_0
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 71'de

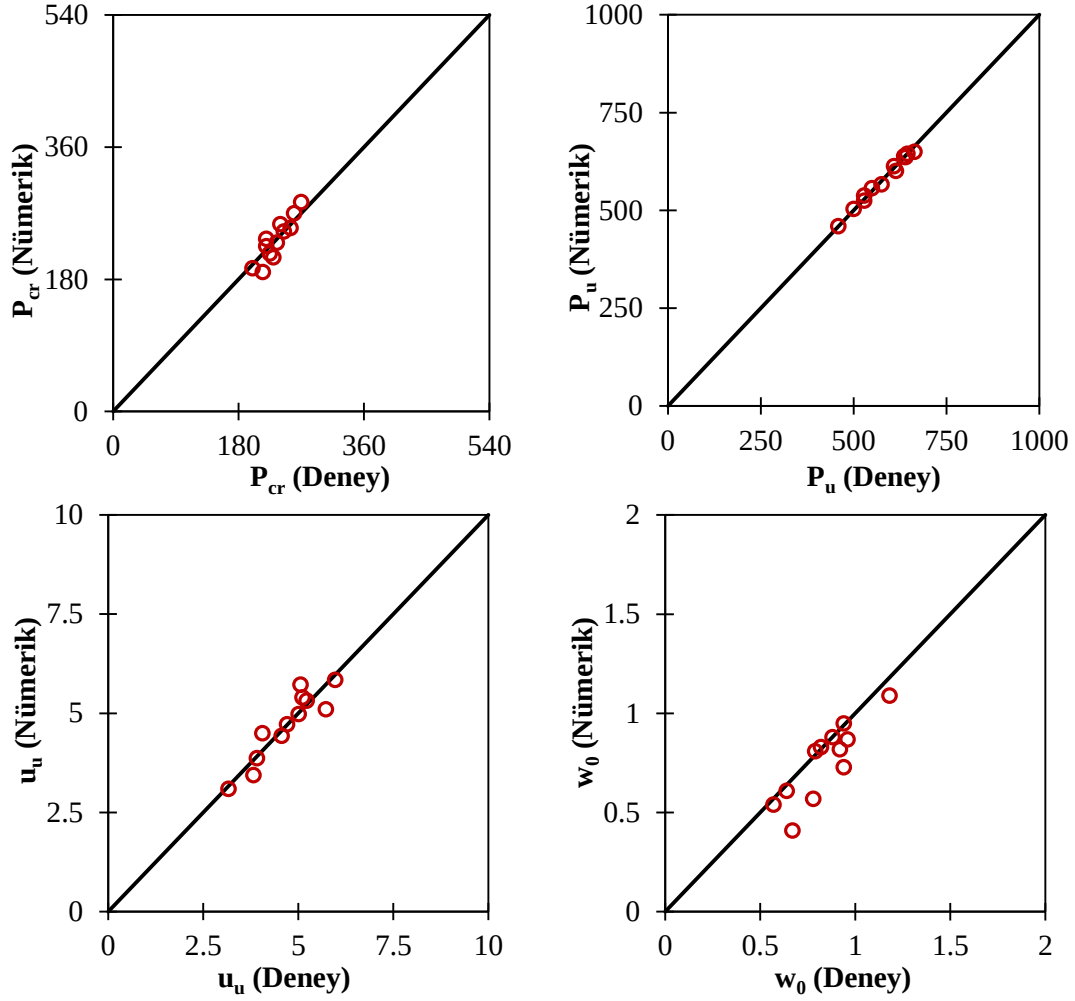
verilmiştir. Nümerik modellerin sonuçları bir bütün olarak incelendiğinde; oluşturulmuş olan SE modellerinin $P-u$ davranışı açısından deneysel çalışma sonuçları ile oldukça başarılı bir şekilde örtüştüğü görülmektedir. Genel olarak yük – çatlak genişliği davranışları da küçük farklar oluşmasına rağmen 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 1) önerilmiştir. Bu proje 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 (Birrcher vd., 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 9). 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.

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 vd., 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 proje çalışması kapsamındaki parametrik çalışma, deney

sonuçları ile doğrulanmış nümerik modeller üzerinde sadece donatı konfigürasyonu değiştirilerek elde edilmiş yeni nümerik modeller kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 71. Nümerik sonuçların performansı.

Tablo 9. Numunelerin deney ve hesap sonucu bulunan maksimum yük taşıma kapasiteleri.

#	Numune Adı	Deney	STM	MSTM	Deney/STM	Deney/MSTM
		P_u (kN)	P_u (kN)	P_u (kN)		
1	DB50/1.40-C1	645	562	624	1,15	1,04
2	DB50/1.63-C1	614	538	596	1,14	1,03
3	DB50/1.86-C1	500	433	489	1,16	1,02
4	DB50/1.86-C1/SR	636	554	608	1,15	1,05
5	DB55/1.67-C1	549	428	519	1,28	1,06
6	DB60/1.51-C1	609	531	584	1,15	1,04
7	DB60/1.86-C1	529	442	506	1,20	1,05
8	DB60/1.86-C1/SR	664	558	643	1,19	1,03
9	DB40/1.86-C1	459	375	433	1,22	1,06
10	DB40/1.86-C2	529	471	504	1,12	1,05
11	DB40/1.86-C3	640	560	621	1,14	1,03
12	DB40/1.86-C1/SR	575	467	556	1,23	1,04

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

Bu proje 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 10'da verilmiştir. İncelenecek her bir parametre için, kendi grubunda yer alan numunelerin sonuçları dikkate alınmıştır.

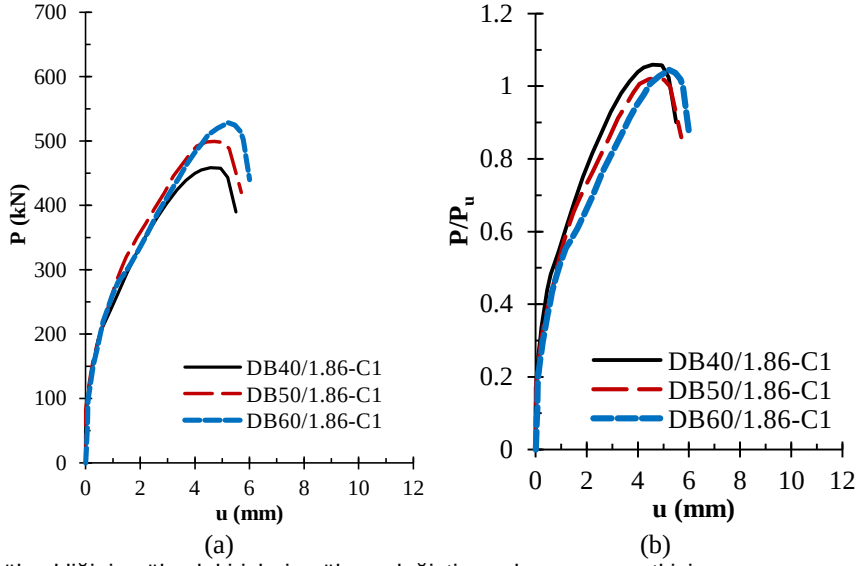
Tablo 10. İncelenecek parametreler için numune matrisi.

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
	DB50/1.86-C1	500	800	1,85	18,1	f_{ck}
	DB60/1.86-C1	600	1000	1,85	18,1	d
a/d	DB50/1.86-C1	500	800	1,85	18,1	f_{ck}
	DB50/1.63-C1	500	700	1,62	18,1	d
	DB50/1.40-C1	500	600	1,39	18,1	f_{ck}
a/d	DB50/1.86-C1	500	800	1,85	18,1	a
	DB55/1.67-C1	550	800	1,67	18,1	f_{ck}
	DB60/1.51-C1	600	800	1,48	18,1	f_{ck}
f_{ck}	DB40/1.86-C1	400	600	1,85	18,1	a/d
	DB40/1.86-C2	400	600	1,85	25,3	h
	DB40/1.86-C3	400	600	1,85	32,0	h

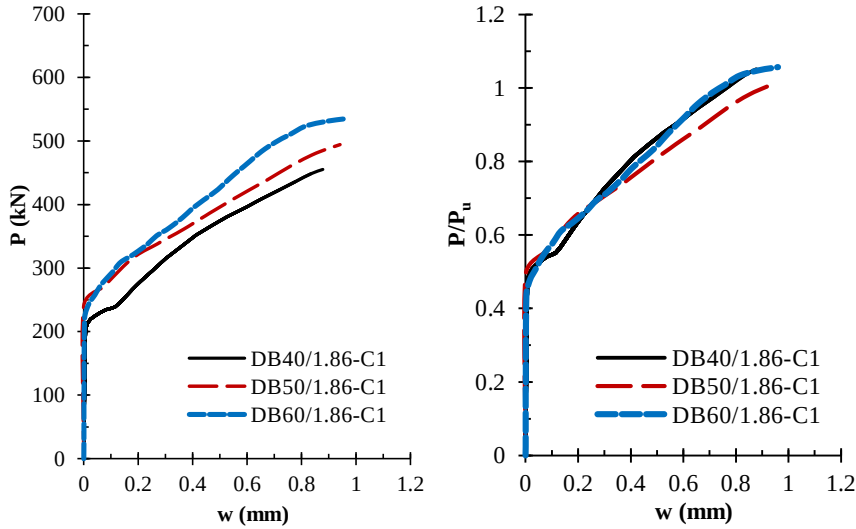
Betonarme yüksek kirişlerde kesit yüksekliğindeki (h) değişimin, yük – düşey yerdeğiştirme ve davranışına etkisi Şekil 72a'da gösterilmiştir. Ayrıca, sonuçlar MSTM'ye göre hesaplanmış P_u değeri ile normalize edilmiş ve Şekil 72b'de gösterilmiştir. Yük – yerdeğiştirme davranış grafiği incelendiğinde, kesit yüksekliğinin artışı ile birlikte yük taşıma kapasitesinde artış gözlenmiştir. Düşey yerdeğiştirme değerlerinde ise küçük artışlar oluşmuştur. Şayet ilgili sonuçlar STM perspektifinden değerlendirilecek olursa, kesit yüksekliğinin artışı basınç çubuklarının yatay düzlem ile olan açısını arttırmakta ve böylece düğüm noktalarının genişlikleri (strut-to-node interfaces) artmaktadır. Bu durum basınç çubuklarının uç noktalarındaki kesit alanını (A_{cs}) artışına yol açmaktadır. Bundan dolayı da basınç çubuklarının dayanım kapasiteleri artmaktadır. Bu sonuç ayrıca numunelerin Tablo 9'da verilmiş STM kapasitelerinden de görülebilmektedir.

Numunelerin yük – eğik çatlak genişliği davranışı (Şekil 73) 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.



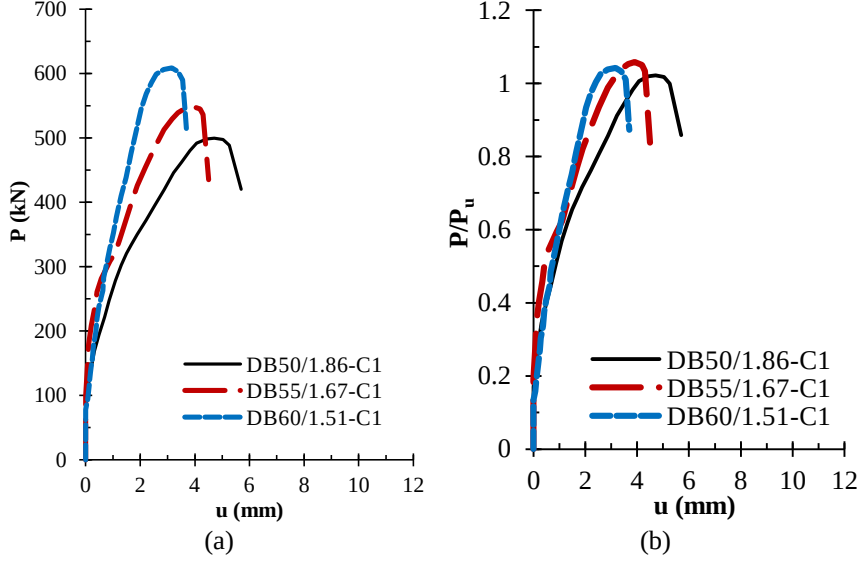
Şekil 72. Kesit yüksekliğinin yüksek kirişlerin yük-yerdeğiştirme davranışına etkisi.



