

**Beton için Yeni Bir Statik ve Dinamik Mekanik  
Karakterizasyon Metodolojisi Geliştirilmesi**

**Program Kodu: 1001**

**Proje No: 115M534**

Proje Yürütücüsü:  
**Prof. Dr. Alper TAŞDEMİRCİ**

Araştırmacı(lar):

Prof. Dr. Mustafa GÜDEN

Yrd. Doç. Dr. Selçuk SAATCI

Bursiyer(ler):

Mehmet Alper ÇANKAYA

Çetin Erkam UYSAL

Semih Berk SEVEN

EYLÜL 2017

İZMİR

## Önsöz

Dünyada en yaygın olarak kullanılan betonu konu alan bu proje kapsamında betonun statik ve dinamik mekanik karakterizasyon metodolojisinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Beton malzemenin şekil değiştirme hızı hassasiyetinin tespiti amacıyla bazı inovatif fikirler uygulamaya konmuş ve başarı sağlanmıştır. Betonun hem statik hem de dinamik şekil değiştirme hızlarındaki davranışı incelenmiş ve oluşturulan nümerik modellerle birlikte deneysel çalışmalar doğrulanarak malzeme modeli seçimi ve model parametrelerinin belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca nümerik modeller kullanılarak beton malzemenin karakterizasyonu sırasında tercih edilmesi uygun olacak olan bazı deneysel parametrelerin ve numune geometrilerinin seçimi üzerine detaylı çalışmalar yapılmıştır. Proje TÜBİTAK tarafından desteklenmiş ve İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü bünyesinde bulunan Dinamik Test ve Modelleme Labotaruvarı' nda yürütülmüştür.

## İÇİNDEKİLER

Önsöz.....	ii
Tablo Listesi.....	iv
Şekil Listesi.....	v
Özet.....	xii
Abstract.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	2
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	13
3.1 Beton Malzeme Üretimi.....	13
3.2 Statik Basma Deneyleri.....	17
3.3 Split Hopkinson Basınç Barı Testi ve Nümerik Modeli.....	19
3.4 Düşen Ağırlık Testi ve Nümerik Modeli.....	25
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	29
4.1 Statik ve Dinamik Mekanik Karakterizasyon Sonuçları.....	29
4.2 Malzeme Modeli Sabitlerinin Doğrulanması.....	52
4.3 Düşen Ağırlık Testi ve Nümerik Modeli Sonuçları.....	74
4.4 Gerilme Dağılımına Etki Eden Faktörler.....	132
5. SONUÇLAR.....	159
KAYNAKLAR.....	161

## Tablo Listesi

Tablo 1. 1989 yılına kadar betonun yüksek hızlı şekil değiştirme davranışını inceleyen başlıca alışmalar (Bischoff ve Perry'den kısaltılarak alınmıştır. [3]).....	7
Tablo 2. Agreganın fiziksel özellikleri.....	14
Tablo 3. Deneme beton karışımı basma mukavemeti değeri. ....	15
Tablo 4. 7075-T6 alüminyum çubuk malzeme özellikleri.....	23
Tablo 5. JHC model parametreleri.....	59
Tablo 6. Değişen sınır ve çarpma hızı şartlarında kuvvetin incelenmesi. ....	113
Tablo 7. Değişen sınır ve çarpma hızı şartlarında çatlak incelenmesi.....	113



## Şekil Listesi

Şekil 1. Betonda statik ve dinamik gerilme – şekil değiştirme eğrileri.....	3
Şekil 2. Betonda basma mukavemetinin şekil değiştirme hızına göre değişimi (test verileri)..	4
Şekil 3. Beton mukavemetinin şekil değiştirme hızına göre değişimi (CEB formülasyonu).....	4
Şekil 4. Farklı araştırmacılarca elde edilmiş DIF fonksiyonlarının karşılaştırılması.....	5
Şekil 5. Split Hopkinson Basınç Barı düzeneği .....	6
Şekil 6. Şekil değiştirme hızına bağlı olarak hesaplanan ve testlerde gözlemlenen mukavemet artışı.....	10
Şekil 7. Agrega gradasyon eğrisi. ....	13
Şekil 8. Çelik Kalıplar: (a) 2.5x2.5x22 cm, (b) 20x20x2 cm ve (c) 15x15x15 cm, (d) 15 cm çap ve 30 cm yükseklik. ....	16
Şekil 9. (a) Elmas kesici uç, (b) prizmatik beton malzeme ve (c) silindirik beton numunesi. .	17
Şekil 10. Shimadzu AG-X Test Cihazı. ....	18
Şekil 11. Numune yüzeyindeki şekil değişim ölçerler.....	18
Şekil 12. Basma cihazında (a) beton numune yerleşimi (b) kontrplak çiteler ve beton numune. ....	19
Şekil 13. SHBB test düzeneği şematik gösterimi. ....	20
Şekil 14. SHBB Test düzeneği.....	20
Şekil 15. EPDM kauçuk gerilme dalgası şekillendirici. ....	21
Şekil 16. Kuartz kristallerin montaj adımları. ....	22
Şekil 17. SHBB nümerik modeli.....	24
Şekil 18. Düşen ağırlık test cihazı.....	25
Şekil 19. Prizmatik beton kalıbı ve beton numunesi.....	26
Şekil 20. (a) Koruyucu hazne ve (b) numune tutucusu.....	26
Şekil 21 . Yarı küre uçlu vurucu. ....	27
Şekil 22. Düşen ağırlık testi nümerik modeli. ....	28
Şekil 23. (a) Kuvvet ve (b) yer değiştirme tarihçeleri. ....	29
Şekil 24. Gerilme-şekil değiştirme eğrileri ( $10^{-4} s^{-1}$ ).....	30
Şekil 25. $10^{-4}$ testi statik deformasyon tarihçesi. ....	31

Şekil 26. Şekil değişim ölçer kullanılmış teste ait (a) gerilme şekil değiştirme ve (b) poisson oranı şekil değiştirme eğrileri.....	31
Şekil 27. Gerilme-şekil değiştirme eğrileri ( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ).....	33
Şekil 28. $10^{-3}$ testi statik deformasyon tarihçesi. ....	33
Şekil 29. Şekil değişim ölçer kullanılmış teste ait gerilme şekil değiştirme eğrisi.....	34
Şekil 30. Gerilme-şekil değiştirme eğrileri ( $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).....	35
Şekil 31. $10^{-2}$ testi statik deformasyon tarihçesi. ....	35
Şekil 32. Şekil değişim ölçer kullanılmış teste ait gerilme şekil değiştirme eğrisi.....	36
Şekil 33. Farklı şekil değiştirme hızlarında gerilme şekil değiştirme eğrileri. ....	36
Şekil 34. (a) Çekme gerilmesi tarihçesi ve (b) beton numune hasar profili.....	37
Şekil 35. Klasik SHBB testlerinde (a) sinyal ve (b-d) gerilme tarihçeleri.....	38
Şekil 36. Gerilme dalgası şekillendiricisiz testlerde gerilme şekil değiştirme eğrileri. ....	40
Şekil 37. NPS-1 testine ait hasar tarihçesi (15000 fps). ....	41
Şekil 38. NPS-1 testine ait şekil değiştirme hızının şekil değiştirmeye bağlı değişimi. ....	42
Şekil 39. R parametresinin şekil değiştirmeye bağlı değişimi.....	43
Şekil 40. Numune ön-arka yüzey kuvvetlerinin piezoelektrik kristal ve çubuk datası ile incelemesi. ....	44
Şekil 41. Kristallerden elde edilen gerilmeler ile şekil değişim ölçerlerden elde edilen gerilmelerin karşılaştırılması.....	45
Şekil 42. Gerilme dalgası şekillendiricili SHBB testlerinde (a) sinyal ve (b-d) gerilme tarihçeleri.....	46
Şekil 43. Gerilme dalgası şekillendiricinin alan gerilme üzerine etkisi. ....	46
Şekil 44. Gerilme dalgası şekillendiricili testlerde gerilme şekil değiştirme eğrileri. ....	47
Şekil 45. PS-1 testine ait hasar tarihçesi (15000 fps).....	49
Şekil 46. PS-1 testine ait şekil değiştirme hızının şekil değiştirmeye bağlı değişimi. ....	49
Şekil 47. R parametresinin şekil değiştirmeye bağlı değişimi.....	49
Şekil 48. Numune ön-arka yüzey kuvvetlerinin piezoelektrik kristal ve çubuk datası ile incelemesi. ....	51
Şekil 49. Kristallerden elde edilen gerilmeler ile şekil değiştirme ölçerlerden elde edilen gerilmelerin karşılaştırılması.....	51

Şekil 50. JHC modelin deviatorik gerilme ve normalize edilmiş yanal basınç altında grafik olarak gösterimi (solda) ve JHC modeli basınç-hacim (sıkışma) etkileşimi (sağda) [2].....	52
Şekil 51. (a) $C_{statik}$ ve $C_{dinamik}$ fitleri.....	55
Şekil 52. NPS ve PS testlerinde B parametresi etkinliği.....	56
Şekil 53. Şekil değiştirme hızı hassasiyeti sabiti etkinliği.....	57
Şekil 54. Parametrik sürtünme katsayısı incelemesi.....	58
Şekil 55. Deneysel ve nümerik çubuk gerilme karşılaştırmaları.....	61
Şekil 56. Gerilme dalgası şekillendiricisiz testler ile nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması: (a) 1-wave gerilme analizi, (b) Numune ön / arka yüzey kuvvetleri incelemesi, (c) şekil değiştirme hızı, (d) denge parametresi.....	63
Şekil 57. Gerilme dalgası şekillendiricili testler ile nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması: (a) 1-wave gerilme analizi, (b) Numune ön-arka yüzey kuvvetleri incelemesi, (c) şekil değiştirme hızı, (d) denge parametresi.....	65
Şekil 58. Gerilme dalgası şekillendiricisiz nümerik analizde Von Misses gerilmesi ve hasarın zamana bağlı değişimi.....	66
Şekil 59. Gerilme dalgası şekillendiricili nümerik analizde Von Misses gerilmesi ve hasarın zamana bağlı değişimi.....	67
Şekil 60. Gerilme dalgası şekillendiricisiz nümerik analizde numune yüzey gerilmesi ve hasar dağılımı.....	68
Şekil 61. Gerilme dalgası şekillendiricili nümerik analizde numune yüzey gerilmesi ve hasar dağılımı.....	69
Şekil 62. Darbe şekillendiricisiz test ve nümerik model numunesindeki şekil değiştirme hızı hassasiyeti ve atalet etkisi.....	70
Şekil 63. Darbe şekillendiricili test ve nümerik model numunesindeki şekil değiştirme hızı hassasiyeti ve atalet etkisi.....	71
Şekil 64. Toplam mukavemet artışına yüzdesel etki.....	72
Şekil 65. Numune üzerindeki radyal gerilmenin şekil değiştirme ve $r/R$ oranına karşı dağılımı a) dalga şekillendiricisiz b) dalga şekillendiricili.....	73
Şekil 66. Radyal gerilmenin numunenin alan çubuk yüzeyindeki dağılımının nümerik analizi a) dalga şekillendiricisiz b) dalga şekillendiricili.....	73
Şekil 67. Kuvvet – zaman eğrisi (Test 1: 1 m/s çarpma hızı ve 0 mm boşluk sınır şartı). ....	74
Şekil 68. Enerji-zaman eğrisi (Test 1: 1 m/s çarpma hızı ve 0 mm boşluk sınır şartı).....	75

Şekil 69. Hız-zaman eğrisi (Test 1: 1 m/s çarpma hızı ve 0 mm boşluk sınır şartı). ....	75
Şekil 70. Düşen ağırlık test-1 hasar tarihçesi (10000 fps). ....	77
Şekil 71. Deney sonrası numune hasarı: (a) ön yüz ve (b) arka yüz. ....	79
Şekil 72. Kuvvet – zaman eğrisi (Test 2: 3 m/s çarpma hızı ve 0 mm boşluk sınır şartı). ....	80
Şekil 73. Enerji – zaman eğrisi (Test 2: 3 m/s çarpma hızı ve 0 mm boşluk sınır şartı). ....	81
Şekil 74. Hız – zaman eğrisi (Test 2: 3 m/s çarpma hızı ve 0 mm boşluk sınır şartı). ....	81
Şekil 75. Düşen ağırlık test 2 hasar tarihçesi (10000 fps). ....	82
Şekil 76. Deney sonrası numune hasarı: (a) ön yüzey ve (b) arka yüzey. ....	84
Şekil 77. 1. ve 2. testin birlikte incelenmesi. ....	85
Şekil 78. Kuvvet – zaman eğrisi (Test 3: 1 m/s çarpma hızı ve 60 mm boşluk sınır şartı). ....	86
Şekil 79. Enerji – zaman eğrisi (Test 3: 1 m/s çarpma hızı ve 60 mm boşluk sınır şartı). ....	87
Şekil 80. Hız – zaman eğrisi (Test 3: 1 m/s çarpma hızı ve 60 mm boşluk sınır şartı). ....	87
Şekil 81. Düşen ağırlık test-3 hasar tarihçesi (10000 fps). ....	89
Şekil 82. Deney sonrası numune hasarı: (a) ön yüzey ve (b) arka yüzey. ....	91
Şekil 83. Kuvvet – zaman eğrisi (Test 4: 3 m/s çarpma hızı ve 60 mm boşluk sınır şartı). ....	92
Şekil 84. Enerji – zaman eğrisi (Test 4: 3 m/s çarpma hızı ve 60 mm boşluk sınır şartı). ....	92
Şekil 85. Hız – zaman eğrisi (Test 4: 3 m/s çarpma hızı ve 60 mm boşluk sınır şartı). ....	93
Şekil 86. Düşen ağırlık test-4 hasar tarihçesi (10000 fps). ....	95
Şekil 87. Deney sonrası numune hasarı: (a) ön yüzey ve (b) arka yüzey. ....	97
Şekil 88. Test 3 ve 4' ün birlikte incelenmesi. ....	98
Şekil 89. Kuvvet – zaman eğrisi (Test 5: 1 m/s çarpma hızı ve 100 mm boşluk sınır şartı). ..	99
Şekil 90. Enerji – zaman eğrisi (Test 5: 1 m/s çarpma hızı ve 100 mm boşluk sınır şartı). ..	100
Şekil 91. Hız – zaman eğrisi (Test 5: 1 m/s çarpma hızı ve 100 mm boşluk sınır şartı). ....	100
Şekil 92. Düşen ağırlık test-5 hasar tarihçesi (10000 fps). ....	102
Şekil 93. Deney sonrası numune hasarı: (a) ön yüz ve (b) arka yüz. ....	104
Şekil 94. Kuvvet – zaman eğrisi (Test 6: 3 m/s çarpma hızı ve 100 mm boşluk sınır şartı). ..	105
Şekil 95. Enerji – zaman eğrisi (Test 6: 3 m/s çarpma hızı ve 100 mm boşluk sınır şartı). ..	105
Şekil 96. Hız – zaman eğrisi (Test 6: 3 m/s çarpma hızı ve 100 mm boşluk sınır şartı). ....	106
Şekil 97. Düşen ağırlık test-6 hasar tarihçesi (10000 fps). ....	107
Şekil 98. Deney sonrası numunede oluşan hasar: (a) ön yüzey ve (b) arka yüzey. ....	109

Şekil 99. Test 5 ve 6 karşılaştırması. ....	110
Şekil 100. 1 m/s çarpma hızının; kuvvet-zaman, enerji-zaman ve hız-zaman eğrileri üzerine etkileri.....	111
Şekil 101. 3 m/s çarpma hızının; kuvvet-zaman, enerji-zaman ve hız-zaman eğrileri üzerine etkileri.....	112
Şekil 102. Deneysel ve nümerik analiz kuvvet – zaman eğrisi karşılaştırılması (1 m/s çarpma hızı ve 0 mm boşluk sınır şartı).....	114
Şekil 103. Numune ön yüzey hasarı: (a) deney (b) nümerik analiz .....	115
Şekil 104. Numune arka yüzey hasarı: (a) deney (b) nümerik analiz .....	116
Şekil 105. Deneysel ve nümerik analiz kuvvet – zaman eğrisi karşılaştırılması (3 m/s çarpma hızı ve 0 mm boşluk sınır şartı).....	117
Şekil 106. Numune ön yüzey hasarı: (a) deney (b) nümerik analiz .....	118
Şekil 107. Numune arka yüzey hasarı: (a) deney (b) nümerik analiz .....	119
Şekil 108. Deneysel ve nümerik analiz kuvvet – zaman eğrisi karşılaştırılması (1 m/s çarpma hızı ve 60 mm boşluk sınır şartı).....	120
Şekil 109. Numune ön yüzey hasarı: (a) deney (b) nümerik analiz .....	121
Şekil 110. Numune arka yüzey hasarı: (a) deney (b) nümerik analiz .....	122
Şekil 111. Deneysel ve nümerik analiz kuvvet – zaman eğrisi karşılaştırılması (3 m/s çarpma hızı ve 60 mm boşluk sınır şartı).....	123
Şekil 112. Numune ön yüzey hasarı: (a) deney (b) nümerik analiz .....	124
Şekil 113. Numune arka yüzey hasarı: (a) deney (b) nümerik analiz .....	125
Şekil 114. Deneysel ve nümerik analiz kuvvet – zaman eğrisi karşılaştırılması (1 m/s çarpma hızı ve 100 mm boşluk sınır şartı).....	126
Şekil 115. Numune ön yüzey hasarı: (a) deney (b) nümerik analiz .....	127
Şekil 116. Numune arka yüzey hasarı: (a) deney (b) nümerik analiz .....	128
Şekil 117. Deneysel ve nümerik analiz kuvvet – zaman eğrisi karşılaştırılması (3 m/s çarpma hızı ve 100 mm boşluk sınır şartı).....	129
Şekil 118. Numune ön yüzey hasarı: (a) deney (b) nümerik analiz .....	130
Şekil 119. Numune arka yüzey hasarı: (a) deney (b) nümerik analiz .....	131
Şekil 120. Kesik koni şekilli metalik insert - numune modeli.....	133

Şekil 121. Kesik koni şekilli metalik insert - numune şekil değiştirme, gerilme ve R dengesi (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili .....	134
Şekil 122. Dog-bone şekilli insert - numune modeli .....	134
Şekil 123. Dog-bone geometrili insert - numune şekil değiştirme, gerilme ve R dengesi (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili.....	135
Şekil 124. İntert olmayan 22.5 mm uzunluk, 19.75 mm çapa sahip numune .....	135
Şekil 125. İntert olmadan numune çubuk modeli (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili .....	136
Şekil 126. R denge parametresine insert etkisi.....	137
Şekil 127. Uzunluk/çap oranı 0.25 (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili.....	138
Şekil 128. Uzunluk/çap oranı 0.50 (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili.....	138
Şekil 129. Uzunluk/çap oranı 0.75 (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili.....	139
Şekil 130. Uzunluk/çap oranı 1 (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili.....	139
Şekil 131. Uzunluk/çap oranı 1.25 (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili.....	140
Şekil 132. Silindirik numune uzunluk/çap oranı varyasyonları şekil değiştirme – R karşılaştırması (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili .....	140
Şekil 133. Halka numuneler boş iç çap:r, dış çap R (a) $r/R=0.25$ (b) $r/R=0.50$ (c) $r/R=0.75$	141
Şekil 134. İç çap dış çap oranı 0.25 (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili .....	141
Şekil 135. İç çap dış çap oranı 0.50 (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili .....	141
Şekil 136. İç çap dış çap oranı 0.75 (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili .....	142
Şekil 137. Dolu ve içi boş numune varyasyonları şekil değiştirme – R karşılaştırması (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili.....	142
Şekil 138. Dogbone numune (a) iç çap dış çap oranı 0.50 (b) iç çap dış çap oranı 0.75 .....	143
Şekil 139. Orta numune çapının çubuk çapına oranı 0.50 (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili .....	144
Şekil 140. Orta numune çapının çubuk çapına oranı 0.75 (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili .....	144
Şekil 141. Silindirik numune ve Dogbone numune varyasyonları şekil değiştirme – R karşılaştırması (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili .....	145
Şekil 142. Örnek Alan Gerilmesi – Zaman Grafiği.....	146
Şekil 143. $0\mu s-10^\circ$ için Gerilme – Zaman Grafiği .....	146

Şekil 144. Çubuk Gerilme – Zaman Grafikleri (a) $0\mu\text{s}-20^\circ$ (b) $0\mu\text{s}-30^\circ$ (c) $0\mu\text{s}-40^\circ$ .....	147
Şekil 145. Kuvvet – Zaman Grafikleri (a) $0\mu\text{s}-20^\circ$ (b) $0\mu\text{s}-30^\circ$ (c) $0\mu\text{s}-40^\circ$ .....	148
Şekil 146. Gerilme – Şekil Değişirme Grafikleri (a) $0\mu\text{s}-20^\circ$ (b) $0\mu\text{s}-30^\circ$ (c) $0\mu\text{s}-40^\circ$ .....	149
Şekil 147. R Denge Parametresi – Şekil Değişirme Grafiği.....	150
Şekil 148. Şekil Değişirme Hızı – Şekil Değişirme Grafiği.....	150
Şekil 149. Çubuk Gerilme – Zaman Grafikleri (a) $20\mu\text{s}-10^\circ$ (b) $20\mu\text{s}-20^\circ$ (c) $20\mu\text{s}-30^\circ$ (d) $20\mu\text{s}-40^\circ$ .....	151
Şekil 150. Kuvvet – Zaman Grafikleri (a) $20\mu\text{s}-10^\circ$ (b) $20\mu\text{s}-20^\circ$ (c) $20\mu\text{s}-30^\circ$ (d) $20\mu\text{s}-40^\circ$ .....	152
Şekil 151. Gerilme – Şekil Değişirme Grafikleri (a) $20\mu\text{s}-10^\circ$ (b) $20\mu\text{s}-20^\circ$ (c) $20\mu\text{s}-30^\circ$ (d) $20\mu\text{s}-40^\circ$ .....	153
Şekil 152. R Denge Parametresi – Şekil Değişirme Grafiği.....	154
Şekil 153. Şekil Değişirme Hızı – Şekil Değişirme Grafiği.....	154
Şekil 154. Gerilme – Zaman Grafikleri (a) $40\mu\text{s}-10^\circ$ (b) $40\mu\text{s}-20^\circ$ (c) $40\mu\text{s}-30^\circ$ (d) $40\mu\text{s}-40^\circ$ .....	155
Şekil 155. Kuvvet – Zaman Grafikleri (a) $40\mu\text{s}-10^\circ$ (b) $40\mu\text{s}-20^\circ$ (c) $40\mu\text{s}-30^\circ$ (d) $40\mu\text{s}-40^\circ$ .....	156
Şekil 156. Gerilme – Şekil Değişirme Grafikleri (a) $40\mu\text{s}-10^\circ$ (b) $40\mu\text{s}-20^\circ$ (c) $40\mu\text{s}-30^\circ$ (d) $40\mu\text{s}-40^\circ$ .....	157
Şekil 157. R Denge Parametresi – Şekil Değişirme Grafiği.....	158
Şekil 158. Şekil Değişirme Hızı – Şekil Değişirme Grafiği.....	158

## Özet

Günümüze kadar beton malzemesi üzerine yapılan çalışmalarda betonun şekil değiştirme hızına bağlı olarak mukavemetinin değişimi konusunda bir fikir birliği oluşturulamamıştır. Betonun yüksek deformasyon hızı testleri esnasında karşılaşılan zorluklar nedeniyle test verilerinden elde edilen sonuçlar farklı şekillerde yorumlanmaktadır. Günümüzde Split Hopkinson Basınç Barı testi bu amaçla en yaygın olarak kullanılan test metodudur. Fakat testler esnasında numunede homojen olmayan gerilme dağılımı meydana gelme riski ve gerilme dalgasında dispersiyon eğilimi vardır. Bahsi geçen problemleri aşmak amacıyla proje kapsamında dinamik test düzeneklerinde bazı inovatif iyileştirmeler uygulanmıştır. Bunlar piezoelektrik kuartz kristal ve dalga şekillendirici kullanımındadır. Piezoelektrik kuartz kristaller numune çubuk ara yüzeylerine doğrudan yerleştirildiği için gerilme dalgasındaki dispersiyon etkisi minimize edilir. Böylece numunede meydana gelen gerilme tarihçesi daha yüksek hassasiyetle ve farklı noktalardan ölçülebilir. Numune içerisinde gerilme dengesinin sağlanması beton gibi gevrek karakterli bir malzemede prematüre kırılma eğiliminin önlenmesi açısından oldukça önemlidir. Proje kapsamındaki deneylerde gerilme dalgası şekillendiricisi kullanılarak gerilme dalgasının şiddeti ve yükleme hızı kontrol edilebilmiştir. Bu sayede numune içerisinde homojen bir gerilme dağılımı sağlanmış ve prematüre kırılma eğilimi önlenmiştir. Statik ve dinamik mekanik karakterizasyon sonuçları incelenerek beton malzemenin mekanik davranışına uygun bir malzeme modeli seçilmiş ve gerekli parametreler belirlenmiştir. Belirlenen parametrelerin doğrulukları farklı yükleme koşulları altında test edilmiştir. Bu amaçla düşen ağırlık testleri icra edilmiş ve numunelerde meydana gelen hasarların ve kuvvet tarihçelerinin deneylerle olan uyumları nümerik model sonuçlarıyla tayin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde betonun mukavemetinde şekil değiştirme hızının artışıyla birlikte bir artışın meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu artışın iki ana sebebi vardır. Bunlardan ilki yüksek hızda meydana gelen hasar esnasında oluşan mikro atalet etkisidir. İkincisi ise beton malzemenin ihtiva ettiği su ve gözenekli yapısından kaynaklanan viskoz davranışdır. Bu ikinci etkiye malzemenin şekil değiştirme hızı hassasiyeti olarak bakılabilir. Yürütülen deneysel ve nümerik çalışma sayesinde bu etkilerin bireysel olarak toplam mukavemet artışındaki etkinlikleri tespit edilebilmiştir. Bu sonuç dünya literatürüne oldukça önemli bir katkıdır.

**Anahtar kelimeler:** Beton, Mekanik Karakterizasyon, Şekil Değiştirme Hızı Hassasiyeti, LS-DYNA



## Abstract

In the previous studies on the mechanical behavior of concrete, there is still a debate continuing on the strain rate sensitivity. The results obtained from test data could be interpreted in different ways due to the difficulties encountered during the high strain rate tests. Presently, Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) is the most widely used test method. However, during the tests an inhomogeneous stress distribution in the sample might occur depending on the chosen experimental parameters and there is also a dispersion tendency in stress wave. In order to overcome aforementioned problems, some innovative advances were implemented; namely, the insertion of piezoelectric quartz crystals at bar interfaces and the usage of pulse shapers. Since the crystals are placed at the interfaces, the stress history is acquired with higher accuracy and the dispersion effects can be minimized. To prevent the premature failure, assuring the stress equilibrium is particularly important in concrete. In SHPB tests, the amplitude and the loading rate of the stress wave can be controlled using pulse shapers. Thus, a homogeneous stress distribution is provided and the tendency of premature failure is reduced. Static and dynamic mechanical characterization results were examined and a suitable material model for the concrete was selected and the parameters were determined. The accuracy of parameters was tested under different loading conditions. For this purpose, drop weight tests and numerical simulations were conducted and a close agreement in force histories and damage formations were noted. When the results were examined, it has been found that an increase in the strength of the concrete as the rate increases. There are two main reasons; the micro-inertia and the viscous behavior due to the water content and porous structure. The contributions could be determined using the experimental and numerical data. This is a unique input to the field.

**Keywords:** Concrete, Mechanical Characterization, Strain Rate Sensitivity, LS-DYNA

## 1. GİRİŞ

Yüksek jeopolitik öneme sahip ülkemizde stratejik öneme sahip yapıların (sığınaklar, silah cephanelikleri, kalekol yapıları, sınır duvarı vb.) korunması düşünüldüğünde bu yapıların patlama ve çarpma etkilerine karşı tasarlanması ve boyutlandırılması hayati önem taşımaktadır. Bu sebeple darbe tipi yüklemelere karşı analiz ve tasarım konusu son yıllarda oldukça önem kazanmıştır. Bu tarz yapıların analizinde özel malzeme modelleri kullanılmaktadır. Betonun yüksek şekil değiştirme hızı davranışı düşük şekil değiştirme hızı davranışından oldukça farklı olduğu için bahsi geçen malzeme modellerinin malzemenin şekil değiştirme hızı hassasiyetini doğru şekilde temsil etmesi gerekmektedir. Bu sebeple malzeme modelinin seçimi ve malzeme modeli parametrelerinin belirlenmesi nümerik modelleme çalışmalarının başarısında kilit rol oynamaktadır. Proje kapsamında esasen beton malzemenin karakterizasyonunda kullanılacak bir mekanik karakterizasyon metodolojisinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Beton, malzeme doğası gereği gevrek karakterlidir ve gözenekli yapıya sahiptir. Bu sebeple deneyler sırasında seçilen deney parametreleri ve numune geometrilerinin seçimi oldukça önemlidir. Detayları bu proje sonuç raporunun ilgili kısımlarında verildiği gibi hassas ve doğru bir karakterizasyon metodolojisi proje kapsamında geliştirilebilmiş ve sonuçlarının doğruluğu farklı yükleme koşulları altında incelenmiştir.

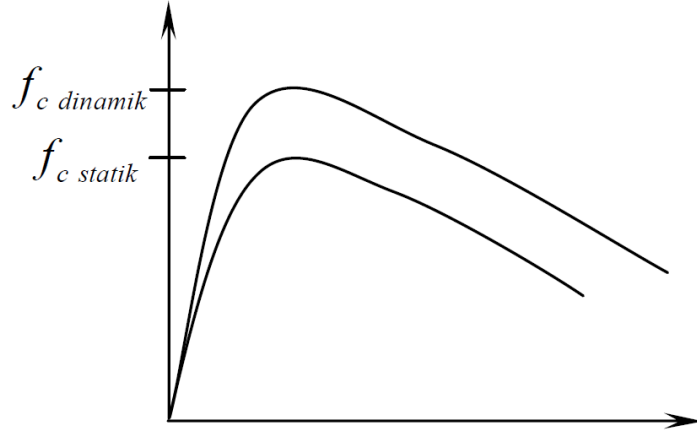
## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Betonarme yapılar kullanımda kaldıkları süre zarfında farklı nedenlerden dolayı darbe ve patlama yüklerine maruz kalabilirler. Ulaştırma yapılarına (köprü ayakları, yol bariyerleri vb.) araç çarpması, endüstriyel yapılarda meydana gelebilen patlamalar ve iskele gibi deniz yapılarına deniz araçlarından veya doğrudan deniz dalgalarının darbeleri, yapıların bu tip yüklemelere maruz kaldığı durumlara örnek olarak verilebilir.

Beton elemanın kullanım ömrü boyunca karşılaşılabileceği bu tipten yüklemelerin doğru analiz edilebilmesi önem kazanmıştır. Explicit sonlu elemanlar analizi, betonarme yapıların darbe ve patlama yüklerine karşı analiz ve tasarımı için sıklıkla başvurulan bir metot olmuştur. Betonun yüksek hızlı şekil değiştirmeler altındaki davranışı, bu metot içinde değişik yöntemlerle modellenmektedir. Genellikle başvurulan yöntem, betonun statik yükler altındaki mukavemetinin şekil değiştirme hızına bağlı bir dinamik artış faktörü (dynamic increase factor, DIF) ile çarpılarak, kullanılan hasar kriterinin değişen beton mukavemetine göre yeniden hesaplanmasıdır (Denklem 1).

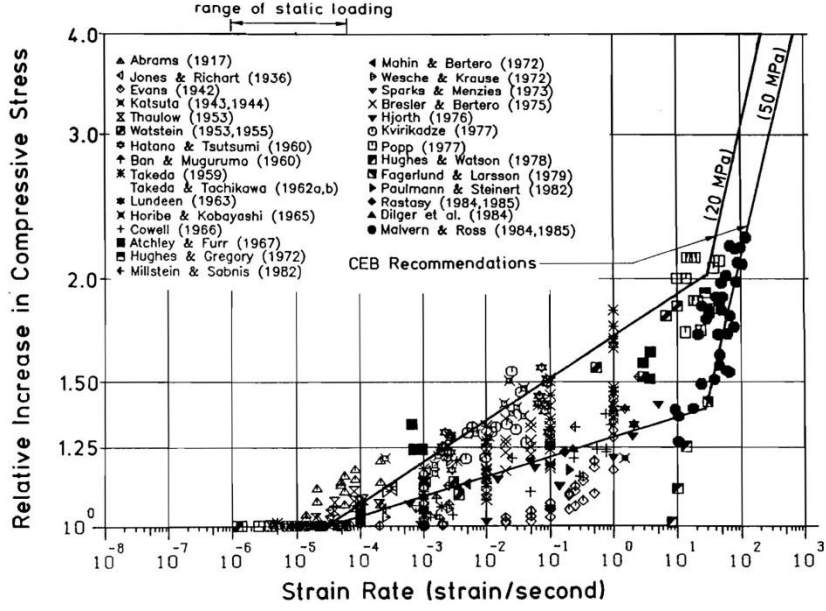
$$f_{c \text{ dinamik}} = DIF \times f_{c \text{ statik}} , DIF = f(\dot{\epsilon}) \quad (1)$$

Denklem 1'de,  $f_{c \text{ dinamik}}$  betonun yüksek hızlı şekil değiştirme durumundaki mukavemetini,  $f_{c \text{ statik}}$  betonun statik yükler altındaki mukavemetini,  $\dot{\epsilon}$  ise birim şekil değiştirme hızını temsil etmektedir. Bu uygulamada, her bir zaman adımında birim şekil değiştirme hızı bulunmakta ve bu şekil değiştirme hızına bağlı olarak seçilen bir fonksiyona göre DIF hesaplanmaktadır. Sonuçta betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi, Şekil 1' de basma yükleri için temsili olarak gösterilene benzer biçimde değiştirilerek tüm diğer hasar kriterleri de bu yeni eğriye göre hesaplanmaktadır.

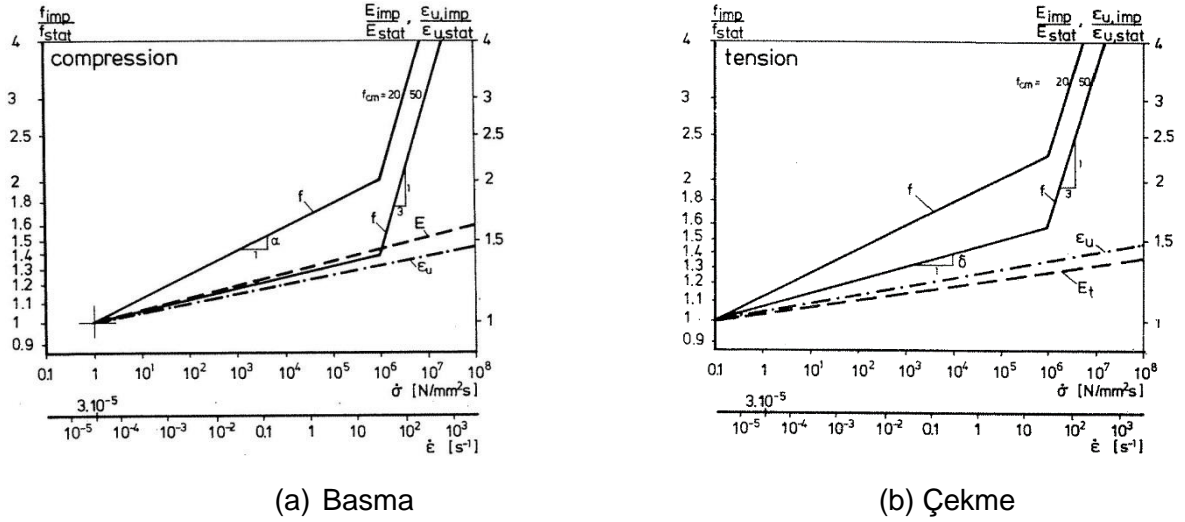


Şekil 1. Betonda statik ve dinamik gerilme – şekil değiştirme eğrileri.

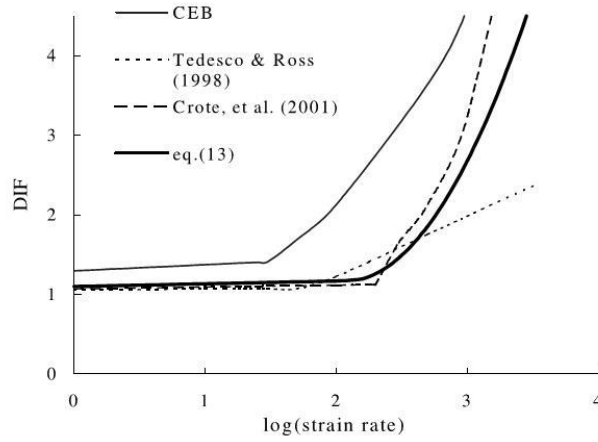
Betondaki mukavemet artışını belirleyen DIF, beton numunelerin yüksek şekil değiştirme hızları altında test edilmesiyle veya aynı düzeneğin bir bilgisayar programı aracılığıyla simule edilmesinden elde edilen verilere istatistiki analiz uygulanarak bulunabilmektedir. Genelde silindirik olan beton numuneler değişen hızlarla yüklenerak kırılma şekil değiştirme hızı – gerilme ilişkisi elde edilmektedir. Bu tür testlerden veya nümerik analizlerden elde edilen tipik veriler Şekil 2’ de sunulmuştur. Günümüzde tasarım aşamasında en yaygın kullanılan şekil değiştirme hızı – beton kırılma mukavemeti ilişkisi, CEB (Comité Euro-International du Béton) tarafından önerilmiş olmakla birlikte [2] (Şekil 3), bu alanda yapılmış benzer çalışmalardan farklı önerilere rastlamak gayet olasıdır. Bu farklılaşma; testler açısından temelde SHBB test düzeneklerindeki ve numune geometrilerindeki tasarım farklılığından, nümerik çalışmalarda ise kullanılabilir birden fazla malzeme modeli bulunmasından ve kullanılan malzeme modeli parametrelerinin tespiti açısından oluşmaktadır. Farklılaşmaya ait tipik bir gösterim Şekil 4’ te sunulmuştur. Diğer taraftan söz konusu fonksiyonların genellikle veya tamamen eleman bazlı nispeten küçük silindirik numunelerden elde edilmiş olmasıyla birlikte bunların yapısal bazdaki betonarme elemanların modellenmesinde de kullanılması veya ne şekilde kullanılması gerektiği durumu pek fazla sorgulanmamıştır.



Şekil 2. Betonda basma mukavemetinin şekil değiştirme hızına göre değişimi (test verileri).



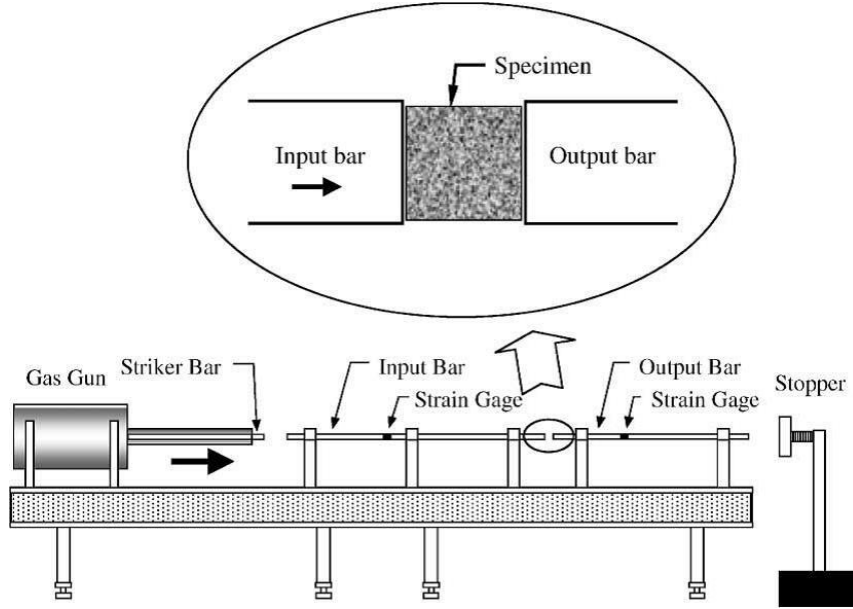
Şekil 3. Beton mukavemetinin şekil değiştirme hızına göre değişimi (CEB formülasyonu).



Şekil 4. Farklı araştırmacılarca elde edilmiş DIF fonksiyonlarının karşılaştırılması.

Şekil 2' de örnekleri verilen test verileri, silindirik beton numunelerin hidrolik pistonlar, patlayıcı düzenekler ve darbe düzenekleri ile test edilmesiyle elde edilebilmekle beraber, yüksek hızlarda daha kontrollü bir yükleme sağlamak için en çok tercih edilen SHBB düzeneğidir (Şekil 5). Bu düzende, çapı genellikle değişken silindirik beton numune iki uzun metalik çubuğun arasında sıkıştırılmakta ve bu çubuklardan birine (alan çubuk) bir gaz tabancasıyla darbe uygulanmaktadır. Uygulanan darbe elastik dalga halinde numuneye ulaşır, bir kısmı numuneden geri yansırken bir kısmı numune üzerinden diğer uçtaki çubuğa (iletken çubuk) iletilir. Bu düzende numune üzerine gelen kuvvet her iki çubuğa bağlanan şekil değişim ölçerlerden okunan değerlerle bir boyutlu elastik dalga teorisi kullanılarak hesaplanır.

SHBB düzeneğinde numune üzerindeki kuvvet ve gerilmelerin hesaplanabilmesi için tipik olarak iki varsayım yapılır: 1) Barların ve numunenin tek eksen üzerinde (uniaxial) gerilmelere maruz kaldığı, dolayısıyla gerilmelerin hesaplanmasında bir boyutlu dalga teorisinin uygulanabildiği, 2) Numune üzerinde oluşan gerilmelerin homojen olduğu, bir başka deyişle numunenin ön ve arka yüzeylerindeki gerilmelerin birbirine eşit olması ve aynı zamanda çubuklar arasındaki numunenin yarıçap doğrultusunda sürtünme etkisine maruz kalmadan serbestçe deforme olabildiği varsayılır. Bu varsayımlardan ilki, çubukların ve numunenin çapının küçük tutulması ile sağlanmaya çalışılır (dispersiyon etkisi [5]). İkinci varsayımın sağlanması için ise numune ve çubuklar arasında yağlayıcılar kullanılır.



Şekil 5. Split Hopkinson Basınç Barı düzeneği.

Bu iki temel varsayım metal numunelerde büyük oranda sağlanabilmekle birlikte kaya ve beton gibi gevrek malzemelerde durum farklı olabilmektedir. Gevrek malzemelerde temel hasar mekanizması, çatlak oluşumu ve oluşan çatlakların yayılarak malzemenin kırılması şeklindedir. Eksenel basma kuvvetine maruz kalan silindirik beton numunede önce mikro çatlaklar oluşmakta, bu çatlaklar büyüyerek makro çatlaklara yol açmakta ve numunenin hasar görmesine sebep olmaktadır. Çatlaklar büyüyüp genişlerken kuvvete dik yani yarıçap doğrultusunda genişlemeye ve numunede hacim artışına da yol açmaktadır. Bu etki elastik malzemelerde görülen Poisson etkisine benzerdir. Eksenel yönde yüklenen bir malzeme yanal yönde Poisson etkisinden dolayı genişleyecektir.