Şekil 73. Kesit yüksekliğinin yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkisi.

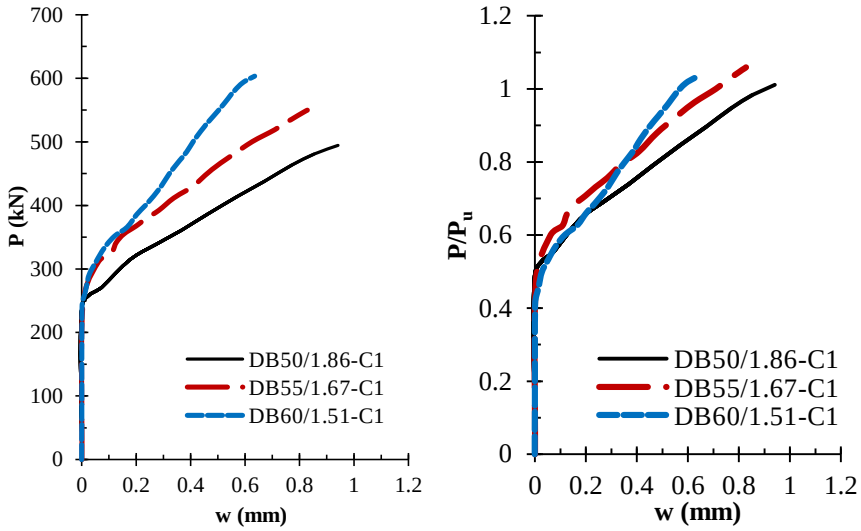
Betonarme yüksek kirişlerde kesme açıklığı (a) sabit tutularak a/d oranındaki değişimin yük – düşey yerdeğiştirme davranışına etkisi Şekil 74a'da gösterilmiştir. Ayrıca, sonuçlar MSTM'ye göre hesaplanmış P_u değeri ile normalize edilmiş ve Şekil 74b'de gösterilmiştir. $P-u$ davranışı incelendiğinde, 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. Bu durumda a/d oranı a sabit tutulup d değiştirilerek değiştirilebildiği için d arttıkça a/d oranı azalmaktadır. Buna göre sonuçlar STM perspektifinden değerlendirilirse, d 'nin artışı basınç çubuklarının yatay ile olan açısını arttırmakta ve böylece düğüm noktalarının genişlikleri (strut-to-node interfaces)

artmaktadır. Bu durum basınç çubuklarının uç noktalarındaki kesit alanını (A_{cs}) artışına yol açmaktadır. Bundan dolayı a/d oranının azalışı ile birlikte basınç çubuklarının dayanım kapasiteleri artmaktadır. Bu sonuç ayrıca numunelerin Tablo 9'da verilmiş STM kapasitelerinden de izlenebilmektedir.



Şekil 74. a/d oranının (a sabit) yüksek kirişlerin yük-yerdeğiştirme davranışına etkisi.

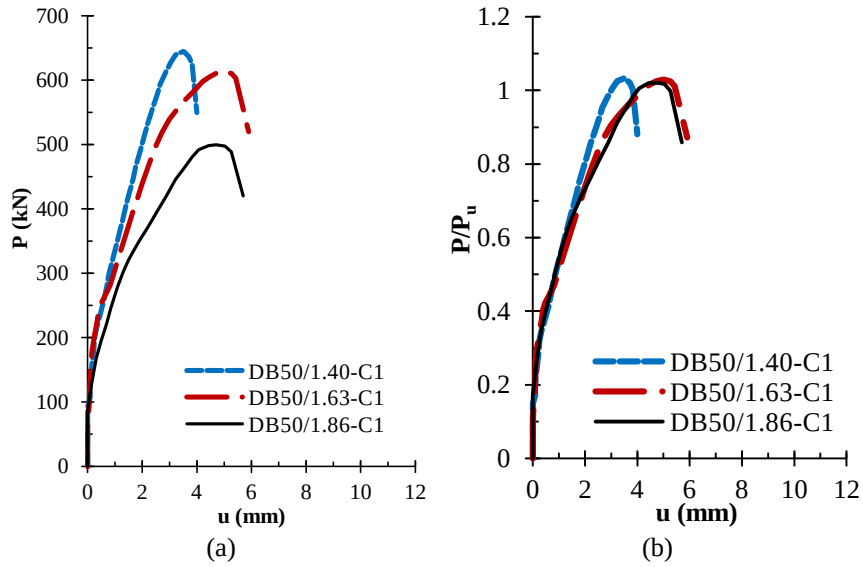
Numunelerin yük – eğik çatlak genişliği davranışı (Şekil 75) incelendiğinde a/d oranının artışı ile birlikte maksimum çatlak genişliği değerlerinde artışlar oluşmuştur. Sonuç olarak; a/d oranının artışının betonarme yüksek kirişlerin yük taşıma kapasitesini azalttığı ve maksimum çatlak genişliklerinde ise önemli artışlara yol açtığı görülmüştür.



Şekil 75. a/d oranının (a sabit) yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkisi.

Betonarme yüksek kirişlerde faydalı yükseklik (d) sabit tutularak a/d oranındaki değişimin; $P-u$ davranışına etkisi Şekil 76a'da gösterilmiştir. Ayrıca, sonuçlar MSTM'ye göre

hesaplanmış P_u değeri ile normalize edilmiş ve Şekil 76b'de gösterilmiştir. Yük – yerdeğiştirme davranışı incelendiğinde bir önceki durumda olduğu gibi 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. Bu durumda a/d oranı d sabit tutulup a 'nın değişimi ile değiştirilebildiği için a azaldıkça a/d oranı da azalmaktadır. Buna göre sonuçlar STM perspektifinden değerlendirilirse, a 'nın azalışı basınç çubuklarının yatay ile olan açısını arttırmakta ve böylece düğüm noktalarının genişlikleri (strut-to-node interfaces) artmaktadır. Bu durum basınç çubuklarının uç noktalarındaki kesit alanını (A_{cs}) artışına yol açmaktadır. Bundan dolayı a/d oranının azalışı ile birlikte basınç çubuklarının dayanım kapasiteleri artmaktadır. Bu sonuç ayrıca numunelerin Tablo 9'da verilmiş STM kapasitelerinden de izlenebilmektedir.

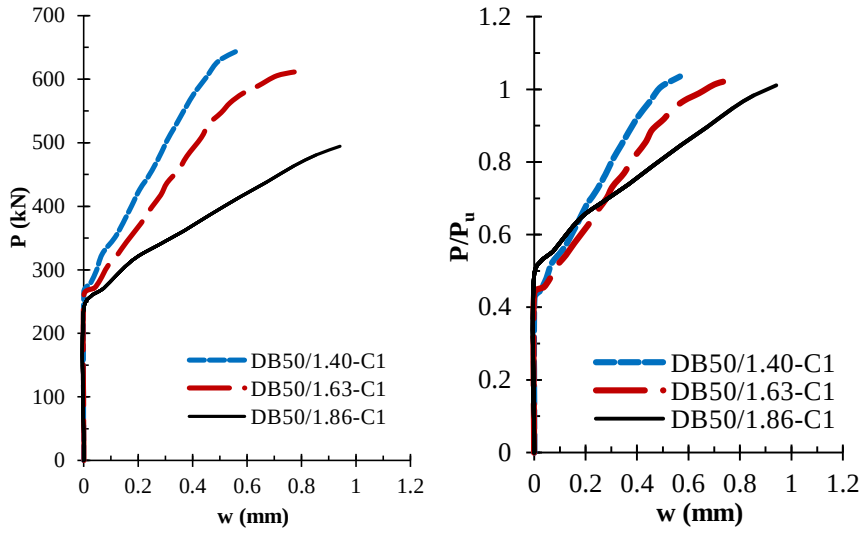


Şekil 76. a/d oranının (d sabit) yüksek kirişlerin yük-yerdeğiştirme davranışına etkisi.

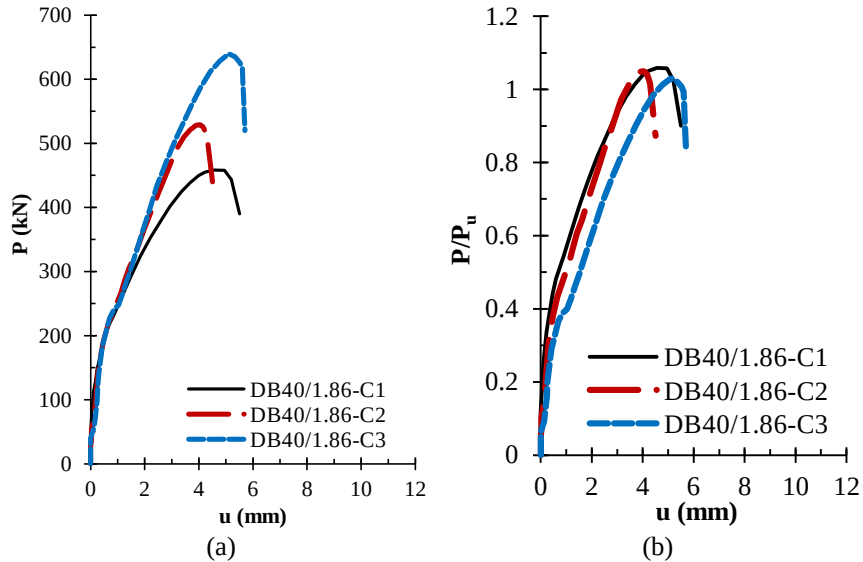
Numunelerin $P-w$ davranış grafikleri (Şekil 77) incelendiğinde a/d oranının artışı ile birlikte maksimum çatlak genişliği değerlerinde artışlar oluşmuştur. Sonuç olarak; a/d oranının artışının betonarme yüksek kirişlerin yük taşıma kapasitesini azalttığı ve maksimum çatlak genişliklerinde ise önemli artışlara yol açtığı görülmüştür. Ayrıca bu davranış, literatürde Birrcher vd. (2009) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları ile de örtüşmektedir.

Betonarme yüksek kirişlerde karakteristik beton basınç dayanımındaki (f_{ck}) değişimin, yük – düşey yerdeğiştirme davranışına etkisi Şekil 78a'da gösterilmiştir. Ayrıca, sonuçlar MSTM'ye

göre hesaplanmış P_u değeri ile normalize edilmiş ve Şekil 78b'de göstermiştir. Yük – yerdeğiştirme davranışı incelendiğinde f_{ck} 'nin artışı ile birlikte yük taşıma kapasitesinde artış gözlenmiştir. Ayrıca düşey yerdeğiştirme değerlerinde de küçük farklar oluşmuştur. Sonuçlar STM perspektifinden değerlendirilirse, f_{ck} 'nin artışı ile birlikte basınç çubuklarının basınç dayanımları artmakta ve bu durum numunelerin maksimum yük taşıma kapasitelerinde önemli artışa yol açmıştır. Bu davranış ayrıca numunelerin Tablo 9'da verilmiş STM kapasitelerinden de izlenebilmektedir.



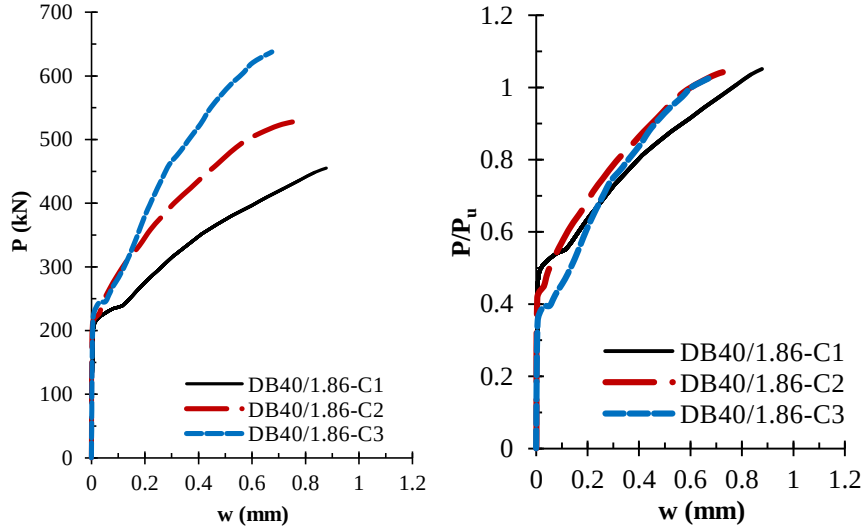
Şekil 77. a/d oranının (d sabit) yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkisi.



Şekil 78. Beton basınç dayanımının yüksek kirişlerin yük-yerdeğiştirme davranışına etkisi.

Numunelerin yük – eğik çatlak genişliği davranışı (Şekil 79) 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 79. Beton basınç dayanımının yüksek kirişlerin eğik çatlak davranışına etkisi.

4.4 Parametrik Çalışma Sonuçları

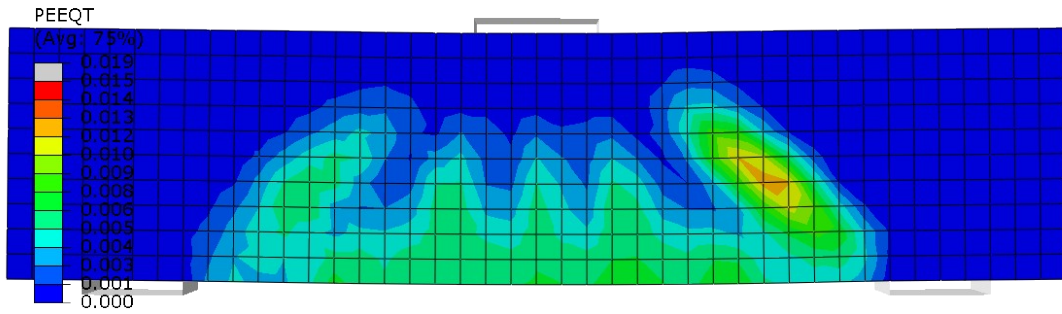
Deneysel çalışma sonuçları kullanılarak doğrulanmış ve sadece donatı konfigürasyonu değiştirilerek elde edilmiş nümerik modeller ile gerçekleştirilen parametrik çalışma sonuçları Tablo 11’de gösterilmiştir. Ayrıca ACI 318-14 (2014) yönetmeliğinde verilen hususlara göre tasarlanan bu yeni yüksek kiriş 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.

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

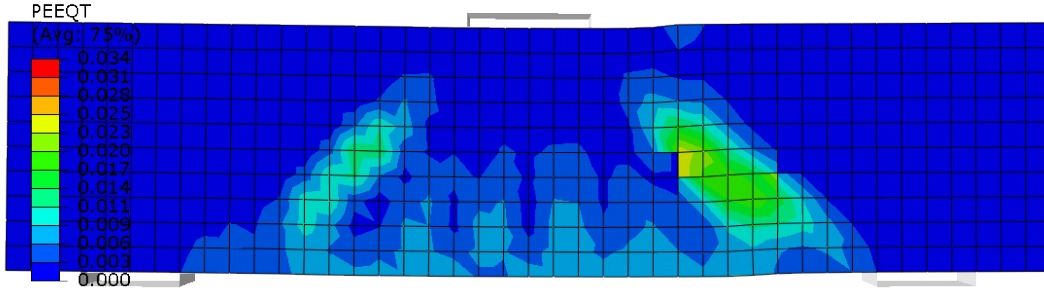
numunelerinin SE modelleri üzerinde sırasıyla Şekil 80 ve Şekil 81'de gösterilmiştir. Gösterilen numunelerin nümerik analizleri sonucunda elde edilen eşdeğer çekme plastik birim şekildeğiştirme (PEEQT) davranış şekillerinden görüldüğü gibi, elemanın çekme bölgesinde asal çekme gerilmelerine dik doğrultuda 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.

Tablo 11. Parametrik çalışma sonuçları.

#	Numune Adı	P_u (kN)	u_u (mm)	W_0 (mm)	Hasar Mekanizması
1	DB50/1.84-C1/SR-1	731	7,60	0,39	Kesmeli-eğilme
2	DB50/1.75-C1/SR-2	774	9,30	1,04	Kesmeli-eğilme
3	DB50/1.75-C1/SR-3	631	7,70	0,97	Kesmeli-eğilme
4	DB50/1.38-C1/SR-1	690	5,10	0,83	Kesmeli-eğilme
5	DB50/1.32-C1/SR-2	653	4,70	0,51	Kesmeli-eğilme
6	DB50/1.32-C1/SR-3	574	3,60	0,43	Kesmeli-eğilme
7	DB60/1.87-C1/SR-1	751	9,20	0,72	Kesmeli-eğilme
8	DB60/1.80-C1/SR-2	738	9,50	0,62	Kesmeli-eğilme
9	DB60/1.80-C1/SR-3	664	9,20	1,13	Kesmeli-eğilme
10	DB60/1.50-C1/SR-1	810	5,50	0,24	Kesmeli-eğilme
11	DB60/1.44-C1/SR-2	721	4,80	0,36	Kesmeli-eğilme
12	DB60/1.44-C1/SR-3	620	5,20	0,90	Kesmeli-eğilme
13	DB55/1.65-C1/SR-1	703	6,10	0,94	Kesmeli-eğilme
14	DB55/1.58-C1/SR-2	637	6,90	0,77	Kesmeli-eğilme
15	DB55/1.58-C1/SR-3	626	6,10	0,88	Kesmeli-eğilme
16	DB40/1.80-C1/SR-1	664	5,80	0,50	Kesmeli-eğilme
17	DB40/1.68-C1/SR-2	582	7,00	0,84	Kesmeli-eğilme
18	DB40/1.68-C1/SR-3	545	7,40	1,15	Kesmeli-eğilme
19	DB40/1.80-C2/SR-1	566	4,60	0,19	Kesmeli-eğilme
20	DB40/1.68-C2/SR-2	511	6,00	0,16	Kesmeli-eğilme
21	DB40/1.68-C2/SR-3	438	5,50	0,89	Kesmeli-eğilme
22	DB40/1.80-C3/SR-1	635	4,40	0,23	Kesmeli-eğilme
23	DB40/1.68-C3/SR-2	617	7,00	0,59	Kesmeli-eğilme
24	DB40/1.68-C3/SR-3	610	7,10	0,58	Kesmeli-eğilme



Şekil 80. DB50/1.84-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz sonucu.



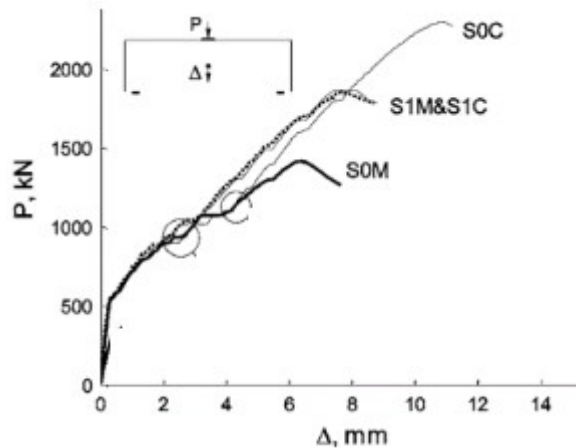
Şekil 81. DB50/1.75-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz sonucu.

4.5 Literatürde Gerçekleştirilmiş Olan Çalışmaların Sonuçları

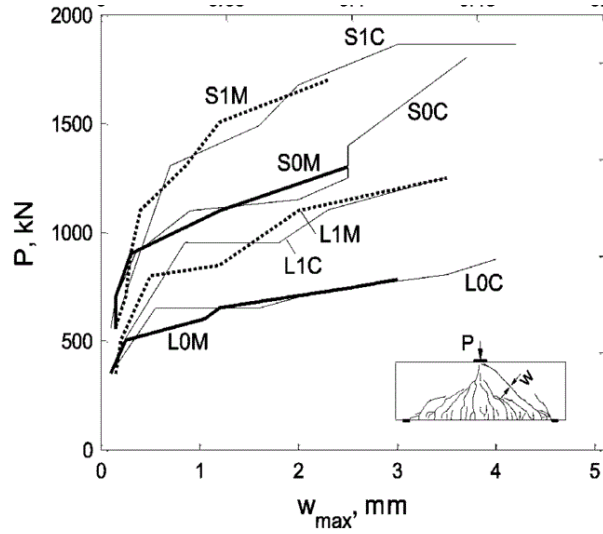
Literatürde, betonarme yüksek kirişlerin çatlak davranışının incelenip eğik çatlak genişliklerinin ölçüldüğü deneysel çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Bununla birlikte, bu proje çalışması kapsamında, betonarme yüksek kirişlerin eğik çatlak genişliği davranışından artık yük taşıma kapasitesinin hesaplanabilmesi için önerilen formülün oluşturulmasında literatürde gerçekleştirilmiş sınırlı sayıdaki çalışma sonuçları da kullanılmıştır. Bu çalışmalarda kullanılan numunelerin boyut ve malzeme özellikleri Tablo 12’de verilmiştir. Ayrıca çalışmalarda verilen yük, yerdeğiştirme ve çatlak genişliği davranış grafikleri Şekil 82 ile Şekil 87 arasında gösterilmiştir.

Tablo 12. Literatürdeki çalışmalardan alınan numunelerin boyut ve malzeme özellikleri.

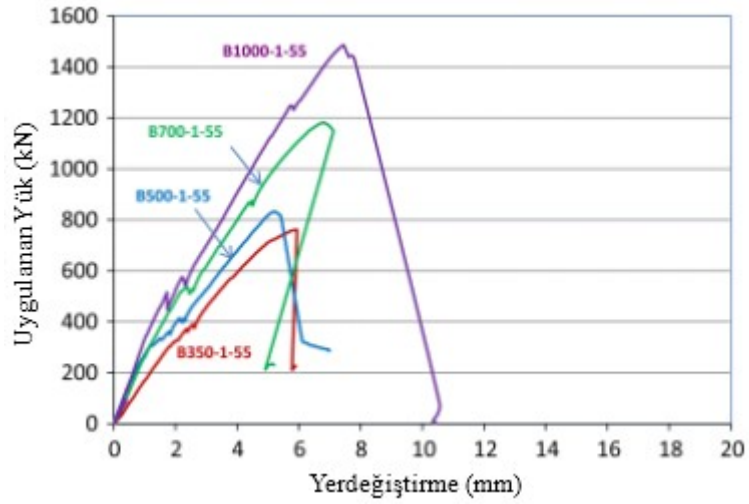
Çalışma	Numune Adı	h (mm)	a (mm)	a/d	b_w (mm)	l_n (mm)	ρ_l	ρ_v	ρ_h	f_{ck} (MPa)
Mihaylov vd. (2010)	S0M	1200	1700	1,55	400	3400	0,0070	0	0	34,2
	S1M	1200	1700	1,55	400	3400	0,0070	0,001	0	33,0
	B350-1-55	350	293	1,00	150	1586	0,0147	0	0	53,9
El-Sayed ve Shuraim (2015)	B500-1-55	500	419	1,00	150	1838	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



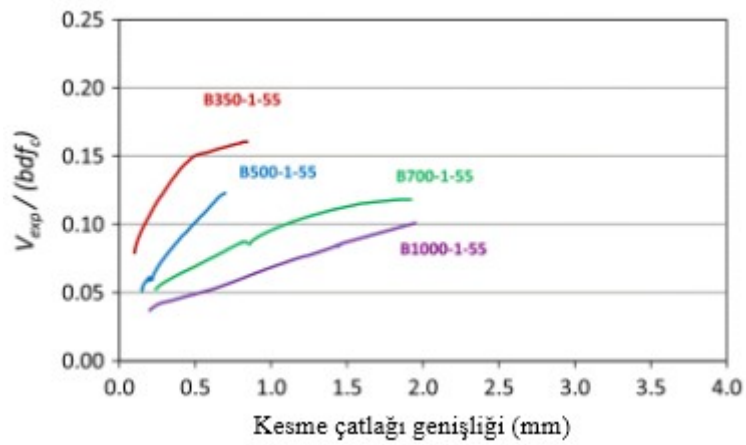
Şekil 82. S0M ve S1M numunesi yük – yerdeğiştirme davranış grafikleri (Mihaylov vd., 2010).