Betonun yüksek şekil değiştirme hızlarında davranışını konu alan çalışmalar incelendiğinde; 1917' de yayınlanan ilk çalışmadan [7] 1970' lerin sonlarına kadar konu ile ilgili yapılan çalışmalarda, beton numunelere yüksek hızlı şekil değiştirme vermek amacıyla hidrolik, pnömatik ve doğrudan darbe düzenekleri kullanılmış, bu tür düzeneklerle  $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  ile  $29 \text{ s}^{-1}$  arasında şekil değiştirme hızları elde edilmiştir. Daha sonraları SHBB düzeneğinde meydana gelen değişimler ve veri ölçüm-kayıt teknolojisindeki ilerlemelerle birlikte daha kontrollü ve daha yüksek şekil değiştirme hızlarında testler yapmak mümkün olmuştur. Özellikle 1980'lerin ortalarından itibaren SHBB düzeneği yüksek hızlı şekil değiştirme testlerinde giderek standart hale gelmiş ve konuyla ilgili çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Malvern ve Ross tarafından yapılan çalışmalar, SHBB kullanılarak betonun yüksek deformasyon hızlarında basma dayanımı üzerine yapılan ilk kapsamlı

çalışmalardandır [8, 9]. Bu çalışmalarda  $118 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızına ulaşılmıştır. Ross ve diğerlerinin 1989' da yayınladıkları çalışma ise betonun yüksek şekil değiştirme hızlarındaki çekme dayanımı üzerinde yapılan deneylerin ilk örneklerindedir [10]. Bu deneylerde  $190 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızına çıkılmıştır. 1990' ların başına kadar konu ile ilgili yapılmış deneysel çalışmaların ayrıntılı özeti Bischoff ve Perry'nin inceleme makalesinde yer almaktadır [3]. Bu makaleden alınan özet tablo, Tablo 1' de verilmektedir.

Tablo 1. 1989 yılına kadar betonun yüksek hızlı şekil değiştirme davranışını inceleyen başlıca çalışmalar (Bischoff ve Perry'den kısaltılarak alınmıştır. [3])

Yıl	Referans	Test Şekli	Numune Boyutu (mm)	Şekil Değiştirme Hızı ( $\text{s}^{-1}$ )
1917	Abrams [7]	900 kN kriko	$\Phi 152 \times 305$	$2 \times 10^{-4}$
1959	Takeda ve Tachikawa [11]	1375 kN pnömatik hidrolik piston	$\Phi 150 \times 300$	1.0
1967	Atchley ve Furr [12]	Hidrolik piston ve darbe	$\Phi 152 \times 305$	3.5
1972	Hughes ve Gregory [13]	Serbest düşme çekici (106 kg, düşme yüksekliği < 1.83 m)	102 küp 244 x 102 x 102 prizma	29.0
1975	Bresler ve Bertero [14]	1335 kN hidrolik piston	$\Phi 152 \times 305$	0.10
1978	Hughes ve Watson [15]	Serbest düşme çekici (106 kg, hız < 5.8 m/s)	102 küp	13.9
1984	Dilger ve diğerleri [16]	1000 kN hidrolik piston	152 x 152 x 610	0.23
1985	Ahmed ve Shah [17]	890 kN hidrolik piston	$\Phi 76 \times 305$	$3 \times 10^{-2}$
1985	Malvern ve diğerleri [9]	SHBB	$\Phi 76 \times 76$ $\Phi 76 \times 66$	59 - 118
1987	Jawed ve diğerleri [18]	Hidrolik piston ve SHBB	$\Phi 6.35 \times 9.5$	$10^3$



			$\Phi 12.7 \times 19.1$ $\Phi 19.05 \times 28.6$	
1989	Gran ve diğerleri [19]	400 MPa patlayıcı gaz yükleyici	$\Phi 150 \times 300$	0.5 - 10
1989	Ross ve diğerleri [10]	SHBB	$\Phi 51 \times 51$	20 - 190

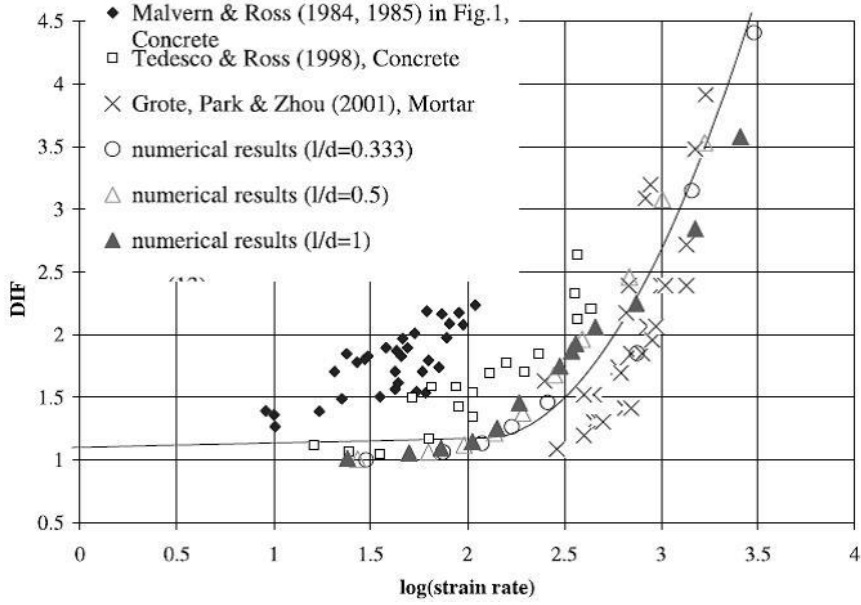
1988 yılında CEB (Comité Euro-International du Béton) yayınladığı bültende [2], temelde Reinhardt'ın çalışmalarına [20] dayanarak, betonun şekil değiştirme hızına bağlı olarak çekme ve basma mukavemetini, elastisite modülünü, kırılma şekil değiştirmesini ve kırılma enerjisini veren bir dizi denkleme yer vermiştir. Bu bültende yer alan denklemler, günümüzde de betonarme yapıların darbe ve patlama yüklerine karşı analiz ve tasarımda yaygın olarak kullanılmaktadır.

CEB' in yayınladığı yükleme hızına bağlı mukavemet değişimi denklemlerinden sonra literatürde yayımlanmış yalnızca birkaç deneysel çalışma vardır. Bu çalışmaların en önemlilerinden birisi 1998 yılında Tedesco ve Ross [21] tarafından yapılmıştır. Betonun yükleme hızı hassasiyetini bünyesel denklemlerle ortaya koymak ana hedef olarak belirlenmiştir. Burada 51 mm çapında ve boyunda beton silindirler üzerinde statik ve dinamik testler yapılmıştır. Her iki test tipi de betonun tek eksenli yükleme ve yarmada çekme (split-tensile) deneylerinden oluşmuştur. Dinamik testlerdeki yükleme hızı  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  ve  $10^3 \text{ s}^{-1}$  aralığında tutulmuştur. Bu testlerden elde edilen sonuçların istatistiki analizleri yapıldıktan sonra, bir sonlu elemanlar programındaki şekil değiştirme hızından bağımsız hipoelastik statik malzeme modeli şekil değiştirme hızına duyarlı bünyesel denklemlere sahip olacak şekilde geliştirilmiştir. Ancak yazarlar elde ettikleri bu yeni ilişkiyi farklı en-boy oranlarındaki numuneler için denememişlerdir. İlk haldeki beton modelinin yükleme kısmı çalışmada formulize edilerek sunulmuş ve yine bu formulasyon içerisindeki bağımsız değişkenler olarak maksimum eksenel basma gerilmesi ile buna karşılık gelen eksenel şekil değiştirmesi ve eksenel çekme gerilmesi ile nihai eksenel basma gerilmesine karşılık gelen şekil değiştirmeler gösterilmiştir. Dolayısıyla bu dört parametrenin istatistiki analizden elde edilmiş denklemlere göre yükleme hızına duyarlılığı belirlenip statik malzeme modeline yerleştirilerek şekil değiştirme hızına bağımlı bir gerilme-şekil değiştirme ilişkisi elde edilmiştir.

Sonrasında Grote ve arkadaşları [6] benzer bir çalışmayı deneysel olarak beton ve harç malzemesi için yapmaya çalışmışlardır. Burada numuneler silindir olarak düşünülmüş ve beton malzeme için en büyük 9.5mm çapında agregalar seçilmiştir. İlk aşamada, her iki

malzeme tipi için de çevresel sınırlandırılmamış statik basma testleri uygulanmış ve harç numunesi yaklaşık 46 MPa gerilme seviyelerinde kırılırken beton numunesi ise yaklaşık 30 MPa seviyelerinde kırılmıştır. Sonrasında 0.31-1.55 aralığında değişen en/boy oranlarına sahip harç numuneleri üzerinde, şekil değiştirme hızları  $250-1700 \text{ s}^{-1}$  bandında değişen SHBB testleri yapılmış ancak beton numunelerdeki kalın agrega kullanılma zorunluluğu ve dolayısıyla numune çapı kısıtı gibi bazı etkilerden ötürü bu testler beton numunelere uygulanamamıştır. Bu aşamada diğer çalışmalara benzer olarak yükleme hızının artmasıyla dayanımda artış gözlemlenmiş ve mukavemet değişim oranı bir fonksiyon olarak ifade edilmeye çalışılmıştır.

Diğer taraftan Li ve Meng [4] Grote' nin çalışmasından bir yıl sonra, beton veya beton benzeri malzemeler (harç) için önerilmiş DIF fonksiyonlarına farklı bir yönden yaklaşmış ve numuneleri nümerik olarak modellemiştir. Bu modelleme kurgulanırken söz konusu fonksiyonda bir artış olacağı göz önünde bulundurulmuş, dayanımdaki artışın kaynağı sorgulanmıştır. Yazarlar çalışmalarında, Grote' nin elde ettiği 12 mm çapındaki silindirik harç numuneleriyle yapılan SHBB testlerinden 3 farklı en-boy oranı başta olmak üzere değişen boylardaki numuneler üzerinde farklı hızlarda yaptıkları analizleri literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırmış ve bir DIF fonksiyonu önermişlerdir, Şekil 6. Nümerik çalışmada beton plastisite teorisi ve Drucker-Prager modeli kullanılmış, kullanılan malzeme davranış modelleri kasıtlı olarak şekil değiştirme hızından bağımsız ancak hidrostatik basınca duyarlı olarak seçilmiştir. Çözüm için ABAQUS/Explicit tercih edilmiştir. Temelde hidrostatik basınçtan kaynaklı bir yanal atalet etkisinin oluşabileceği vurgulanmış, SHBB deney düzeneğine yerleştirilmiş beton numunenin uçlarında oluşabilecek sürtünme kuvvetlerinin dahi bu yanal atalet etkisine katkı sağlayabileceği eklenmiş ancak DIF fonksiyonunda bu etkiyi azaltmak için herhangi bir öneride bulunmamıştır.



Şekil 6. Şekil değiştirme hızına bağlı olarak hesaplanan ve testlerde gözlemlenen mukavemet artışı.

DIF fonksiyonlarındaki artışın kaynağının anlaşılmasına yönelik araştırmacılar; hızlı yükleme koşulları altında bünyesel mikro çatlakların oluşmasına ve ilerleyişine yeterli zamanın bulunmamasından dolayı şekil değiştirme hızına duyarlılık [22,23], malzeme matrisindeki bağımsız su muhteviyatından kaynaklı olarak viskoz davranışın gözlenmesi [23] ve malzemenin yanal sargı etkisinden kaynaklanan tek eksenli gerilme halinden, tek eksenli şekil değiştirme durumuna geçmesi [22,23] olarak gösterilmiştir. Yanal sargı etkisi Chen ve arkadaşları [24] tarafından analitik yöntemlerle incelenmiş ve sıkıştırılabilen bir malzeme için bu etkiyi eksenel şekil değiştirmenin bir fonksiyonu olarak ifade etmişlerdir (Denklem 2). Bu denklemde;  $\mu$ ,  $L_0$ ,  $\varepsilon_z$ ,  $\dot{\varepsilon}_z$ ,  $\varepsilon_z^0$  sırasıyla Poisson oranı, ilk boy, eksenel şekil değiştirme, şekil değiştirme hızı ve ivmesini ifade eder. Benzer bir çalışma daha önceden Forrestal ve arkadaşları [25] tarafından gerçekleştirilmiş, ancak incelemede sadece yanal sargı etkisini değil aynı zamanda bu etkiden kaynaklanan eksenel gerilmeyi de sıkışabilen bir malzeme için; boyuna şekil değiştirme ve yarıçap değişkenlerine bağlı olarak analitik bir formülasyonla ortaya koymuşlardır (Denklem 3 ve 4). Denklemlerde  $\nu$ ,  $a$ ,  $r$ ,  $\varepsilon_z^0$  sırasıyla Poisson oranı, yarıçap, anlık yarıçap ve eksenel şekil değiştirme olarak ifade edilmiştir.

$$\sigma_r = \frac{\mu\rho_0}{2L_0(1-\varepsilon_z)^2(1+\mu\varepsilon_z)^2} \left[ \frac{\mu+1}{L_0(1-\varepsilon_z)} \dot{\varepsilon}_z^2 + \dot{\varepsilon}_z \right] [R_0^2(1+\mu\varepsilon_z)^2 - r^2] \quad (2)$$

$$\sigma_z = \frac{v^2(3-2v)}{4(1-v)} \left[ a^2 - \frac{2r^2}{(3-2v)} \right] \rho \frac{d^2 \varepsilon_z^0}{dt^2} \quad (3)$$

$$\sigma_r = \frac{v(3-2v)}{8(1-v)} [a^2 - r^2] \rho \frac{d^2 \varepsilon_z^0}{dt^2} \quad (4)$$

Ayrıca bu artışın SHBB deney düzeneğinde numune-çubuk sürtünme etkileşimi, farklı en-boy oranları ve numunenin içerdiği agrega gibi farklı olgulardan nasıl etkileneceğini savunmuşlardır. Hao ve arkadaşlarının [26,27] çalışmaları bu sorunlar üzerine odaklanmış incelemelerdendir. Bu çalışmaların ilkinde yazarlar literatürde önerilmiş deneye dayalı DIF fonksiyonlarının çoğunlukla beton benzeri (kaba agrega içermeyen, harç) malzemeler için önerildiğini vurgulamış, beton bir malzeme için bu fonksiyonun yanlış sonuçlar verebileceğini yazmışlardır. Diğer taraftan önceki yıllarda yapılan çalışmaların hemen hemen hiçbirinde agregaların malzeme dayanımındaki artışa olan etkisi sistematik bir biçimde incelenmediğine değinilmiştir. Sonuçta %20, %30 ve %40 gibi değişik hacimsel yüzdelerde nümerik çalışmalar yapılmış ve elde edilmiş DIF fonksiyonunu agrega değişkenliği altında modifiye edebilecek analitik bir formülasyon önerilmiştir.[26]

Yukarıda bahsi geçen çalışmadan iki yıl sonra yine Hao ve arkadaşları [27] numune-çubuk ara yüzeyindeki sürtünmenin yanal atalet etkisini incelemek amacıyla nümerik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Nümerik çalışmalar parametrik ilerlemiş ve 5 değişik sürtünme katsayısı ve 3 farklı en-boy oranı değerlendirilmeye alınmıştır. Bu şartlar altında en-boy oranı, sürtünme katsayısı ve şekil değiştirme hızı parametrelerinin betonun gerilme-şekil değiştirmesini ve kırılma tiplerini kayda değer biçimde ve birbirleriyle tümleşik bir şekilde etkilediği sonucuna varıp deney esnasında gerçekte sürtünmenin tamamen yok edilemeyeceği gerçeğinden dolayı bu etkiyi DIF' ten çıkarmaya yarayan ampirik bir formülasyon üretmişlerdir.

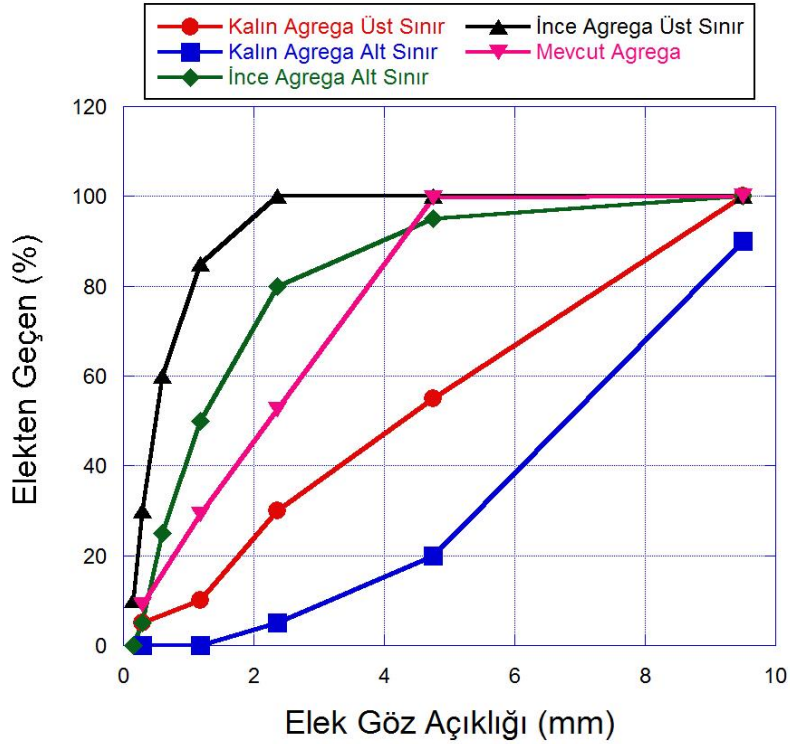
Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde beton ve beton benzeri malzemelerin yüksek şekil değiştirme hızlarında sergilediği davranış değişikliğinin önemi görülmektedir. Fakat gerek deneysel anlamda yapılan çalışmaların sayısal olarak azlığı, gerekse SHBB testlerinde karşılaşılan sorunlar beton malzemenin bu davranışını gerçekçi bir biçimde yansıtabilen bir DIF fonksiyonunun eksikliğine yol açmakla birlikte birbirinden farklı fonksiyonların ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Bu farklı davranış eğrilerinin son derece yaygın kullanılan bu malzemenin sayısal modellemesi esnasında hangisinin referans kabul edileceği sorusunu da beraberinde getirmiştir. Diğer taraftan bazı geometrik ve malzeme parametrelerinin söz konusu fonksiyon üzerindeki etkisi incelenmeye kısmen başlanmış olsa da henüz bu değişimin parametrik olarak kontrol edildiği deneysel ve nümerik çalışma literatürde mevcut

değildir. Bu açıdan bakıldığında önerilen proje yukarıda bahsi geçen eksiklikleri gidermeyi amaçlayan, homojen gerilme dağılımının sağlanabildiği numune geometrisinin tespit edildiği ve standardize edilebilecek bir statik ve dinamik malzeme karakterizasyon metodolojisinin geliştirileceği nadir ve önemli çalışmalardan biri olacaktır. Sonuçta elde edilmesi hedeflenen yüksek şekil değiştirme hızı davranışları ilerleyen aşamalarda farklı mühendislik alanlarındaki problemlere uygulanabilecek ve yapı elemanlarının analizinde daha hassas ve doğru çözümler üretilebilecektir.

### 3. GEREÇ VE YÖNTEM

#### 3.1 Beton Malzeme Üretimi

Statik ve dinamik mekanik karakterizasyonu yapılacak beton malzemenin hazırlanması ve üretimi hakkında birtakım çalışmalar yürütülmüştür. Bu amaçla 130 litrelik bir beton karışım hesabı yapılmıştır. Beton malzeme karışımı temelde agregalar, çimento ve sudan oluşmaktadır. Beton malzeme genellikle hacmen %75 oranında agregalardan meydana gelmektedir ve bu agregalar betonun mekanik özelliklerinde oldukça etkilidirler. Agregalar, genellikle yüksek mukavemetlidirler ve çevresel korozyon etkilerine karşı direnç sağlarlar. Bütün bunların yanı sıra agregalar betonun işlenebilirlik kabiliyeti ve malzeme içerik oranlarını üzerinde de oldukça etkilidirler. Agregalar malzemesinin; maksimum agregalar boyutu ve dane boyutu dağılımı, su emme kapasitesi vb. gibi özelliklerinin tespiti oldukça önemlidir. Çalışmada ilk olarak bu özellikler arasından, agregalar dane boyutu dağılımı incelenmiştir. Bu amaçla ASTM C 136 standardına uygun elek analizi yapılmıştır. Bu analizin sonucunda elde edilen eğri Şekil 7’de sunulmuştur.



Şekil 7. Agregalar gradasyon eğrisi.

Şekil 7' de beton karışımında kullanılacak mevcut agreganın gradasyon eğrisi sunulmuştur. Eğriden de anlaşılacağı gibi maksimum agreganın çapı ( $D_{maks.}$ ) 4.75 mm' dir. Literatürle karşılaştırıldığında bu malzeme kalın agregaya içeren harç sınıfına girmektedir ve malzeme beton karakteristiği taşımaktadır [1]. ASTM standardına göre 4.75 mm elek göz açıklığı kaba ve ince agreganın ayırım sınırındadır.

Elek analizinin tamamlanmasından sonra uygun karışım hesabının yapılabilmesi amacıyla; agreganın özgül ağırlığı, su emme kapasitesi ve nem muhteviyatı tespit edilmiştir. Özgül ağırlığın tespitinde ASTM C127 standardı kullanılarak özgül ağırlık değeri 2.56 olarak bulunmuştur. Yine aynı ASTM standardına uyularak su emme kapasitesi ve su muhteviyatı deneyleri yapılmış ve sonuçlar Tablo 2' de sunulmuştur.

Tablo 2. Agreganın fiziksel özellikleri.

<b>Fiziksel Özellikler</b>	<b>Agrega</b>
Doygun, yüzey-kuru özgül ağırlık	2.56
Su Emme (%)	3.9
Nem Miktarı	Kuru

Beton karışımında mekanik dayanımı doğrudan etkileyen diğer bir bileşen çimentodur ve bu çalışma kapsamında Portland CEM I 42.5R tipli çimento kullanılmıştır.

Betonun karışımında kullanılacak malzemelerin seçimi, seçilen malzemelerin özellikleri ve hangi oranlarda karıştırılacakları; mekanik özellikler, işlenebilirlik, dayanım gibi parametreler üzerinde oldukça etkilidir.

Bu amaçla, beton karışım oranının tespiti için ACI 211.1 numaralı standart izlenmiştir. Bu kapsamda: (1) beton çökme değeri, (2) maksimum agreganın boyutu, (3) karma suyu ağırlığı ve hava hacmi, (4) su/çimento oranı (s/ç), (5) çimento ağırlığı, (6) agreganın miktarının tespiti adımları sırasıyla uygulanmıştır. Bu parametreler arasında beton çökme değeri işlenebilirlik kabiliyetini doğrudan etkileyen bir faktördür. Bu sebeple, betonun küçük prizmatik kalıplara da döküleceği dikkate alındığında 150 mm - 175 mm aralığında çökme değerine sahip (çökme değerinin artması beton akıcılığını göstermektedir) olması istenmiştir.

Diğer bir önemli parametre olan maksimum agreganın boyutu ise Split Hopkinson Basınç Barı (SHBB) testlerinde kullanılacak olan maksimum numune çapı ile doğrudan ilgilidir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde SHBB testlerinde agreganın numune çapına oranı en

fazla 1/10 olduğu görülmüştür. Detayları dinamik mekanik karakterizasyon başlığında açıklanacak olan SHBB test düzeneğinde test edilecek numunenin çapı en fazla numunedeki çubuk çapı kadar olabilmektedir. Proje kapsamında kullanılacak olan test düzeneğindeki çubukların çapı 40 mm' dir.

Karışım oranındaki üçüncü önemli parametre olan karma suyu miktarı ACI 211.1 standardında önerilen tablolar vasıtasıyla bulunmuştur. Tablolarda ulaşılması hedeflenen beton basınç dayanımı dikkate alınmış ve su/çimento oranı 0.40 olarak belirlenmiştir. Gerekli çimento miktarı da bu oran sayesinde tespit edilmiştir.

28 günlük beton basınç dayanımı olarak hedeflenen 40 MPa' nın elde edebilmesi amacıyla seçilen s/ç oranı 6 litrelik bir ön döküm ile kontrol edilmiştir. Bu amaçla 10 cm çap ve 20 cm yükseklikte iki adet standart silindirik numune üretilmiştir. Bu numunelerin basma dayanımları hidrolik pres aracılığıyla ölçülmüştür ve 28 günlük beton basınç dayanımları Tablo 3' te sunulmuştur.

Tablo 3. Deneme beton karışımı basma mukavemeti değeri.

<b>Numune</b>	<b>1. Silindir</b>	<b>2. Silindir</b>
28 Günlük Beton Basınç Dayanımı (MPa)	40.9	39.21
Ortalama Dayanım (MPa)	~40	

Hedeflenen beton basınç dayanımının elde edilebildiğinin tespitinden sonra asıl numunelerin üretilmesi için gerekli 130 litrelik bir karışım hazırlanmıştır ve bu karışım da s/ç oranı 0.40 olarak seçilmiştir. Hazırlanan karışım standart küp, silindir ve prizmatik kalıplara dökülmüştür. Prizmatik kalıplara ait bir örnek Şekil 8' de gösterilmektedir. Tüm numuneler yeterince sertleştikten sonra kür havuzuna alınmış ve 28 gün boyunca bu havuzda bekletilmişlerdir. Daha sonra numuneler dış ortama taşınmıştır. Beton malzemenin doğası gereği 28. günün sonrasında da mekanik özelliklerinde artış meydana gelmektedir. Bu artışın sebebi genellikle kimyasal reaksiyonların devam etmesi, kür koşulları vb. gibi etkenlere bağlı olmakla birlikte artış miktarı bir yılın sonunda yaklaşık %15 olmaktadır. Statik ve dinamik karakterizasyon testlerinde 45 mm boy ve 39.5 mm çapta silindirik numuneler kullanılmıştır.





(a)



(b)



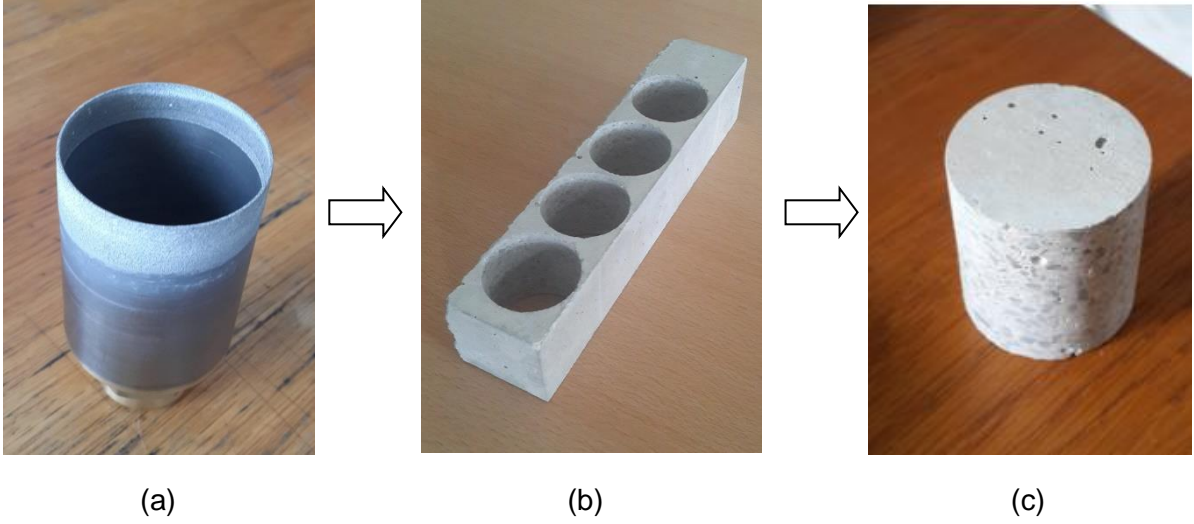
(c)



(d)

Şekil 8. Çelik Kalıplar: (a) 2.5x2.5x22 cm, (b) 20x20x2 cm ve (c) 15x15x15 cm, (d) 15 cm çap ve 30 cm yükseklik.

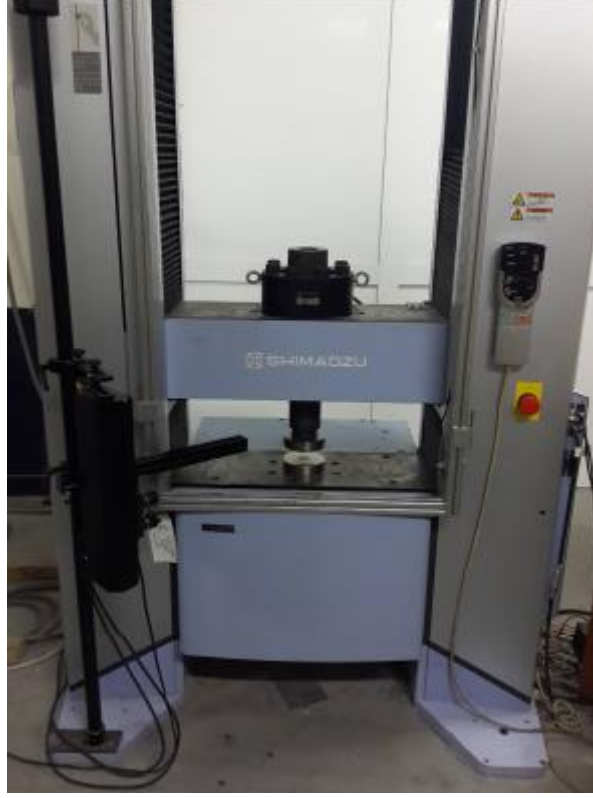
Silindirik numuneler Şekil 9 (a)' da sunulan elmas kesici uç kullanılarak Şekil 9 (b)' de gösterilen 220mm x 45mm x 45mm boyutlara sahip prizmatik beton malzemeden sulu kesim matkap kullanılarak çıkarılmıştır. Elde edilen silindirik numune Şekil 9 (c)' de görülmektedir. Testler esnasında numunenin ön ve arka yüzey paralellikleri, homojen olmayan gerilme dağılımının önlenmesi ve prematüre kırılma etkisinin azaltılması bakımından büyük öneme sahiptir. Bu sebeple numunenin ön ve arka yüzeyleri parlatma işlemine tabii tutulmuştur.



Şekil 9. (a) Elmas kesici uç, (b) prizmatik beton malzeme ve (c) silindirik beton numunesi.

### 3.2 Statik Basma Deneyleri

Statik mekanik karakterizasyon çalışmalarında 300 kN kapasiteli Shimadzu AG-X üniversal çekme-basma test cihazı kullanılmıştır, Şekil 10. Betonun statik karakterizasyonu ile basma ve çekme mukavemetini bulma amacıyla 2 tip test tekniği uygulanmıştır. Bunlardan ilki statik basma testleridir. Statik basma testleri sırasında üç farklı şekil değiştirme hızı seçilmiştir ve bu hızlar sırasıyla:  $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$  ve  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  dir. Statik testlerde şekil değiştirme iki farklı yöntemle ölçülmüştür. Bunlardan ilki video ekstansometre, ikincisi ise numune üzerine yapıştırılan şekil değişim ölçerlerdir (strain gage). Video ekstansometre ile yapılan şekil değişim ölçümleri sırasında numune yüzeyine yapıştırılan izleyiciler kullanılmıştır. Ayrıca testler video kamera ile kayıt altına alınarak hasar oluşumu ve kırılma incelenmiştir.



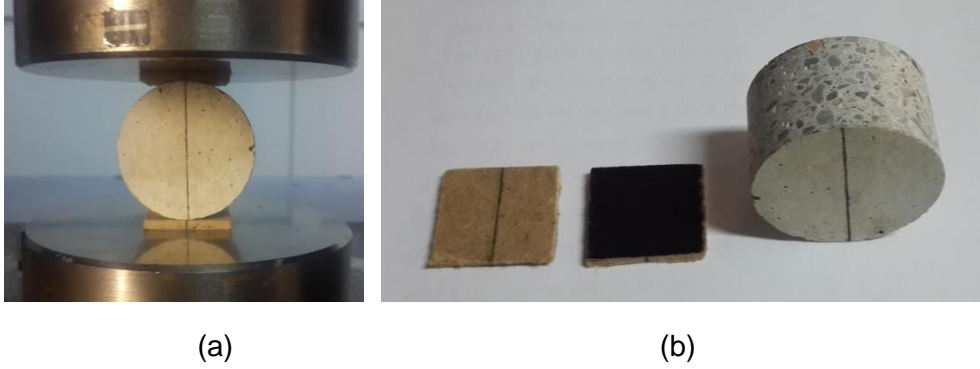
Şekil 10. Shimadzu AG-X Test Cihazı.

Ayrıca numune yüzeyine farklı oryantasyonlarda şekil değişim ölçerler yerleştirilerek numunede meydana gelen şekil değiştirmenin tarihçesi ve poisson oranının tespiti amacıyla ilave testler de yapılmıştır. Bu amaçla üç adet dikey ve iki adet yatay olmak üzere toplam beş adet şekil değişim ölçer numunenin yanal yüzeyine Şekil 11’ de görüldüğü gibi yapıştırılmıştır.



Şekil 11. Numune yüzeyindeki şekil değişim ölçerler.

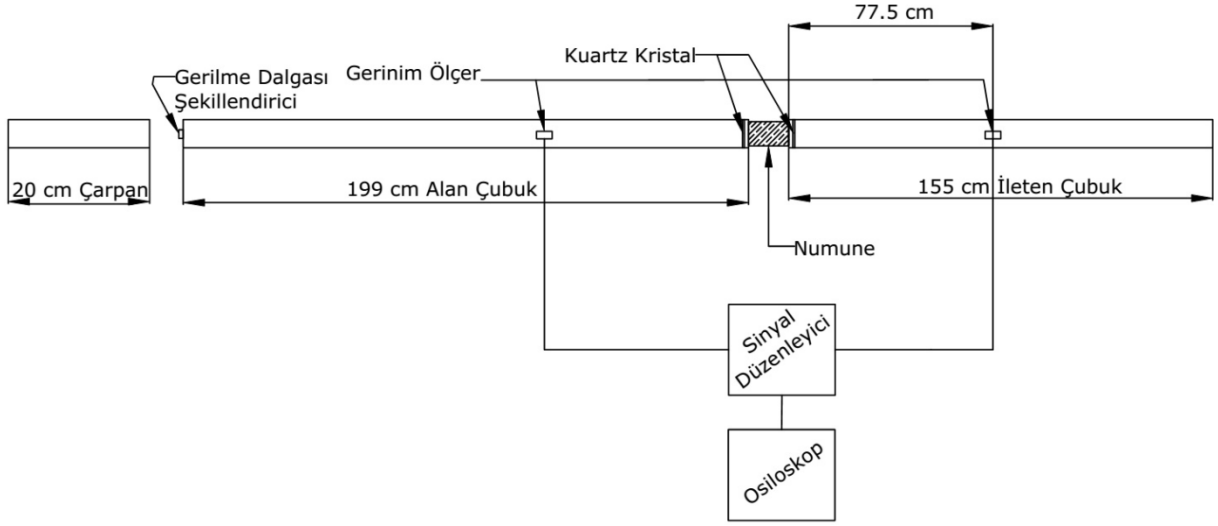
Beton malzemesine ait çekme mukavemetinin ölçülebilmesi amacıyla yarmada-çekme dayanımı testleri yapılmıştır. Bu testler sırasında ASTM C 496 standardı takip edilmiştir. Testler sırasında numunenin üst ve alt yanıl yüzeylerini desteklemek amacıyla 3 mm kalınlıkta ve 25 mm eninde kontrplak çıtalar hazırlanmıştır ve bu çıtalar 24 mm boy, 39.5 mm çapa sahip numunelerin testinde kullanılmıştır (Şekil 12).



Şekil 12. Basma cihazında (a) beton numune yerleşimi (b) kontrplak çıtalar ve beton numune.

### 3.3 Split Hopkinson Basınç Barı Testi ve Nümerik Modeli

Beton malzemenin dinamik mekanik karakterizasyonu Split Hopkinson Basınç Barı (SHBB) kullanılarak yapılmıştır. SHBB gaz tabancası tarafından fırlatılan bir çubuk, alan çubuğun ön yüzeyine çarpmakta ve bir basma gerilme dalgası oluşturmaktadır. Basma gerilme dalgası alan ve ileten çubuklar arasında yerleştirilmiş numuneye ulaştığında bir kısmı numune üzerinden ileten çubuğa iletilmekte, kalan kısmı ise alan çubuğa yansımaktadır. SHBB şematığı Şekil 13' te verilmiştir.



Şekil 13. SHBB test düzeneği şematik gösterimi.

Alan ve iletken çubuklar üzerine yerleştirilmiş şekil değişim ölçerler bahsi geçen bu gerilme dalgalarını kaydetmektedirler. Şekil değişim ölçerlere sinyal düzenleyici cihaz tarafından voltaj beslemesi yapılmakta ve üzerlerinden sinyal alınmaktadır. Şekil değişim ölçerlerden gelen voltaj sinyalleri yüksek hızlı bir osiloskop tarafından kaydedilmektedir.

Beton malzemenin testlerinde kullanılacak SHBB test düzeneğinde 199 cm uzunluğunda alan ve 155 cm uzunluğunda iletken çubuklar kullanılmıştır. Testler sırasında kullanılan çarpan çubuğunun uzunluğu ise 20 cm' dir, Şekil 14. Çubukların çapı 40 mm' dir.



Şekil 14. SHBB Test düzeneği.

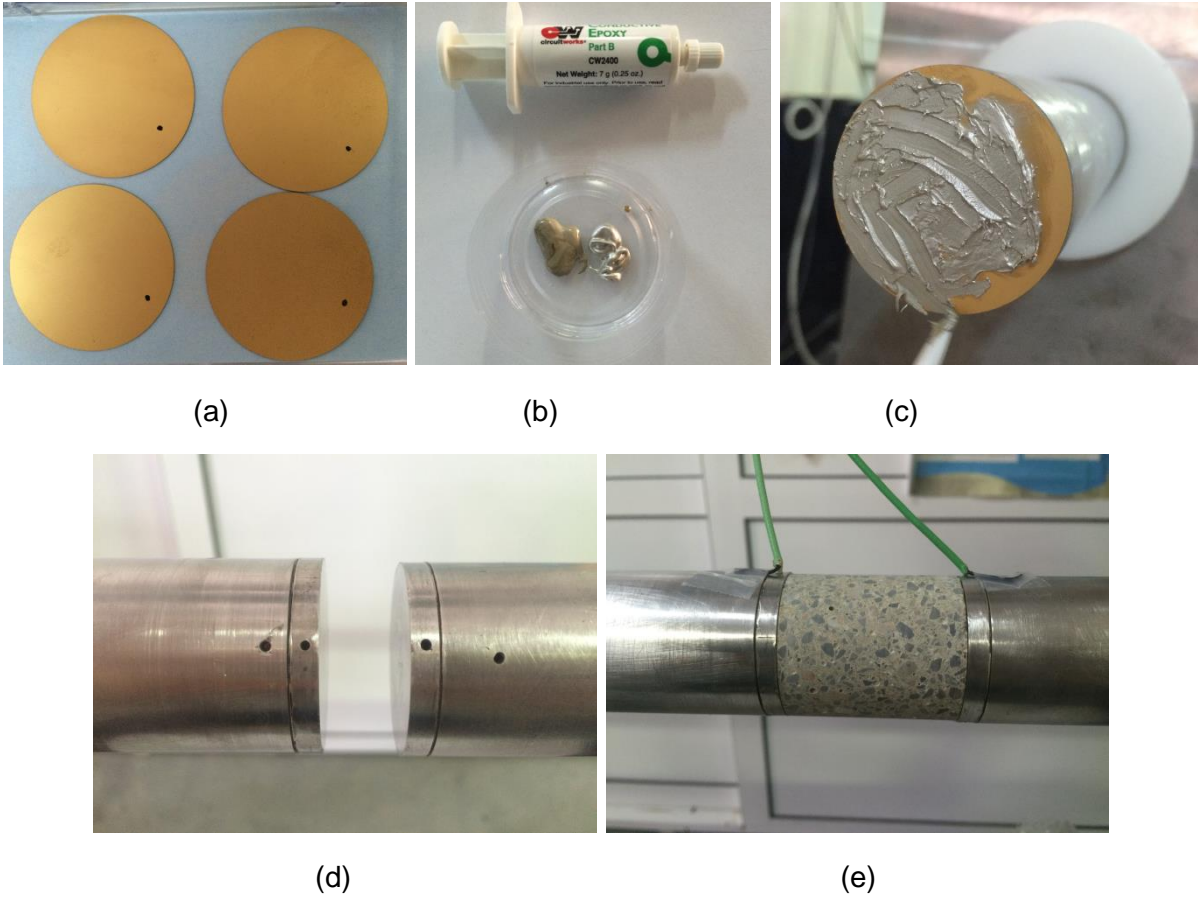


Beton malzemenin homojen olmayan yapısından dolayı (agrega ve çimento karışımı) dinamik mekanik karakterizasyonda kullanılacak numunenin, malzemenin kendisinin mekanik özelliklerini temsil edebilmesi amacıyla nispeten büyük çaplı numunelerin kullanılması gerekmektedir (40mm). SHBB testlerinde numune çapı en fazla çubuk çapı kadar olabilmektedir. Nispeten büyük çaplı bu çubuklarda ilerleyen gerilme dalgası yüksek miktarda dispersiyon etkisine maruz kalmaktadır ve dolayısıyla numunenin ön / arka yüzeylerinden ve şekil değişim ölçerlerden okunan gerilme değerleri arasında farklılık olmaktadır. Bu sorunu aşmak amacıyla proje ekibinin bilgisi dâhilinde olmak üzere dünyada ilk defa piezoelektrik kuartz kristaller çubuk / numune ara yüzeylerine yerleştirilmiş ve kuvvet değerleri doğrudan ara yüzeylerden okunmuştur. Bu sayede hem dinamik gerilme dengesi daha doğru bir şekilde incelenebilmiş hem de kuvvet değerleri daha doğru şekilde kaydedilebilmiştir. Kuvvetlerin aynı zamanda doğrudan numune / çubuk ara yüzeylerinden okunabilmesi dispersiyon etkisini minimize edecektir. Yine beton gibi gevrek malzemelerin dinamik mekanik karakterizasyonlarında premature kırılmayı engellemek amacıyla gerilme dalgası şekillendiricisi (pulse shaper), SHBB testleri sırasında kullanılmaktadır. Gerilme dalgası şekillendirici de SHBB test düzeneğindeki çarpan ve alan çubuğunun ara yüzeyine yerleştirilmekte ve test sırasında deforme olmaktadır. Elde edilen sonuçlardan da görüleceği üzere gerilme dalgası şekillendirici şekil değişim ölçerlerden gelen sinyallerdeki gürültüleri engellediği gibi malzemenin yükleme hızını da azaltıp, gerilme dalgasının numune içerisindeki dengeli ilerleyişine imkân tanımaktadır. Bu sayede numunenin premature kırılma eğilimi azalmaktadır. Deneyler sırasında kullanılan gerilme dalgası şekillendirici Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM) kauçuk malzemeden seçilmiş olup 3 mm kalınlık ve 12.7 mm çapa sahip dairesel geometridir, Şekil 15.