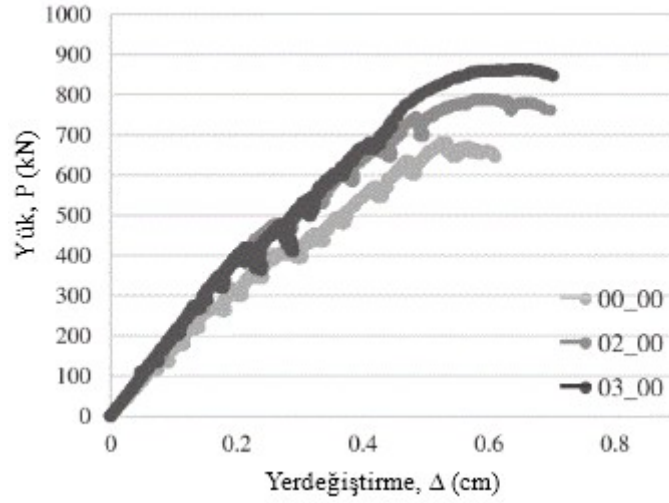
Şekil 83. SOM ve S1M numunesi yük – çatlak genişliği davranış grafikleri (Mihaylov vd., 2010).



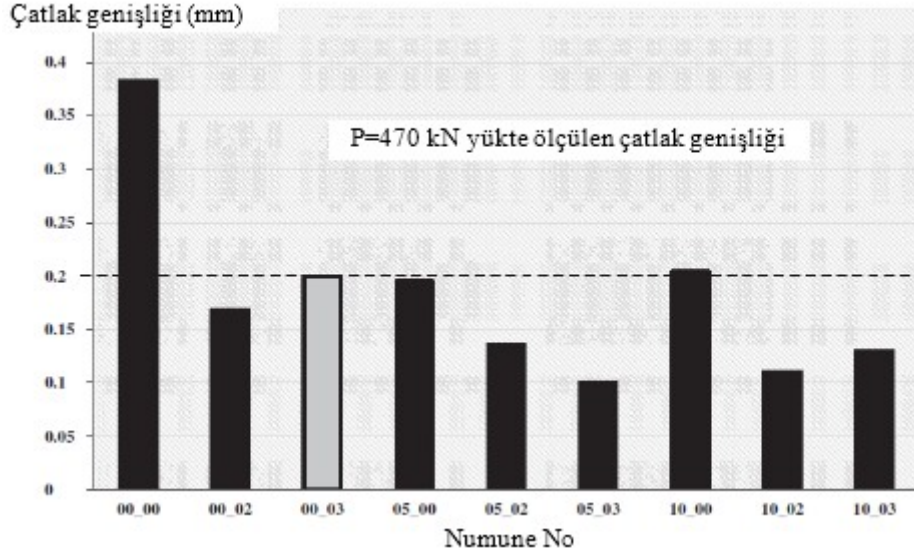
Şekil 84. B350-1-55, B500-1-55, B700-1-55 ve B1000-1-55 numunesi yük – yerdeğiştirme davranış grafikleri (El-Sayed ve Shuraim, 2015).



Şekil 85. 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 86. 00_00, 00_02 ve 00_03 numunesi yük – yerdeğiştirme davranış grafikleri (Tuchscherer ve Quesada, 2015).



Şekil 87. 00_00, 00_02 ve 00_03 numunesi yük – çatlak genişliği davranış grafikleri (Tuchscherer ve Quesada, 2015).

5. ARTIK YÜK TAŞIMA KAPASİTESİNİN HESABI İÇİN ÖNERİLEN FORMÜL

Proje çalışmasının son aşamasında, literatürde gerçekleştirilmiş çalışmalar ile bu proje kapsamında yapılan deneysel ve parametrik 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 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 proje çalışması kapsamında GEP analizlerinde kök bağıl karesel hata (RRSE) kullanılmıştır.

Bu proje 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 (Cağlar vd., 2015). Programda, optimal evolution, constant fine-tuning, model fine-tuning, subset selection ve custom olarak 5 ayrı çözüm stratejisi eğitim stratejisi bulunmaktadır (GeneXproTools Tutorials). Proje 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 13’de verilmiştir. Bu parametrelerin optimum değerinin tespiti için parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. En iyi uygunluk performansı sergileyen değerler tabloya yazılmıştır.

Tablo 13. 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 14’te gösterilmiştir.

Tablo 14. 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 (%)	0,70	2,38
w (mm)	0,10	2,49
Çıktı parametreleri		
P (kN)	209	1700

Bir betonarme yüksek kiriş elemanının artık yük taşıma kapasitesi oranı (η); elemana etkiyen mevcut yükün (P), maksimum yük taşıma kapasitesine (P_u) bölünmesiyle elde edilmektedir ($\eta=1-P/P_u$). Yüksek kirişlerde P_u değeri mevcut tasarım yönetmeliklerinde (ACI 318-14, AASHTO LRFD, FIB MC2010 vb.) veya literatürde önerilen yöntemlerden (Birrcher vd., 2009; Gong ve Su, 2013; Hassoun ve Al-Manaseer, 2015; Wight, 2016) birisi kullanılarak rahatlıkla hesaplanabilmektedir. Ancak, eğik olarak çatlama betonarme yüksek kirişlerin artık yük taşıma kapasite oranının belirlenebilmesi için gerekli olan P değerinin hesabı için literatürde bir bağıntıya pek rastlanmamıştır. Bu sebeple, bu proje çalışması kapsamında P değerinin hesabı için bir formül önerilmiştir (Denklem 2). Önerilen formül ile eğik olarak çatlama 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 3, 4, 5 ve 6'da verilen bağıntılar yardımı ile elde edilmektedir.

$$P = A + B - C D \quad (2)$$

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

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

$$C = \frac{a}{d} \rho_w (f_{ck} + 280) w^{0,25} \quad (5)$$

$$D = \frac{1260}{w} - 2 A_c - 103200 \quad (6)$$

Denklemlerde; w : eğik çatlak genişliğini (mm), f_{ck} : betonun 28 günlük karakteristik silindirik 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.

Denklemlerden 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 proje 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

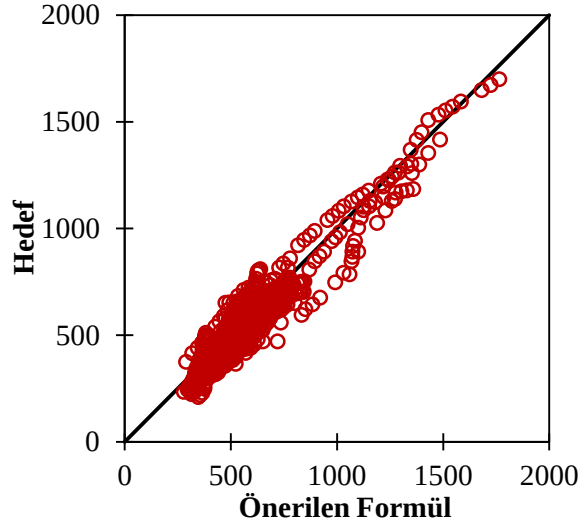
parametreler tespit edilmiştir. Gerçekleştirilmiş olan bu kapsamlı çalışma neticesinde oldukça başarılı, etkin ve geçekçi sonuçlar veren bir formül elde edilmiştir.

Önerilen formülün performansı istatistiksel olarak Tablo 15'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 15'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.

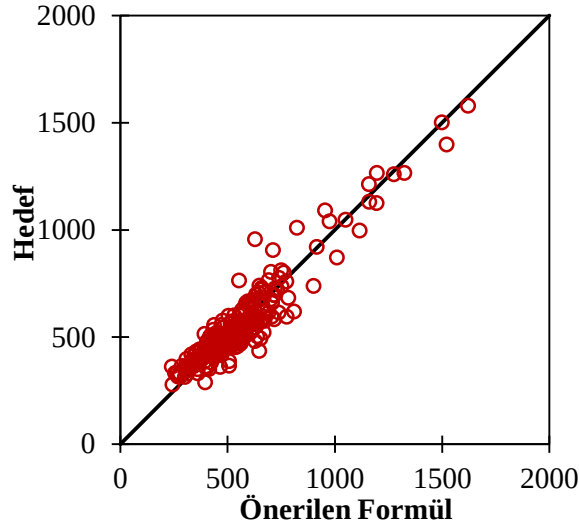
Tablo 15. Önerilen formülün performansı.

	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 88'de verilmiştir. Doğrulama verisinin saçılım diyagramı ise Şekil 89'de gösterilmiştir. Her iki diyagramdan görülebileceği gibi, önerilen formülün performansı oldukça başarılıdır.



Şekil 88. Eğitim verisinin saçılım diyagramı (birim: kN).



Şekil 89. Doğrulama verisinin saçılım diyagramı (birim: kN).

Bu proje 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 proje kapsamında yapılan deneysel ve parametrik çalışma sonuçları birlikte kullanılmıştır. Bu sebeple formülün oluşturulmasında kullanılan verinin kapsam ve sınırı bulunmaktadır. Önerilen formül ancak Tablo 14'te verilen sınır değerler dikkate alındığında gerçekçi sonuçlar vermektedir. Önerilen formülün bu sınır değerler dışında kalan özelliklere sahip yüksek kirişlerde 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 kirişler kesme kritik davranışları sebebiyle ani ve gevrek hasara maruz kalabilmektedir. Bu sebeple önerilen formülün kullanılmasında bu husus dikkate alınmalıdır. Bununla birlikte, bir betonarme yüksek kiriş 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 proje 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 proje çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışma laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş olup saha ve laboratuvar koşullarında oluşabilecek farklılıklar dikkate alınmalıdır.
- Betonarme yüksek kirişlerin eğik çatlak genişliklerine etkisi önemli olabilecek ancak bu proje çalışması kapsamına girmeyen başka parametrelerin de var olabileceği ihtimali unutulmamalıdır.
- Betonarme elemanlarda genel olarak, çatlak davranışının değişkenlik gösterebileceği göz ardı edilmemelidir.

6. GENEL SONUÇLAR

Bu proje 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 ve çatlak genişliği 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. Proje 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. 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 yerdeğiştirme sünekliği açısından beklenen etkiyi göstermediği ancak basınç çubuklarında sargı etkisi oluşturarak 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 yerdeğiştirme kapasitesi açısından 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. Elde edilen sonuçlar, deneysel çalışma ile numunelerden elde edilen maksimum yük taşıma kapasiteleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde; STM kullanılarak elde edilen sonuçlar, deney sonuçlarına göre oldukça güvenli (conservative) tarafta kaldığı görülmüştür. 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 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. 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.

- Deneysel çalışma sonuçlarının strut-and-tie modeli ile oldukça uyumlu olduğu ve STM'nin yüksek kirişlerin yük taşıma kapasitesi davranışını oldukça gerçekçi bir şekilde temsil ettiği görülmüştür. Ancak tasarım yöntemi olması sebebiyle sonuçlar her zaman güvenli tarafta kalmaktadır.

Çalışmanın ikinci aşamasında öncelikle, deneysel çalışmada kullanılan numuneler doğrusal olmayan SE metodu kullanılarak modellenmiştir. Ayrıca, 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.
- Bu proje çalışması kapsamında oluşturulmuş nümerik modellerin, $P-w$ davranış grafikleri deney sonuçları ile karşılaştırıldığında, modellerin deneysel çalışma sonuçlarını gerçekçi bir şekilde temsil ettiği görülmüştür. 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 konfigürasyonundaki değişimi oldukça gerçekçi ve başarılı bir şekilde temsil ettikleri görülmüştür. Bu durum ayrıca literatürde önerilen yöntemi de (Demir vd., 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. 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.

Proje çalışmasının son aşamasında ise, gerçekleştirmiş olan deneysel ve nümerik çalışmalar ile literatürde verilen çalışma sonuçları birlikte kullanılarak, eğik olarak çatlamış betonarme 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 ifadeli programlama (GEP) optimizasyon tekniği kullanılmıştır. Analiz verisinin oluşturulması amacıyla öncelikle, betonarme yüksek kirişlerin eğik kesme çatlak davranışına etkisi olabilecek parametreler, gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışma ve literatürde mevcut çalışmaların sonuçları bir bütün olarak değerlendirilerek belirlenmiştir. Belirlenen parametreler dikkate alınarak, literatürde gerçekleştirilmiş çalışmalar ile bu proje 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.

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

- Bu proje 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 proje 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 proje 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 artırılması 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 incelenebilir.



KAYNAKÇA

- 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.
- ABAQUS Documentation, 2018, France: Dassault Systèmes, 10 rue Marcel Dassault CS 40501 78946 Vélizy-Villacoublay Cedex.
- 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.
- 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.
- 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, 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.
- 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/>,
Son 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.
- Ersoy, U., Özcebe, G., Tankut, T. 2012. Reinforced Concrete. İstanbul: Metu Press.

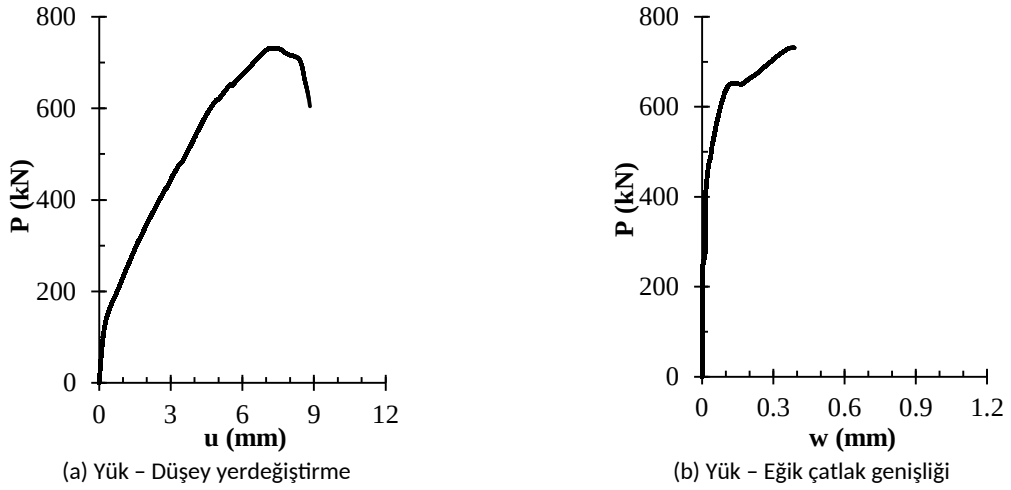
- Ferreira, C. 2006. Gene Expression Programming Mathematical Modeling by an Artificial Intelligence. New York: Springer.
- FIB MC2010. 2013. CEB-FIB Model Code for Concrete Structures 2010. Lausanne: International Federation for Structural Concrete.
- Gandomi, A. H., Yun, G. J., Alavi, A. H. 2013. "An 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>,
Son erişim tarihi: 15 Ocak 2019.
- 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.
- 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.
- Hassoun, M. N., Al-Manaseer, A. 2015. *Structural Concrete: Theory and Design*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- 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
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Van Mier, J. G. M. 1984. Strain-softening of concrete under multiaxial loading conditions. Techn. Univ. Eindhoven, PhD Thesis.
- Vonk, R. A. 1993. "A micromechanical investigation of softening of concrete loaded in compression", Heron, 38(3), 3-94.
- Wight, J. K. 2016. Reinforced Concrete Mechanics and Design. New Jersey: Pearson Education Inc.
- 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.

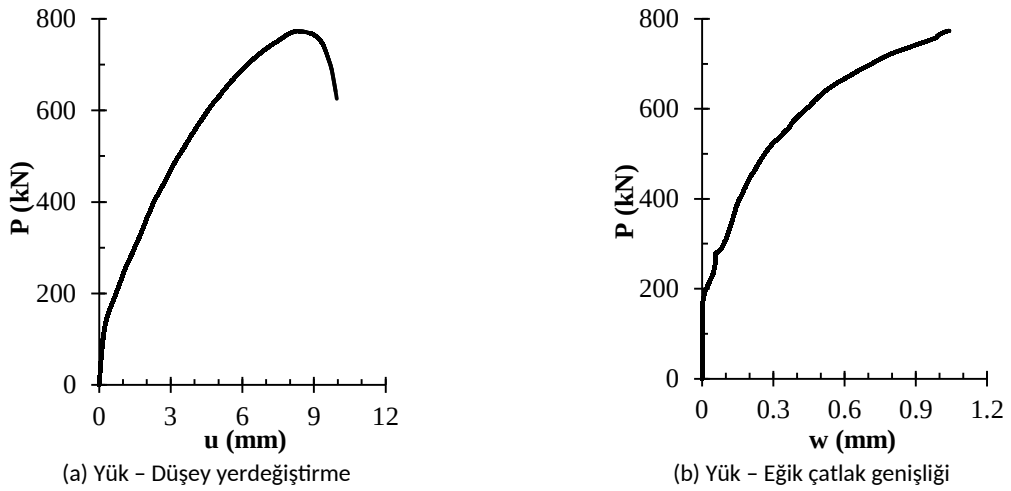
EKLER

EK 1: Parametrik Çalışma Sonuçları

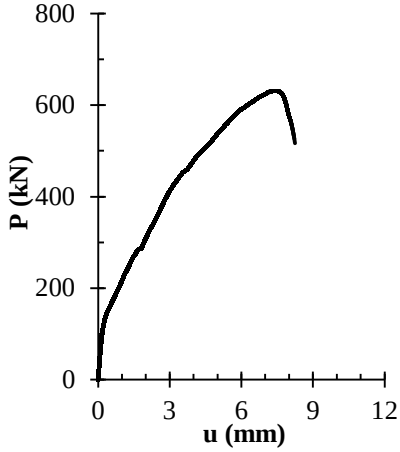
Deneysel çalışma sonuçları kullanılarak doğrulanan ve sadece donatı konfigürasyonu değiştirilerek elde edilmiş nümerik modeller kullanılarak gerçekleştirilen parametrik çalışma sonucunda elde edilen “ $P-u$ ” ve “ $P-w$ ” davranış grafikleri aşağıda verilmiştir.



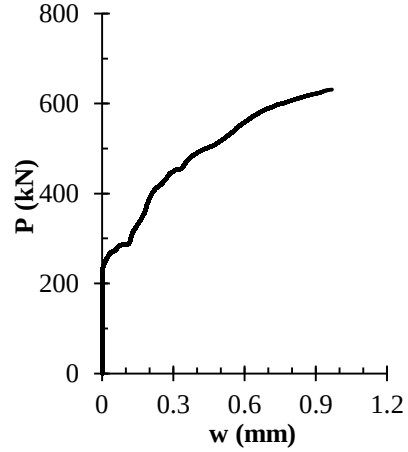
Şekil 90. DB50/1.84-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