Şekil 15. EPDM kauçuk gerilme dalgası şekillendirici.

Deneyler sırasında kullanılan numune / çubuk ara yüzlerine yerleştirilen piezoelektrik kuartz kristaller ve yapıştırma aşamaları Şekil 16' da görülmektedir. Kuartz kristallerin kalınlıkları  $0.254 \pm 0.01 \text{ mm}$ ' dir, çapları SHBB çubuklarının çaplarıyla aynı değerdedir. Kuartz kristal ve alüminyum çubukların akustik empedans değerleri birbirlerine oldukça yakındır ve bu değerler sırasıyla  $15.11 \times 10^6 \text{ kg/m}^2/\text{s}$  ve  $14.19 \times 10^6 \text{ kg/m}^2/\text{s}$ ' dir. Kuartz kristaller, çubuk yüzeylerine Circuit Works CW 2400 iletken epoksi vasıtasıyla yapıştırılmaktadır. Aynı zamanda numune ile kristallerin arasında 5 mm kalınlığa sahip alüminyum diskler de bulunmaktadır. Bu diskler de yukarıda bahsi geçen iletken epoksi vasıtasıyla kristallerin diğer yüzeylerine yapıştırılmıştır. Alüminyum disklerde ve çubuklarda yaklaşık 5 mm derinliğinde kör delikler açılarak kuartz kristalin Kistler 5010A (charge amplifier) cihazına kablolanması tamamlanmıştır. Kuartz kristallere ait piezoelektrik sabit  $-2.3 \times 10^{-12} \text{ C.N}^{-1}$ ' dir. Kuvvet değerleri Kistler cihazından okunmuştur.



Şekil 16. Kuartz kristallerin montaj adımları.

SHBB deney düzeneğinde kullanılan çubuklar 7075-T6 alüminyum malzemeden üretilmiştir ve mekanik özellikleri Tablo 4' te sunulmuştur.

Tablo 4. 7075-T6 alüminyum çubuk malzeme özellikleri.

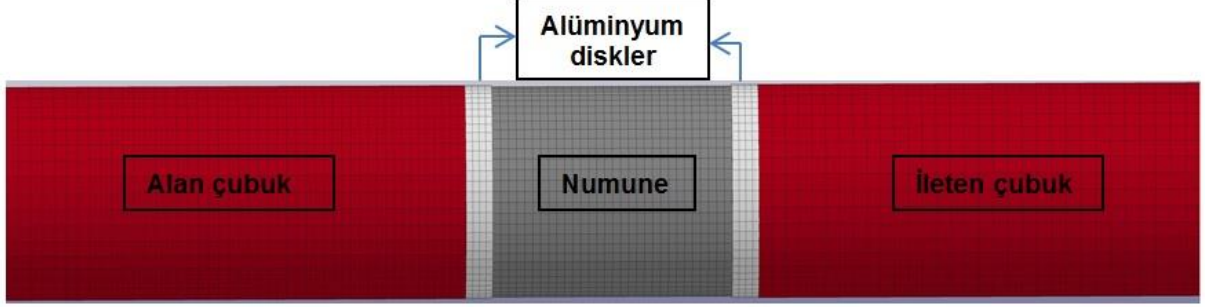
<i>Elastik Modül (GPa)</i>	<i>Yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Poisson Oranı</i>
71.7	2810	0.3

Split Hopkinson basınç barı nümerik modelleme çalışmalarına ilk olarak gerçekleştirilen deney sonuçlarının LS-DYNA yazılımı kullanılarak modellenmesiyle başlanmıştır. Bu kapsamda hem dalga şekillendirici hem de dalga şekillendiricisiz testlerin tamamı nümerik olarak incelenerek çıkan sonuçlar sunulmuştur. Sonuçların tutarlılığı göz önünde bulundurularak hali hazırda hem dalga şekillendirici hem de piezoelektrik kuartz kristal kullanımıyla modifiye edilmiş olan SHBB test düzeneğine ek olarak yapılan nümerik modifikasyonlar ile betonun davranışı farklı şartlar altında incelenmiştir. Ayrıca nümerik olarak numune geometrisinde değişikliklere gidilerek numune geometrisinin yüksek deformasyon hızlarında betonun davranışına etkisi incelenmiştir.

SHBB test düzeneği Şekil 17' de görüldüğü gibi sekiz düğüm noktalı katı elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Yukarıda detayları anlatıldığı gibi beton numune malzemesi MAT\_JOHNSON\_HOLMQUIST\_CONCRETE malzeme modeliyle modellenmiştir. Alüminyum parçalar ise MAT\_ELASTIC malzeme modeli kullanılarak alüminyum malzemenin sahip olduğu malzeme özellikleri ile modellenmiştir. SHBB nümerik modeli altı ana parçadan oluşmaktadır. Bu parçalar çarpan çubuk, alan çubuk, ileten çubuk, ön ve arka alüminyum diskler ve beton numunedir. Oluşturulan nümerik model toplam 318,200 katı eleman ihtiva etmektedir. Modelin örgü sıklığı hassasiyeti analizi (mesh sensitivity analysis) deneysel ve nümerik sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılarak kontrol edilmiş olup çalışma sırasında kullanılan eleman sayısı kabul edilebilir çözüm süreleri ihtiva eden maksimum örgü sıklığındadır. Hourglass tipi 5 numaralı stiffness tanımlı Flangan-Belytschko seçilmiştir. SHBB nümerik modeli gerilme dalgası şekillendiricili ve şekillendiricisiz durum için iki farklı şekilde oluşturulmuştur. Şekillendiricisiz olan modelde, çarpan çubuğa deneysel olarak tespit edilmiş bir ilk hız atanmış ve çarpan çubuk bu hızla alan çubuğa çarpıtılmıştır. Bu çarpma sonunda bir basma gerilme dalgası alan çubuk içerisinde deney düzeneğinde olduğu gibi ilerlemektedir. Şekillendiricili modelde ise deneysel olarak tespit edilmiş alan gerilme dalgası doğrudan alan çubuğun ön yüzeyine etki ettirilmiştir. Çubukların arasında temas tanımında Surface to Surface, numune ile temaslarında ise Nodes to Surface algoritması kullanılmıştır. Kontakt tanımında kullanılan statik ve dinamik sürtünme katsayıları çubuklar arasında sırasıyla 0.3 ve 0.2, numune ile çubuk arasında ise sırasıyla 0.1 ve 0.05 olarak kullanılmıştır.



Nümerik analizlerde numune ön ve arka yüzeylerinde, alan ve ileten çubuk şekil değişim ölçer noktalarında kuvvet, gerilme, şekil değiştirme, hasar vb gibi veriler okunmuş ve elde edilen sonuçlar deneylerle kıyaslanmıştır.



Şekil 17. SHBB nümerik modeli

### 3.4 Düşen Ağırlık Testi ve Nümerik Modeli

Silindirik numuneler üzerine dinamik mekanik karakterizasyon çalışmalarının yapılması ve malzeme modeli parametrelerinin belirlenmesi üzerine betonun farklı geometri ve farklı sınır şartları altında davranışını gözlemlemek amacıyla düşen ağırlık testleri yapılmıştır. Testler, Şekil 18' de sunulan CEAST Fractovis Plus düşen ağırlık test cihazı kullanılarak farklı çarpma hızlarında ve sınır şartlarında gerçekleştirilmiştir. Cihazda bulunan yüksek hız modülü sayesinde 20 m/s çarpma hızlarına kadar test yapabilmek mümkündür. Ayrıca proje kapsamında satın alınan düşen ağırlık test ucu ile çarpma sırasındaki kuvvet değeri tespit edilebilmektedir. Bu testlerde kullanılacak numuneler ise Şekil 19 (a)' da sunulan çelik kalıplara dökülen beton karışımlarından 200 mm x 200 mm x 20 mm ayrıtlara sahip prizmalar halinde çıkarılmıştır, Şekil 19 (b).



Şekil 18. Düşen ağırlık test cihazı.



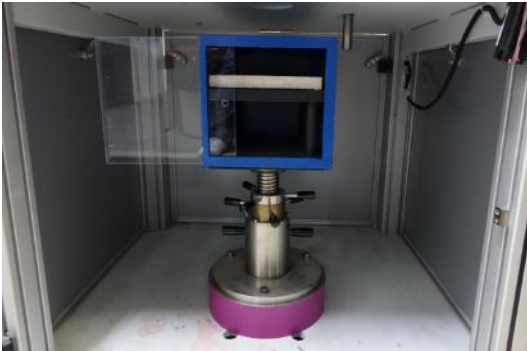
(a)



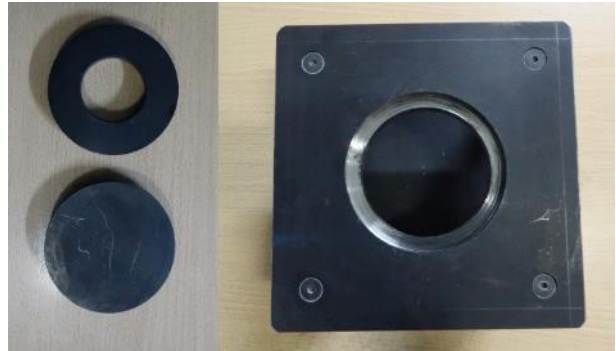
(b)

Şekil 19. Prizmatik beton kalıbı ve beton numunesi.

Deneyler esnasında gerçekleşen kırılmadan dolayı etrafa dağılan numune parçalarının bir arada tutulması, hızlı kamera ve test cihazında meydana gelebilecek hasarın engellenmesi amacıyla bir koruyucu hazne tasarlanmış ve deneyler sırasında kullanılmıştır, Şekil 20 (a). Farklı sınır şartları altında malzemenin davranışını incelemek amacıyla numune tutucu deliksiz, 60 mm ve 100 mm çapında deliklere sahip olacak şekilde insertlere sahiptir. Gerçekleştirilen tüm deneylerde proje kapsamında satın alınan ve Şekil 21' de sunulmuş 10 mm yarıçapa sahip yarıküre geometrili vurucu uç kullanılmıştır. Ayrıca tüm testlerde toplamda 15.68 kg' lık bir çarpan kütle kullanılmıştır.



(a)



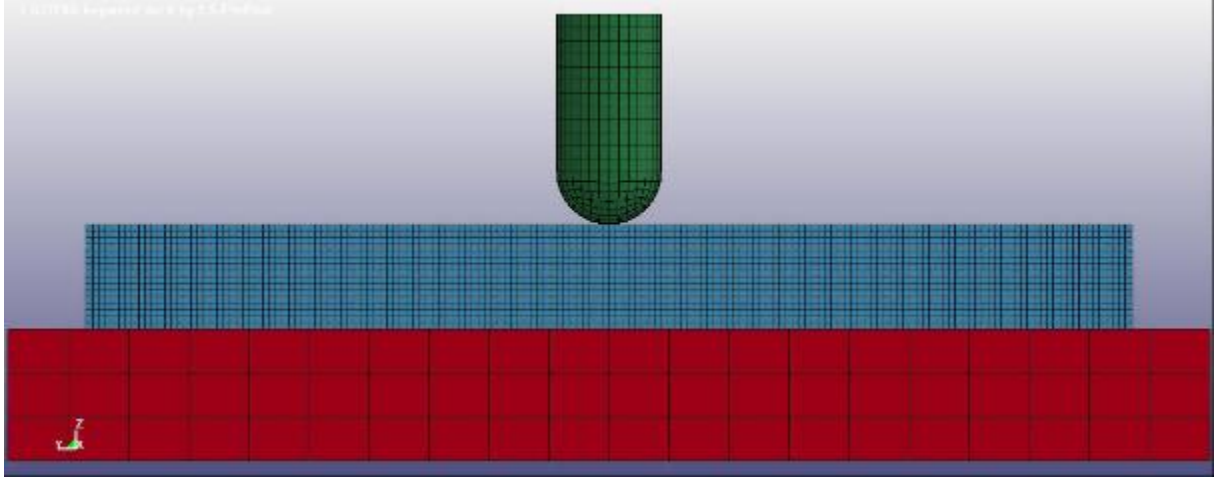
(b)

Şekil 20. (a) Koruyucu hazne ve (b) numune tutucusu.



Şekil 21 . Yarı küre uçlu vurucu.

Bu çalışma ile birlikte düşen ağırlık testlerinin nümerik modelleri hazırlanmıştır. Oluşturulan modele JHC malzeme modeli parametreleri [1] ve proje kapsamında bulunan C parametresi yerleştirilerek simülasyon sonuçları incelenecektir. Düşen ağırlık test düzeneğinin nümerik modelinde üç ana parça tanımlanmıştır. Bu parçalar sırasıyla vurucu uç, numune ve numune tutucudan oluşmaktadır. Bu parçaların katı modelleri hazırlandıktan sonra LS-Prepost programında birleştirilip nümerik model oluşturulmuştur. Oluşturulan nümerik model toplam 415328 katı eleman ihtiva etmektedir. Modelin örgü sıklığı hassasiyeti analizi (mesh sensitivity analysis) deneysel ve nümerik sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılarak kontrol edilmiş olup çalışma sırasında kullanılan eleman sayısı kabul edilebilir çözüm süreleri ihtiva eden maksimum örgü sıklığındadır. Hasarın numunede gerçekleşecek olmasından dolayı numune örgü sıklığı yüksek seviyelerde tutulmuştur. Split Hopkinson Basınç Barı nümerik modelinde olduğu gibi düşen ağırlık test modelinde de beton malzeme MAT\_JOHNSON\_HOLMQUIST\_CONCRETE [1] malzeme modeliyle modellenmiştir. Ayrıca vurucu uç için Rigid, numune tutucu uç için ise Elastic malzeme modeli kullanılmıştır. Test düzeneğine eklenen ilave ağırlık ile birlikte vurucu ucun kendi ağırlığının toplamı olan 15.68 kg ağırlık, modelde vurucu uca tanımlanmıştır. Ayrıca numune tutucunun alt taban düğüm noktaları x, y ve z eksenlerinde hem öteleme hem de dönme açısından sınırlandırılmıştır. Modelde Eroding\_Single\_Surface [2] temas algoritması kullanılmıştır. Temas tanımında statik sürtünme katsayısı 0.3, dinamik sürtünme katsayısı 0.2 olarak seçilmiştir. Şekil 22' de görüldüğü gibi düşen ağırlık testi nümerik modeli daha önce de belirtildiği gibi 3 ana parçadan oluşmaktadır. Sistemdeki toplam kütleyle sahip vurucu uca, deneyde belirlenen hız tanımlanmıştır. Numune tutucu ve vurucu uçtaki kuvvet değerlerini ayrı ayrı okuyabilmek amacıyla ilave Force\_Transducer\_Penalty [2] kartları tanımlanmıştır. Ucun yer değiştirmesi vurucu ucun numuneye bakan düğüm noktasından ölçülmüştür.



Şekil 22. Düşen ağırlık testi nümerik modeli.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

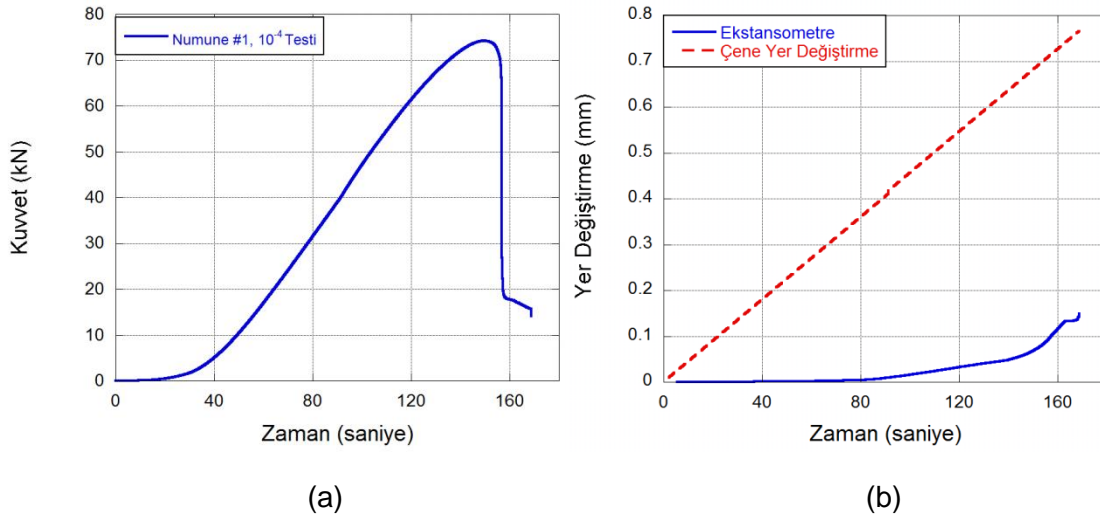
### 4.1 Statik ve Dinamik Mekanik Karakterizasyon Sonuçları

Beton malzemesinin karakterizasyonu için hem statik hem de dinamik şekil değiştirme hızlarında testler gerçekleştirilmiştir. Düşük şekil değiştirme hızlarındaki statik testler Shimadzu AG-X 300kN statik basma ve çekme cihazıyla, yüksek şekil değiştirme hızlarındaki testler ise Split Hopkinson Basınç Barı (SHBB) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Statik testler uygulanırken malzeme modeli parametrelerini elde etmek amacıyla 2 farklı tipte test metodu uygulanmıştır. Bunlardan ilki aksenal basma testi, ikincisi ise yarmada çekme testidir. Eksenle basma testlerde denklem 5 kullanılarak basma cihazı çene hızı kontrol edilerek istenilen şekil değiştirme hızlarında testler gerçekleştirilmiştir. Statik basma testlerinde hedeflenen şekil değiştirme hızı, çenenin ilerleme hızıyla kontrol edilmektedir. Denklemde  $v_{cr}$ ,  $\dot{\epsilon}$  ve  $L$  sırasıyla çene hızı, şekil değiştirme hızı ve numune boyutudur

$$v_{cr} = \dot{\epsilon}L \quad (5)$$

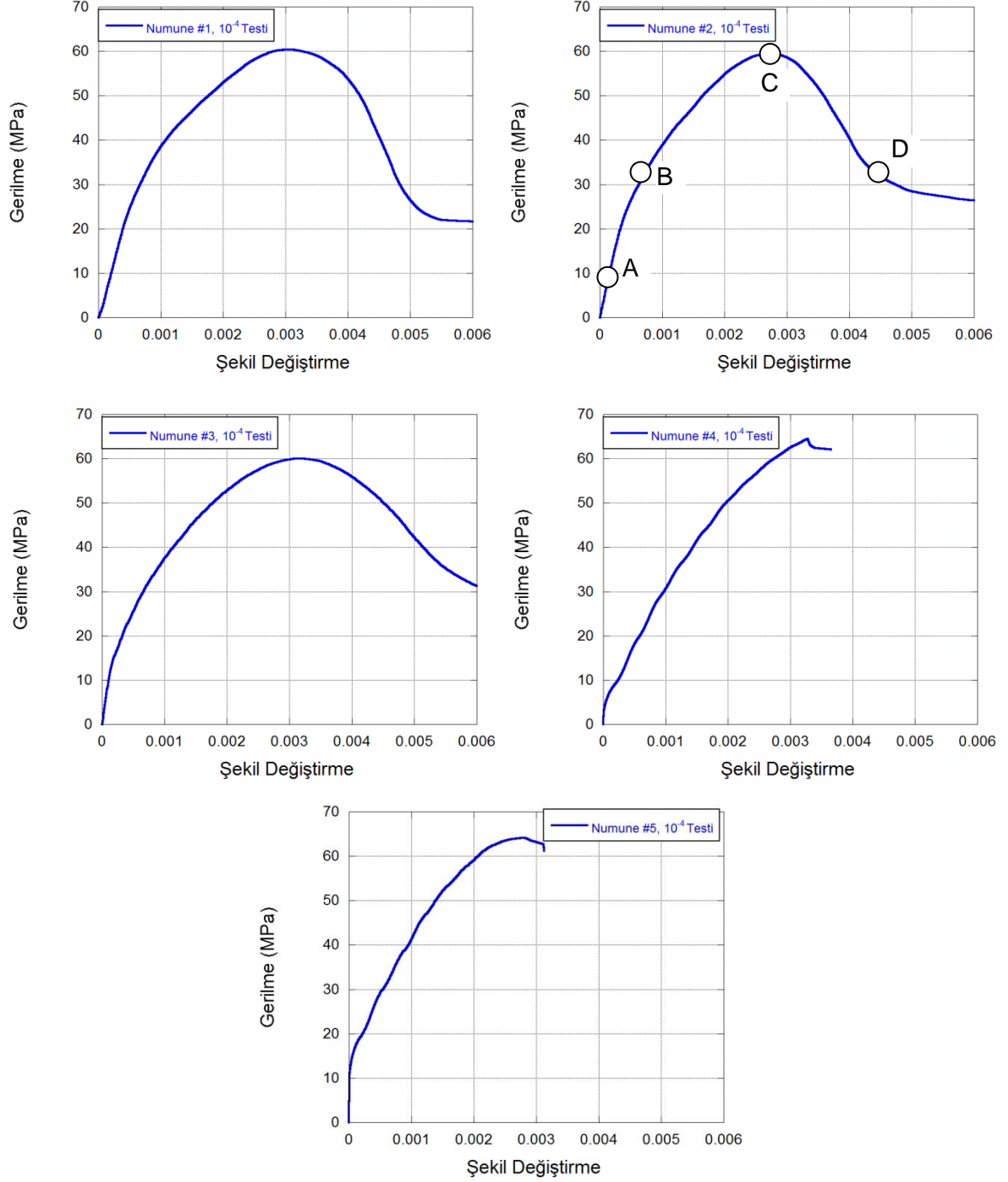
Beton malzemenin gevrek karakterinden dolayı kırılma şekil değiştirme değeri oldukça küçüktür. Bu küçük şekil değiştirme değerinden dolayı basma çenelerinin yer değiştirme değerleri şekil değişim ölçümlerinde kullanılamamaktadır (machine compliance). Bu farklılık Şekil 23 (b)' de görülmektedir



Şekil 23. (a) Kuvvet ve (b) yer değiştirme tarihçeleri.

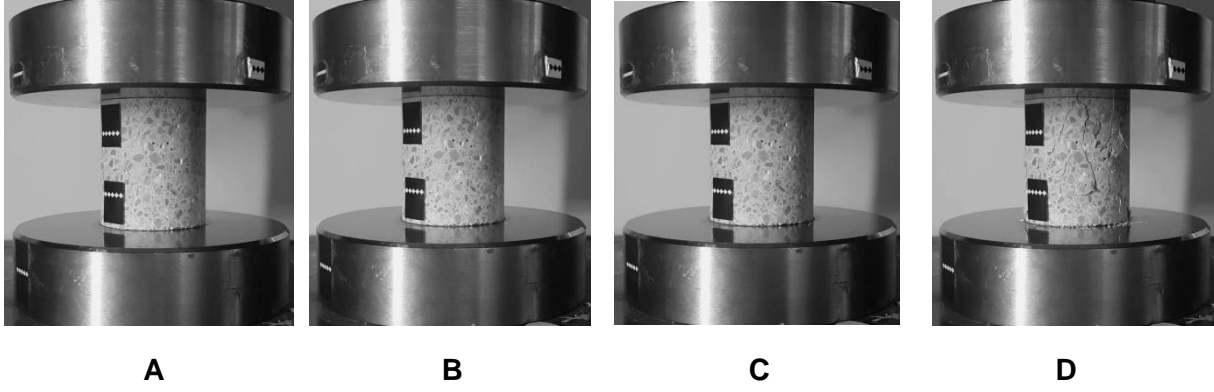
Statik testlere öncelikli olarak 10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup> testleriyle başlanmıştır ve bu testlerde çenelerin ilerleme hızı 0.0045 mm/s' dir. Şekil 24' te bu testlere ait gerilme şekil değiştirme eğrileri

verilmiştir. Test sonuçları incelendiğinde ortalama basma mukavemeti değeri 62 MPa ve kırılma şekil değiştirme değerinin ise 0.0025 ile 0.003 aralığında değiştiği görülmektedir.



Şekil 24. Gerilme-şekil değiştirme eğrileri ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ).

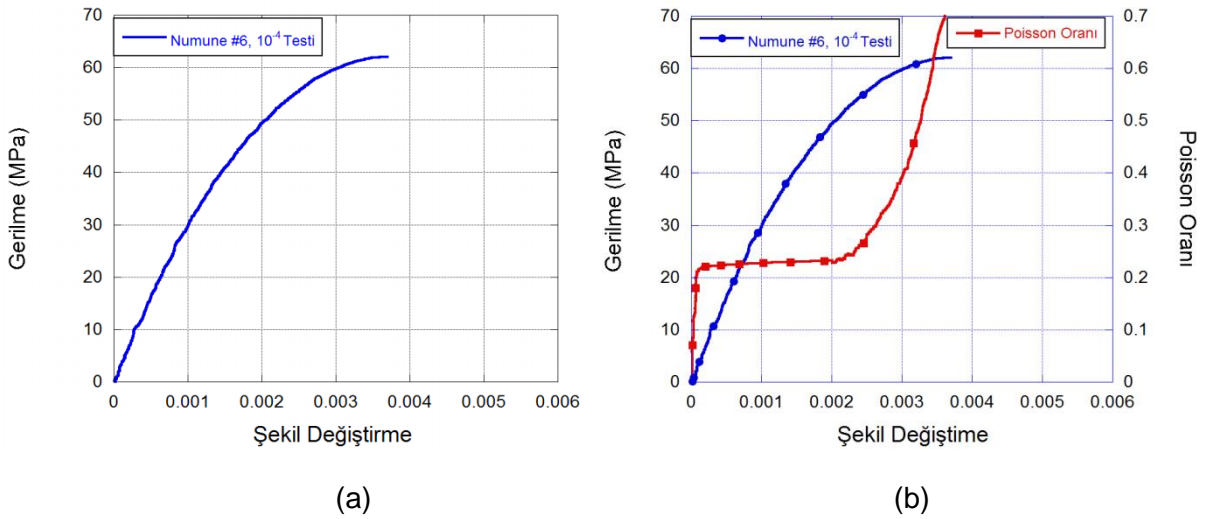




Şekil 25.  $10^{-4}$  testi statik deformasyon tarihçesi.

Hasarın başlangıcı ve ilerleyişi testlerin video kamerasıyla kaydedilmesiyle incelenmiştir. Numune 2' ye ait  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  testi, gerilme şekil değiştirme eğrisi üzerindeki dört farklı noktaya karşılık gelen numune deformasyonları Şekil 25' te verilmiştir. Özellikle D noktasında hasar yüzeye kadar ilerlemekte, aksenal ve çevresel yönde hasarın oluşumu numune yüzeyinde gözlemlenmektedir. Deformasyonun ilerlemesiyle birlikte numunede katastrofik hasar meydana gelmekte ve numune parçalanmaktadır.

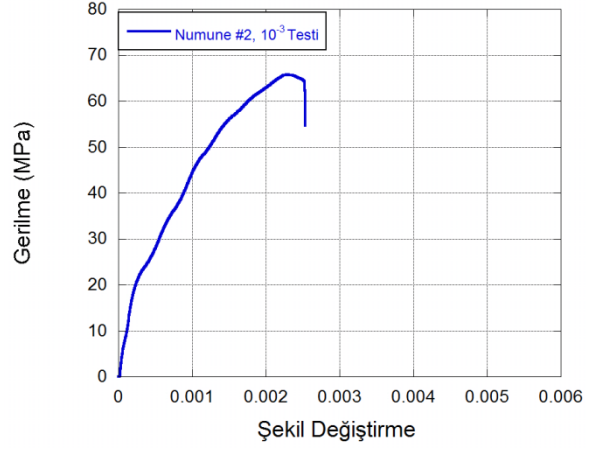
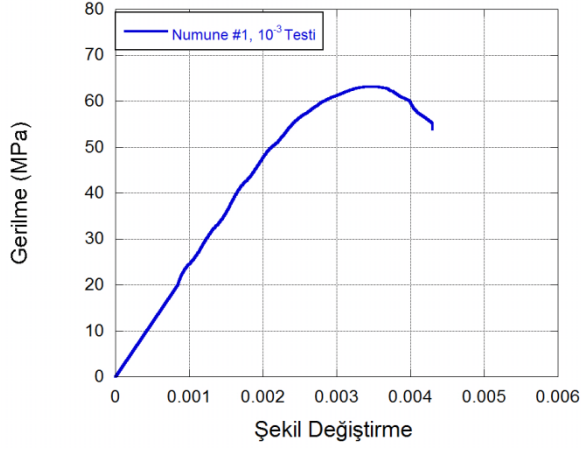
Bu teste ait sonuçlar Şekil 26' da sunulmuştur. Şekil 26 (b)' den de görüleceği gibi dikey ve yatay şekil değişim ölçerlerden gelen şekil değiştirme değerlerinin oranları alınıp poisson oranı hesap edilmiştir. Bu değer literatürdeki poisson oranı değeri olan 0.2' ye oldukça yakın olarak tespit edilmiştir. Bu testte numune yaklaşık 62 MPa basma mukavemetinde ve  $\sim 0.0035$  şekil değiştirme değerinde kırılmıştır.

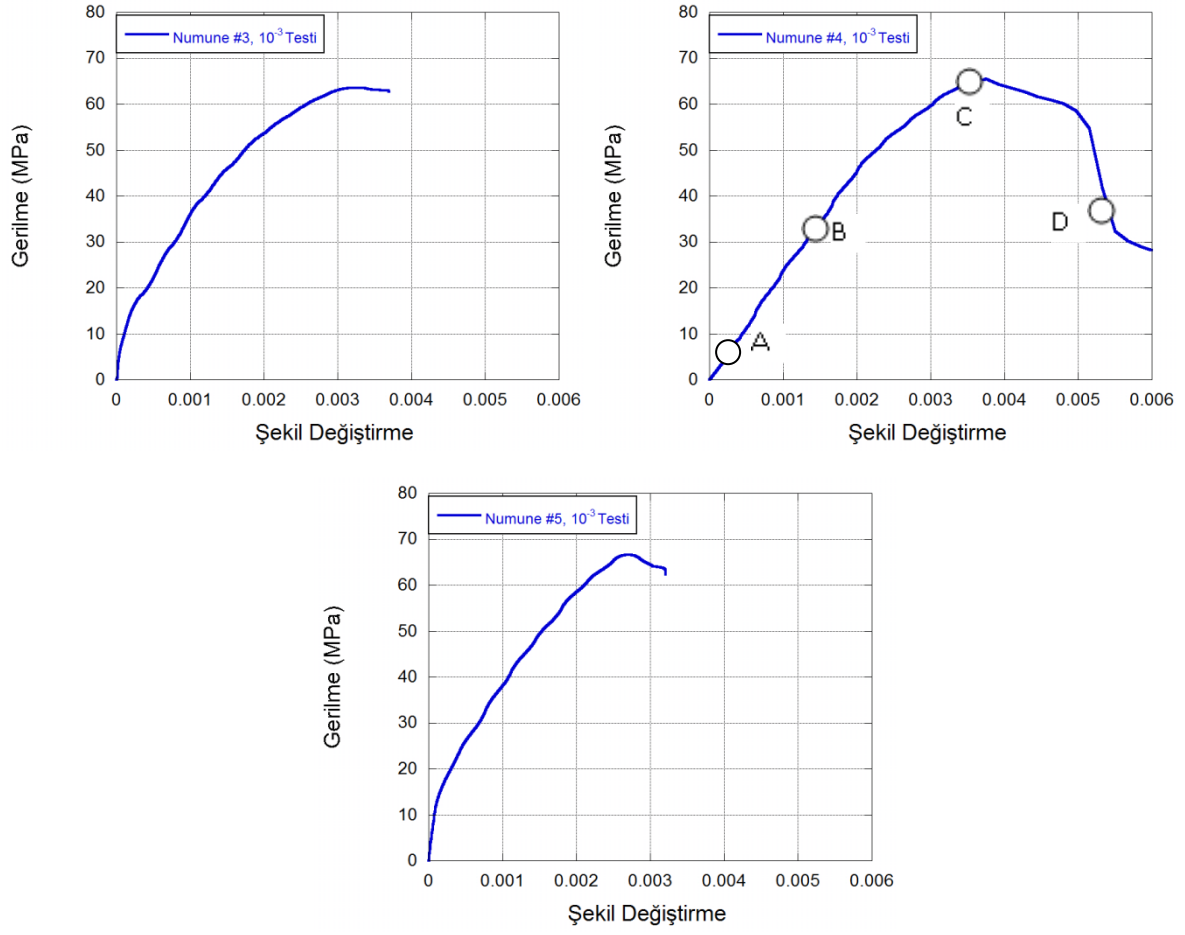


Şekil 26. Şekil değişim ölçer kullanılmış teste ait (a) gerilme şekil değiştirme ve (b) poisson oranı şekil değiştirme eğrileri.

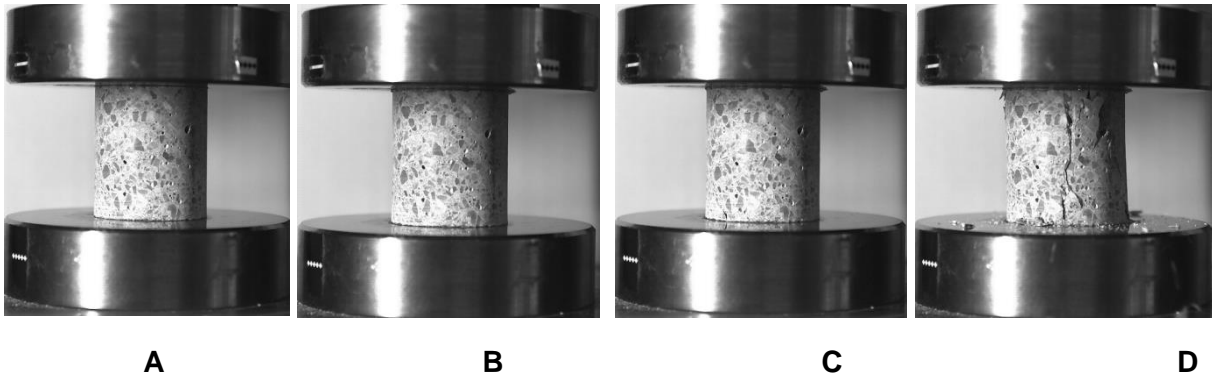


Statik testlere  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızındaki testlerle devam edilmiştir. Bu testlerde çenenin ilerleme hızı 0.045 mm/s olarak seçilmiştir. şekil 27' de bu testlere ait gerilme şekil değiştirme eğrileri sunulmuştur. Betonun bu şekil değiştirme hızındaki ortalama basma mukavemeti 65.1 MPa' dır ve kırılma şekil değiştirme değerleri ise 0.0025 ile 0.0035 aralığında değişmektedir.





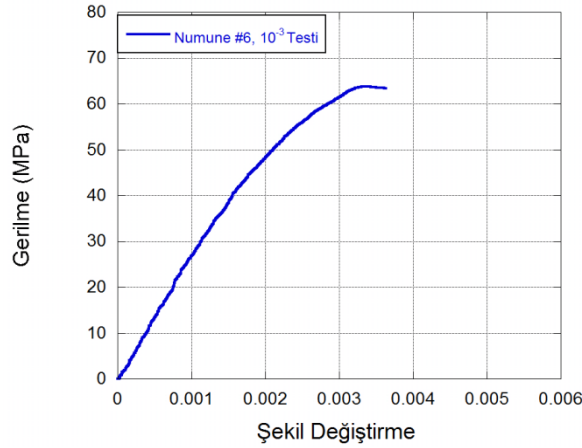
Şekil 27. Gerilme-şekil değiştirme eğrileri ( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ).



Şekil 28.  $10^{-3}$  testi statik deformasyon tarihçesi.

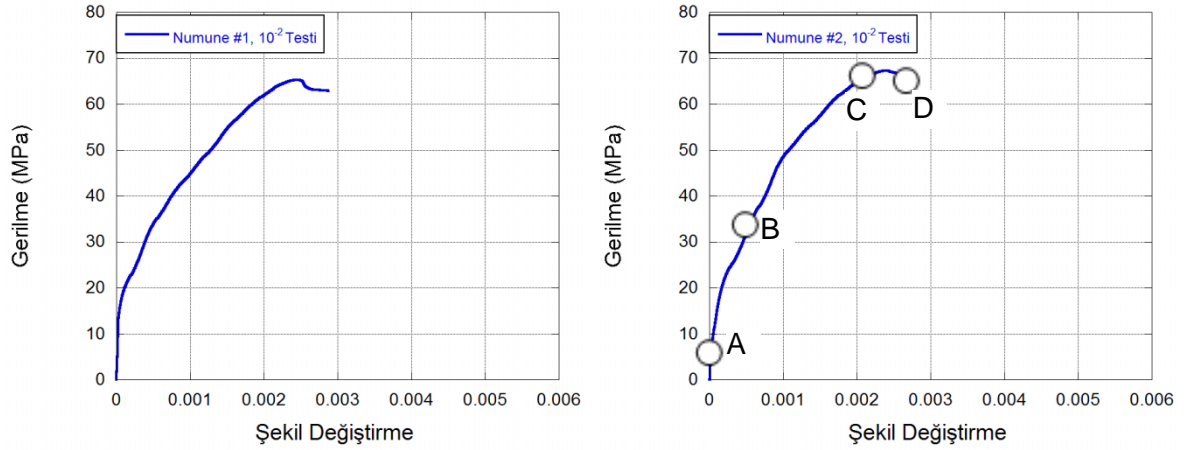
Hasarın başlangıcı ve ilerleyişi, testlerin video kamerayla kaydedilmesiyle incelenmiştir. Numune 5' e ait  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  testi, gerilme şekil değiştirme eğrisi üzerindeki dört farklı noktaya karşılık gelen numune deformasyonları Şekil 28' de verilmiştir. Özellikle D noktasında hasar yüzeye kadar ilerlemekte aksenal ve çevresel yönde hasarın oluşumu numune yüzeyinde gözlemlenmektedir. Hasarın oluşumunda aksenal yarıma (axial splitting) etkisinin arttığı tespit edilmiştir. Numunede radyal yönde genişleme gözlemlenmektedir. Deformasyonun ilerlemesiyle birlikte numunede katastrofik hasar meydana gelmekte ve numune parçalanmaktadır.

Video ekstansometrenin kullanıldığı testlere ek olarak detayları daha önce açıklandığı gibi numune yüzeyine farklı oryantasyonlarda şekil değişim ölçerler yerleştirilerek testler yapılmıştır. Şekil değişim ölçerlerden gelen şekil değiştirme değerinin kullanıldığı bir teste ait gerilme şekil değiştirme eğrisi Şekil 29' da verilmiştir. Bu test sonucu öncekilerle tutarlılık göstermektedir.

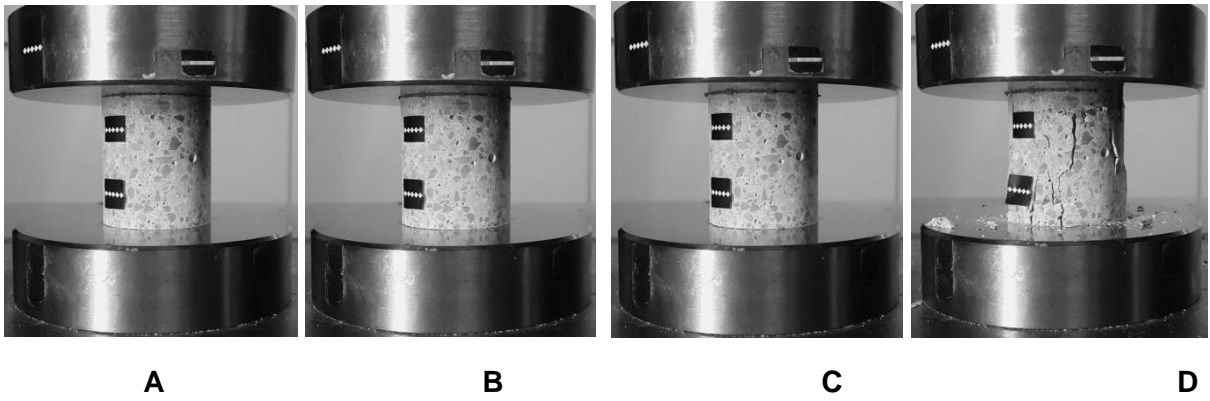


Şekil 29. Şekil değişim ölçer kullanılmış teste ait gerilme şekil değiştirme eğrisi.

Statik testlere  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızındaki testlerle devam edilmiştir ve bazı örnek test sonuçları Şekil 30' da sunulmuştur. Testlerden betonun ortalama basma mukavemeti 66.35 MPa olduğu tespit edilmiştir. Kırılma şekil değiştirme değerleri ise  $\sim 0.0025$  seviyelerinde elde edilmiştir.



Şekil 30. Gerilme-şekil değiştirme eğrileri ( $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).

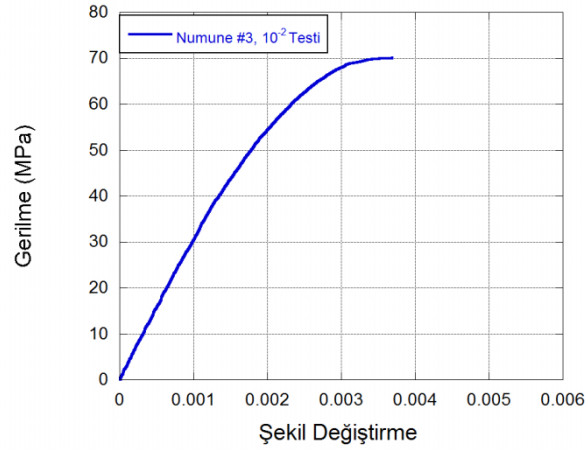


Şekil 31.  $10^{-2}$  testi statik deformasyon tarihçesi.

Hasarın başlangıcı ve ilerleyişi, testlerin video kamerayla kaydedilmesiyle incelenmiştir. Numune 2' ye ait  $10^{-2}$  testi, gerilme şekil değiştirme eğrisi üzerindeki dört farklı noktaya karşılık gelen numune deformasyonları

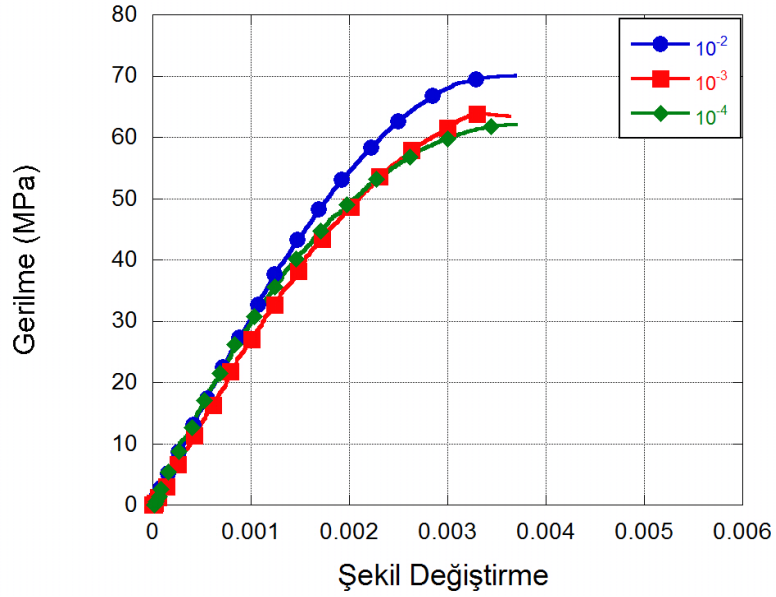
Şekil 31' de verilmiştir. Hasarın oluşumunda şekil değiştirme hızının artışıyla birlikte özellikle radyal yönde genişleme etkisi oldukça arttığı gözlenmiş olup numunenin sabit alt çeneye yakın olan bölgesindeki radyal deformasyon D noktasına ait şekilde bariz olarak görülmektedir.