Şekil 91. DB50/1.75-C1/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

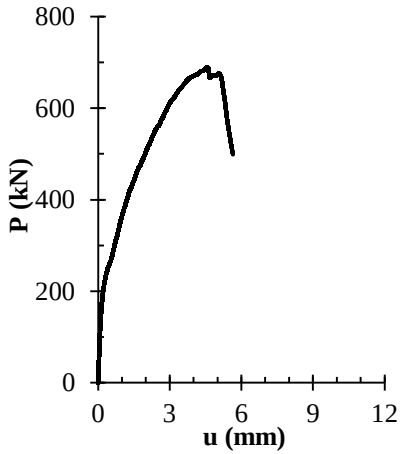


(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

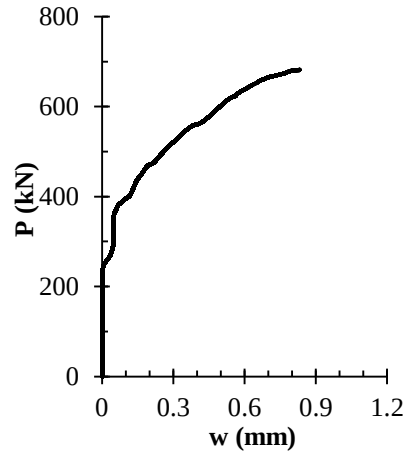


(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

Şekil 92.DB50/1.75-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

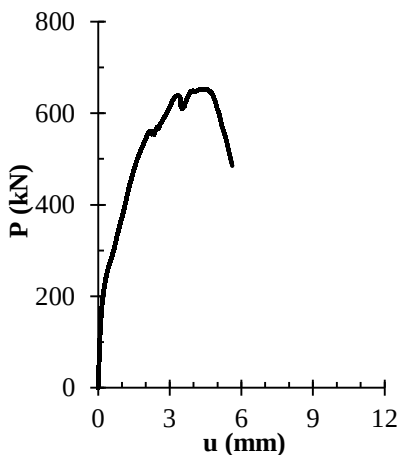


(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

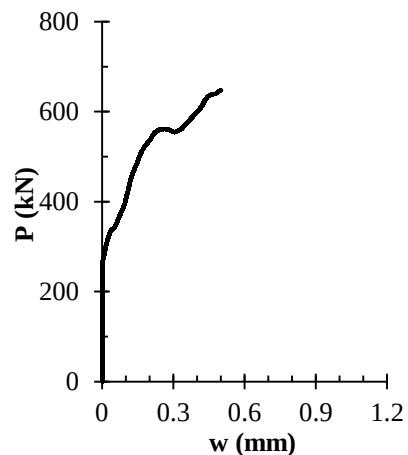


(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

Şekil 93. DB50/1.38-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

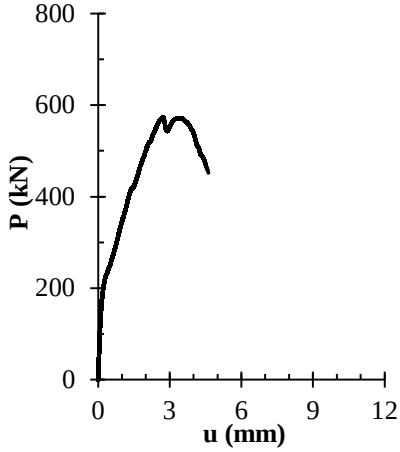


(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

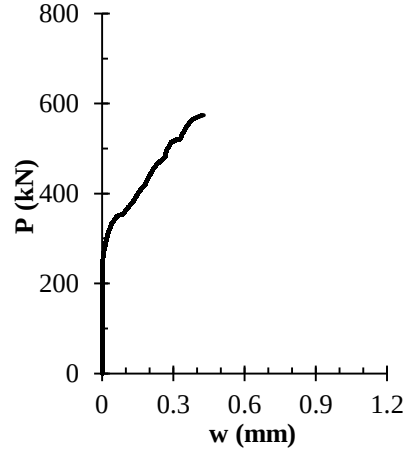


(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

Şekil 94. DB50/1.32-C1/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

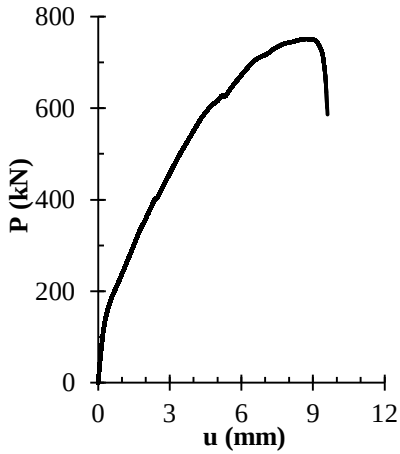


(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

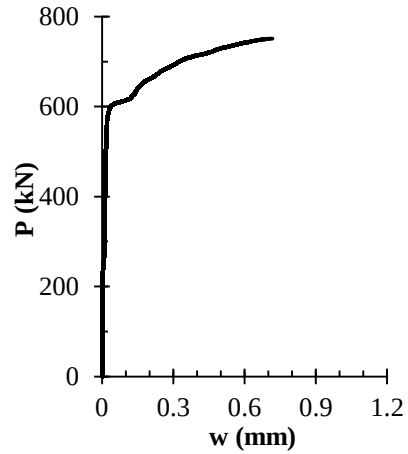


(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

Şekil 95. DB50/1.32-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

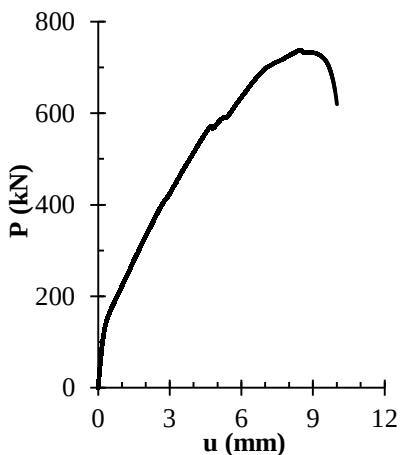


(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

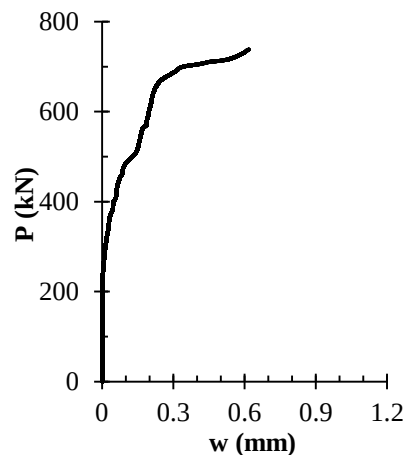


(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

Şekil 96. DB60/1.87-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

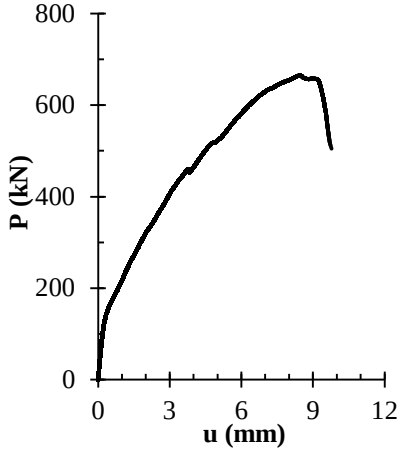


(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

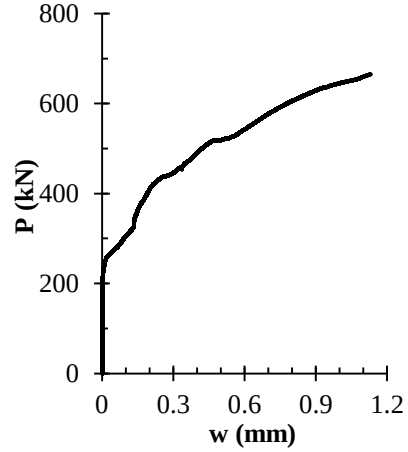


(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

Şekil 97. DB60/1.80-C1/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

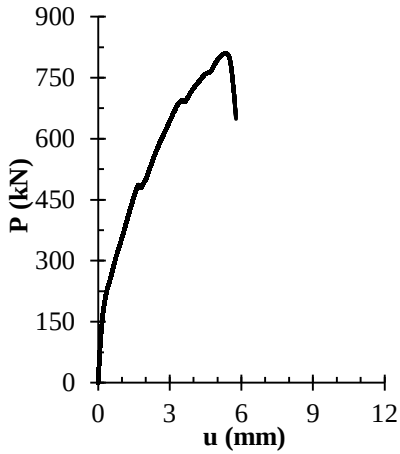


(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

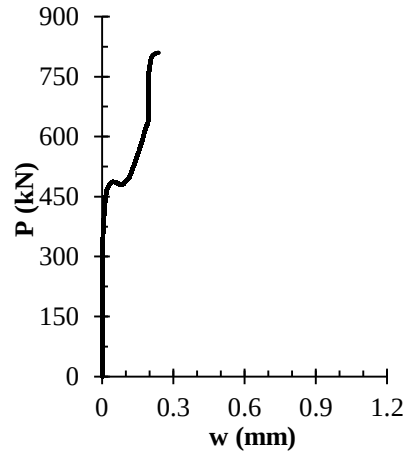


(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

Şekil 98. DB60/1.80-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

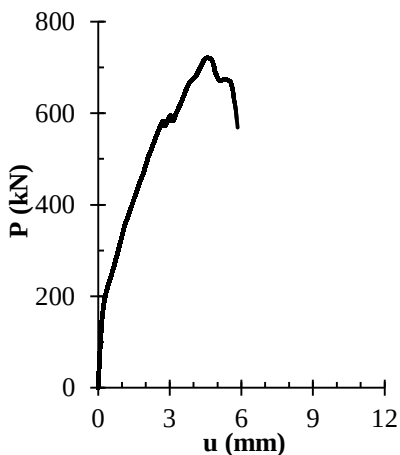


(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

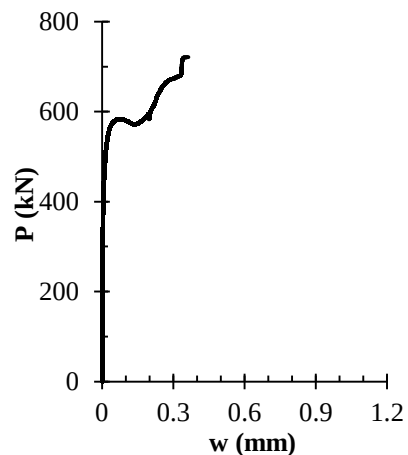


(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

Şekil 99. DB60/1.50-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

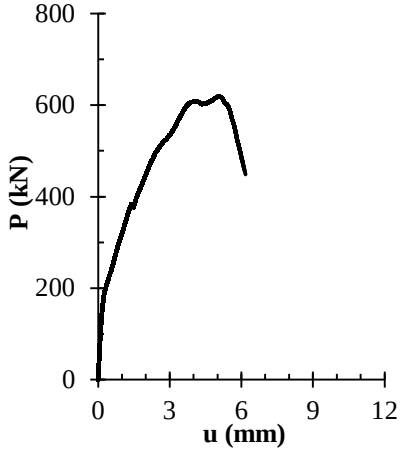


(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

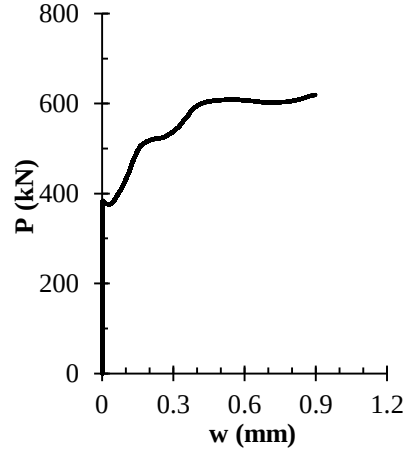


(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

Şekil 100. DB60/1.44-C1/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

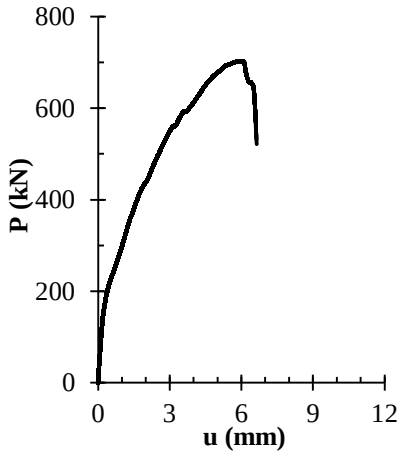


(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

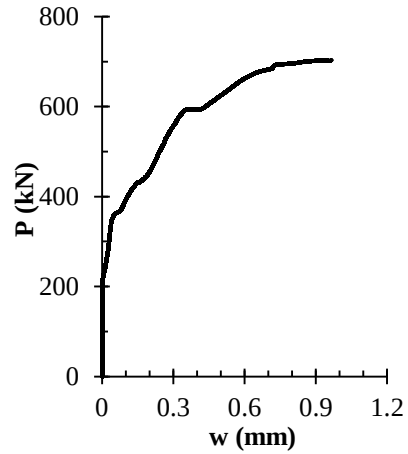


(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

Şekil 101. DB60/1.44-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

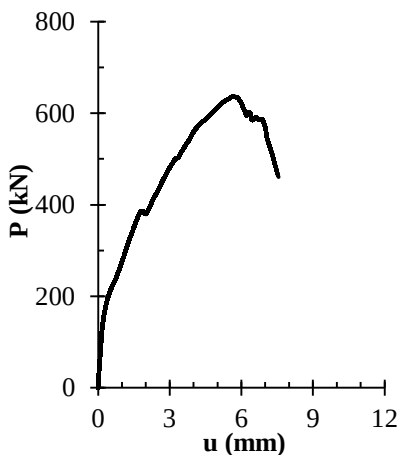


(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

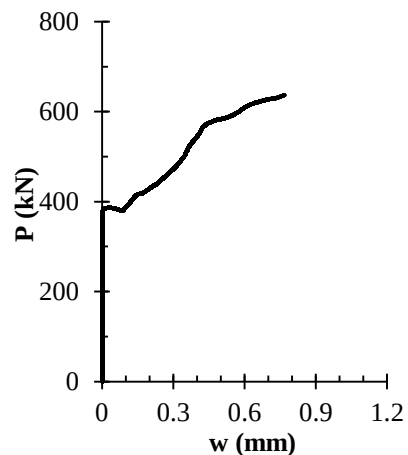


(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

Şekil 102. DB55/1.65-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

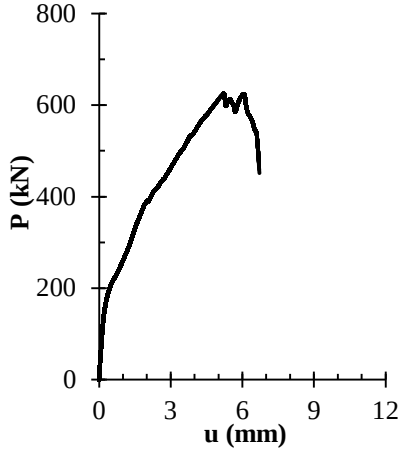


(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

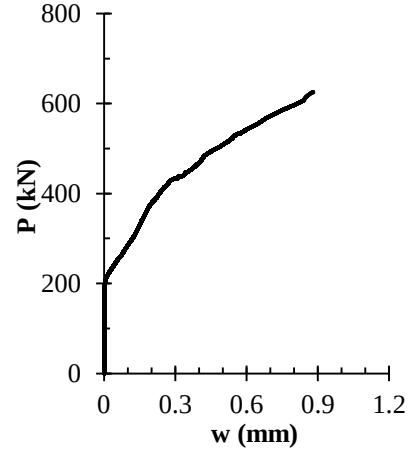


(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

Şekil 103. DB55/1.58-C1/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

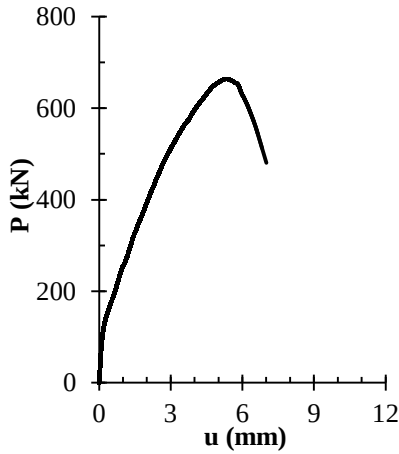


(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

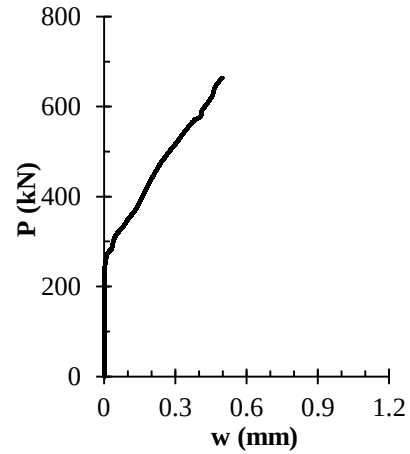


(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

Şekil 104. DB55/1.58-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

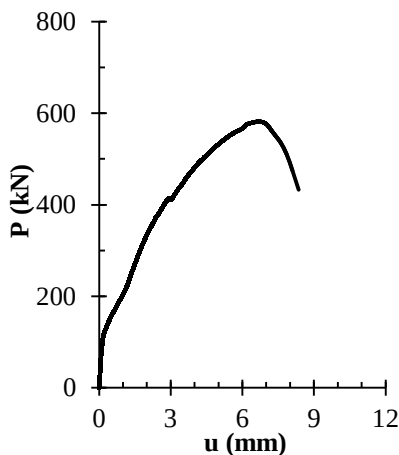


(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

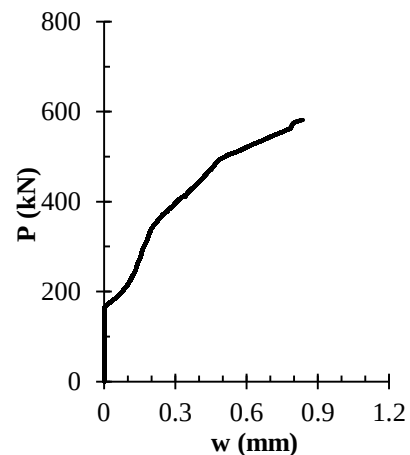


(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

Şekil 105. DB40/1.80-C1/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

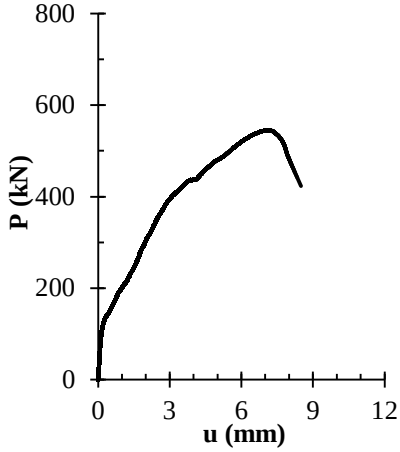


(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

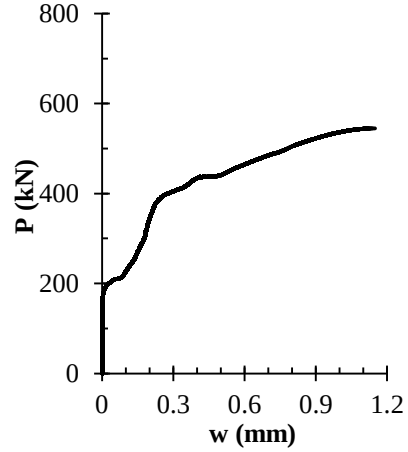


(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

Şekil 106. DB40/1.68-C1/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

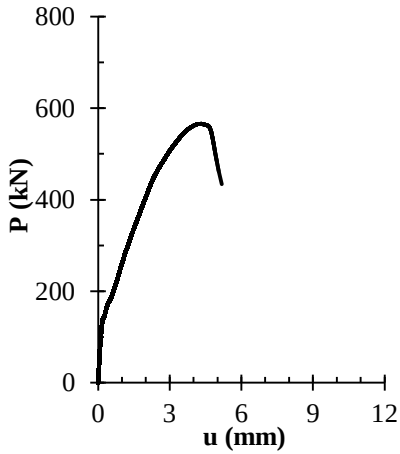


(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

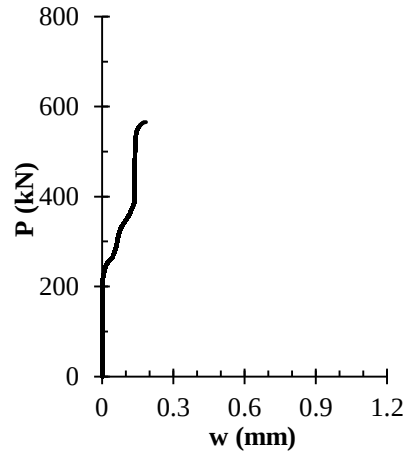


(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

Şekil 107. DB40/1.68-C1/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

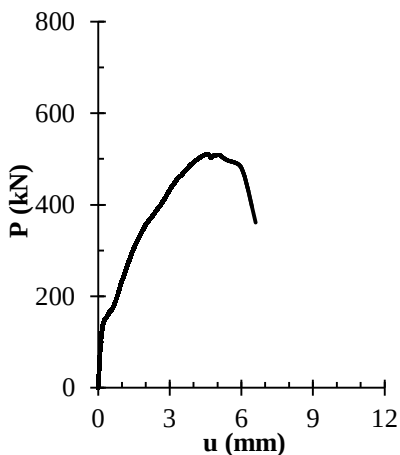


(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

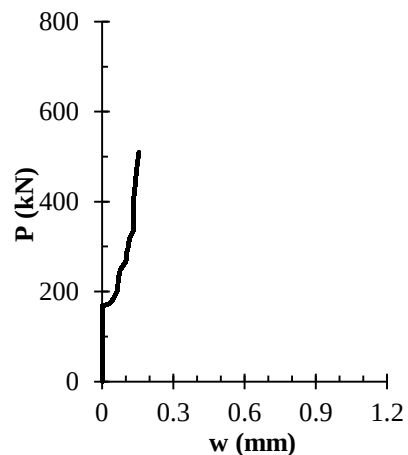


(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

Şekil 108. DB40/1.80-C2/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

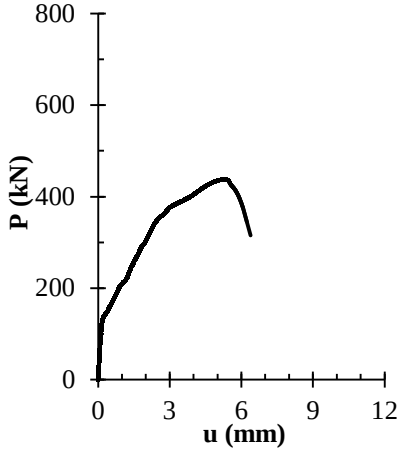


(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

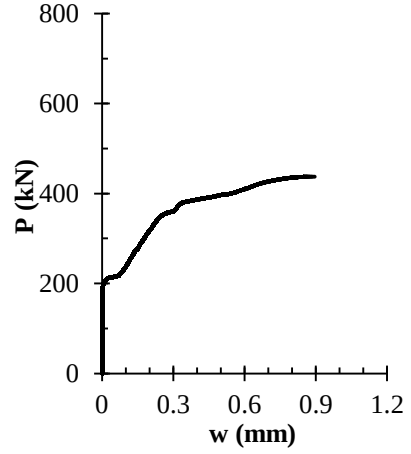


(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

Şekil 109. DB40/1.68-C2/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

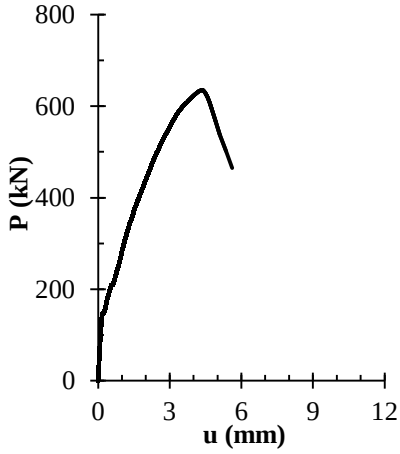


(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

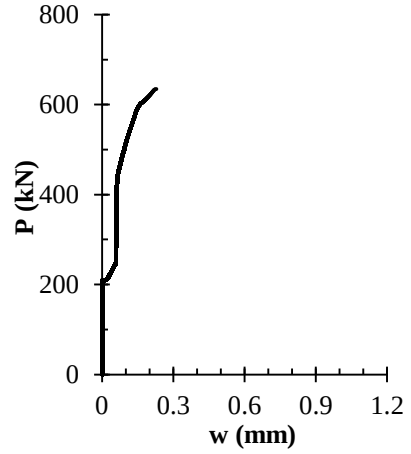


(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

Şekil 110. DB40/1.68-C2/SR-3 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

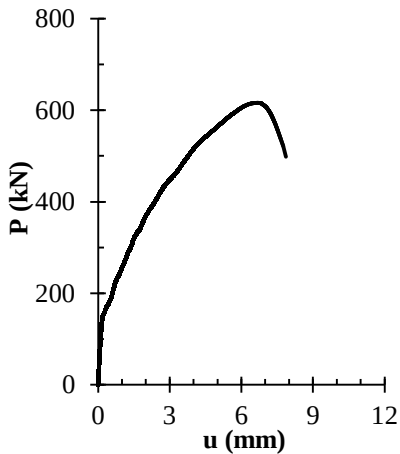


(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

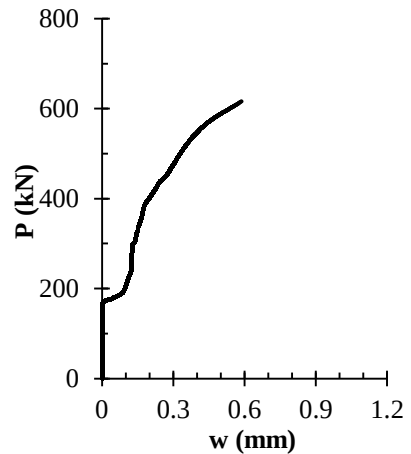


(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

Şekil 111. DB40/1.80-C3/SR-1 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.

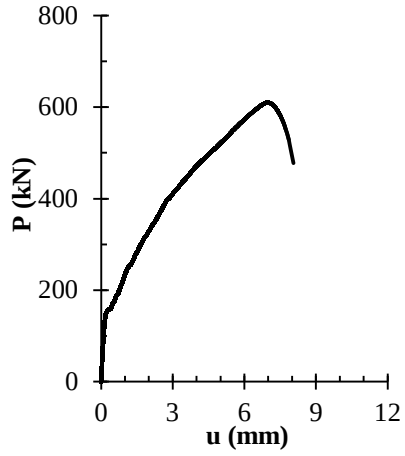


(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme

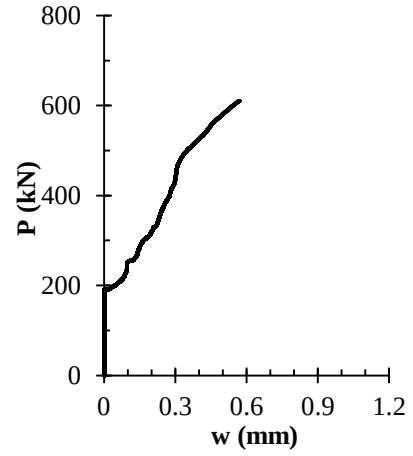


(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

Şekil 112. DB40/1.68-C3/SR-2 numunesi nümerik analiz davranış grafikleri.