Video ekstansometrenin kullanıldığı testlere ek olarak detayları daha önce açıklandığı gibi numune yüzeyine farklı oryantasyonlarda şekil değişim ölçerler yerleştirilerek testler de yapılmıştır. Şekil değişim ölçerlerden gelen şekil değiştirme değerinin kullanıldığı bir teste ait gerilme şekil değiştirme eğrisi Şekil 32' de verilmiştir. Bu test sonucu öncelerle tutarlılık göstermektedir.



Şekil 32. Şekil değişim ölçer kullanılmış teste ait gerilme şekil değişirme eğrisi.

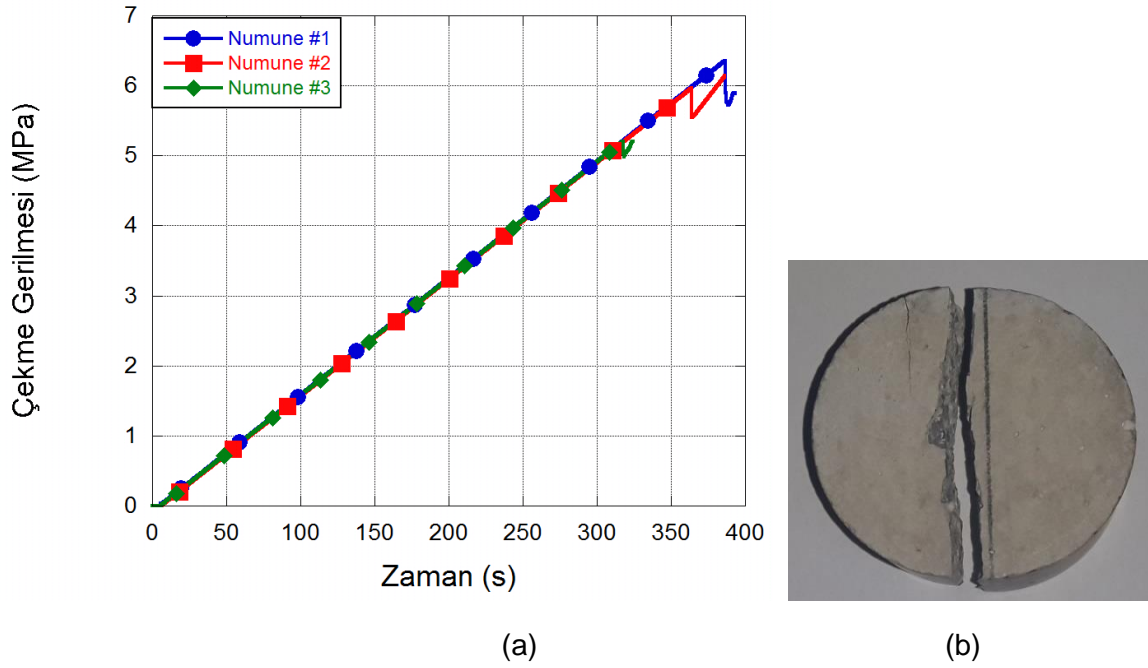
Farklı şekil değişirme hızlarına ait ortalama gerilme şekil değişirmesi eğrileri Şekil 33' te sunulmuştur. Basma mukavemeti şekil değişirme hızının artışıyla birlikte artmaktadır.



Şekil 33. Farklı şekil değişirme hızlarında gerilme şekil değişirme eğrileri.

Düşük şekil değiştirme hızlarındaki bir diğer test yöntemi olan yarmada çekme testleri ile beton numunesinin çekme gerilmesi mukavemeti elde edilmiştir. Deney sırasında numuneden elde edilmiş tipik gerilme zaman eğrisi ve hasar profili Şekil 34' te görülmektedir. Numunenin yükleme hızı standarda uygun olarak 1000 kPa/dk olarak seçilmiş ve çekme gerilmesi hesabı Denklem (6) kullanılarak yapılmıştır. Şekil 34 (a)' dan da görülebileceği gibi beton numunelerin çekme mukavemeti değeri ortalama 6 MPa olarak tespit edilmiştir. Şekil 34 (b)' de ise kırılan numuneye ait hasar profili sunulmuştur.

$$T = \frac{2P}{\pi LD} \quad (6)$$

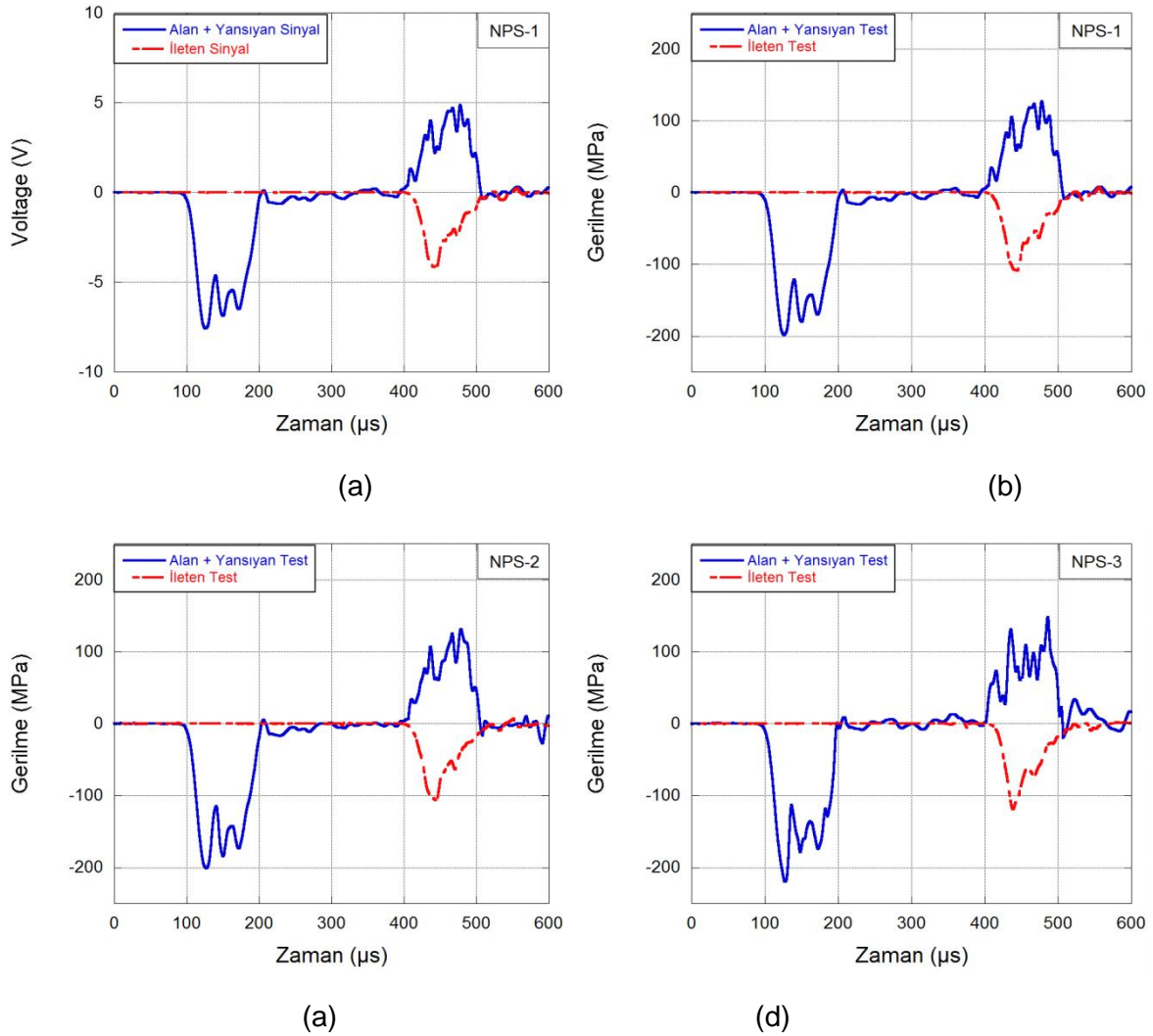


Şekil 34. (a) Çekme gerilmesi tarihçesi ve (b) beton numune hasar profili.

Klasik SHBB (no pulse shaper – NPS) test düzeneğinde çubuklar üzerine yerleştirilmiş şekil değişim ölçerlerden elde edilen sinyal tarihçelerine ait bir örnek Şekil 35 (a)' da sunulmuştur. Bu sinyallerden (voltaj) Denklem (7) kullanılarak şekil değiştirme tarihçeleri hesap edilmiştir. SHBB deneyi sırasında çubuklardaki gerilme seviyelerinin elastik bölgede kalması testlerin geçerliliği açısından en önemli şartlardan birisidir. Çubuklar içerisinde ilerleyen gerilme tarihçesinin elde edilmesi için şekil değiştirme tarihçeleri elastiklik modül değerleriyle çarpılmıştır, Şekil 35 (b-d).

$$\varepsilon(t) = \frac{2 \times V(t)}{V_{exc} \times GF \times K_{gain} \times (1 + \nu)} \quad (7)$$

Bu denklemde  $V(t)$ ,  $V_{exc}$ ,  $GF$ ,  $K_{gain}$ ,  $\nu$  sırasıyla; şekil değiştirme ölçerden elde edilen sinyali, şekil değiştirme ölçer besleme gerilimini (volt) ve katsayısını, yükseltici değerini ve alüminyum poisson oranını temsil etmektedir.



Şekil 35. Klasik SHBB testlerinde (a) sinyal ve (b-d) gerilme tarihçeleri.

SHBB deney sonuçlarında (şekil değiştirme tarihçelerinde) tek boyutlu dalga ilerleyişi teorisi dikkate alınarak malzemenin dinamik gerilme şekil değiştirme eğrilerinin elde edilebilmesi mümkündür. Bu amaçla 8, 9, 10 ve 11 no' lu denklemler kullanılarak numunenin ön ve arka yüzeyindeki gerilmeler ve numuneye ait şekil değiştirme değerleri hesap edilebilmektedir. Bu

denklemlerde kullanılan  $E$ ,  $A$ ,  $A_s$ ,  $\varepsilon_i$ ,  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_t$  sırasıyla: elastik modül, çubuk alanları, numune alanı ve alan, yansıyan ve ileten şekil değiştirmeyi temsil etmektedir. Denklem (11)'deki  $c_0$  elastik dalga hızını,  $l_0$  ise numune boyunu ifade etmektedir.

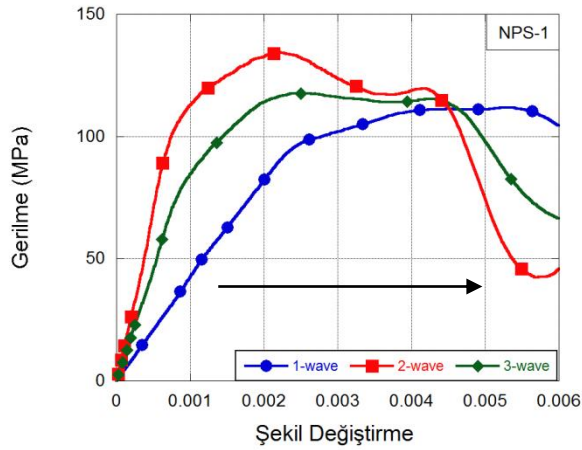
Denklem (9)'daki sonuçlar kullanılıp tek bir dalgadan (transmitter) yararlanılırsa bu analize 1-wave analizi adı verilmektedir. Şayet Denklem (8) ve Denklem (10) kullanılacak olursa bu durumdaki analizlere sırasıyla 2-wave ve 3-wave analizleri denilmektedir.

$$\sigma_{s1} = E \frac{A}{A_s} (\varepsilon_i + \varepsilon_r) \quad (8)$$

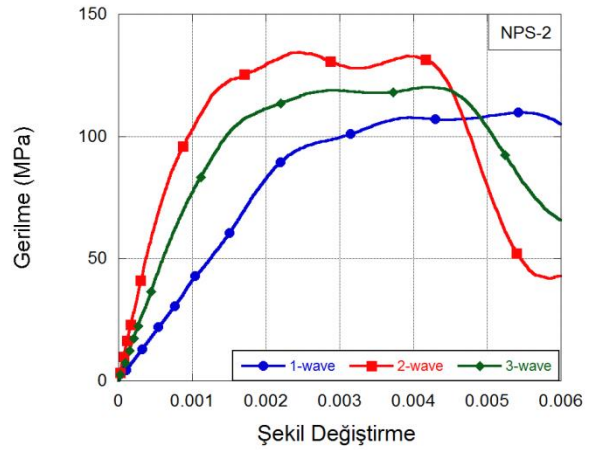
$$\sigma_{s2} = E \frac{A}{A_s} (\varepsilon_t) \quad (9)$$

$$\sigma_s = E \frac{A}{2A_s} (\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \quad (10)$$

$$\varepsilon_s = \frac{c_0}{l_0} \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) dt \quad (11)$$

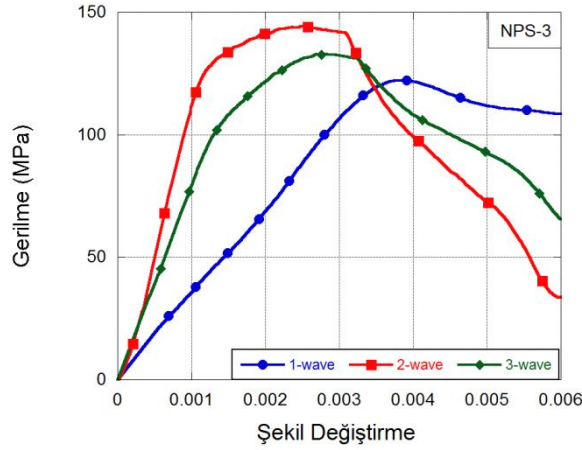


(a)



(b)



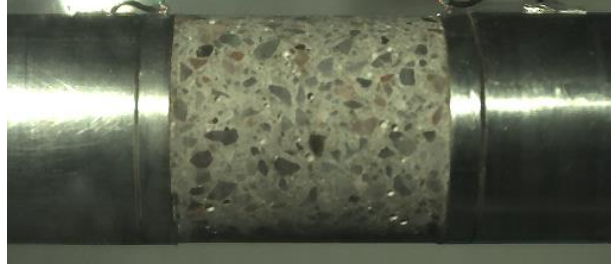


(c)

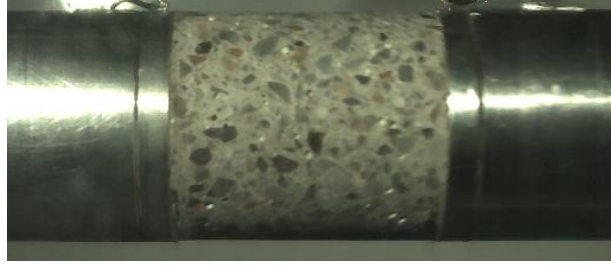
Şekil 36. Gerilme dalgası şekillendiricisiz testlerde gerilme şekil değiştirme eğrileri.

Şekil 36' da gerilme dalgası şekillendiricisi kullanılmamış SHBB test sonuçları sunulmuştur. 1-wave analizi temelde numunenin ön ve arka yüzelerindeki gerilmelerin birbirine eşit olduğunu yani numune içerisinde gerilme dengesinin oluştuğunu varsaymaktadır. Bu sebeple gerilmenin hesabında sadece arka yüzey kuvveti dikkate alınmıştır. Gelen ve yansıyan dalgaların momentum dengesi dikkate alınarak numunenin ön yüzeyindeki gerilme de hesap edilebilmektedir ve buna 2-wave analizi denilmektedir. Özellikle yüklemenin başlangıcında numunenin içerisinde gerilme dengesine hemen erişilmez. Bu durumun sebebi yüklemenin numunenin ön yüzeyinde başlaması ve arka yüzeyin hala sabit olarak kalmasıdır. Bu sebeple gerilme dengesinin oluşması için numunenin içerisinde gerilme dalgasının belirli sayıda gidip gelmesi gerekmektedir. Ayrıca alan ve yansıyan dalgalar önemli miktarda osilasyon içermektedir ve bu durumda elde edilen gerilme seviyeleri sadece ileten dalganın dikkate alınması durumuna göre daha fazla miktarda değişim göstermektedir. Bu sebeple temelde numunenin her iki yüzeyindeki gerilmenin ortalamasını kullanan 3-wave analizi uygulanabilir. Şekilden de görüleceği gibi 1-wave ve 2-wave analizlerinin ortalaması 3-wave analizidir. Gerilme dalgası şekillendiricinin kullanılmadığı bu testlerde 1, 2 ve 3-wave analiz sonuçları oldukça farklılık göstermektedir.

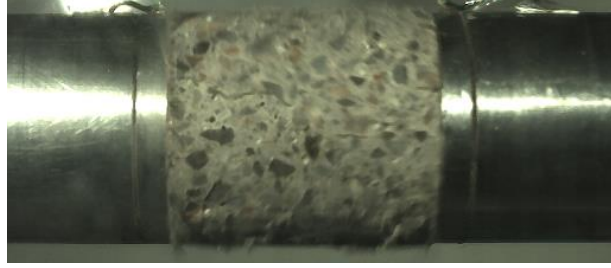
Şekil 37' de gerilme dalgası şekillendiricisi kullanılmayan beton testine ait yüksek hızlı kamera kaydı sunulmuştur. Yüksek hızlı kamera kayıtlarında numunenin sağında görülen çubuk, alan çubuktur ve gerilme dalgası bu çubuk üzerinden numuneye iletilmektedir. Yani gerilme dalgası sağdan sola doğru ilerlemektedir. Gerilme dalgasının numune içerisinde ilerlemeye başlamasıyla birlikte numunede eksenel ve radyal çatlak oluşumu meydana gelmiş olup, deformasyon ve zamanın ilerleyişiyle birlikte numune parçalanmaktadır.



0 mikrosaniye



66 mikrosaniye



132 mikrosaniye



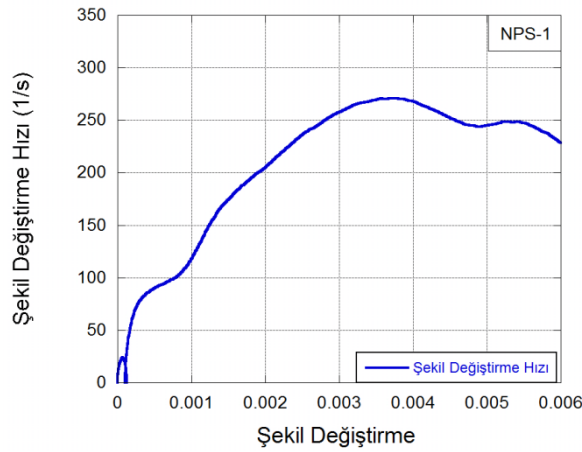
198 mikrosaniye



594 mikrosaniye

Şekil 37. NPS-1 testine ait hasar tarihçesi (15000 fps).

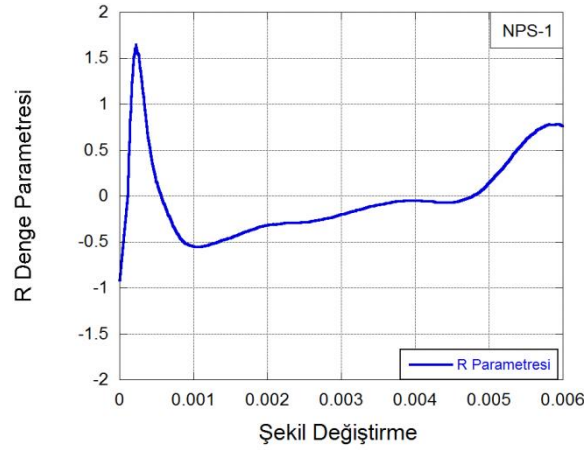
Şekil 38' den de görüleceği gibi deformasyonun başlangıcıyla birlikte şekil değiştirme hızı ani bir artış göstermektedir. Beton gibi gevrek karakterli bir malzeme için şekil değiştirme hızındaki bu tarz ani artışlar tam olarak gerilme dengesi sağlanamadan numunelerde prematüre kırılma eğilimini artırmaktadır. Bu sebeple genellikle deneylerde şekil değiştirme hızlarının artış hızının sabit ve daha düşük seviyelerde kalması gevrek karakterli malzemelerin testlerindeki başarıyı artırmaktadır. Gerilme dalgası şekillendirici kullanımı yukarıda bahsi geçen şekil değiştirme hızı artış hızlarının azaltılması ve sabit seviyelerde tutulması amacıyla kullanılmıştır.



Şekil 38. NPS-1 testine ait şekil değiştirme hızının şekil değiştirmeye bağlı değişimi.

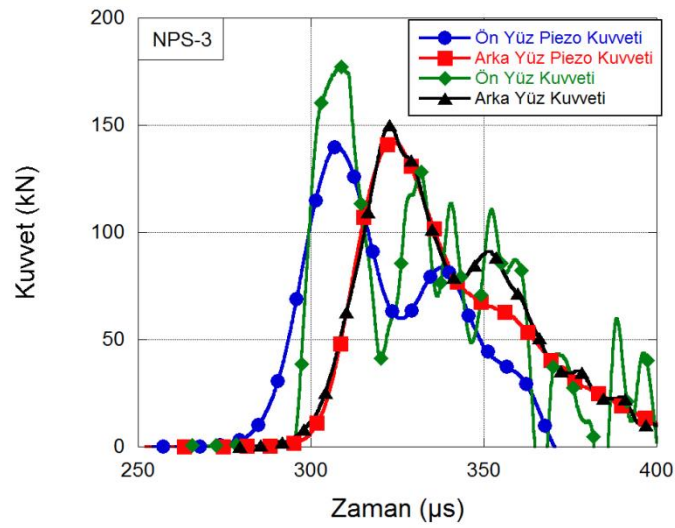
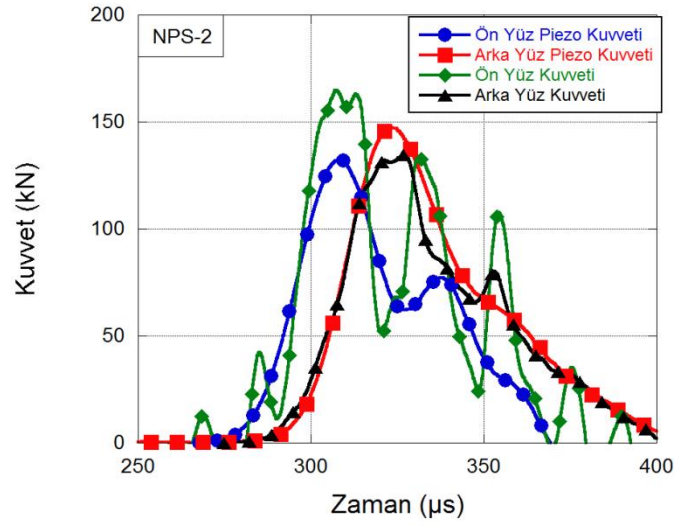
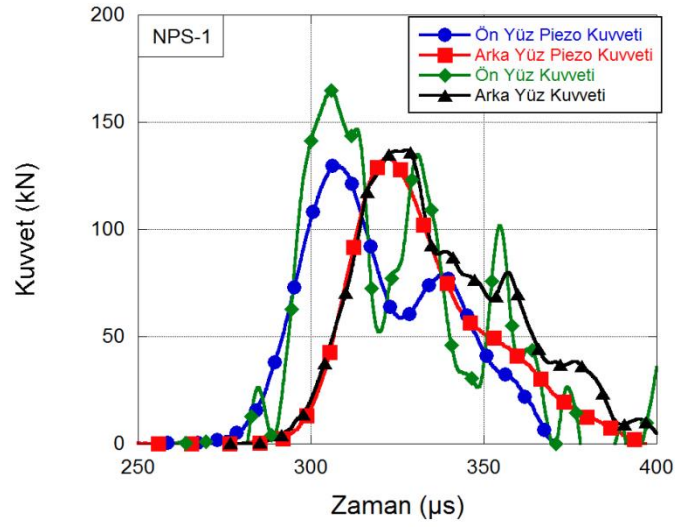
Numune içerisindeki gerilme dengesinin tayininde R denge parametresi kullanılmaktadır. Bu parametre aşağıdaki formülle (Denklemler 12) hesaplanmaktadır. Bu formülde  $F_1$  numune ön yüzey kuvvetini ve  $F_2$  ise arka yüzey kuvvetini temsil etmektedir. R parametresi sıfır değerine yaklaştıkça numune içerisinde gerilme dengesi artmaktadır.

$$R = -\frac{2(F_1 - F_2)}{F_1 + F_2} \quad (12)$$

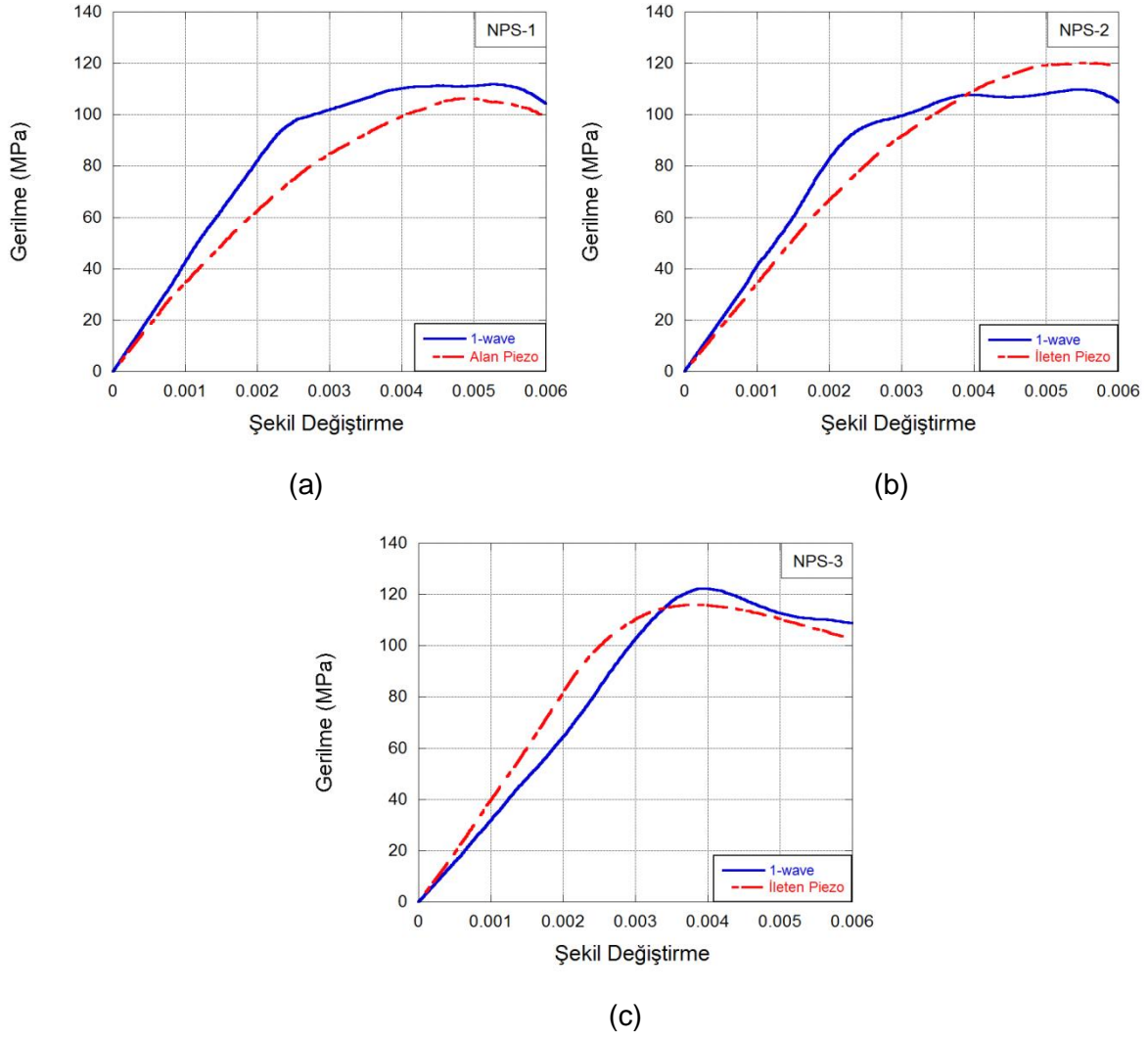


Şekil 39. R parametresinin şekil değiştirmeye bağlı değişimi.

Şekil 40 (a-c)' de üç farklı dalga şekillendiricisi kullanılmayan testlerde alan ve ileten çubuklardan hesaplanan numune ön ve arka yüzey kuvvetleri ile bu çubukların numuneye bakan yüzeylerine yerleştirilmiş olan piezoelektrik kuartz kristallerden okunan kuvvet değerleri karşılaştırılmıştır. Grafiklerden de gözlemlenebileceği gibi alan çubuk (ön yüzey piezo) ile ileten çubuk (arka yüzey piezo) üzerindeki piezoelektrik kristallerden elde edilen kuvvetler arasında bir zaman farkı görülmektedir. Bu zaman farkı (yaklaşık 14 mikro saniye) gerilme dalgasının numune içerisindeki ilerleyişinden kaynaklanmaktadır. Kristaller ve çubuklardan elde edilen kuvvetler incelendiğinde özellikle çubuklardan elde edilen ön yüzey kuvvetinin ilk pik değerinin kristallerden elde edilen değerlerden yüksek çıktığı ve oldukça yüksek seviyede osilasyon içerdiği görülmektedir. Buna karşın ön yüzeydeki piezoelektrik kristallerden daha hassas ve gürültüsüz kuvvet tarihçesinin okunabilmesi mümkün olmuştur. Arka yüzeydeki kuvvetler dikkate alındığında tepe değerlerinin çubuklardan ve kristallerden elde edilen kuvvet tarihçeleri açısından birbirleriyle uyumlu olduğu fakat yine arka yüzeyde bulunan piezoelektrik kristalinden daha hassas ve gürültüsüz bir sinyalin kaydedilebildiği bütün testlerinden görülebilmektedir. Bu durum beton gibi gevrek karakterli bir malzemenin dinamik mekanik karakterizasyonunda kuartz kristal kullanımının ne derece önemli olduğunu göstermiştir. Kuartz kristal kullanımıyla numune içerisindeki gerilme dengesinin tayini daha hassas ve doğru bir şekilde yapılabilmüş yine benzer şekilde betona ait dinamik gerilme şekil değiştirme eğrileri daha doğru ve hassas şekilde elde edilmiştir, Şekil 41.



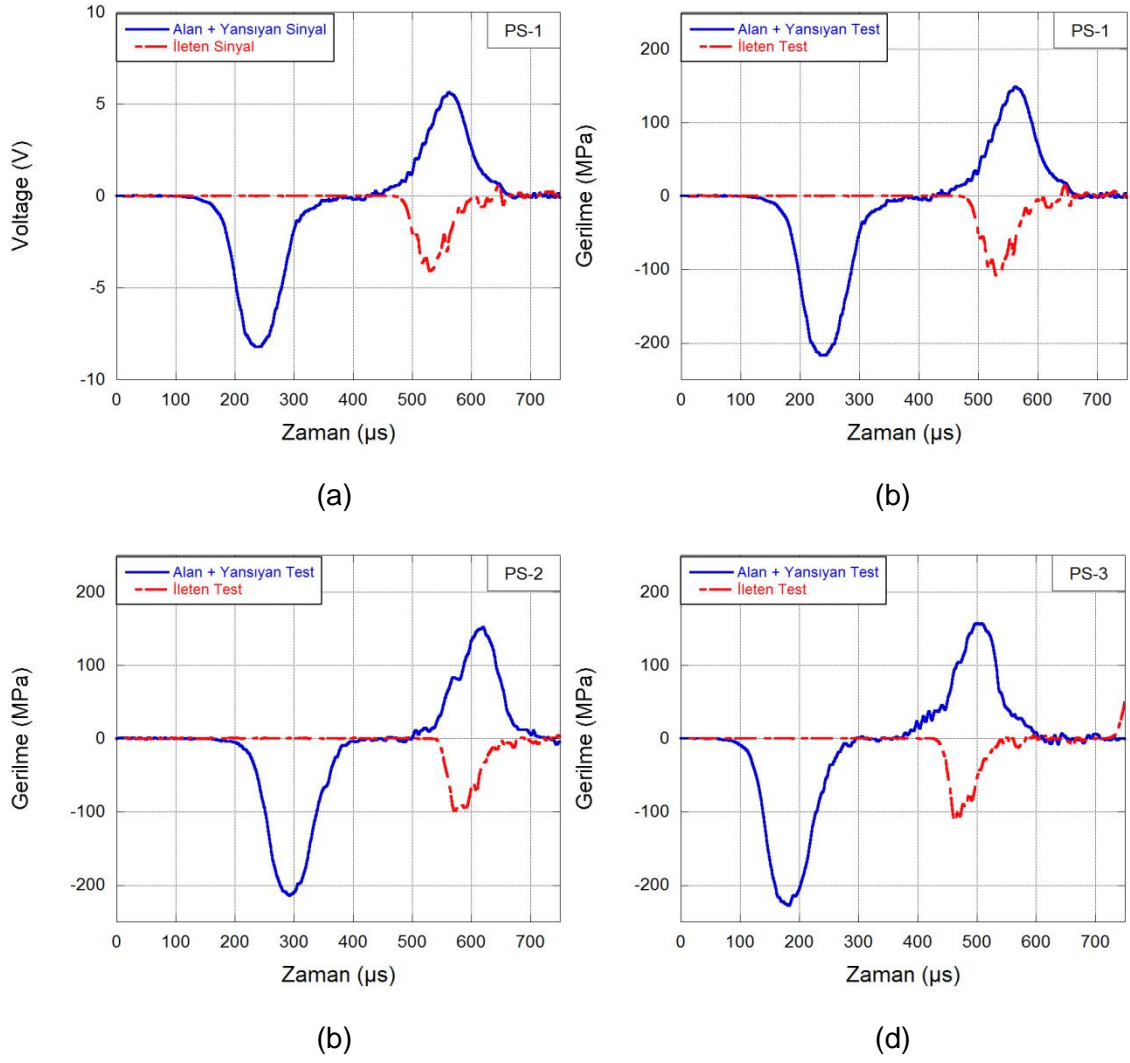
Şekil 40. Numune ön-arka yüzey kuvvetlerinin piezoelektrik kristal ve çubuk datası ile incelemesi.



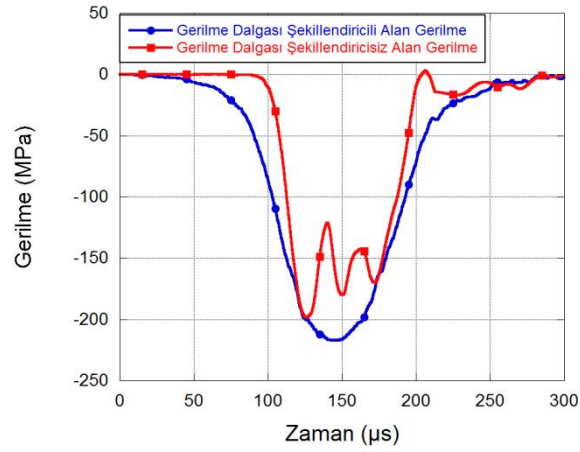
Şekil 41. Kristallerden elde edilen gerilmeler ile şekil değişim ölçerlerden elde edilen gerilmelerin karşılaştırılması.

SHBB testlerine gerilme dalgası şekillendiricilerin kullanıldığı (pulse shaper – PS) testlerle devam edilmiştir. Çubuklar üzerine yerleştirilmiş şekil değişim ölçerlerden elde edilen tipik sinyal tarihçesi Şekil 42 (a)' da sunulmuştur. Gerilme dalgası şekillendiricinin kullanılması durumunda alan gerilme dalgasındaki osilasyonun, kullanılmaması durumundaki osilasyona göre son derece azaldığı (Şekil 43) ve oldukça temiz (gürültüsüz) bir sinyalin numuneye sevk edildiği görülmektedir. Yine benzer şekilde yansıyan ve ileten sinyallerdeki osilasyon miktarları da oldukça azalmıştır. Aynı şekilde gerilme dalgası kullanılması durumunda gerilmenin artış hızındaki azalma Şekil 43' te görülmektedir. Bu durum daha önceden de bahsedildiği gibi gevrek karakterli malzemelerde prematüre kırılma eğilimini azaltmakta ve numune içerisinde gerilme dengesi oluşumunu hızlandırmaktadır. Böylece daha doğru ve hassas ölçümler yapabilmek mümkün olmaktadır.



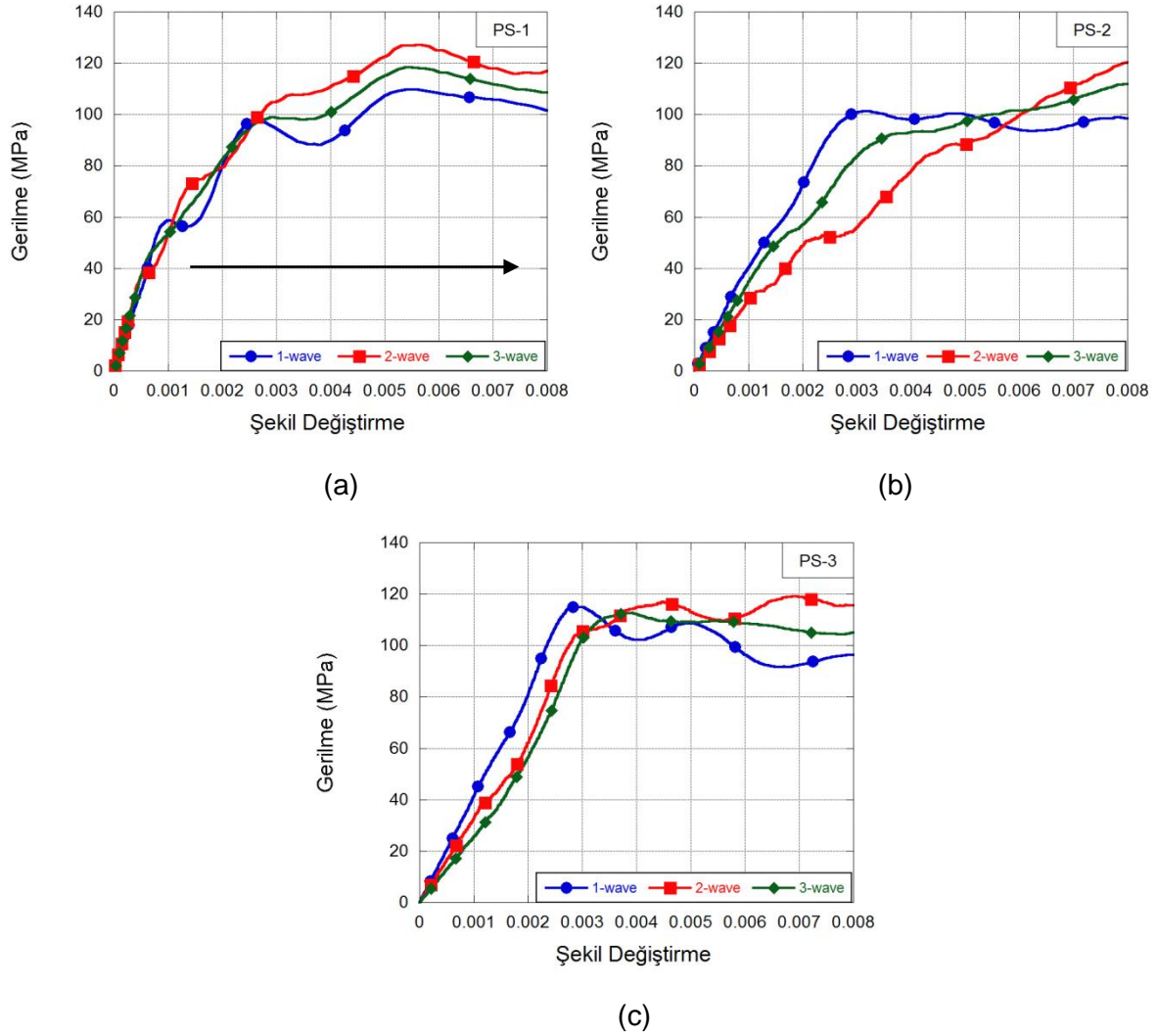


Şekil 42. Gerilme dalgası şekillendiricili SHBB testlerinde (a) sinyal ve (b-d) gerilme tarihçeleri.



Şekil 43. Gerilme dalgası şekillendiricinin alan gerilme üzerine etkisi.

Daha önce detayları açıklandığı üzere gerilme dalgası şekillendiricisi kullanılması durumundaki 1, 2 ve 3-wave çözümleri Şekil 44' te verilmiştir. Şekil 36 ve 32 kıyaslandığında 1, 2 ve 3-wave çözümleri sonucunda elde edilen gerilme şekil değiştirme eğrilerinin birbirlerine oldukça yaklaştığı ve benzer sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Yine bu durum numune içerisinde gerilme dengesine hızlıca ulaşıldığı ve bu durumun deformasyon boyunca korunduğunu teyit etmektedir.

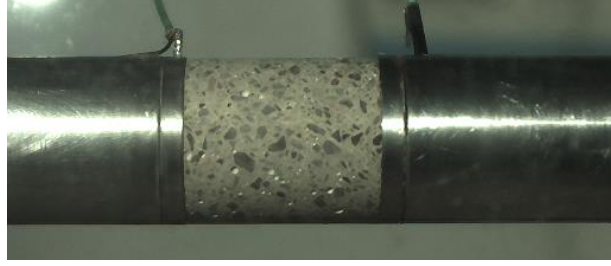


Şekil 44. Gerilme dalgası şekillendiricili testlerde gerilme şekil değiştirme eğrileri.

Şekil 45' te gerilme dalgası şekillendiricisi kullanılmayan bir beton testine ait yüksek hızlı kamera kaydı sunulmuştur. Yüksek hızlı kamera kayıtlarında numunenin sağında görülen çubuk alan çubuktur ve gerilme dalgası bu çubuk üzerinden numuneye iletilmektedir. Yani



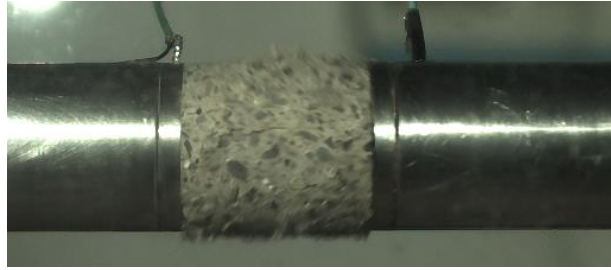
gerilme dalgası sağdan sola doğru ilerlemektedir. Gerilme dalgasının numune içerisinde ilerlemeye başlamasıyla birlikte numunede aksenal ve radyal çatlak oluşumu meydana gelmiş olup, deformasyon ve zamanın ilerleyişiyle birlikte numune parçalanmaktadır.