(a) Yük - Düşey yerdeğiştirme



(b) Yük - Eğik çatlak genişliği

Şekil 113. 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 16’da verilmiştir. Ayrıca doğrulama verisi olarak ise 240 adet veri kullanılmış olup, Tablo 17’de verilmiştir. Tablolarda “Numune” sütununda verinin, literatürden veya bu proje çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel ve parametrik çalışmadan alındığı belirtilmiştir.

Tablo 16. 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	(Mihaylov vd., 2010)S0M
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	(Mihaylov vd., 2010)S1M
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 16. (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	(Minaylov vd., 2010)S1M	
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	(El-Sayed ve Shuraim, 2015)B350-1-55	
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	(El-Sayed ve Shuraim, 2015)B500-1-55	
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		(El-Sayed ve Shuraim, 2015)B700-1-55
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 16. (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	(El-Sayed ve Shuraim, 2015)B700-1-55	
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		(El-Sayed ve Shuraim, 2015)B1000-1-55
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	(Deneyisel çalışma)DB50/1.40-C.1l	
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		(Deneyisel çalışma)DB50/1.86-C.1l
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		
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
				0,0037			
154	100000	0,0221	1,86		18,1	0,47	531515

(Deneysel çalışma)DB50/1.86-C1/SR

Tablo 16. (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	
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		
				0,0037					
162	100000	0,0221	1,86		18,1	1,08	640000		
163	110000	0,0237	1,67	0	18,1	0,18	373196		DB55/1.67-C1
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	
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	
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	
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 0,00379	18,1	0,69	644134
211	120000	0,0215	1,89		18,1	0,84	650279

(Deneysel çalışma)

Tablo 16. (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	(Deneysel çalışma)DB40/1.86-C1
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	(Deneysel çalışma)DB40/1.86-C2
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	(Deneysel çalışma)DB40/1.86-C3
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	
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 16. (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	(Deneysel çalışma)DB40/1.86-C1/SR	
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		
				0,00426					
282	80000	0,0228	1,80		18,1	0,73	566667		
283	100000	0,0147	1,84	0,00794	18,1	0,13	651749		(Parametrik çalışma)DB50/1.84-C1/SR-1
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		
				0,00794					
293	100000	0,0147	1,84		18,1	0,39	731396		
294	100000	0,0125	1,75	0,00789	18,1	0,10	313897	(Parametrik çalışma)DB50/1.75-C1/SR-2	
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 16. (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	(Parametrik çalışma)DB50/1.75-C1/SR-3
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	(Parametrik çalışma)DB50/1.38-C1/SR-1
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 16. (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	(Parametrik çalışma)DB50/1.38-C1/SR-1
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	(Parametrik çalışma)DB50/1.32-C1/SR-3
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 16. (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	(Parametrik çalışma)DB60/1.87-C1/SR-1	
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		(Parametrik çalışma)DB60/1.80-C1/SR-2
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	
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 16. (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	(Parametrik çalışma) DB60/1.50-C1/SR-1
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	
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	(Parametrik çalışma) DB60/1.80-C1/SR-3
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 16. (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	(Parametrik çalışma)DB60/1.80-C1/SR-3	
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		(Parametrik çalışma)DB60/1.44-C1/SR-3
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	
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 16. (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	(Parametrik çalışma)DB55/1.65-C1/SR-1
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	(Parametrik çalışma)DB55/1.58-C1/SR-2
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	(Parametrik çalışma)DB55/1.58-C1/SR-3
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 16. (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	(Parametrik çalışma)DB55/1.58-C1/SR-3
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	
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	(Parametrik çalışma)DB40/1.68-C1/SR-2
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 16. (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	(Parametrik çalışma)DB40/1.68-C1/SR-2
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	(Parametrik çalışma)DB40/1.80-C2/SR-1
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	(Parametrik çalışma)DB40/1.68-C2/SR-2
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 16. (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	(Parametrik çalışma)DB40/1.80-C3/SR-1	
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		(Parametrik çalışma)DB40/1.68-C3/SR-2
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	
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

(Parametrik çalışma)

Tablo 16. (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	
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	
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	

(Parametrik çalışma)DB40/1.68-C1/SR-3

(Parametrik çalışma)DB40/1.68-C2/SR-3



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 16. (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	(Parametrik çalışma)DB40/1.68-C2/SR-3	
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		(Parametrik çalışma)DB40/1.68-C3/SR-3
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 17. 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	S0M (Mihaylov vd., 2010)
2	480000	0,0070	1,55	0	34,2	0,302	900000	
3	480000	0,0070	1,55	0	34,2	0,797	1009804	
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	S1M (Mihaylov vd., 2010)
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	
11	480000	0,0070	1,55	0,001	33,0	0,888	1323529	
12	480000	0,0070	1,55	0,001	33,0	1,276	1521569	
13	480000	0,0070	1,55	0,001	33,0	1,849	1621569	
14	52500	0,0147	1,00	0	53,9	0,106	394966	B350-1-55 (El-Sayed ve Shuraim, 2015)
15	52500	0,0147	1,00	0	53,9	0,199	507084	
16	52500	0,0147	1,00	0	53,9	0,384	653791	
17	52500	0,0147	1,00	0	53,9	0,659	737457	
18	75000	0,0147	1,00	0	53,9	0,183	400724	B500-1-55 (El-Sayed ve Shuraim, 2015)
19	75000	0,0147	1,00	0	53,9	0,365	577665	
20	75000	0,0147	1,00	0	53,9	0,616	783490	
21	105000	0,0147	1,00	0	53,9	0,313	585555	B700-1-55 (El-Sayed ve Shuraim, 2015)
22	105000	0,0147	1,00	0	53,9	0,624	761274	
23	105000	0,0147	1,00	0	53,9	0,913	915833	
24	105000	0,0147	1,00	0	53,9	1,229	1049380	
25	105000	0,0147	1,00	0	53,9	1,649	1159130	
26	150000	0,0147	1,00	0	53,9	0,202	553803	B1000-1-55 (El-Sayed ve Shuraim, 2015)
27	150000	0,0147	1,00	0	53,9	0,466	711046	
28	150000	0,0147	1,00	0	53,9	0,905	953789	
29	150000	0,0147	1,00	0	53,9	1,343	1196531	
30	150000	0,0147	1,00	0	53,9	1,943	1497957	
31	100000	0,0221	1,40	0	18,1	0,163	394545	DB50/1.40-C1 (Deneyisel çalışma)
32	100000	0,0221	1,40	0	18,1	0,372	526667	
33	100000	0,0221	1,40	0	18,1	0,500	638182	
34	100000	0,0221	1,86	0	18,1	0,199	343636	DB50/1.86-C1 (Deneyisel çalışma)
35	100000	0,0221	1,86	0	18,1	0,577	429697	
36	100000	0,0221	1,86	0	18,1	0,841	493939	
37	100000	0,0221	1,86	0,0037	18,1	0,154	369091	DB50/1.86-C1/SR (Deneyisel çalışma)
38	100000	0,0221	1,86	0,0037	18,1	0,315	446667	
39	100000	0,0221	1,86	0,0037	18,1	0,516	549697	
40	100000	0,0221	1,86	0,0037	18,1	0,793	623636	
41	110000	0,0237	1,67	0	18,1	0,119	355155	DB55/1.67-C1 (Deneyisel çalışma)
42	110000	0,0237	1,67	0	18,1	0,402	438144	
43	110000	0,0237	1,67	0	18,1	0,648	519072	
44	120000	0,0215	1,51	0	18,1	0,106	374302	DB60/1.51-C1 (Deneyisel çalışma)
45	120000	0,0215	1,51	0	18,1	0,320	463687	
46	120000	0,0215	1,51	0	18,1	0,498	570950	
47	120000	0,0215	1,89	0	18,1	0,158	342458	DB60/1.86-C1 (Deneyisel çalışma)
48	120000	0,0215	1,89	0	18,1	0,532	418994	
49	120000	0,0215	1,89	0	18,1	0,742	502235	
50	120000	0,0215	1,89	0,00379	18,1	0,134	392179	DB60/1.86-C1/SR (Deneyisel çalışma)
51	120000	0,0215	1,89	0,00379	18,1	0,271	503911	
52	120000	0,0215	1,89	0,00379	18,1	0,441	599441	
53	120000	0,0215	1,89	0,00379	18,1	0,755	648603	
54	80000	0,0228	1,80	0	18,1	0,184	277778	DB40/1.86-C1 (Deneyisel çalışma)
55	80000	0,0228	1,80	0	18,1	0,317	348073	
56	80000	0,0228	1,80	0	18,1	0,470	384354	
57	80000	0,0228	1,80	0	18,1	0,680	425624	
58	80000	0,0228	1,80	0	18,1	0,882	460091	



Tablo 17. (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 17. (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	DB60/1.80-C1/SR-3 (Parametrik çalışma)
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 17. (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 17. (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	
225	80000	0,0107	1,68	0,00673	25,3	0,362	382869	DB40/1.68-C2/SR-3
226	80000	0,0107	1,68	0,00673	25,3	0,464	392745	(Parametrik çalışma)
227	80000	0,0107	1,68	0,00673	25,3	0,569	404480	
228	80000	0,0107	1,68	0,00673	25,3	0,677	423650	
229	80000	0,0107	1,68	0,00673	25,3	0,778	434147	
230	80000	0,0107	1,68	0,00673	25,3	0,870	437543	
231	80000	0,0107	1,68	0,00673	32,0	0,136	266028	
232	80000	0,0107	1,68	0,00673	32,0	0,174	304453	
233	80000	0,0107	1,68	0,00673	32,0	0,223	335098	
234	80000	0,0107	1,68	0,00673	32,0	0,259	384756	
235	80000	0,0107	1,68	0,00673	32,0	0,295	424047	DB40/1.68-C3/SR-3
236	80000	0,0107	1,68	0,00673	32,0	0,314	472851	(Parametrik çalışma)
237	80000	0,0107	1,68	0,00673	32,0	0,370	510835	
238	80000	0,0107	1,68	0,00673	32,0	0,436	547517	
239	80000	0,0107	1,68	0,00673	32,0	0,499	580314	
240	80000	0,0107	1,68	0,00673	32,0	0,557	606202	

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. NACI ÇAĞLAR
Proje No:	117M854
Proje Başlığı:	Eğik Olarak Çatlamış Betonarme Yüksek Kirişlerin Kullanılabilirlik Davranışının Deneysel Ve Analitik Olarak İncelenmesi
Proje Türü:	3001 - Başlangıç AR-GE
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	HAKAN ÖZTÜRK, AYDIN DEMİR
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	SAKARYA Ü. MÜHENDİSLİK F. İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/03/2018 - 01/03/2020
Onaylanan Bütçe:	99000.0
Harcanan Bütçe:	20469.73
Öz:	<p>Bu 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 kesme etkisi ön plana çıkmakta olup 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.</p> <p>Bu proje 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, 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. Proje 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.</p>
Anahtar Kelimeler:	Betonarme yüksek kiriş, Kesme çatlaklığı, Artık yük taşıma kapasitesi, Sonlu elemanlar yöntemi
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Parameters affecting diagonal cracking behavior of reinforced concrete deep beams (Makale - Diğer Hakemli Makale), 2- BETONARME YÜKSEK KİRİŞLERDE KESME ÇATLAĞININ ARTIK YÜK TAŞIMA KAPASİTESİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ (Tez (Araştırmacı Yetiştirilmesi) - Doktora Tezi),