0 mikrosaniye



66 mikrosaniye



132 mikrosaniye

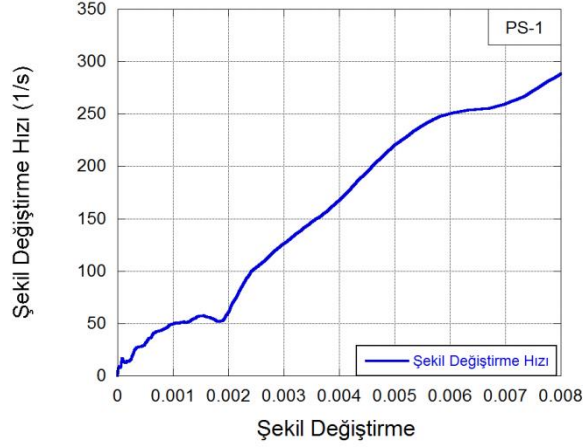


198 mikrosaniye



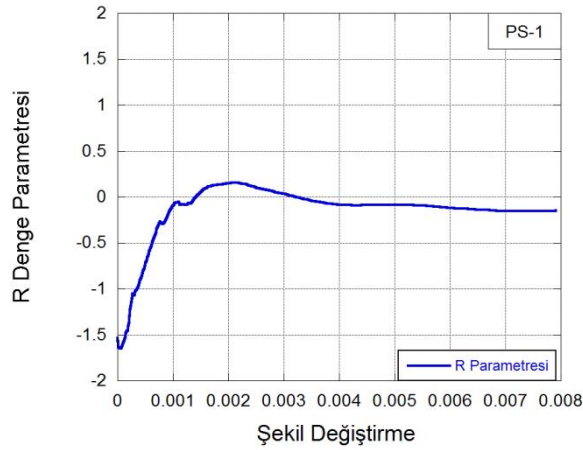
462 mikrosaniye

Şekil 45. PS-1 testine ait hasar tarihçesi (15000 fps).



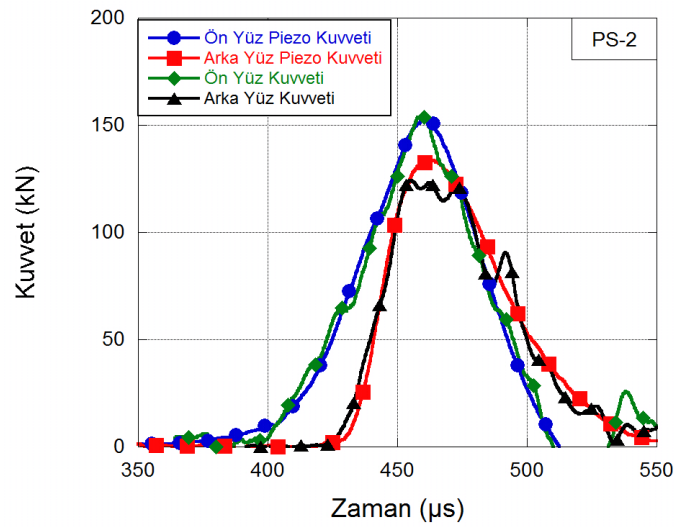
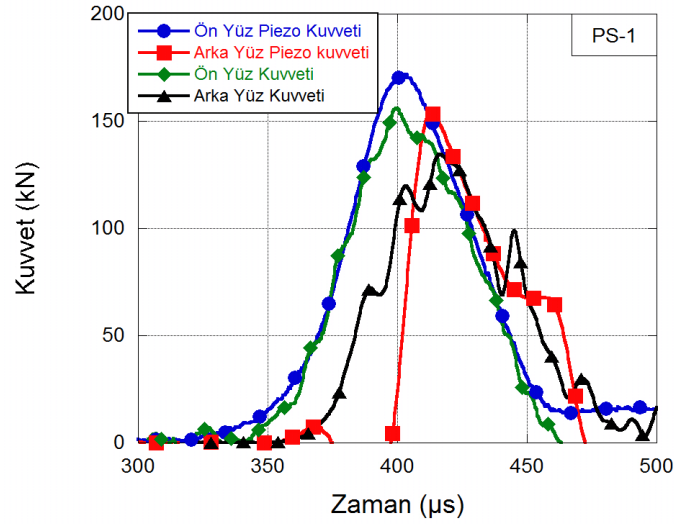
Şekil 46. PS-1 testine ait şekil değiştirme hızının şekil değiştirmeye bağlı değişimi.

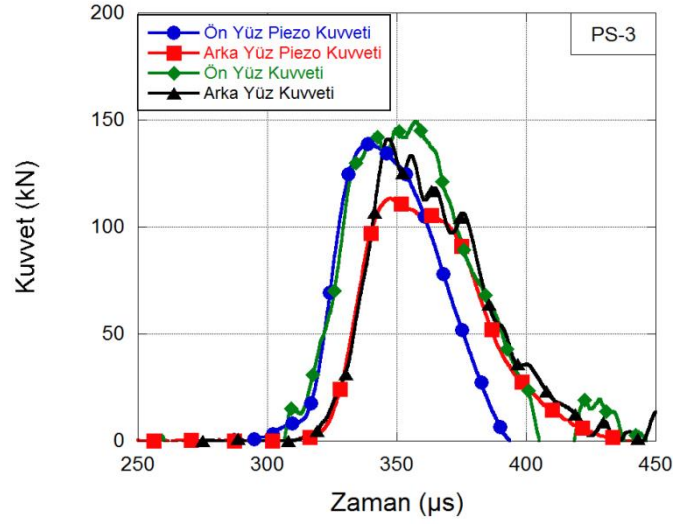
Şekil 46' da şekil değiştirme hızının şekil değiştirmeye karşı değişimi çizilmiştir. Şekil 38 ile karşılaştırıldığında şekil değiştirme hızı artış hızının azaldığı ve deformasyon sırasında hemen hemen sabit seviyelerde kaldığı görülmektedir. Bu durum gevrek karakterli beton malzemelerde gerilme dengesinin sağlanmasına ve premature kırılmaların önlenmesine yardımcı olmaktadır. Şekil 47' de R denge parametresinin şekil değiştirmeye bağlı şekil değişimi sunulmuştur. Şekilden de görülebileceği gibi deneyin başlangıcından itibaren numune içerisinde gerilme dengesine hızlıca ulaşılmış olup bu durum numune kırılana kadar sürmüştür.



Şekil 47. R parametresinin şekil değiştirmeye bağlı değişimi.

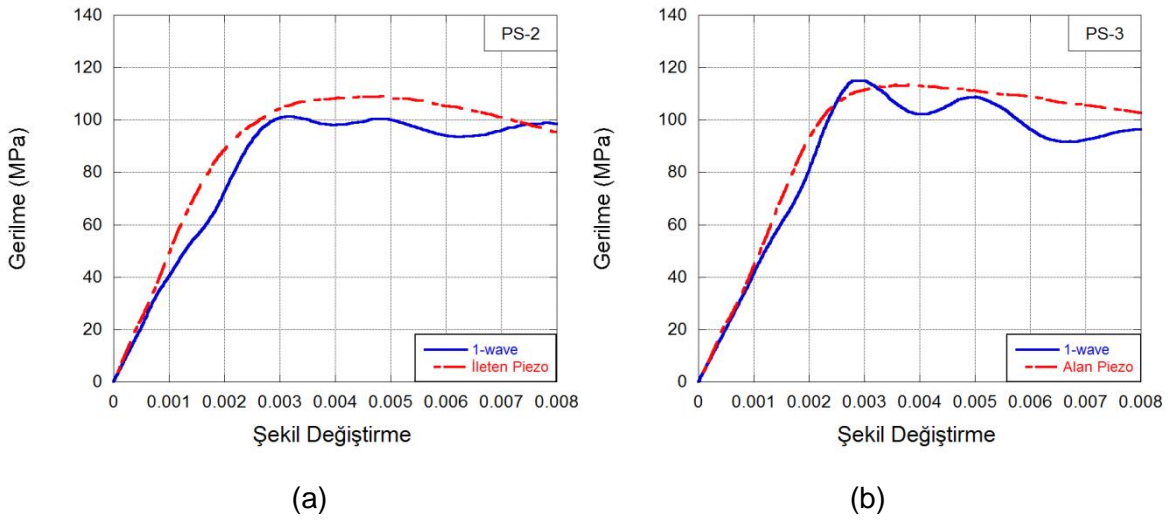
Şekil 48 (a-c)' de üç farklı test için alan ve ileten çubuklardan hesaplanan numune ön ve arka yüzey kuvvetleriyle numune ara yüzeylerine yerleştirilmiş olan piezoelektrik kristallerinden okunan kuvvet değerlerinin zamana bağlı değişimi verilmiştir. Şekillerden de görülebileceği gibi gerilme dalgası şekillendirici kullanılması durumunda ön ve arka yüzeyler arasındaki kuvvet değerleri arasındaki fark azalmaktadır. Yine her iki sinyal içerisindeki gürültü miktarı azalmakla birlikte piezoelektrik kristallerden elde edilen değerler ile çubuklardan hesaplanan kuvvet değerleri birbirlerine yaklaşmaktadır.





Şekil 48. Numune ön-arka yüzey kuvvetlerinin piezoelektrik kristal ve çubuk datası ile incelemesi.

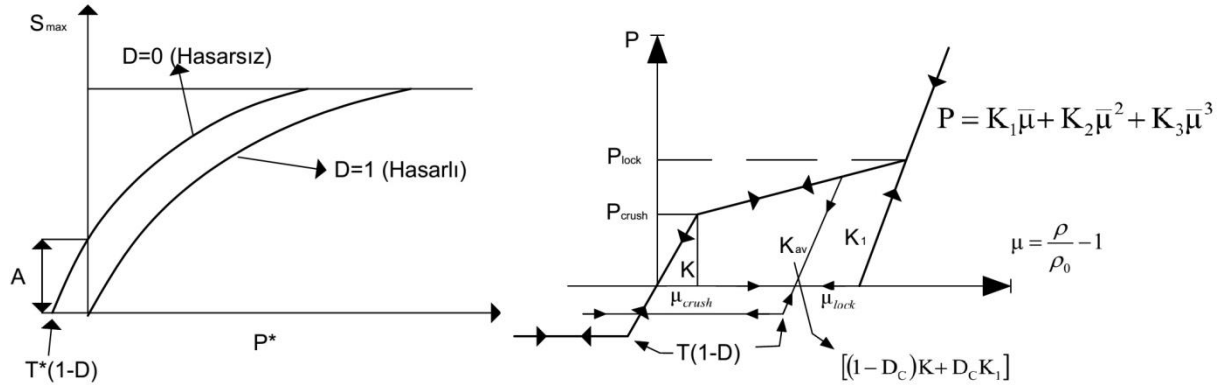
Şekil 49 (a ve b)' de piezoelektrik kristallerden gelen kuvvet datası kullanılarak hesaplanmış gerilme değerleri ile yine şekil değişim ölçerlerden gelen dataların kullanılmasıyla elde edilen gerilme değerlerinin şekil değiştirmeye bağlı değişimleri sunulmuştur. Dalga şekillendirici kullanılması durumunda eğrilerdeki osilasyonlar azalmaktadır fakat bu azalma hiçbir zaman kuartz kristallerden elde edilebilen hassas ve oldukça gürültüsüz değerler seviyesine ulaşamamaktadır. Ayrıca kuartz kristal kullanımı ile birlikte numunenin hem ön hem de arka ara yüzeyindeki kuvvet datalarının ölçümüyle gerilme tarihçesi doğru bir şekilde hesap edilebilmektedir, (Şekil 49 a ve b).



Şekil 49. Kristallerden elde edilen gerilmeler ile şekil değiştirme ölçerlerden elde edilen gerilmelerin karşılaştırılması.

## 4.2 Malzeme Modeli Sabitlerinin Doğrulanması

Proje kapsamında yürütülecek nümerik modelleme çalışmalarında Johnson Holmquist Beton (JHC) malzeme modeli kullanılmıştır. Bu malzeme modeli elastik-viskoplastik karakterli olup; yüksek deformasyon (şekil değiştirme), yüksek şekil değiştirme hızlarına ve yanal basınca maruz kalan beton malzemelerin modellenmesine oldukça uygundur. Ayrıca bu malzeme modelinde hidrostatik ve deviatorik gerilmeler yalnızca yanal basıncın fonksiyonu olarak değil; şekil değiştirme hızı ve hasarın fonksiyonu olarak da ifade edilebilmektedir. Şekil 50' in düşey eksenindeki  $\sigma^*$  ifadesi, anlık gerilmenin betonun statik basma dayanımına normalize edilmiş halini ( $\sigma/f_c'$ ) ve yatay eksendeki  $P^*$  ise anlık yanal basıncın betonun statik basma dayanımına normalize edilmiş halini ( $p/f_c'$ ) temsil etmektedir. Diğer taraftan Denklem (13)' te, A normalize kohezyon dayanımı, B ve N normalize kırılma malzeme dayanımını, C ise şekil değiştirme hızı hassasiyetini ifade eden mukavemet denklemi parametreleri olup, D hasar parametresini,  $\varepsilon^*$  ise birimsiz (referans şekil değiştirme hızına göre normalize edilmiş) şekil değiştirme hızını ifade etmektedir.



Şekil 50. JHC modelin deviatorik gerilme ve normalize edilmiş yanal basınç altında grafiki gösterimi (solda) ve JHC modeli basınç-hacim (sıkışma) etkileşimi (sağda) [2].

JHC malzeme modelinde hasar için skalar bir formülasyon önerilmiştir ve bu modelde önerilen hasar tipi eşdeğer plastik şekil değiştirme ve plastik volumetrik şekil değiştirme kaynaklı hasar ile ifade edilmiştir. Hasar fonksiyonu Denklem (14)' te sunulmuştur [3]. Bu denklemde  $\Delta\mu_{eq}^p$ , eşdeğer plastik volumetrik şekil değiştirmeyi ve  $\Delta\varepsilon_{eq}^p$  ise eşdeğer plastik şekil değiştirme artışıdır. Son olarak  $\varepsilon_p^f + \mu_p^f$  ise belirli sabit bir yanal basınç altında malzemenin kırılmasına kadar olan plastik şekil değiştirmeyi göstermektedir.

$$\sigma^* = [A(1 - D) + BP^{*N}][1 + C \ln \varepsilon^*] \leq S_{\max} \quad (13)$$

$$\Delta D = \frac{\Delta \varepsilon_{eq}^p + \Delta \mu_{eq}^p}{\varepsilon_p^f + \mu_p^f} \quad (14)$$

$$\bar{\mu} = \frac{\mu - \mu_{lock}}{1 + \mu_{lock}} \quad (15)$$

$$K_{elastic} = P_{crush} / \mu_{crush} \quad (16)$$

$$P = K_1 \bar{\mu} + K_2 \bar{\mu} + K_3 \bar{\mu} \quad (17)$$

$$P_{crush} = f_c / 3 \quad (18)$$

$$\mu_{crush} = P_{crush} / K_{elastic} \quad (19)$$

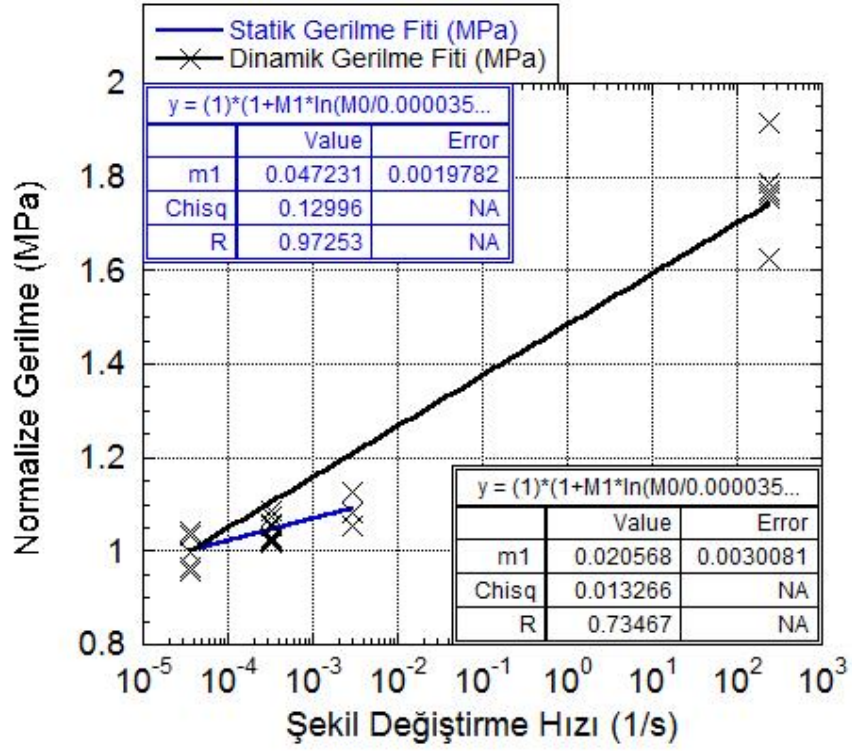
$$\mu_{lock} = (\rho_{tane} / \rho_{beton}) \quad (20)$$

Diğer taraftan betonun basınç-hacim ilişkisi de (sıkışma) bu modelde hesaba katılmaktadır (Şekil 50). Bu şekilde yatay eksen  $\mu$  volumetrik şekil değiştirmeyi, dikey eksen  $P$  ise anlık basıncı vermektedir. Basıncın şekil değiştirmeye göre değişimi grafikten de görülebileceği üzere üç bölgede ele alınmıştır. Bunlar sırasıyla: (1) lineer elastik bölge ( $P \leq P_{crush}$ ) veya aynı zamanda elastik hacim modülüyle ifade edilebilen bölgedir, Denklem 16 , (2) geçiş bölgesi  $P_{crush} \leq P \leq P_{lock}$ , burada hava boşlukları aşamalı olarak beton malzemeyi terk eder ve sonuçta plastik volumetrik şekil değişim artışı gözlemlenir, (3) hava boşluksuz tamamen sıkışmış bölge  $P \geq P_{lock}$  olarak tanımlanmakta ve basınç fonksiyonu da Denklem 17 ile ifade edilmektedir. Geliştirilmiş volumetrik şekil değişimi ( $\bar{\mu}$ ) ise Denklem (15) ile sunulmuştur.

Malzeme modelinin parametrelerinin tespiti amacıyla yapılacak çalışmaya öncelikli olarak betonun fiziksel özellikleri ile başlanmıştır. Bu amaçla yoğunluk (öz kütle) tespiti yapılmıştır. Yoğunluk hesabı için ağırlıkları ve hacimleri ölçülmüş silindirik beton numuneler kullanılmıştır ve ortalama yoğunluk değeri  $2183 \text{ kg/m}^3$  olarak elde edilmiştir.

Statik testler sonucunda beton malzemenin en düşük şekil değiştirme hızı olan  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  de ortalama basma mukavemet değeri 62 MPa olarak tespit edilmiştir. Beton malzemenin elastiklik modülü tespiti çalışmalarında ise ACI 318-08 yönetmeliğine uygun olarak yapılan hesaplamalar sonucunda ortalama beton elastiklik modülü 32 GPa olarak bulunmuştur. Kayma (G) modülü ise 13.32 GPa olarak hesap edilmiştir. Ayrıca proje önerisinde daha önceden belirtildiği üzere mukavemet denklemi parametrelerinden A ve N literatür değerleri olarak alınmıştır [3]. Son olarak basınç parametreleri Denklem 18, 19 ve 20 kullanılarak hesaplanmıştır. Malzeme modeli sabitleri Tablo 5' te özetlenerek sunulmuştur.

Bu çalışmanın en önemli sonuçlarından birisi de beton malzemenin şekil değiştirme hızı hassasiyetinin ortaya konmasıdır. Bu amaçla statik ve dinamik basma testleri sonuçları kullanılmıştır Şekil 51' de farklı şekil değiştirme hızlarına karşılık gelen normalize basma mukavemeti değerlerinin değişimi sunulmuştur. JHC beton malzeme modelinde şekil değiştirme hızının normalize gerilme üzerindeki etkisi  $1 + C^* \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_{ref})$  fonksiyonu ile tanımlanmıştır. Burada  $\epsilon_{ref}$  statik bölgede yapılan testlerdeki en düşük şekil değiştirme hızıdır ( $3.55e-5$ ). Şekil 51' de bu fonksiyona bütün test sonuçlarının fiti ve sadece statik bölgedeki test sonuçlarının fiti yapılmış ve C şekil değiştirme hızı hassasiyeti sabiti statik ve tüm bölgeleri kapsayacak şekilde hesap edilmiştir.  $C_{statik}$  sadece statik testlerin dikkate alındığı  $C_{dinamik}$  ise hem statik hem dinamik testlerin dikkate alındığı sabitlerdir. Yüksek şekil değiştirme hızlarının etkisinin artışıyla birlikte beton malzemede basıncın fonksiyonu olan gerilmede artış meydana gelmektedir. Bu noktada en önemli husus dinamik deformasyon sırasında mekanik özelliklerdeki artışın malzemenin şekil değiştirme hızı hassasiyeti etkisi ile birlikte bu bahsi geçen basınç etkisinin de devreye girmesidir. Dinamik testlerin (SHBB) nümerik modellerinin oluşturulması oldukça kritik bilgilerin elde edilebilmesine imkân sağlayacaktır. Yani statik şekil değiştirme hızı hassasiyeti parametresiyle birlikte basınç artışı etkisinin de hesaba katılması ve dinamik şekil değiştirme hızı hassasiyetiyle birlikte basınç artışı etkisinin hesaba katılması sonrasında elde edilecek sonuçların deneysel datalar ile kıyaslanması hangi şekil değiştirme hızı hassasiyeti parametresinin daha doğru ve hassas sonuçlar vereceğini ortaya koyacaktır.



(b)

Şekil 51. (a)  $C_{statik}$  ve  $C_{dinamik}$  fitleri.

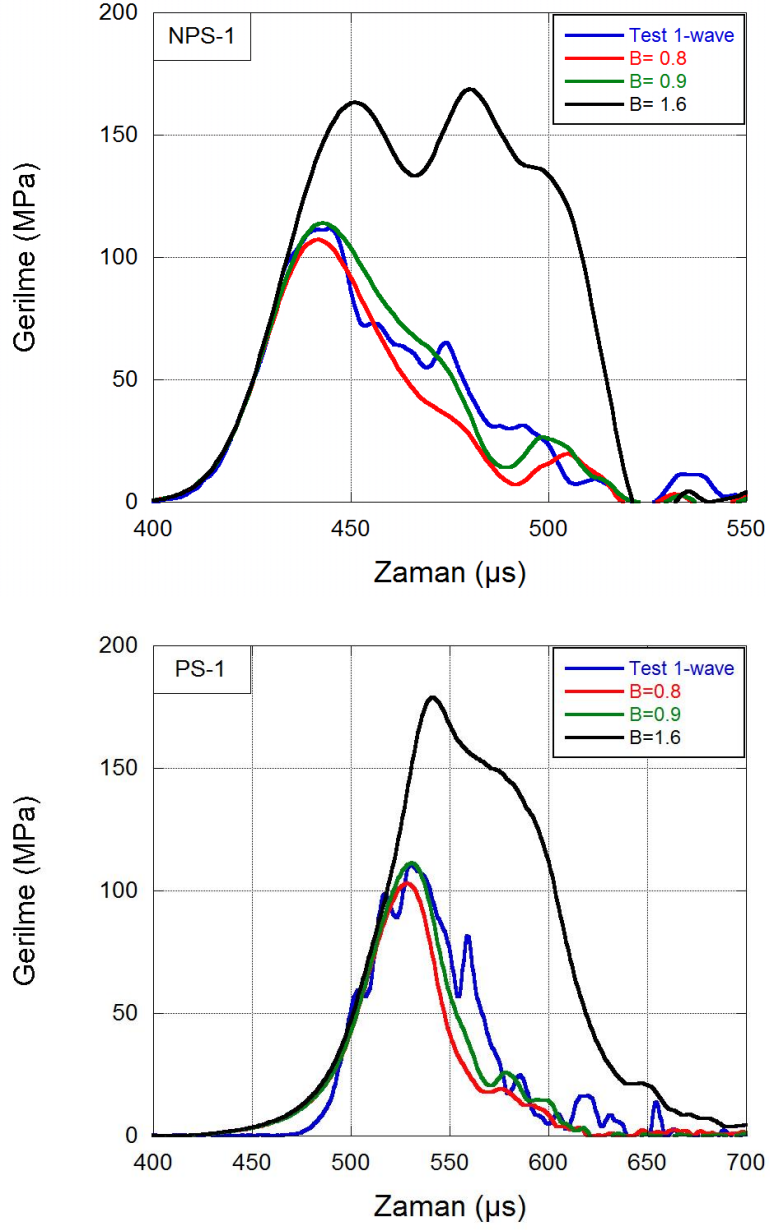
Nümerik modelleme çalışmalarına öncelikli olarak gerekli olan malzeme modeli parametre setinin tamamlanması amacıyla C parametresinin etkinliğini ve B parametresinin tespiti için çalışmalarla başlanmıştır.

Malzeme modelindeki diğer bütün parametreler sabit tutularak B parametresine farklı değerler atanmış ve elde edilen iletilen dalgalar deneysel sonuç ile karşılaştırılmıştır. Gerilme dalgası şekillendiricisiz ve şekillendiricili deneylere en yakın sonuçlar B değerinin 0.9 alındığı durumda elde edilmiştir, Şekil 52.

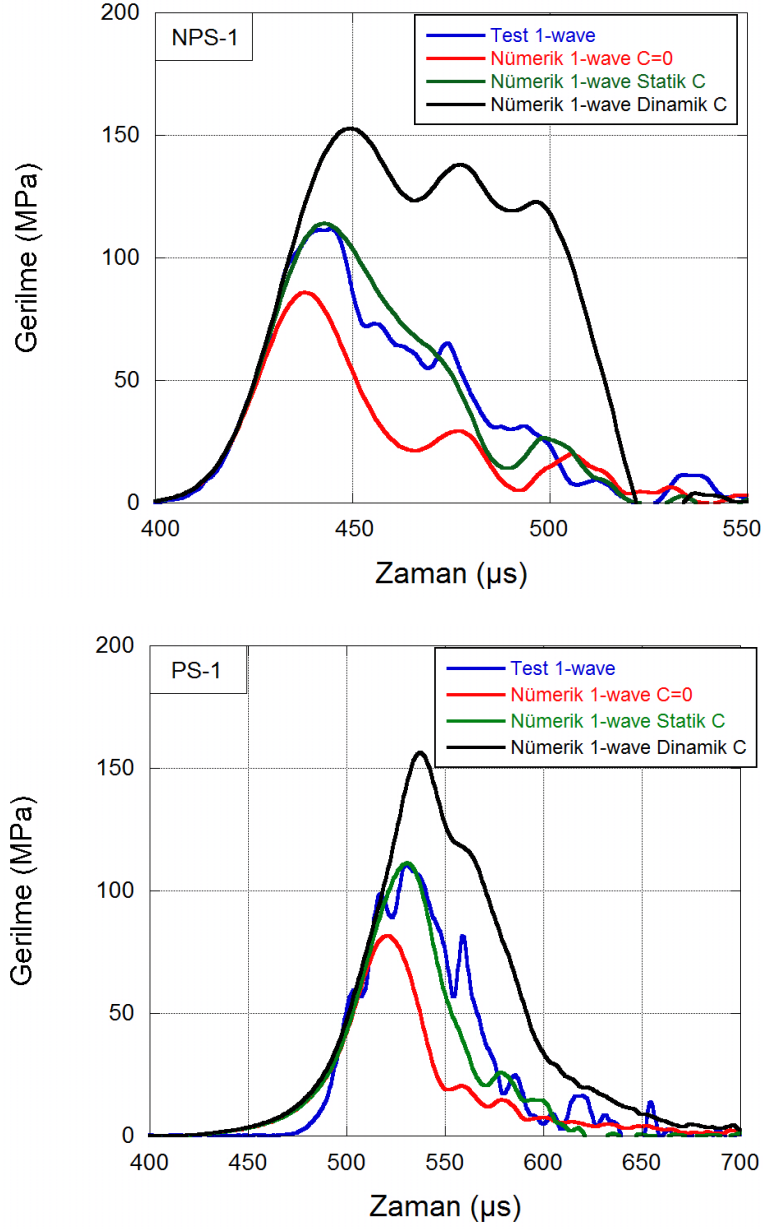
Yine benzer şekilde şekil değiştirme hızı hassasiyeti parametresinin etkinliğinin tayininde nümerik modelde şekil değiştirme hızı hassasiyeti parametresi (C) sıfır, statik sonuçlar hesaba katılmış olarak bulunmuş değeri ( $C_{statik}$ ) ve hem statik hem dinamik sonuçlar ( $C_{dinamik}$ ) hesaba katılmış olarak bulunmuş değerler kullanılarak elde edilen iletilen dalgalar yine deneysel sonuç ile karşılaştırılmıştır. Gerilme dalgası şekillendiricisiz ve şekillendiricili deneylere en yakın sonucu  $C_{statik}$  ile elde edildiği tespit edilmiştir. Bu durum literatürdeki mevcut sonuçlarla tutarlılık arz etmektedir [3]. Bu noktada yüksek deformasyon hızlarındaki betondaki mukavemet artışının hem malzemenin şekil değiştirme hızı hassasiyetinden hem de yüklemeye kaynaklı basınç etkisiyle birlikte ataletin de hesaba katılmasıyla arttığı tespit edilmiştir. Bu oldukça önemli bir sonuçtur. Nitekim model statik bölgedeki şekil değiştirme



hızı hassasiyeti parametresi kullanılarak nümerik modelin basıncın da etkisini hesaba katabilmesinden dolayı dinamik davranışı doğru ve hassas bir şekilde temsil edebilmiştir, Şekil 53.



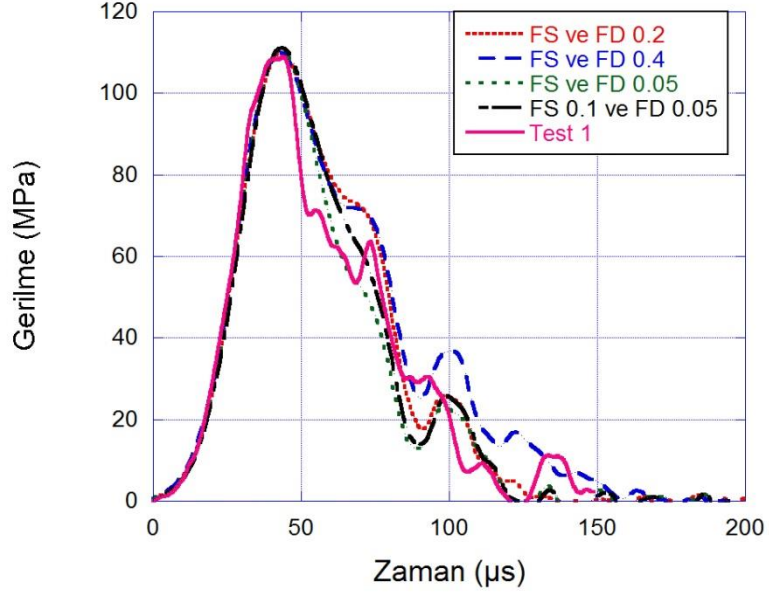
Şekil 52. NPS ve PS testlerinde B parametresi etkinliği.



Şekil 53. Şekil değiştirme hızı hassasiyeti sabiti etkinliği.

Şekil 54' te Hopkinson basınç barı nümerik modelindeki statik ve dinamik sürtünme katsayılarının alan çubuk gerilmesi üzerine etkisi parametrik olarak incelenmiştir. Alan çubuk gerilmesinin zamana göre grafiği aynı zamanda 1-wave analizinde kullanılan numune geometrisini de temsil ettiğinden sürtünme katsayısını incelemeye alan çubuk gerilmesi davranışını incelemek yeterlidir. Yapılan parametrik analiz sonuçlarına göre statik ve dinamik sürtünme katsayıları eşit değerde sırasıyla 0.05, 0.2 ve 0.4 olarak alınmıştır. Ayrıca gerçekleştirilen deneyler esnasında kullanılan yağlayıcılar ile sürtünme etkisi minimuma indirmek istendiğinden, deneysel koşullara en yakın sonucu vermesi amacıyla statik sürtünme katsayısı 0.1, dinamik sürtünme katsayısı ise 0.05 alınan nümerik model analizleri

gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonuçlarına göre sürtünme katsayılarının alan çubuk gerilmesine etkisi önemsiz miktarlardadır. Bu nedenle nümerik model çalışmalarına deney koşullarını en gerçekçi şekilde sağlamak amacıyla statik sürtünme katsayısı 0.1, dinamik sürtünme katsayısı 0.05 değerleri seçilerek devam edilmiştir.

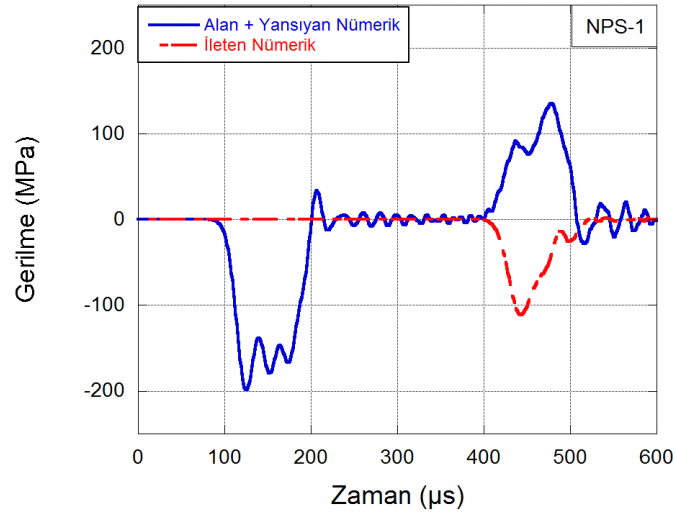
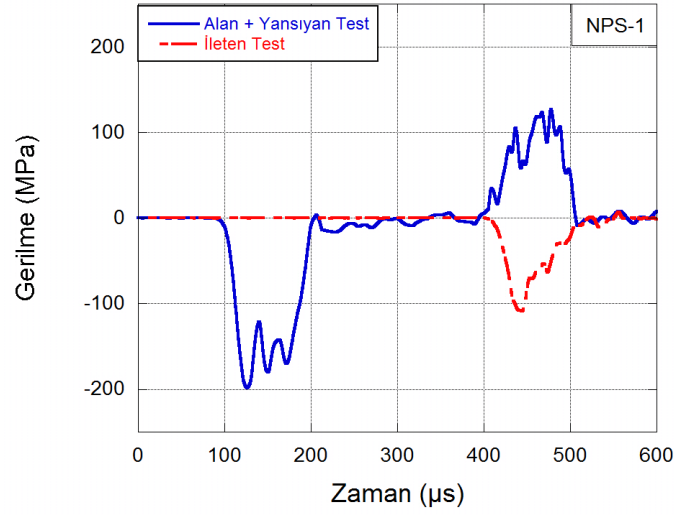


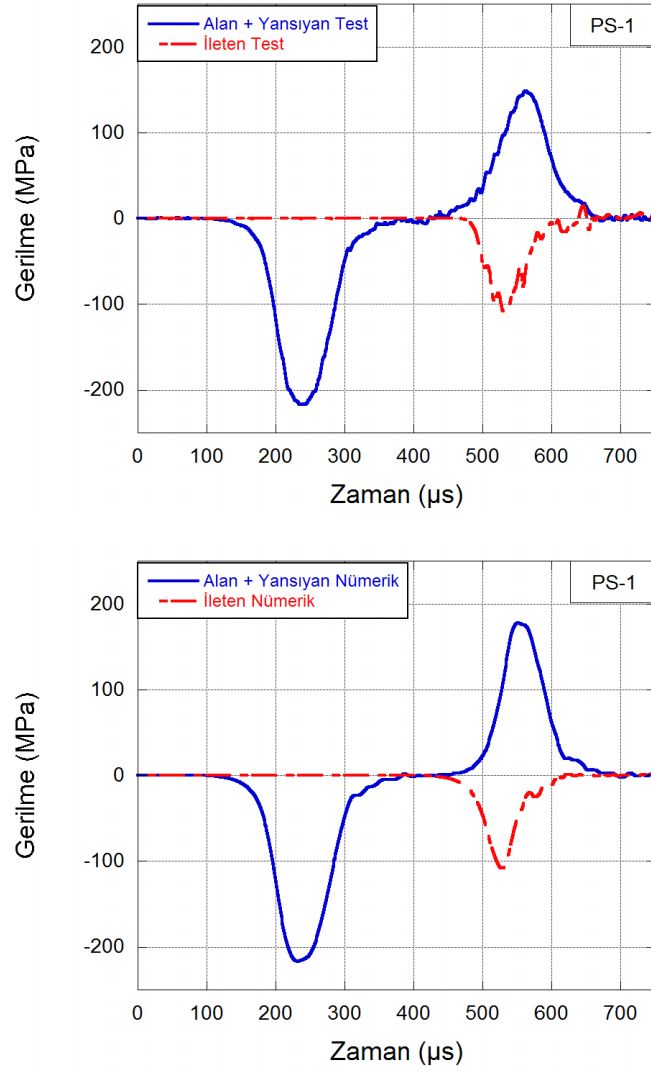
Şekil 54. Parametrik sürtünme katsayısı incelemesi.

Tablo 5. JHC model parametreleri.

<b>Mukavemet Parametreleri</b>	<b>Değer</b>
A	0.7900
B	0.9
N	0.6100
C	0.0205
$f_c'$	0.0620 (GPa)
$S_{max}$	5.7000
G	13.3200 (GPa)
<b>Hasar Parametreleri</b>	<b>Değer</b>
$D_1$	0.04
$D_2$	1
$EF_{min}(\epsilon_p^f)$	0.01
<b>Basınç Parametreleri</b>	<b>Değer</b>
$P_{crush}$	0.0210 (GPa)
$\mu_{crush}$	0.001
K1	85 (GPa)
K2	-171 (GPa)
K3	208 (GPa)
$P_{lock}$	0.80 (GPa)
$\mu_{lock}$	0.173
T	0.0063 (GPa)

Şekil 55' te gerilme dalgası şekillendiricisiz ve şekillendiricili SHBB test sonuçları deneysel ve nümerik olarak sunulmuştur. Nümerik model oldukça başarılı bir şekilde deneysel sonuçları yakalayabilmiştir. Deneysel ve nümerik alan, ileten ve yansıyan sinyallerin şiddetleri / genlikleri ve formlarının birbirleriyle oldukça tutarlı oldukları görülmektedir. Nümerik modelin deneysel sonuçları oldukça hassas bir şekilde tekrar edebilmesi hem malzeme modeli parametrelerinin doğruluğunu göstermekte hem de modelin geçerliliğini ortaya koymaktadır. Bu noktadan sonra farklı şekil değiştirme hızları ve yükleme koşulları için bahsi geçen malzeme modeli ve nümerik model güvenle kullanılabilir.

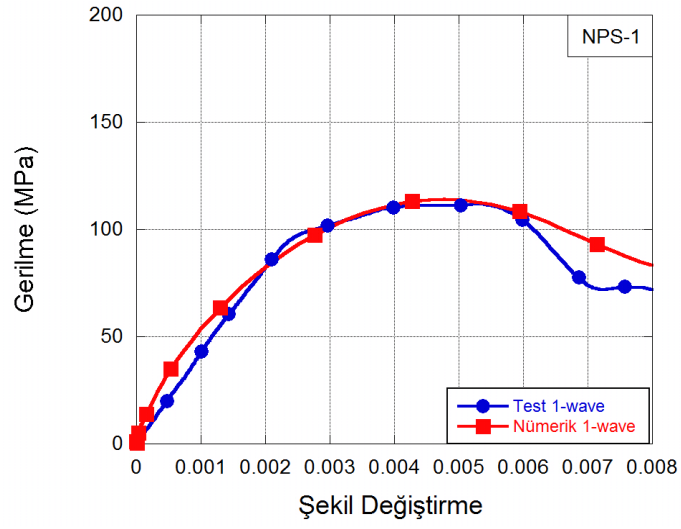




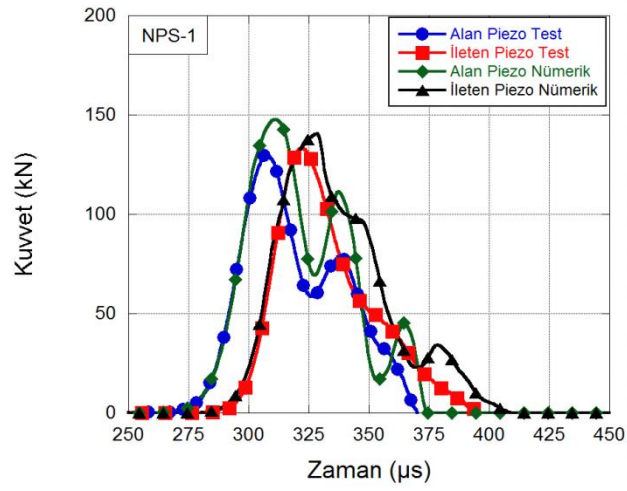
Şekil 55. Deneysel ve nümerik çubuk gerilme karşılaştırmaları.

Şekil 56' da deneysel ve nümerik (kontrol) olarak elde edilmiş gerilmenin, şekil değiştirme hızının ve R denge parametresinin şekil değiştirmeye bağlı değişimleri sunulmuştur. Yine Şekil 56' da nümerik modelden elde edilen ara yüzey kuvvetlerinin deneysel piezoelektrik kristal kuvvet tarihçelerinin karşılaştırılmaları verilmiştir. Sonuçlardan da görülebileceği gibi nümerik model deneysel sonuçları oldukça yüksek hassasiyetle tekrar edebilmiştir.

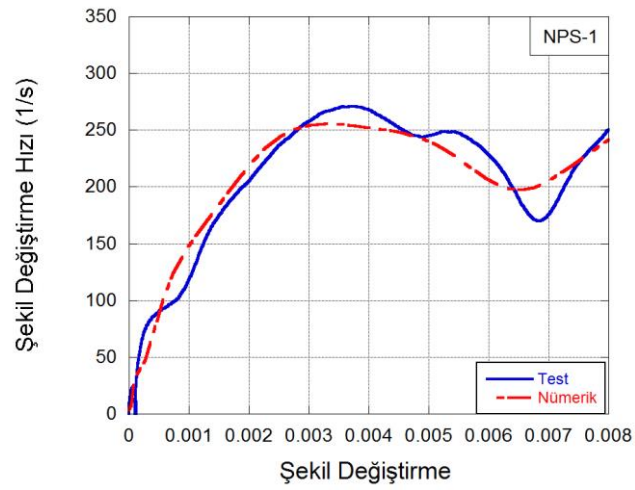
Benzer sonuçlar gerilme dalgası şekillendiricili test için de elde edilmiş ve Şekil 57' de sunulmuştur.



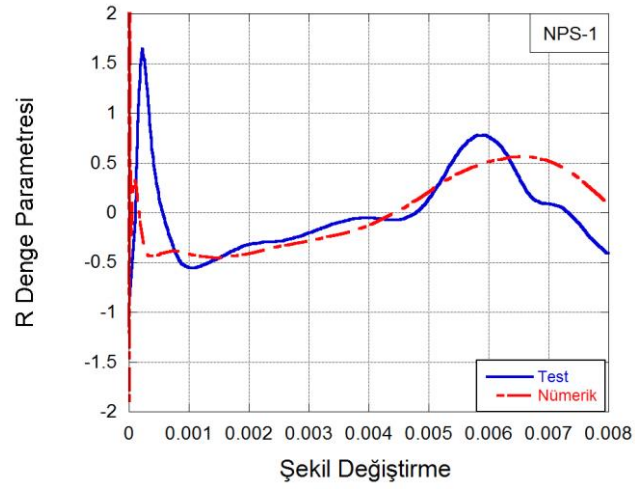
(a)



(b)



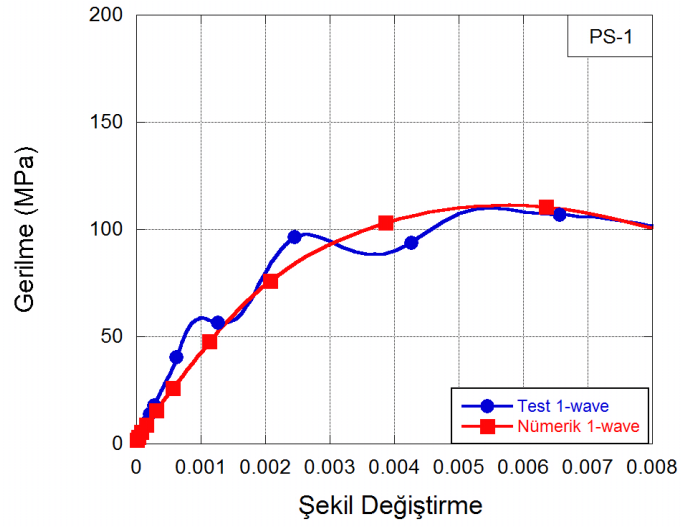
(c)



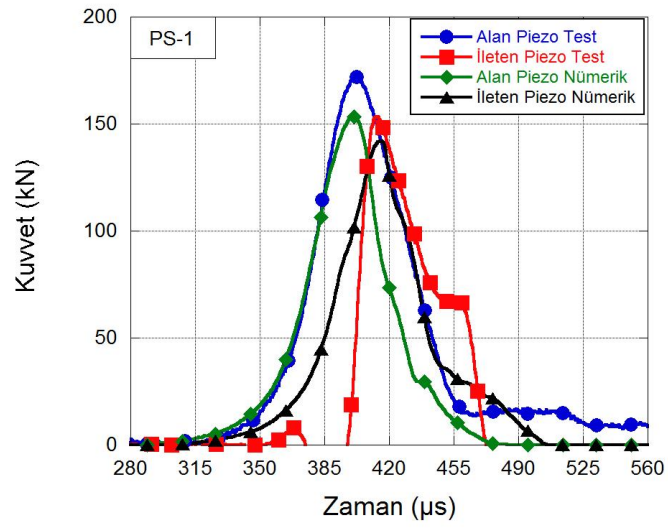
(d)

Şekil 56. Gerilme dalgası şekillendiricisiz testler ile nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması: (a)1-wave gerilme analizi, (b) Numune ön / arka yüzey kuvvetleri incelemesi, (c) şekil değiştirme hızı, (d) denge parametresi .

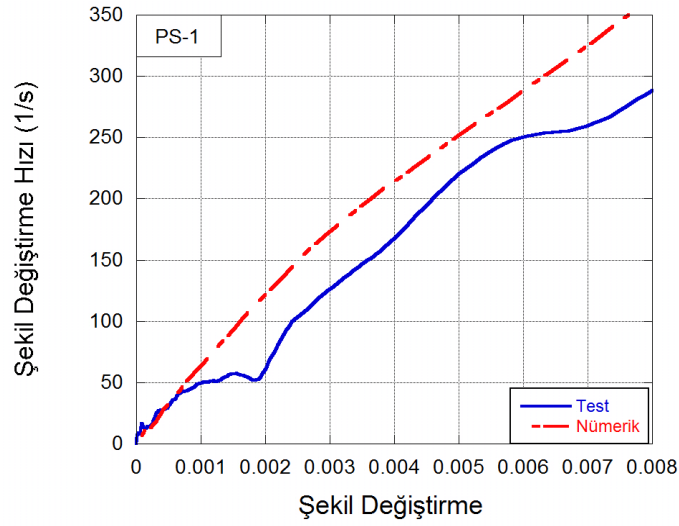




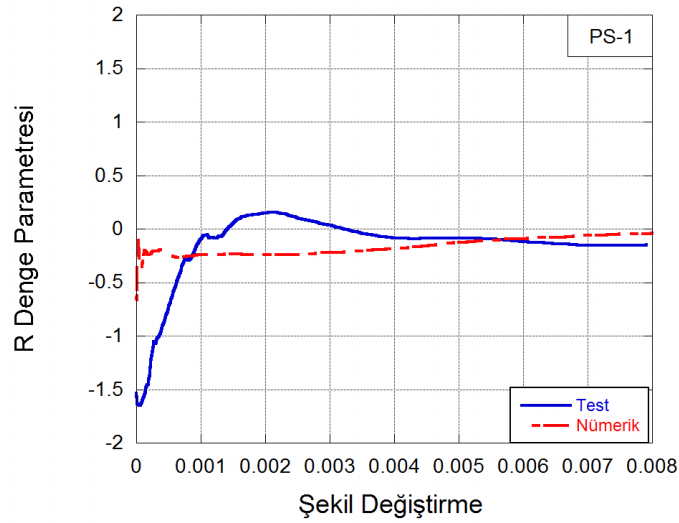
(a)



(b)



(c)

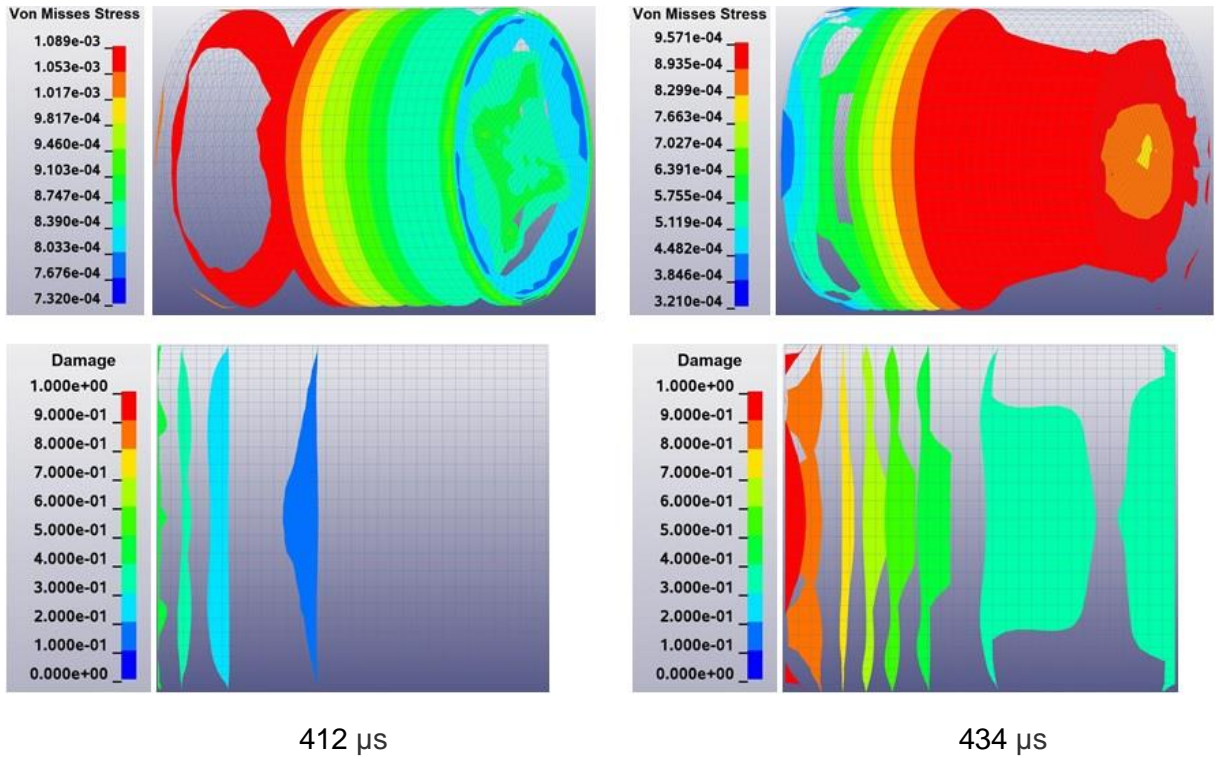


(d)

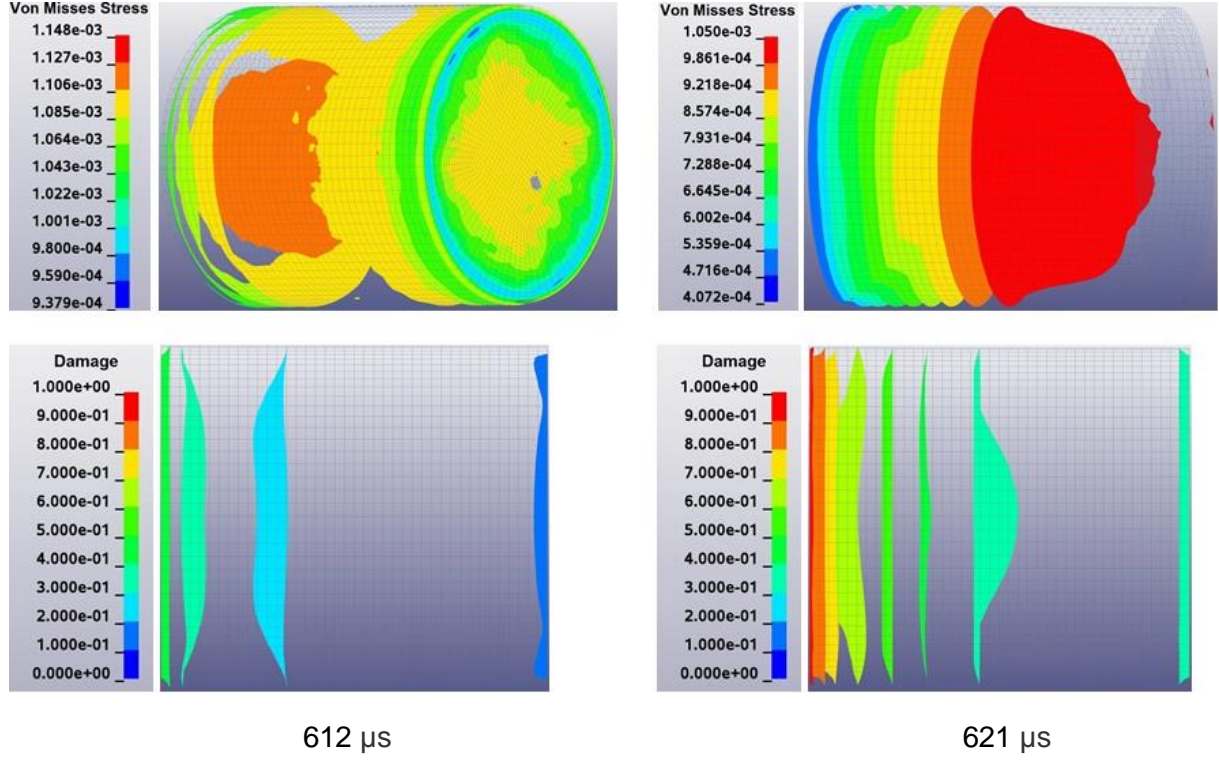
Şekil 57. Gerilme dalgası şekillendiricili testler ile nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması: (a) 1-wave gerilme analizi, (b) Numune ön-arka yüzey kuvvetleri incelemesi, (c) şekil değiştirme hızı, (d) denge parametresi.

Şekil 58 ve Şekil 59 da ise sırasıyla gerilme dalgası şekillendiricisiz ve şekillendiricili testlerde numune içerisindeki Von Misses gerilmesi ve hasarın zamana bağlı değişimini gösteren konturlar verilmiştir. Şekillerden de görülebileceği gibi hasar öncelikli olarak gerilmenin numuneye girdiği yüzeyden başlayıp numunenin arka yüzeyine doğru ilerlemektedir. Von Misses gerilmesinin ve hasarın ilerleyişini incelerken iki durum göz önünde bulundurulmuştur. Bunlardan ilki Von Misses gerilmesinin alan çubuk - numune ara yüzeyinde maksimum değere ulaştığı andır. Bu ana karşılık gelen zamanlar şekillerin altında

belirtilmiştir. Gerilme dalgası şekillendirici kullanılan analizde Von Mises gerilmesi 412 mikro saniyede maksimum değere ulaşırken, gerilme dalgası şekillendiricisiz analizde ise 612 mikro saniyede ulaşılmıştır. Şekil 59 ve Şekil 60' dan görüleceği üzere dalga şekillendirici kullanılan nümerik analizde daha homojen bir gerilme dağılımı mevcuttur. Aynı zamanda hasarın başlangıcı numunenin hem ön hem de arka yüzeyinden ilerlerken dalga şekillendirici kullanılmayan analizde hasar sadece numunenin ön yüzeyinden başlayarak ilerlemektedir. Bu durum dalga şekillendirici kullanılmayan testlerde numunenin ön yüzeyinde prematüre kırılmaların olabileceğini ve dalga şekillendirici kullanmanın önemini göstermektedir. Seçilen ikinci durum ise hasar parametresi D' nin tam hasar aldığı (D=1) anının numune üzerinde ilk oluşmaya başlama zamanını göstermektedir. Bu anda dalga şekillendirici kullanılan analizde hasarın ve Von Mises gerilmesinin ilerleyişi daha düzgün bir forma sahipken dalga şekillendiricisiz analizde hasarın formundaki bozukluklar daha ön plandadır.

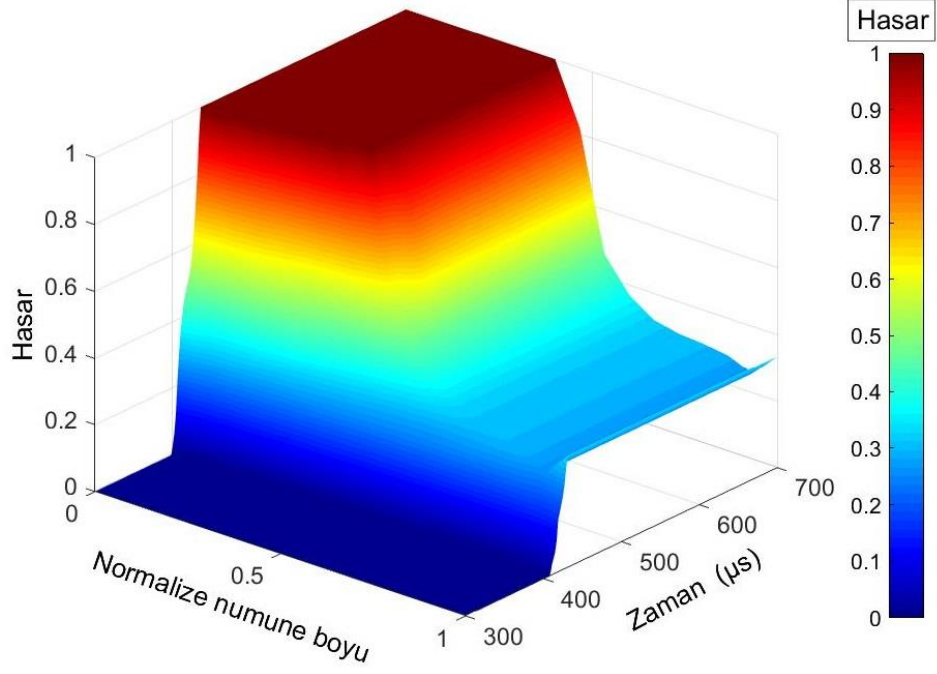
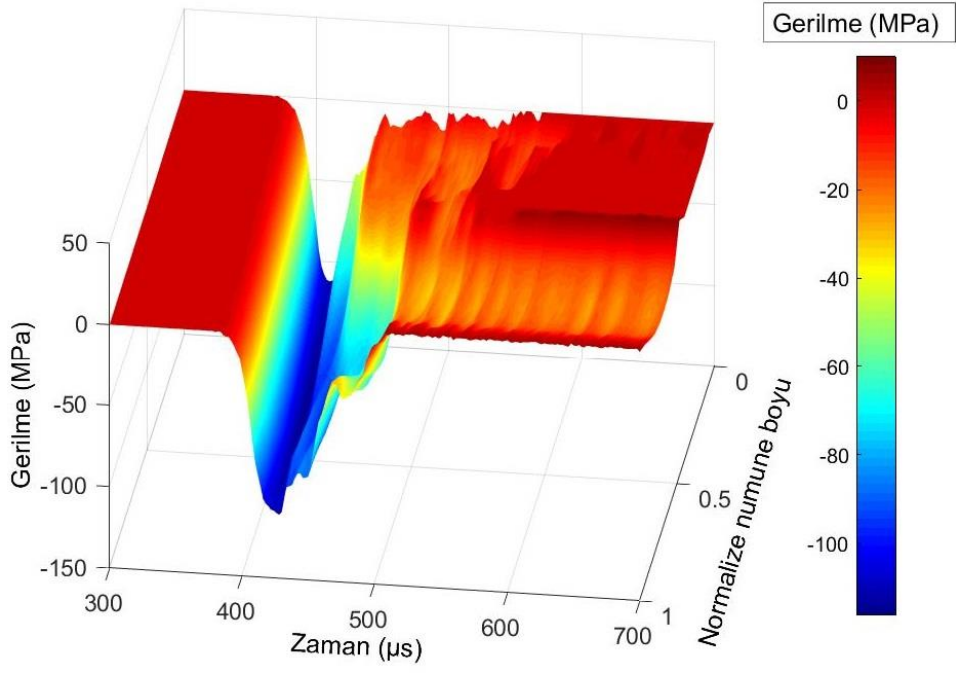


Şekil 58. Gerilme dalgası şekillendiricisiz nümerik analizde Von Mises gerilmesi ve hasarın zamana bağlı değişimi.



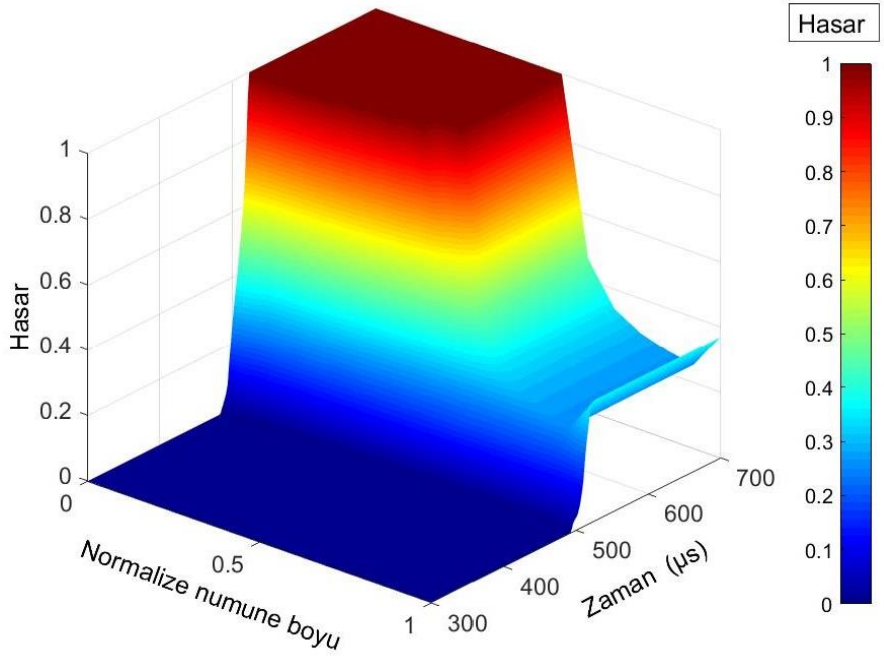
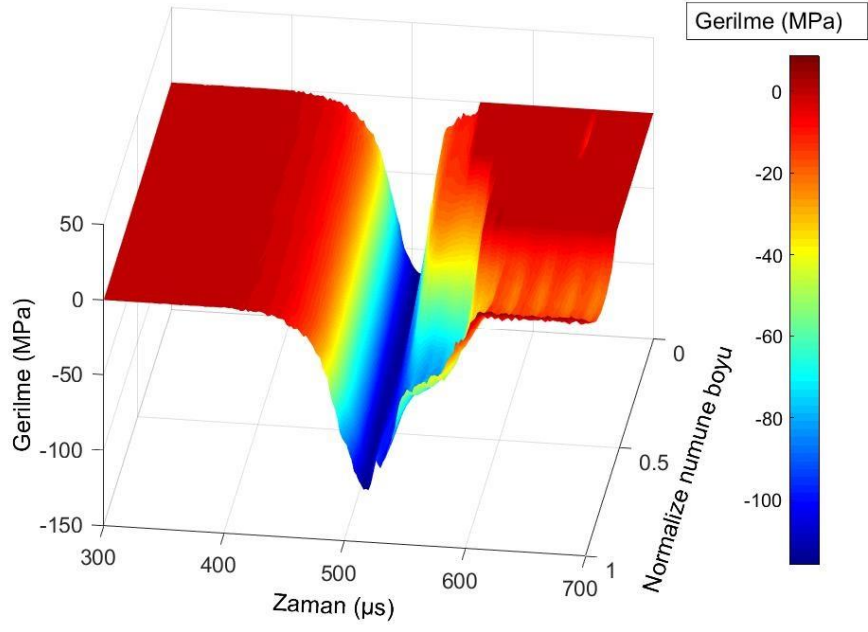
Şekil 59. Gerilme dalgası şekillendiricili nümerik analizde Von Misses gerilmesi ve hasarın zamana bağlı değişimi.

Şekil 60 ve Şekil 61' de ise gerilme dalgası şekillendiricisiz ve şekillendiricili testlere ait numune kalınlığı boyunca gerilmenin ve hasarın zamana ve konuma bağlı değişimleri sunulmuştur. Gerilme dalgası şekillendiricili durumda numune içerisindeki gerilmenin daha uzun süre uniform olarak kaldığı şekillerden görülmektedir. Yine numune içerisindeki hasar, gerilme dalgası şekillendiricili testte kalınlık içerisinde daha geniş bir alana yayılmıştır.



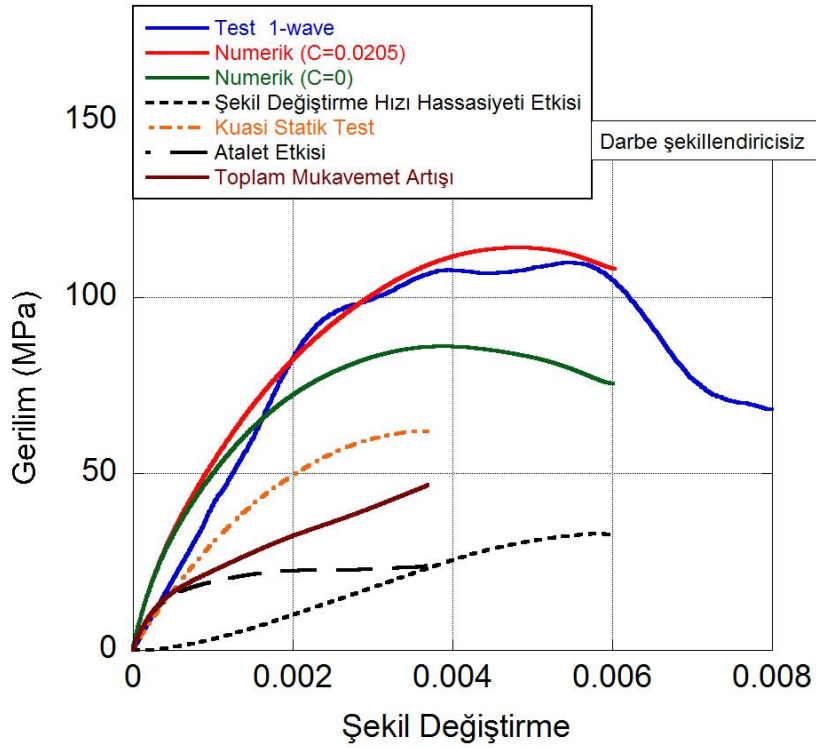
Şekil 60. Gerilme dalgası şekillendiricisiz nümerik analizde numune yüzey gerilmesi ve hasar dağılımı.





Şekil 61. Gerilme dalgası şekillendiricili nümerik analizde numune yüzey gerilmesi ve hasar dağılımı.

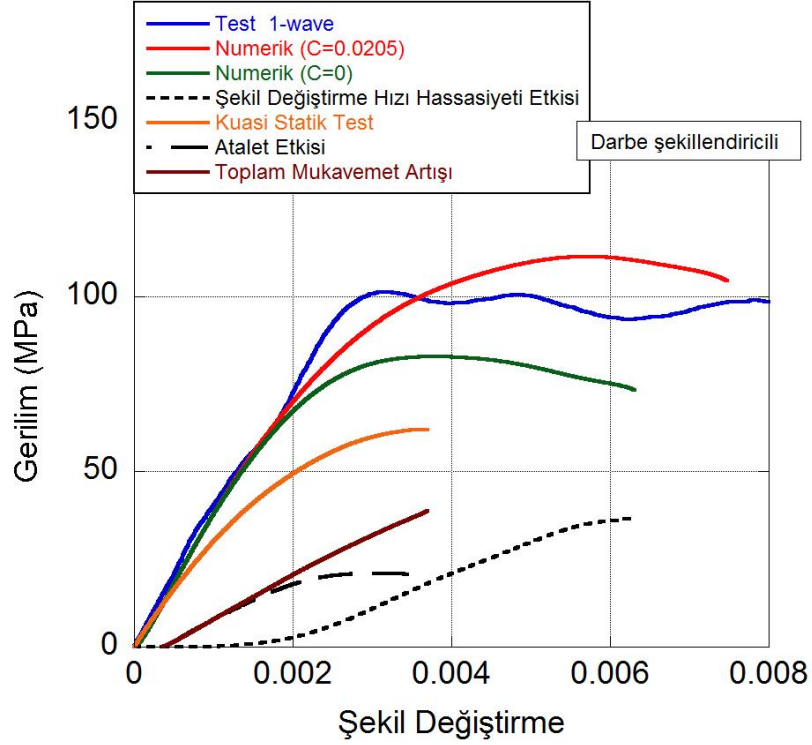
Beton numunesinin şekil değiştirme hızına bağlı olarak mukavemetini artışını ve bu artışın nedenlerini incelemek için hem deneysel hem nümerik sonuçlar birlikte analiz edilerek numuneye etki eden şekil değiştirme hızı hassasiyeti ve atalet etkisi Şekil 61 ve Şekil 62' de sunulmuştur. Şekil değiştirme hızı hassasiyetinin etkisi incelenirken nümerik modeldeki analiz sonuçlarında şekil değiştirme hızı hassasiyeti parametresinin (C parametresi)  $C=0.0205$  olduğu analizden  $C=0$  olduğu analiz sonucunun şekil değiştirme değerlerine karşı gerilim değerlerinin farkının alınmasıyla bulunmuştur. Atalet etkisi ise statik test gerilmesinin  $C=0$  nümerik modeli analiz sonucundan çıkan gerilmenin farkının alınmasıyla hesaplanmıştır. Şekil 62' te darbe şekillendiricisiz SHBB test, nümerik analiz ve statik test sonuçlarıyla birlikte şekil değiştirme hassasiyeti etkisi ve atalet etkisi sunulmuştur. Statik kırılma anında atalet etkisi 20 MPa değerlerindeki dinamik kırılma şekil değiştirme anındaki şekil değiştirme hızı hassasiyeti etkisi 30 MPa civarındadır.



Şekil 62. Darbe şekillendiricisiz test ve nümerik model numunesindeki şekil değiştirme hızı hassasiyeti ve atalet etkisi.

Şekil 63' te darbe şekillendiricili SHBB test, nümerik analiz ve statik test sonuçlarıyla birlikte şekil değiştirme hassasiyeti etkisi ve atalet etkisi sunulmuştur. Statik kırılma anında atalet

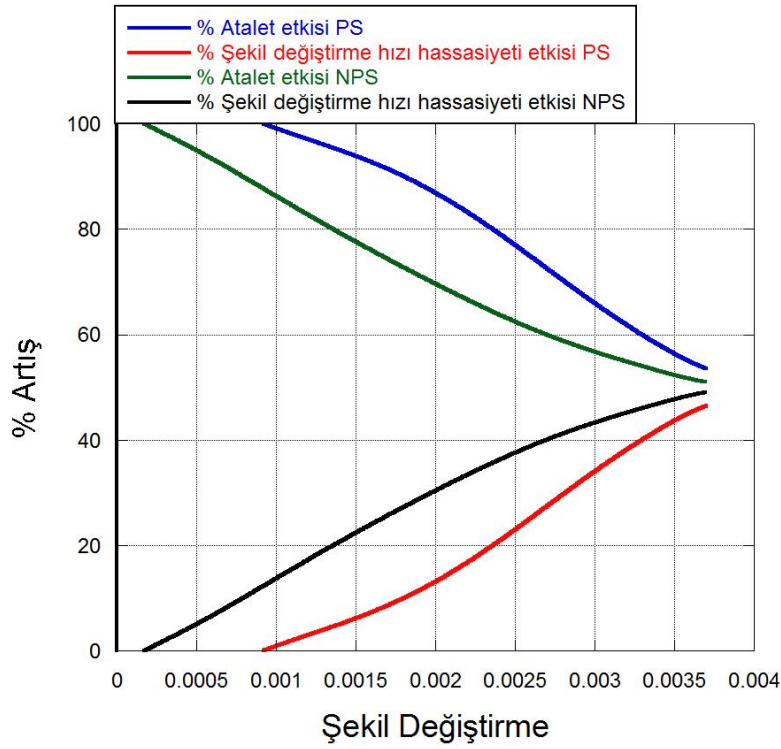
etkisi 20 MPa değerlerindeyken dinamik kırılma şekil değiştirme anındaki şekil değiştirme hızı hassasiyeti etkisi 40 MPa civarındadır.



Şekil 63. Darbe şekillendiricili test ve nümerik model numunesindeki şekil değiştirme hızı hassasiyeti ve atalet etkisi.

Toplam mukavemet artışına etki eden atalet etkisinin ve şekil değiştirme hızı hassasiyeti etkisinin yüzdesel artış grafiği Şekil 64' te sunulmuştur. Görüldüğü üzere düşük şekil değiştirme değerlerinde atalet etkisi baskınken şekil değiştirme değerleri arttıkça şekil değiştirme hızı hassasiyeti etkisi de artmaktadır. Ayrıca numune üzerindeki şekil değiştirme değeri arttıkça atalet etkisi ve şekil değiştirme hızı hassasiyeti etkisi dengelenmektedir.



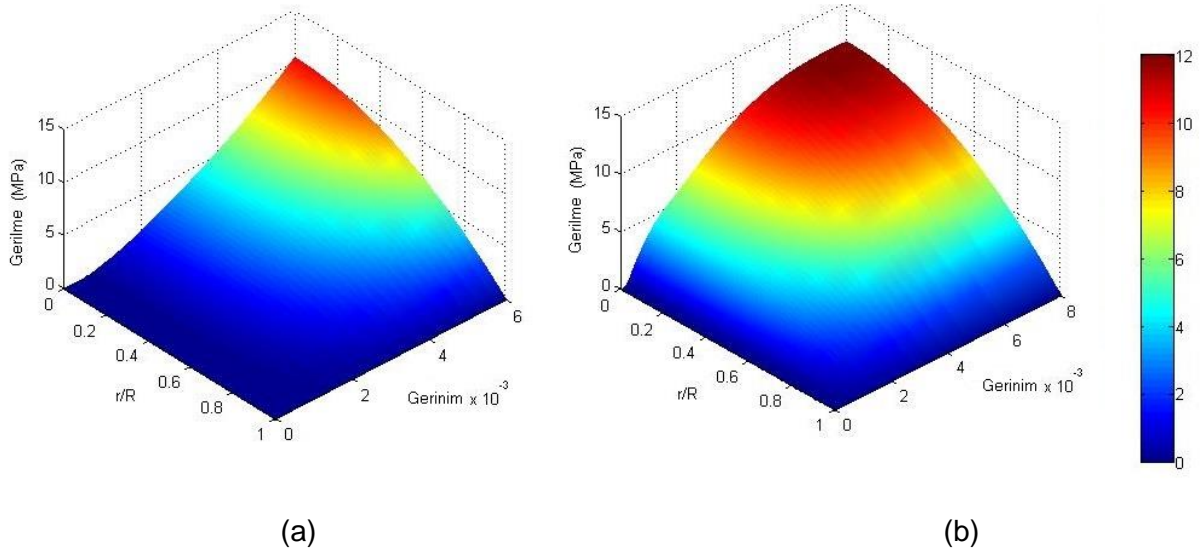


Şekil 64. Toplam mukavemet artışına yüzdesel etki.

Atalet etkisinden dolayı numunede oluşan radyal gerilme incelenirken Denklem (21) kullanılmıştır. Numune üzerindeki radyal gerilme analitik olarak Matlab programıyla hesaplanarak radyal gerilmenin şekil değiştirme ve yarıçap değişkenine göre değişimi üç boyutlu grafikte Şekil 65' te gösterilmiştir. Buradaki  $r/R$  oranı numunenin merkezinden en dış çapına kadar normalize yarıçapı göstermektedir.

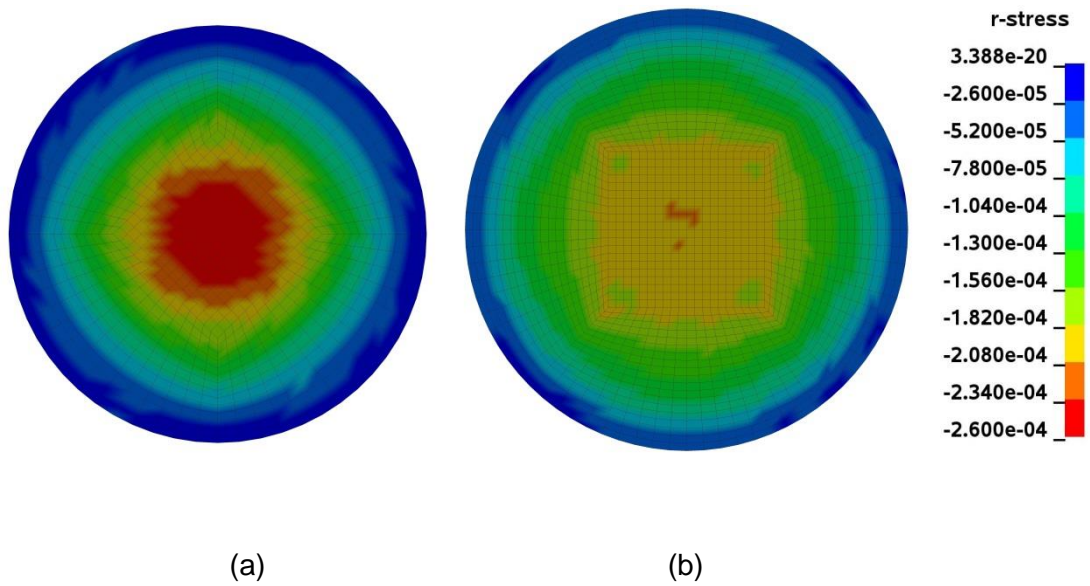
$$\sigma_r = \frac{\mu\rho_0}{2L_0(1-\varepsilon_z)^2(1+\mu\varepsilon_z)^2} \left[ \frac{\mu+1}{L_0(1-\varepsilon_z)} \varepsilon_z^2 + \dot{\varepsilon}_z \right] [R_0^2(1 + \mu\varepsilon_z)^2 - r^2] \quad (\text{Denklem 21})$$

Şekil 65' te denklem (21) kullanılarak elde edilen analitik radyal gerilmenin normalize çap ve şekil değiştirmeye göre değişimi sunulmuştur. Şekil 65' te verilen grafiklerden görüleceği üzere darbe şekillendiricili ve darbe şekillendiricisiz testlerin sonuçlarında kırılma şekil değiştirmesinde radyal gerilmenin maksimuma ulaştığı görülmektedir. Ayrıca numunenin merkezinden dış yüzeyine doğru radyal gerilmenin azaldığı görülmüştür.



Şekil 65. Numune üzerindeki radyal gerilmenin şekil değiştirme ve  $r/R$  oranına karşı dağılımı a) dalga şekillendiricisiz b) dalga şekillendiricili.

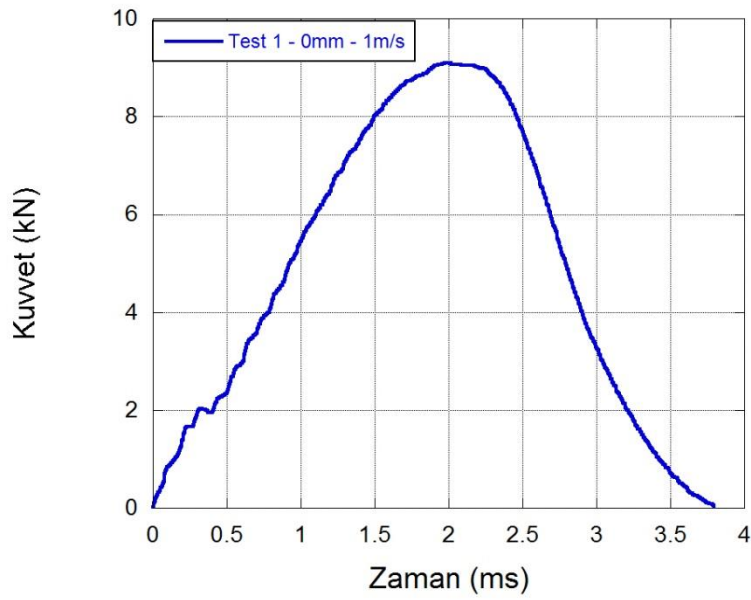
Radyal gerilmenin nümerik olarak incelenmesi de Şekil 66' da sunulmuştur. Numune üzerindeki boyuna gerilmenin maksimum olduğu anda radyal gerilmenin de maksimum olduğu görülmüştür. Ayrıca analitik sonuçlardaki gibi benzer şekilde radyal gerilme kırılma şekil değiştirmesinde ve numunenin merkezinde maksimum değere ulaşmıştır.



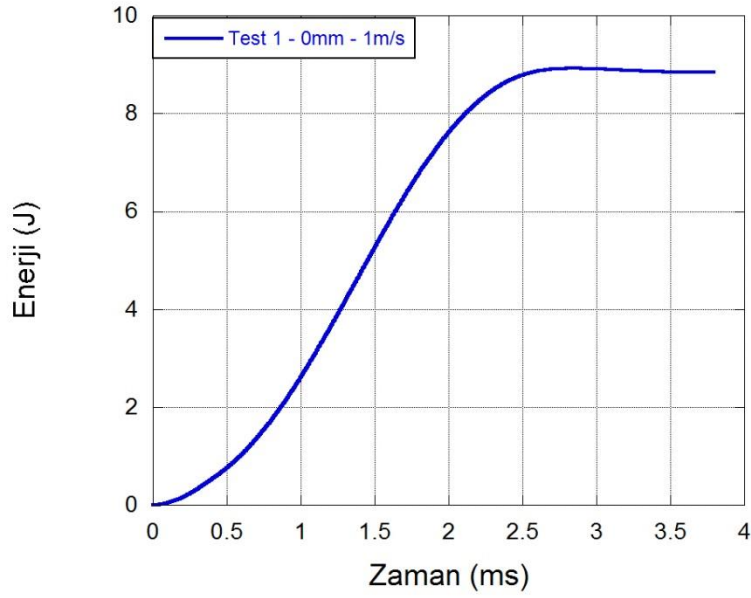
Şekil 66. Radyal gerilmenin numunenin alan çubuk yüzeyindeki dağılımının nümerik analizi a) dalga şekillendiricisiz b) dalga şekillendiricili.

### 4.3 Düşen Ağırlık Testi ve Nümerik Modeli Sonuçları

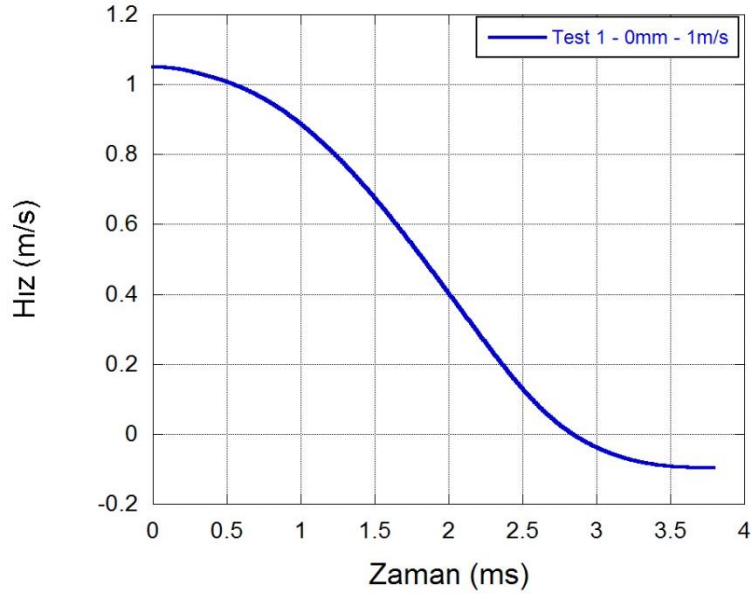
Düşen ağırlık testlerine ilk olarak numune tutucu yüzey tamamen kapalı olacak konfigürasyonla başlanmıştır. Bu sınır şartı için gerçekleştirilen ilk testte vurucu hızı 1 m/s olarak seçilmiştir. Şekil 67’ de kuvvet zaman grafiği sunulmuştur. Grafikten görüldüğü gibi ilk 2 milisaniye zaman aralığında kuvvet liinear bir şekilde artmış ve 9.10 kN’ luk en yüksek değerine ulaşarak azalmaya başlamıştır. Zamana karşı enerji grafiği ise Şekil 68’ de verilmiş olup ilk 2 milisaniyede enerji hızlı bir artış eğilimiyle 7.6 Joule’ e erişmiş ve bu artışın 8.9 Joule’ e kadar artışıyla test tamamlanmıştır. Şekil 69’ da ise hız-zaman eğrisi sunulmuştur. Deney sırasında perforasyon gerçekleşmemiştir.



Şekil 67. Kuvvet – zaman eğrisi (Test 1: 1 m/s çarpma hızı ve 0 mm boşluk sınır şartı).

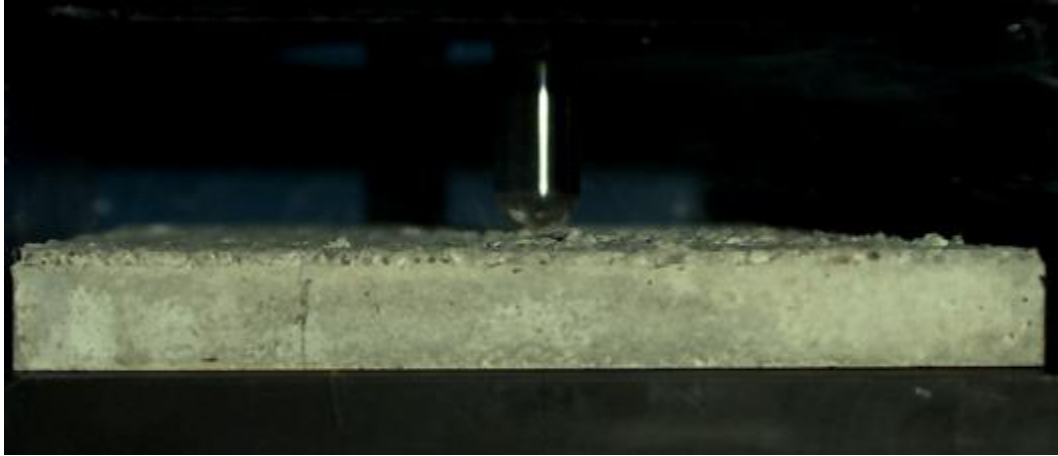


Şekil 68. Enerji-zaman eğrisi (Test 1: 1 m/s çarpma hızı ve 0 mm boşluk sınır şartı).

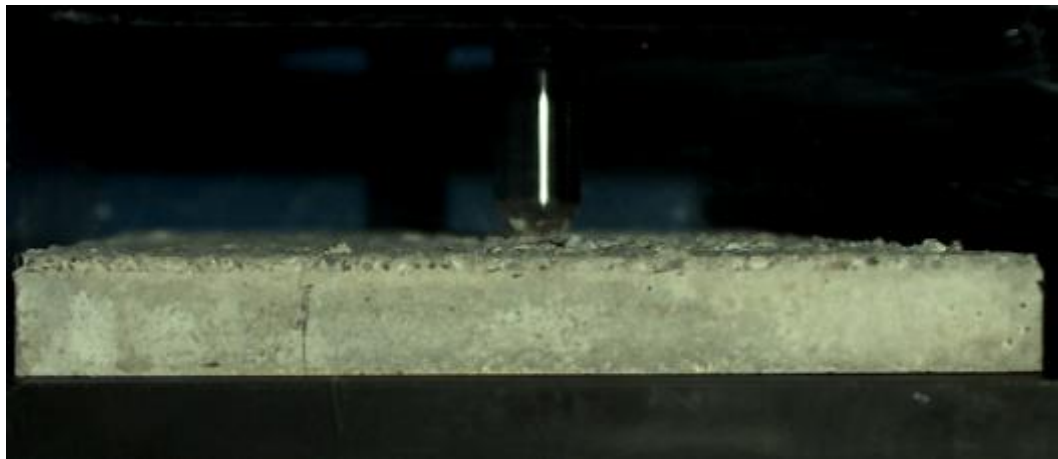


Şekil 69. Hız-zaman eğrisi (Test 1: 1 m/s çarpma hızı ve 0 mm boşluk sınır şartı).

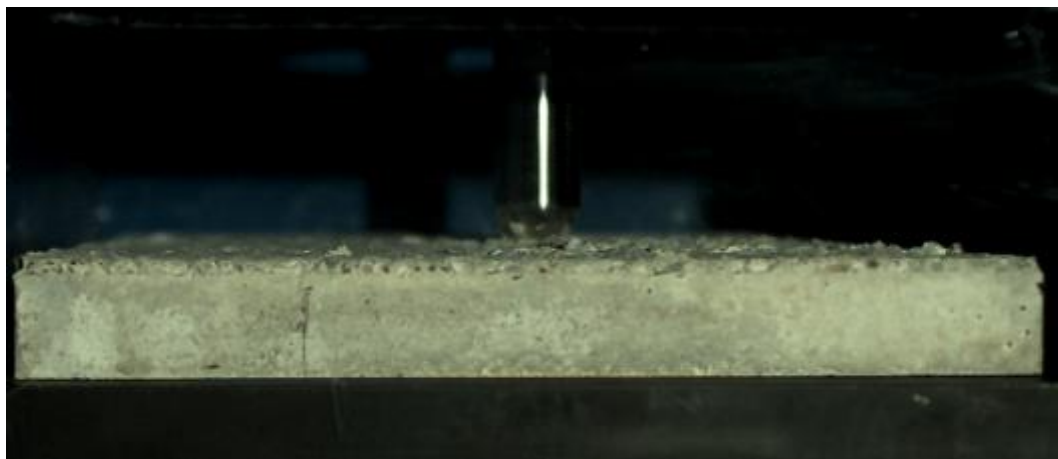
Deneye ait yüksek hızlı kamera görüntüleri ve deney sonrası numune hasarı sırasıyla Şekil 70 ve Şekil 71' de sunulmuştur. Şekiller incelendiğinde ucun vurduğu noktanın hemen altında kalan bölge haricinde numunenin makro ölçüde herhangi bir kırık veya çatlığa maruz kalmadığı görülmüştür.



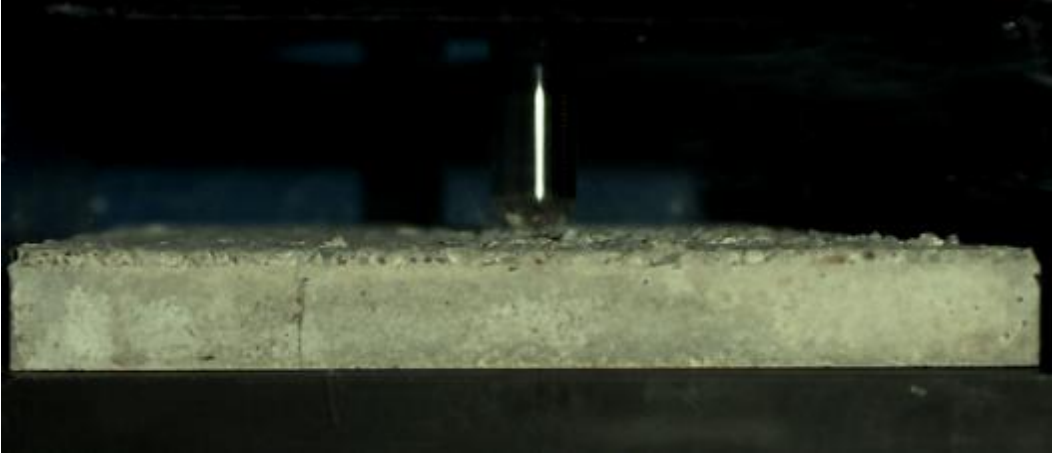
0 ms



1 ms



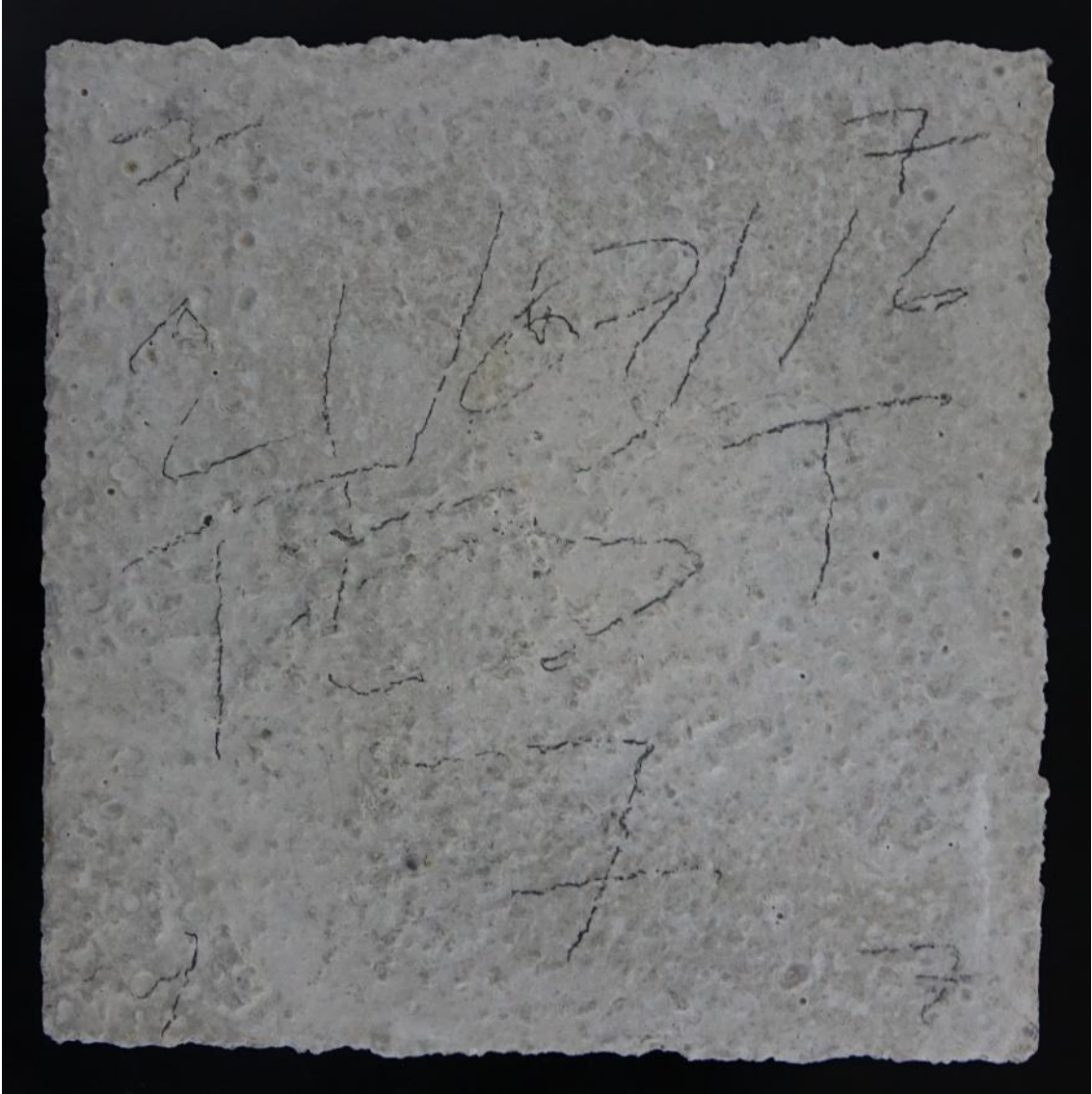
2 ms



3 ms

Şekil 70. Düşen ağırlık test-1 hasar tarihçesi (10000 fps).





(a)



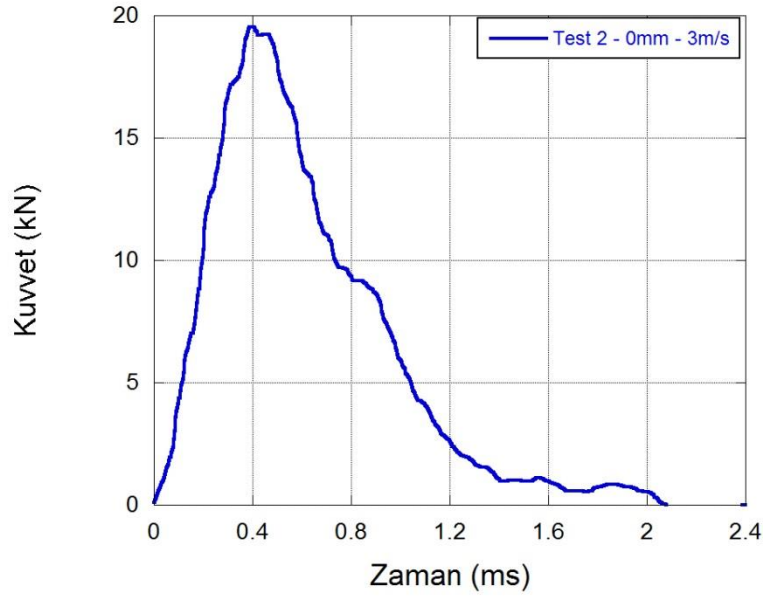
(b)

Şekil 71. Deney sonrası numune hasarı: (a) ön yüz ve (b) arka yüz.

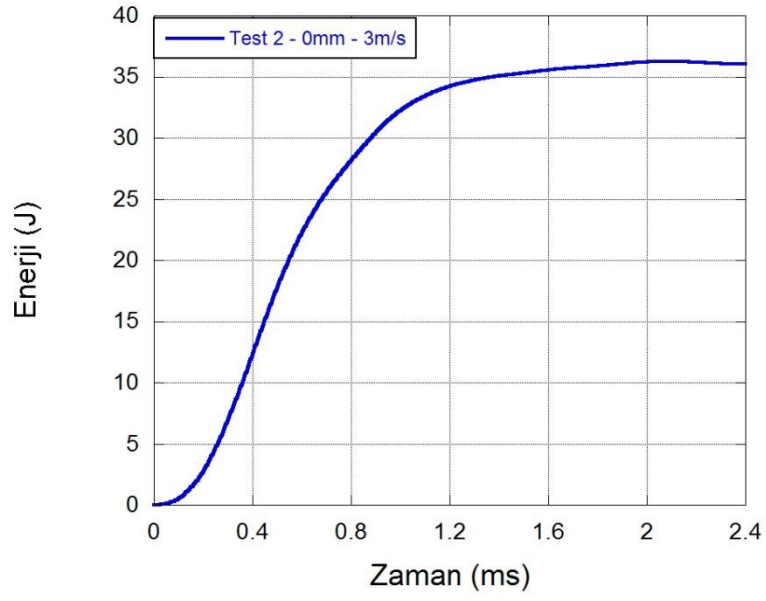


Deneylere aynı sınır şartında daha yüksek çarpma hızlarındaki davranışı inceleyebilmek adına 3 m/s hızla devam edilmiştir. Şekil 72' de sunulan kuvvet zaman tarihçesi incelendiğinde, kuvvet ilk testteki gibi doğrusal olarak artmakla birlikte en yüksek değerine ilk 0.4 milisaniyede 20 kN olarak ulaşmış ve sonrasında kuvvet azalmaya başlamıştır. Test, bir önceki testten daha kısa sürmüştür ve 2 milisaniyede tamamlanmıştır. Zamana karşı enerji grafiği ise Şekil 73' te verilmiş olup ilk 0.4 milisaniyede enerji 12.3 Joule' e erişmiş ve bu artışın 2 milisaniyede 36 Joule' e kadar ulaşmasıyla test tamamlanmıştır. Şekil 74' te hız-zaman eğrisi sunulmuştur. Burada 3.17 m/s olarak ölçülen başlangıç çarpma hızı zamana bağlı olarak azalmıştır. Test sırasında perforasyon meydana gelmiştir.

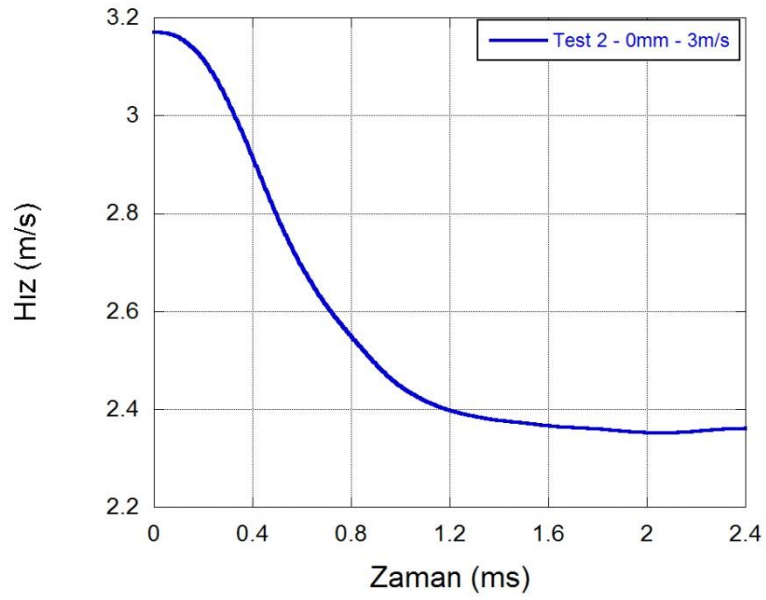
Şekil 75' te sunulan yüksek hızlı kamera kayıtları incelendiğinde numunenin yan yüzeyinde 0.5 milisaniyede çatlak oluşumu gözlemlenmiş ve çatlak zamanla ilerlemiştir. Şekil 76 a ve b' de deney sonrası numune ön ve arka yüzeyinde oluşan hasar oluşumu verilmektedir. Numune ön ve arka yüzeyinde üç parçalı makro bir hasar gözlemlenmiş olup toplam çatlak uzunluğu detayları Tablo 7' de verilmiştir.



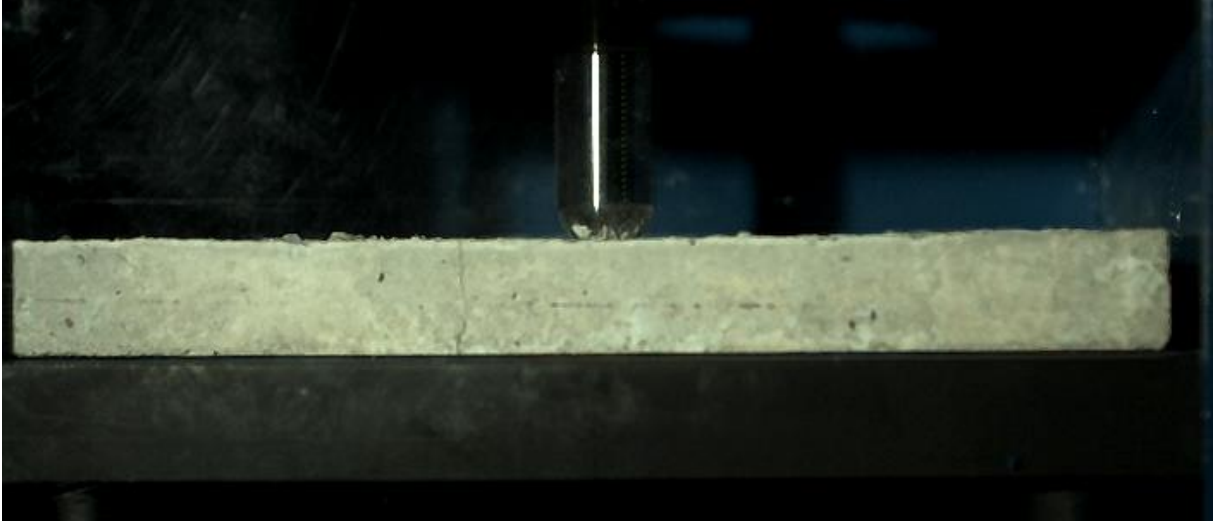
Şekil 72. Kuvvet – zaman eğrisi (Test 2: 3 m/s çarpma hızı ve 0 mm boşluk sınır şartı).



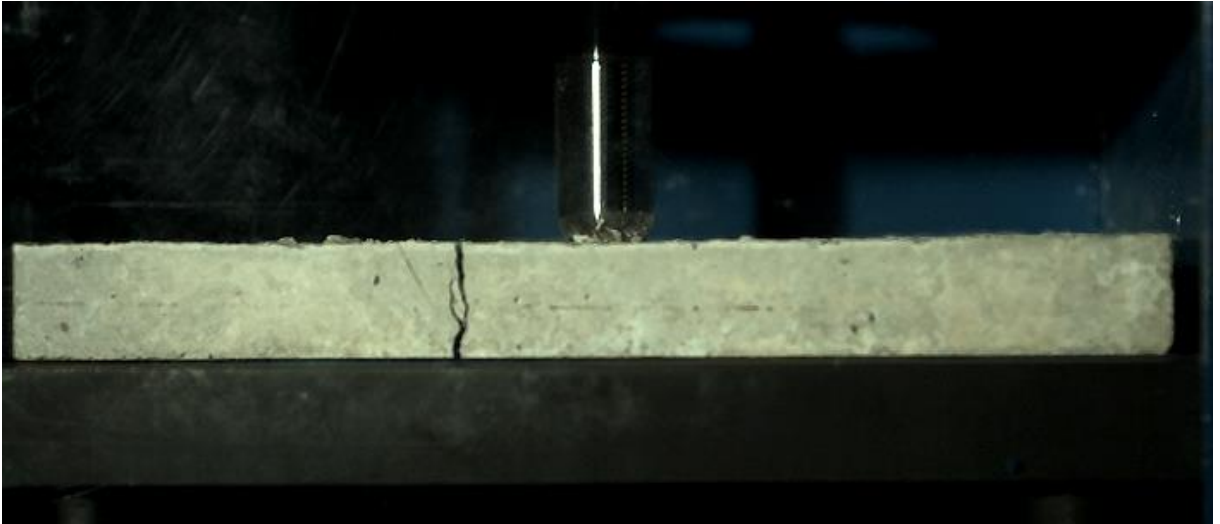
Şekil 73. Enerji – zaman eğrisi (Test 2: 3 m/s çarpma hızı ve 0 mm boşluk sınır şartı).



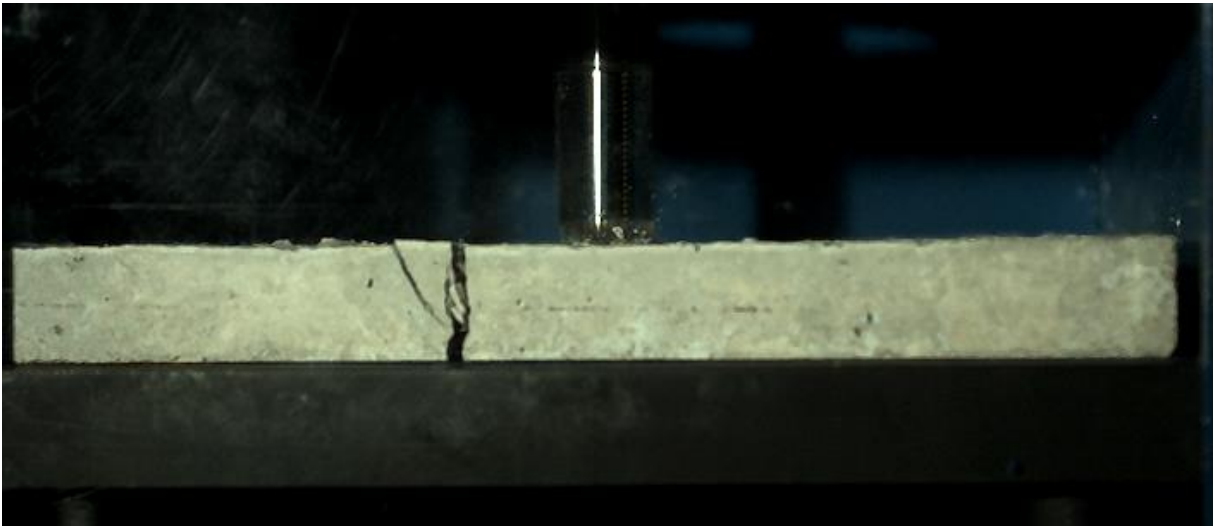
Şekil 74. Hız – zaman eğrisi (Test 2: 3 m/s çarpma hızı ve 0 mm boşluk sınır şartı).



0.5 ms

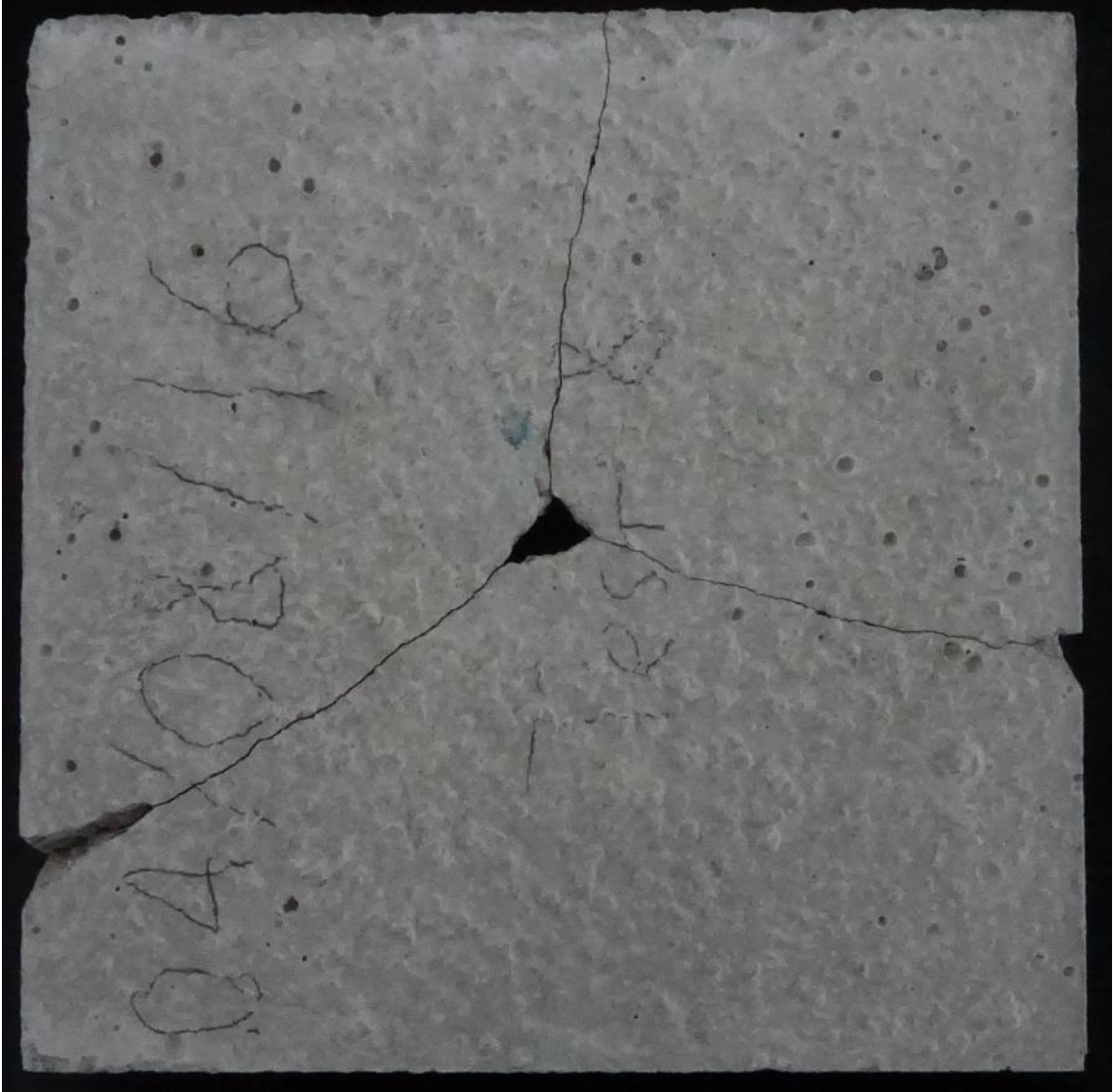


1 ms



1.5 ms

Şekil 75. Düşen ağırlık test 2 hasar tarihçesi (10000 fps).

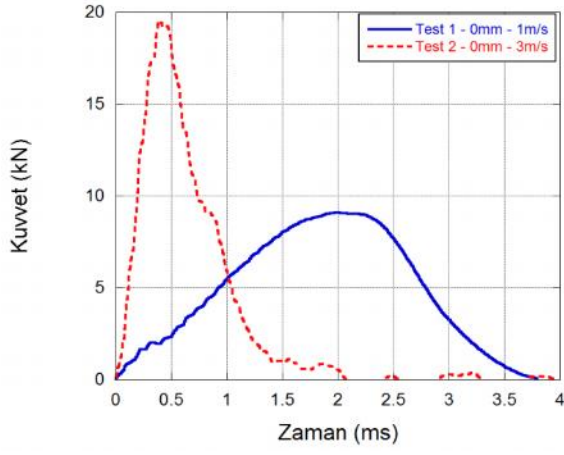


(a)

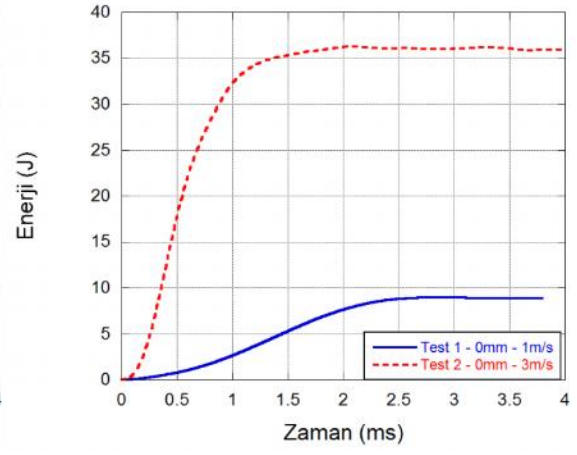


(b)

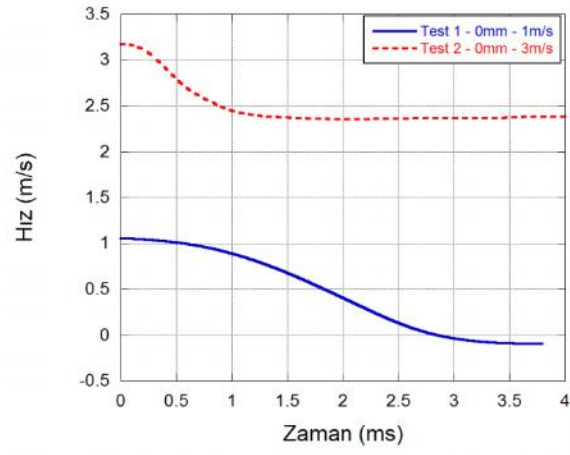
Şekil 76. Deney sonrası numune hasarı: (a) ön yüzey ve (b) arka yüzey.



(a)



(b)



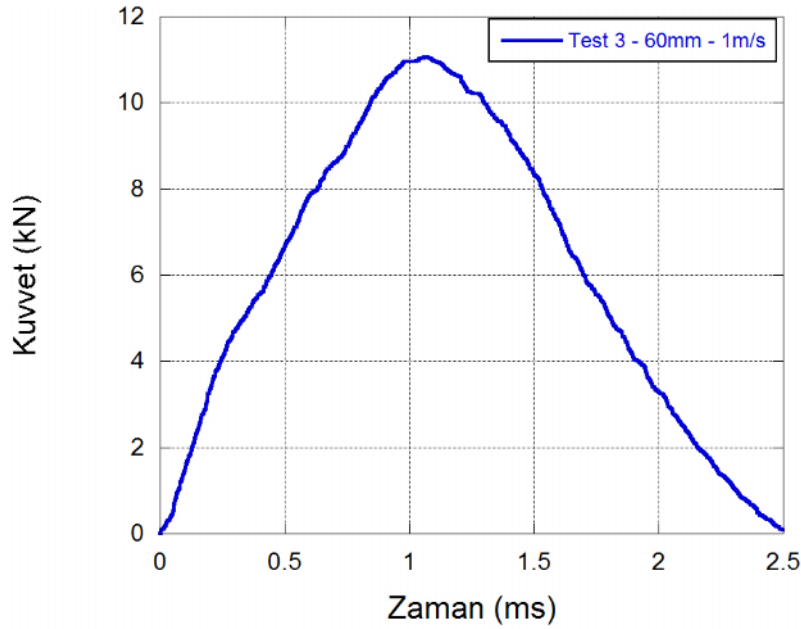
(c)

Şekil 77. 1. ve 2. testin birlikte incelenmesi.

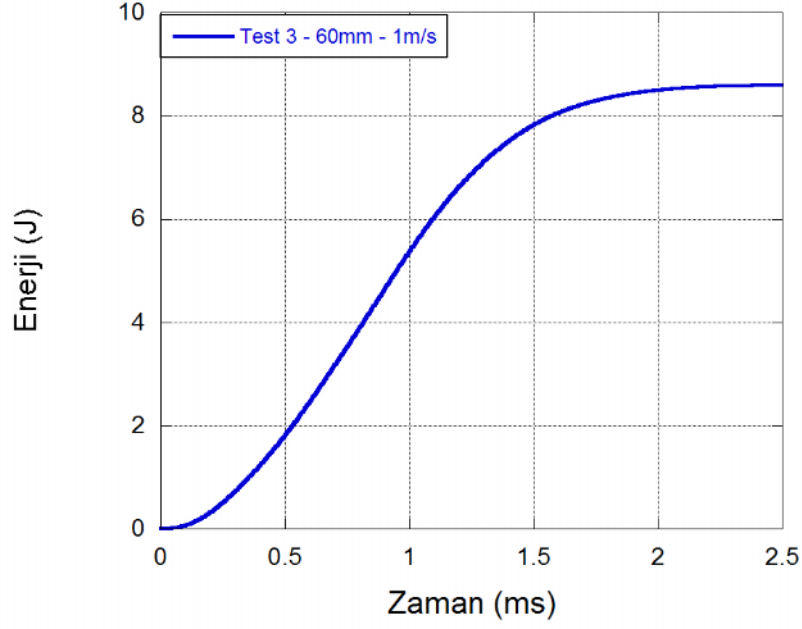


Şekil 77’de iki testten elde edilen kuvvet, enerji ve hızın zamana göre değişimi karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Şekil 77 (a)’daki kuvvet – zaman grafiği incelendiğinde çarpma hızındaki 3 katlık artış, kuvveti 2.20 kat artırmıştır. Şekil 77 (b)’den testlerdeki enerjiler kıyaslandığında hızdaki artış enerjinin 4 kat artmasına sebep olmuştur. Vurucu ucun perforasyon sonrasında kinetik enerji içerdiği unutulmamalıdır.

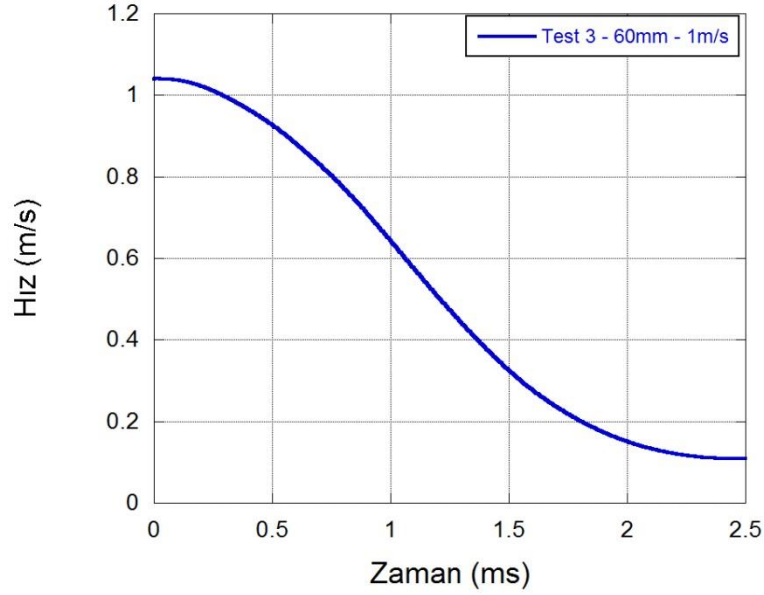
Bir sonraki taban sınır şartı olarak 60 mm boşluk seçilmiştir. Önceki test çiftine benzer şekilde çarpma hızı 1 m/s ve 3 m/s olarak seçilmiştir. Şekil 78’den görülebileceği gibi maksimum kuvvet değeri 11 kN olarak ölçülmüştür ve bu değere yaklaşık olarak 1 milisaniyede ulaşılmıştır. Şekil 79’da sunulan enerji zaman eğrisine bakıldığında toplamda maksimum 8.60 Joule’lük enerji değerine ulaşılmıştır. Kuvvetin maksimum olduğu andaki enerji değeri ise 5.80 Joule olarak ölçülmüştür. Deney sırasında gerçek çarpma hızı ise Şekil 80’den de anlaşılacağı gibi 1.07 m/s olarak ölçülmüştür.



Şekil 78. Kuvvet – zaman eğrisi (Test 3: 1 m/s çarpma hızı ve 60 mm boşluk sınır şartı).



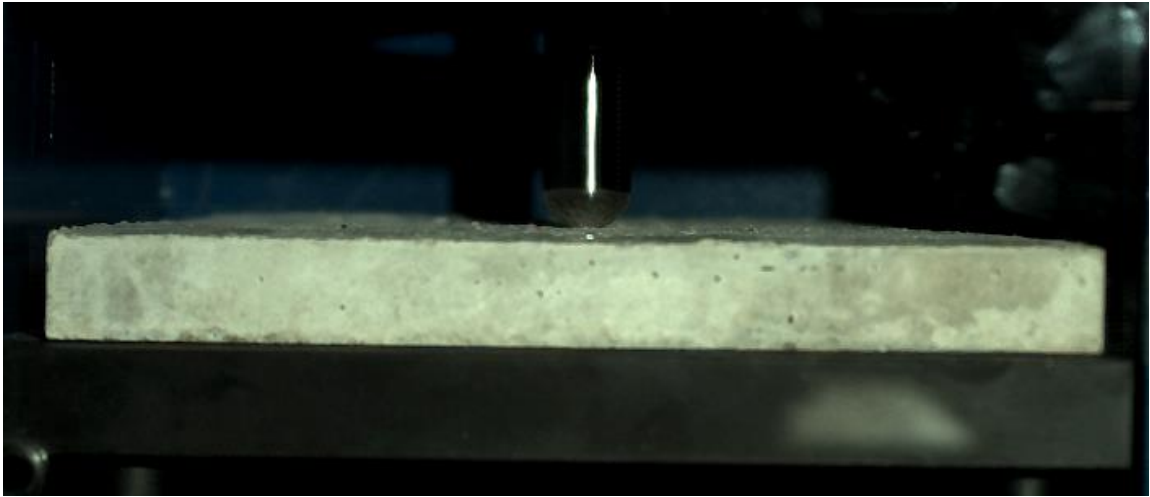
Şekil 79. Enerji – zaman eğrisi (Test 3: 1 m/s çarpma hızı ve 60 mm boşluk sınır şartı).



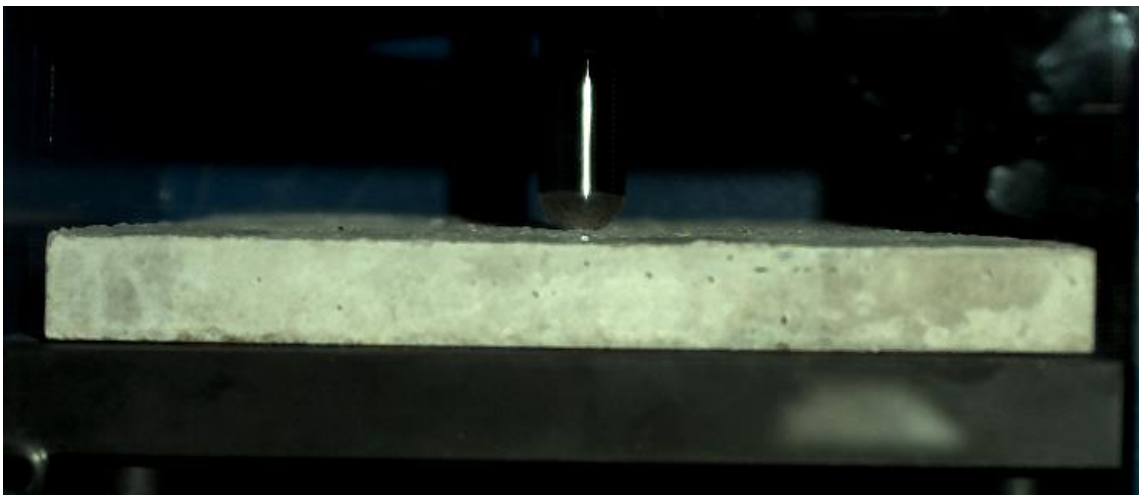
Şekil 80. Hız – zaman eğrisi (Test 3: 1 m/s çarpma hızı ve 60 mm boşluk sınır şartı).

Şekil 81' de sunulan yüksek hızlı kamera görüntüleri incelendiğinde numunedeki hasarın yükleme başlangıcından 1.5 milisaniye sonra net olarak yan yüzeyde çatlak oluşumu olarak meydana geldiği tespit edilmiştir. Şekil 82 (a) ve (b)' de görüldüğü gibi numune asimetrik olarak 5 parçaya bölmüştür.

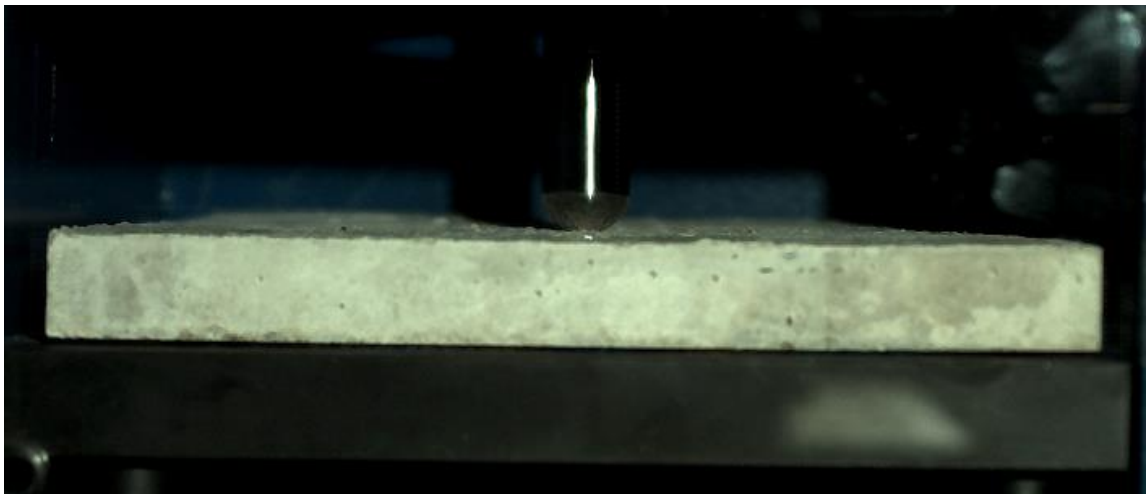




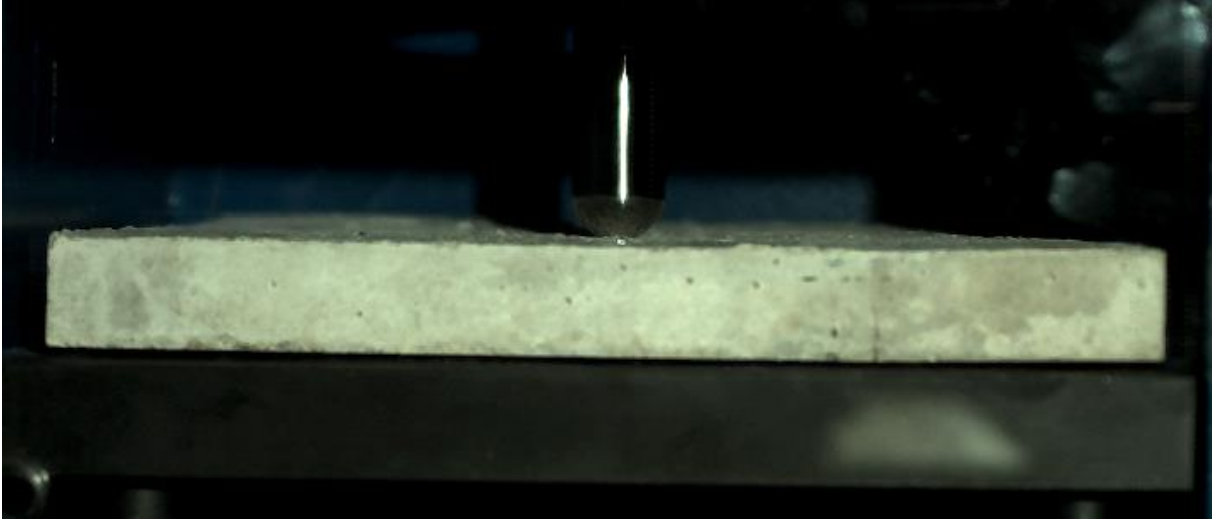
0 ms



0.5 ms

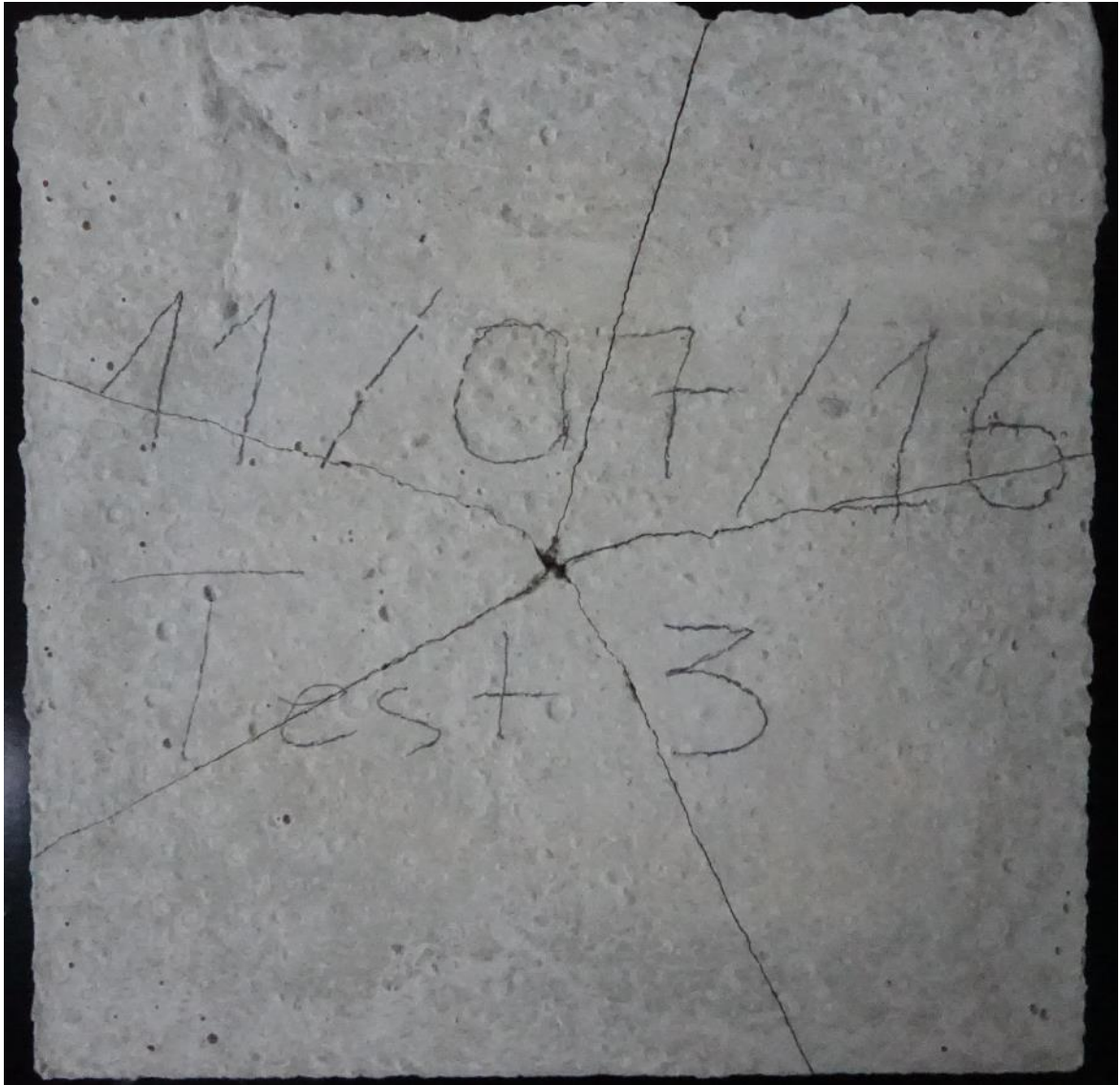


1 ms



1.5 ms

Şekil 81. Düşen ağırlık test-3 hasar tarihçesi (10000 fps).



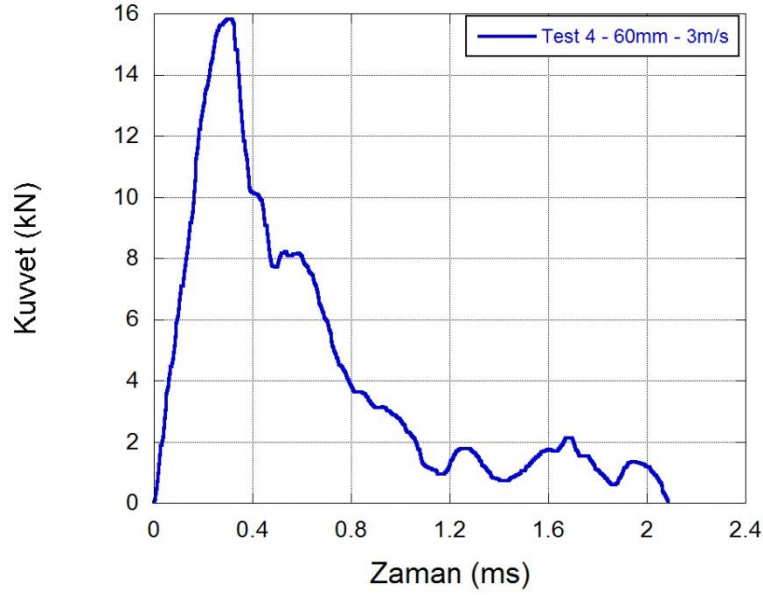
(a)



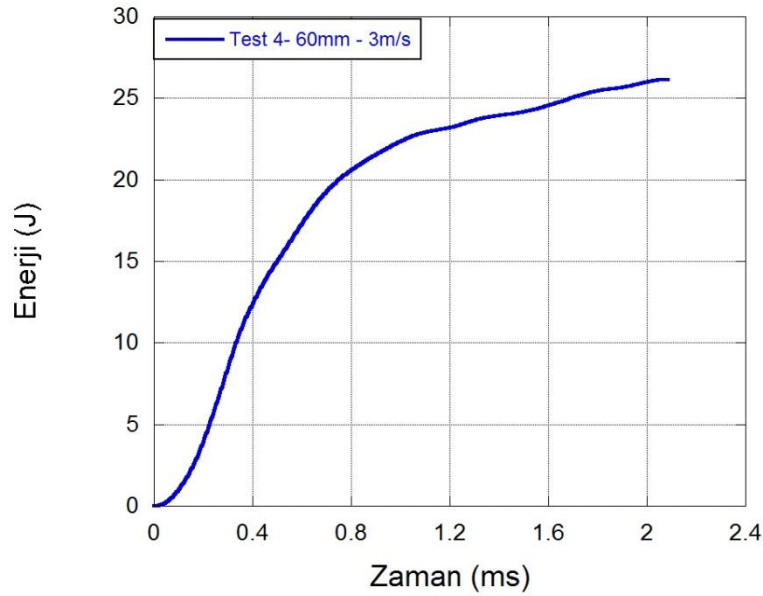
(b)

Şekil 82. Deney sonrası numune hasarı: (a) ön yüzey ve (b) arka yüzey.

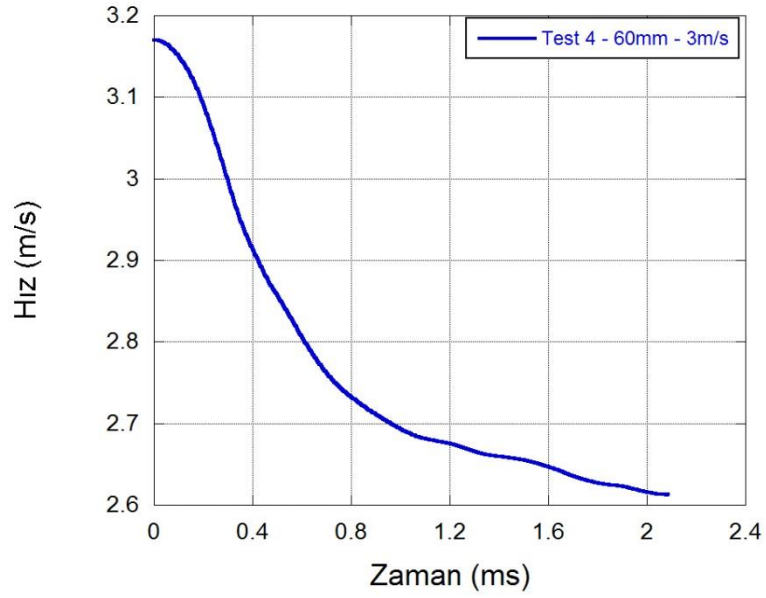
Çarpma hızının bu sınır şartındaki etkinliğini görmek amacıyla hız 3 m/s çıkarılmıştır. Hızın 3 kat artırılmasıyla birlikte beklenildiği gibi kuvvet ve enerji değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Şekil 83' te sunulan kuvvet zaman grafiği incelendiğinde maksimum kuvvet değeri test başladıktan 0.3 milisaniye sonra 15.80 kN olarak ölçülmüştür. Bu kuvvete karşılık gelen enerji değeri ise Şekil 84' te sunulan enerji zaman eğrisinden 8.40 joule olarak tespit edilmiştir. Test sonunda elde edilen toplam enerji değeri ise 26.15 Joule olarak ölçülmüştür. Şekil 85' te ise hızın zamana bağlı değişimi sunulmuştur.



Şekil 83. Kuvvet – zaman eğrisi (Test 4: 3 m/s çarpma hızı ve 60 mm boşluk sınır şartı).



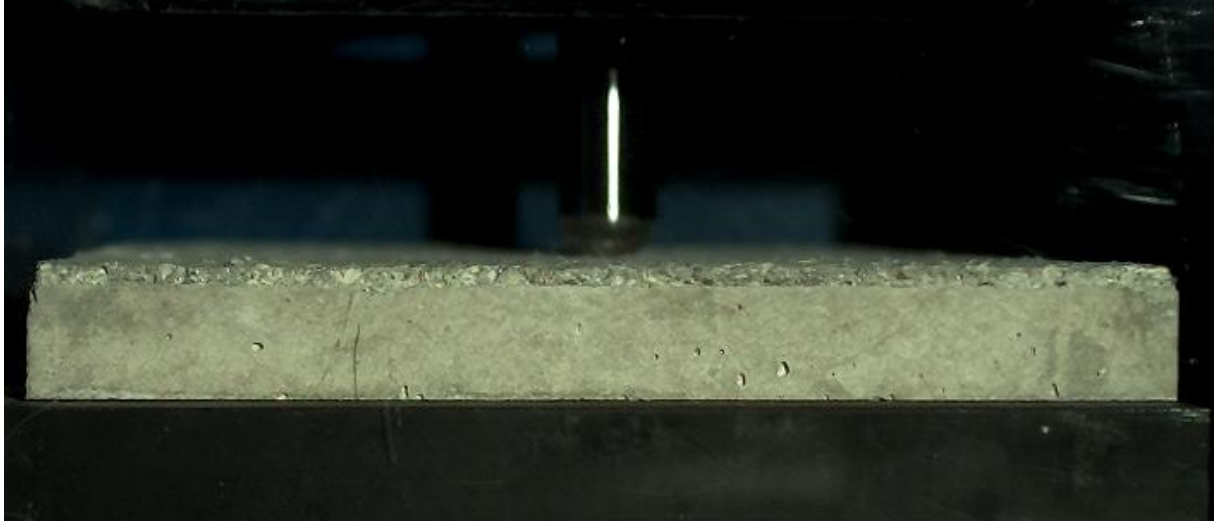
Şekil 84. Enerji – zaman eğrisi (Test 4: 3 m/s çarpma hızı ve 60 mm boşluk sınır şartı).



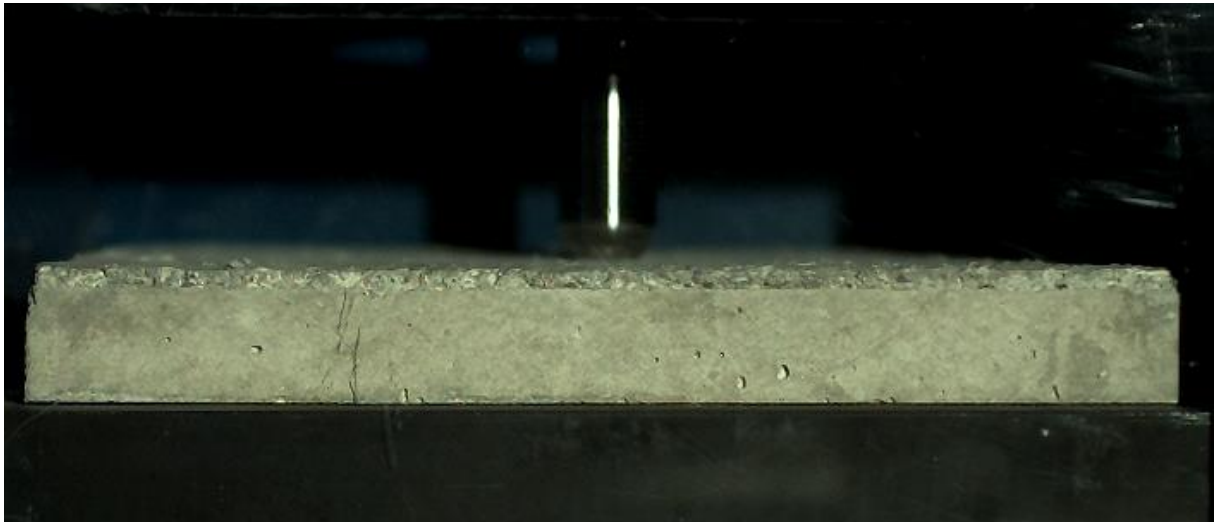
Şekil 85. Hız – zaman eğrisi (Test 4: 3 m/s çarpma hızı ve 60 mm boşluk sınır şartı).

Şekil 86' da sunulan yüksek hızlı kamera görüntüleri incelendiğinde 0.3 milisaniye anında numune yanal yüzeyine çatlağın ulaştığı ve hızla ilerleyerek 0.9 milisaniye anında katastrofik hasarın meydana geldiği tespit edilmiştir. Şekil 87 (a) ve (b)' de verilmiş olan numune hasarları incelendiğinde, numune bir önceki teste benzer şekilde asimetric 5 parçaya ayrılmış olduğu görülmektedir. Yine gevrek malzemelerin tipik hasar modlarından birisi olan spall oluşumu bu numunede tespit edilmiştir. Spall oluşumuna darbe anında meydana gelen basma gerilme dalgasının numune arka yüzeyinden çekme dalgası olarak yansması sebep olmaktadır. Nitekim gevrek malzemelerin çekme mukavemetleri basma mukavemetleri ile kıyaslandığında oldukça düşük seviyelerde kalmaktadır.

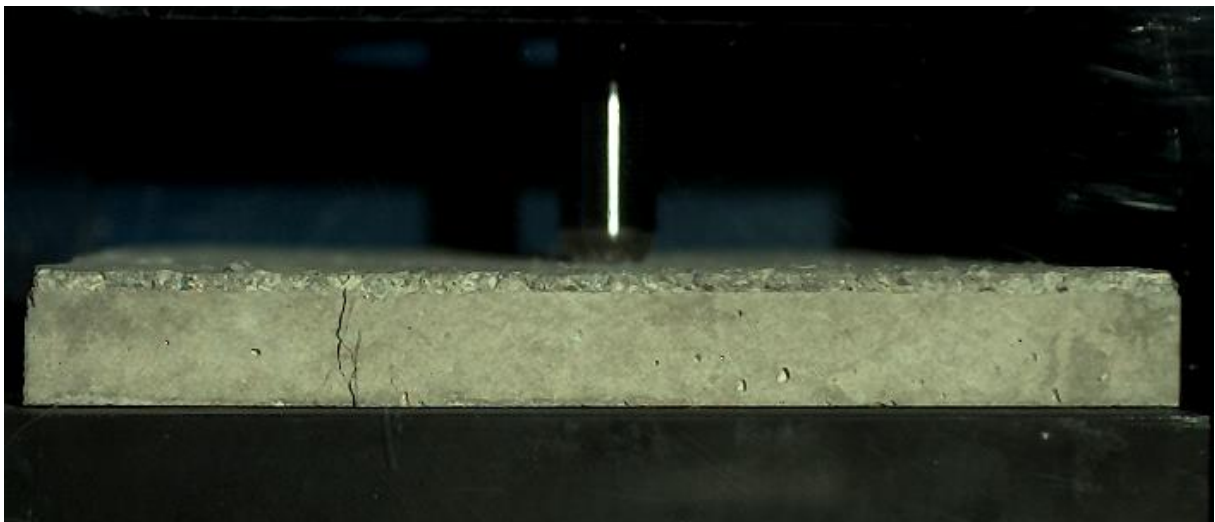




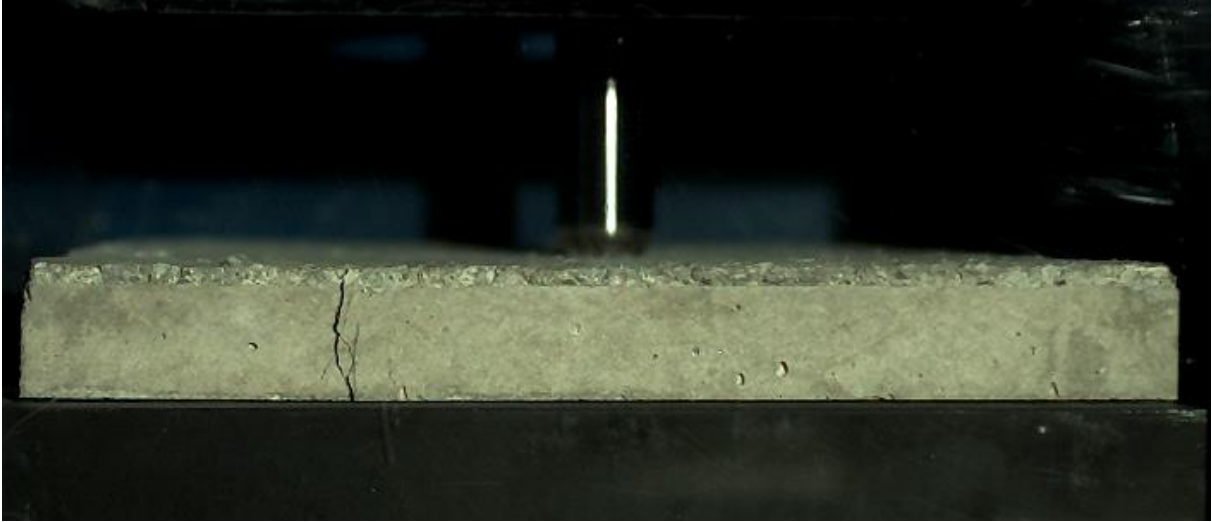
0 ms



0.3 ms



0.6 ms



0.9 ms

Şekil 86. Düşen ağırlık test-4 hasar tarihçesi (10000 fps).



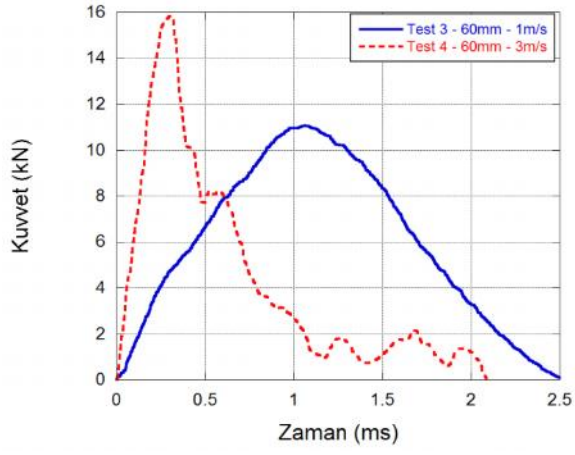


(a)

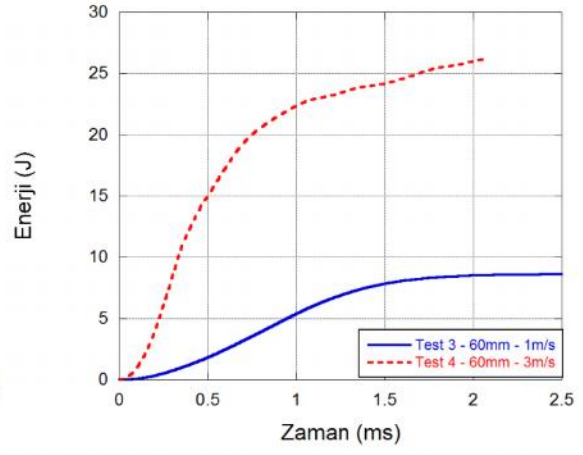


(b)

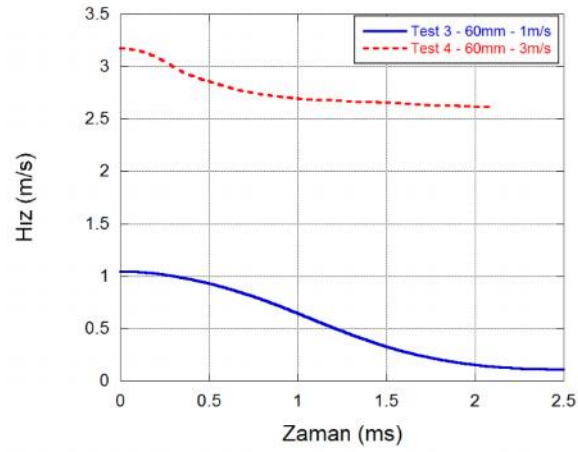
Şekil 87. Deney sonrası numune hasarı: (a) ön yüzey ve (b) arka yüzey.



(a)



(b)

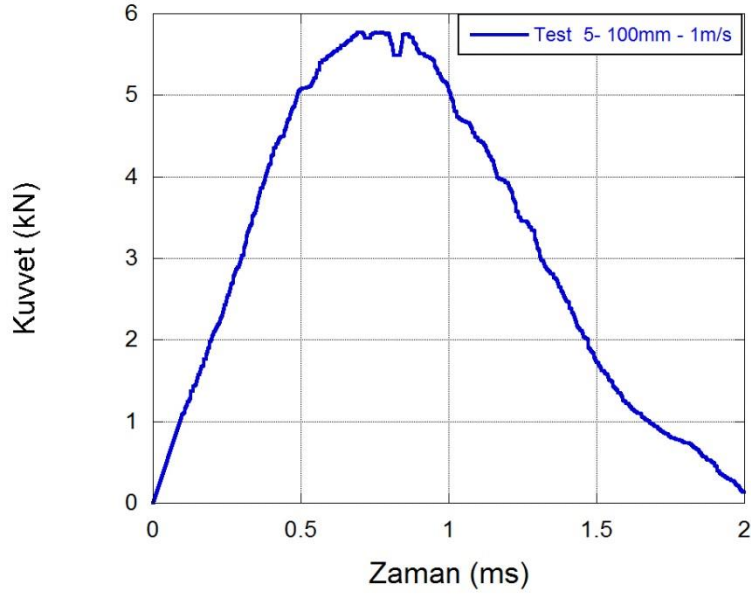


(c)

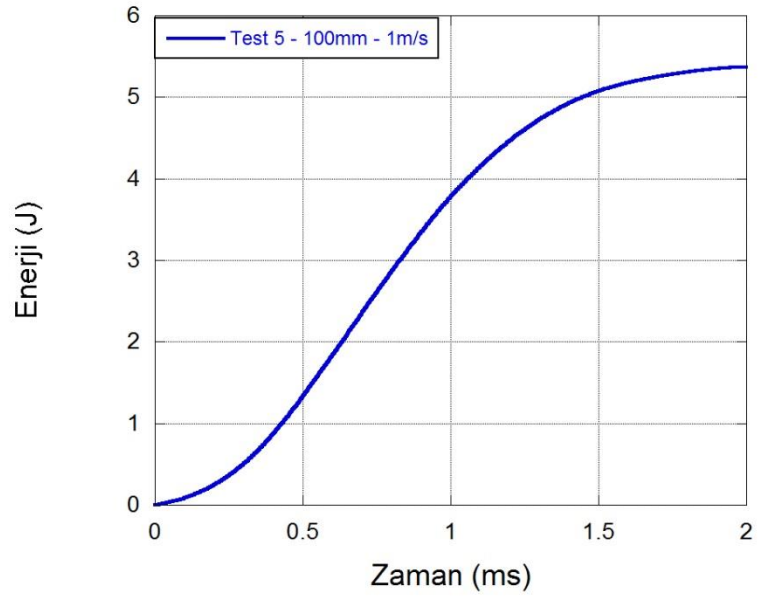
Şekil 88. Test 3 ve 4' ün birlikte incelenmesi.

Şekil 88' de 60 mm boşluk sınır şartına sahip testlerin kuvvet, enerji ve hız parametrelerinin zamana göre değişimi karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Hızın artışı ile birlikte enerji ve kuvvet seviyelerinde artışlar meydana gelmiştir.

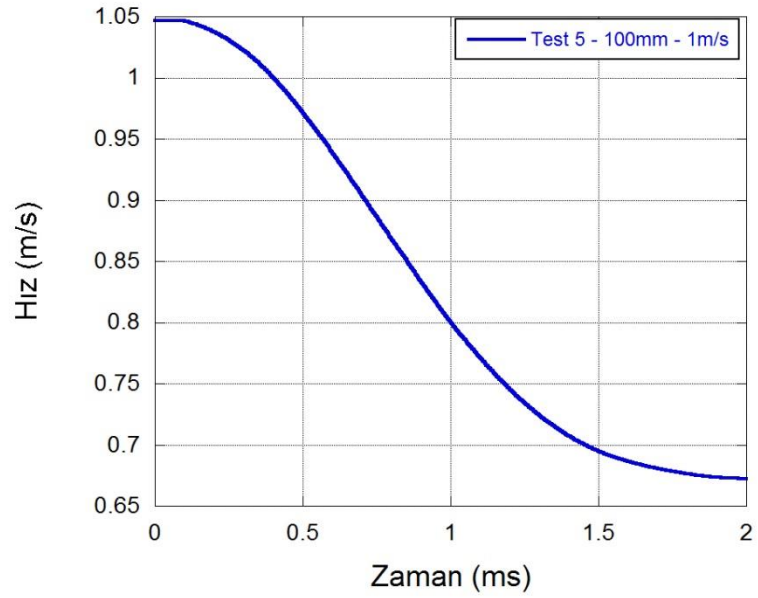
Son sınır şartı olan 100 mm boşluklu testler de yine 1 ve 3 m/s çarpma hızları için gerçekleştirilmiştir. Şekil 89' da sunulan kuvvet zaman grafiği beşinci teste ait olup, maksimum kuvvet 5.70 kN (0.7 milisaniyede) olarak tespit edilmiştir. Şekil 90' da enerji - zaman grafiği verilmiş ve maksimum yüke ulaşıldığı anda enerji 2.40 Joule olarak hesaplanmıştır. Deney süresince toplam 5.40 Joule enerji seviyesine erişilmiştir. Ayrıca, Şekil 91' deki hız – zaman eğrisinden de anlaşılacağı gibi test esnasındaki gerçek çarpma hızı 1.05 m/s olarak tespit edilmiştir.



Şekil 89. Kuvvet – zaman eğrisi (Test 5: 1 m/s çarpma hızı ve 100 mm boşluk sınır şartı).

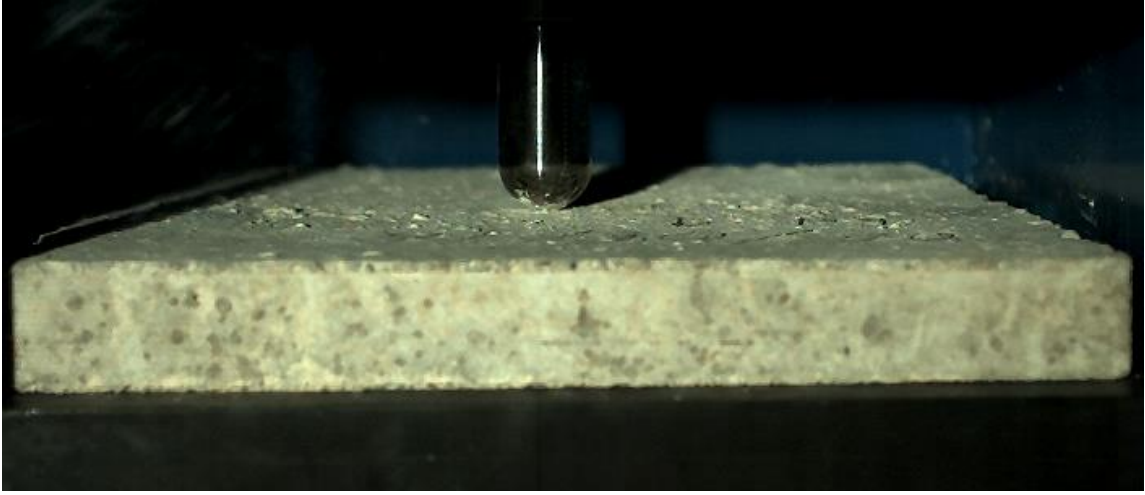


Şekil 90. Enerji – zaman eğrisi (Test 5: 1 m/s çarpma hızı ve 100 mm boşluk sınır şartı).

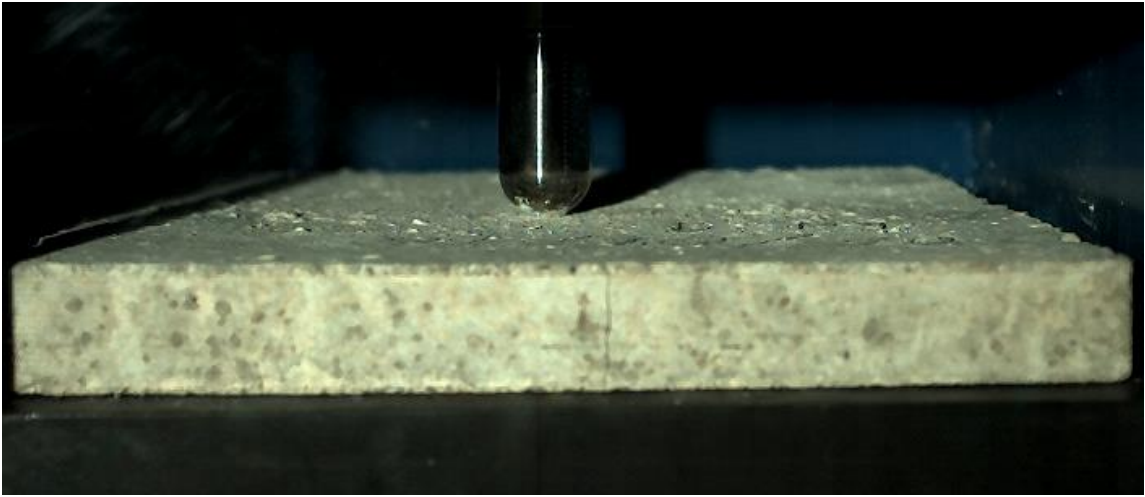


Şekil 91. Hız – zaman eğrisi (Test 5: 1 m/s çarpma hızı ve 100 mm boşluk sınır şartı).

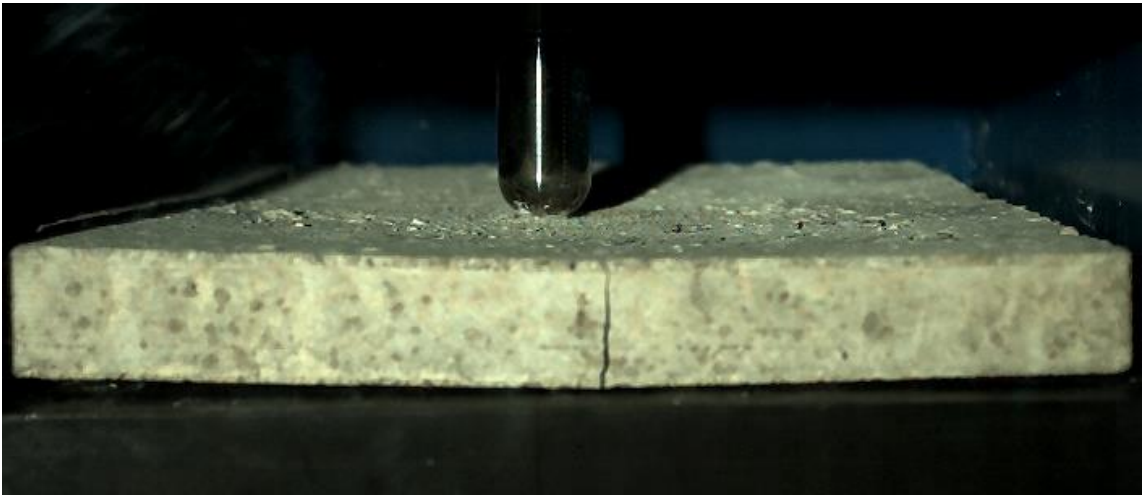
Şekil 92' deki hasar tarihçesi incelendiğinde numunenin yanal yüzeyindeki ilk hasar 0.7 milisaniye civarında gözlemlenmiştir. Bu zaman dilimi aynı zamanda vurucu uçtan elde edilen kuvvetin en yüksek olduğu bölgedir. Söz konusu çatlak deney sonunda (2 milisaniye) daha da belirginleştiği gözlemlenmiştir. Şekil 93 (a) ve (b)' de sunulan deney sonrası numune ön ve arka yüzey hasarı incelendiğinde numunenin simetrik olmayan 4 parçaya ayrıldığı görülmüştür. Her iki yüzeyde gözlemlenen toplam çatlak uzunlukları Tablo 7' de sunulmuştur.



0 ms



0.7 ms



2 ms

Şekil 92. Düşen ağırlık test-5 hasar tarihçesi (10000 fps).





(a)

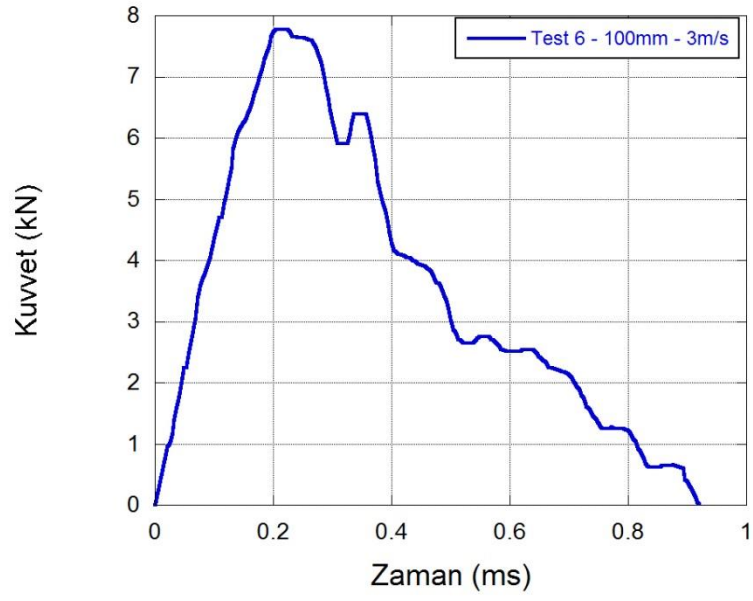




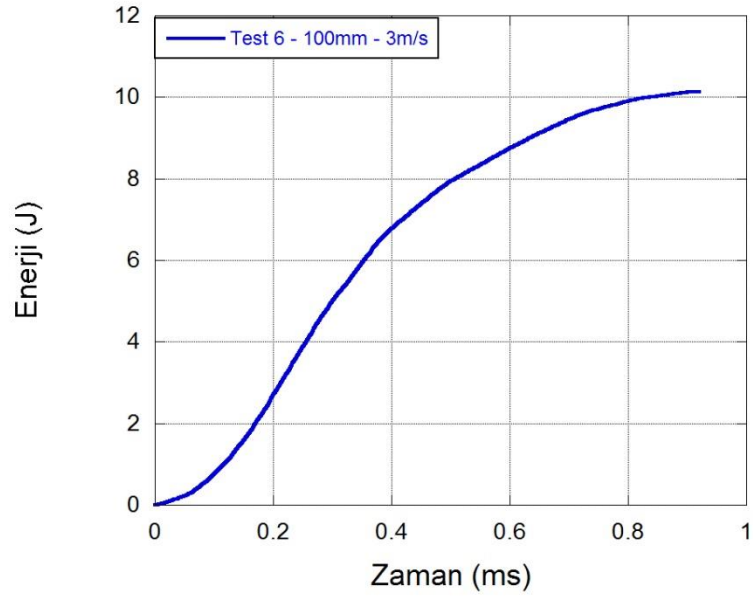
(b)

Şekil 93. Deney sonrası numune hasarı: (a) ön yüz ve (b) arka yüz.

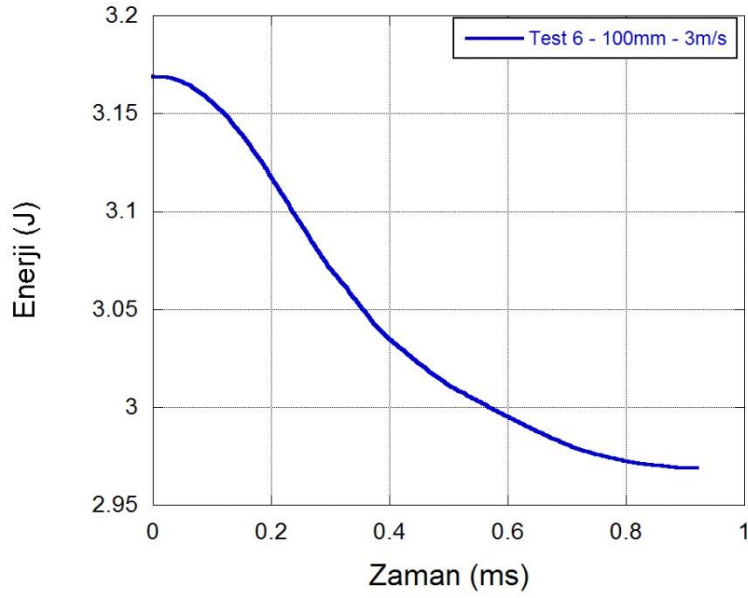
Testlere 3 m/s çarpma hızı ile devam edilmiştir. 100 mm delikli 3 m/s hızla gerçekleştirilen testin kuvvet – zaman eğrisi Şekil 94’ te verilmiştir. Deney sırasında en yüksek kuvvet değeri olan 7.80 kN seviyesine 0.25. milisaniyede erişilmiştir. Bu kuvvet değerindeki anda enerji 3 Joule olarak ölçülmüştür, Şekil 95. Deney sırasında tespit edilen maksimum enerji 12.10 Joule olmuştur. Şekil 96’ daki hız- zaman grafiğinden numunenin perfore olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 94. Kuvvet – zaman eğrisi (Test 6: 3 m/s çarpma hızı ve 100 mm boşluk sınır şartı).

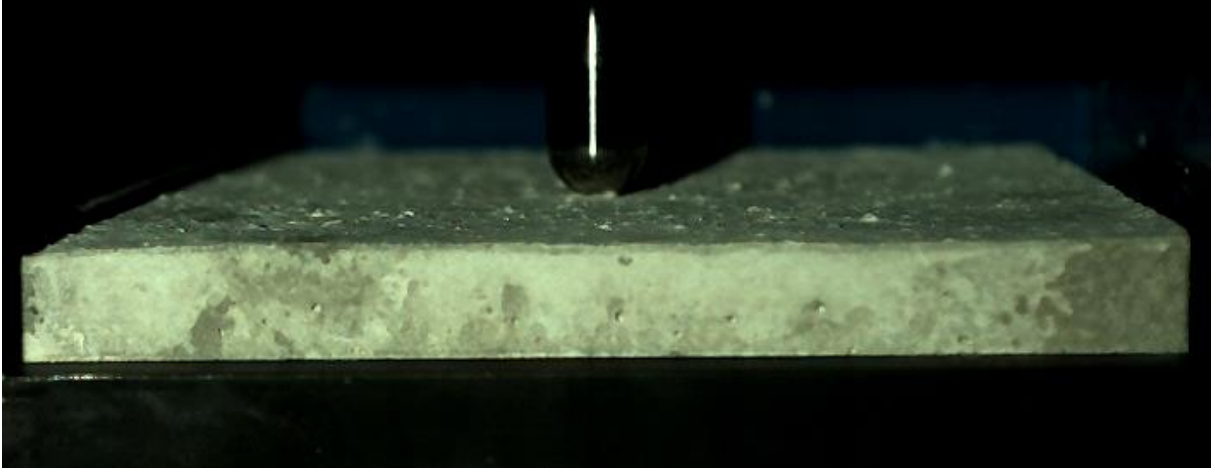


Şekil 95. Enerji – zaman eğrisi (Test 6: 3 m/s çarpma hızı ve 100 mm boşluk sınır şartı).

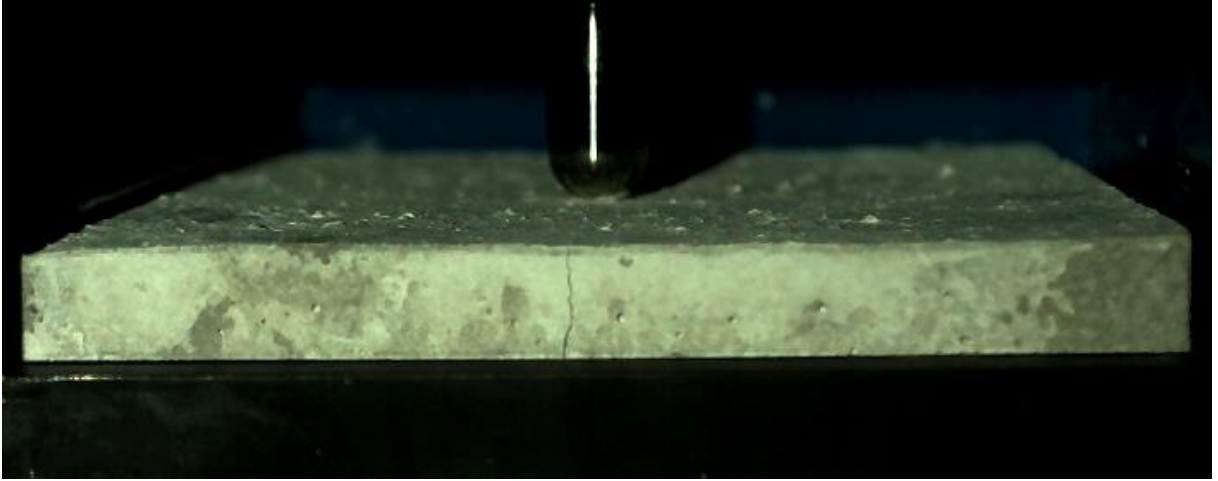


Şekil 96. Hız – zaman eğrisi (Test 6: 3 m/s çarpma hızı ve 100 mm boşluk sınır şartı).

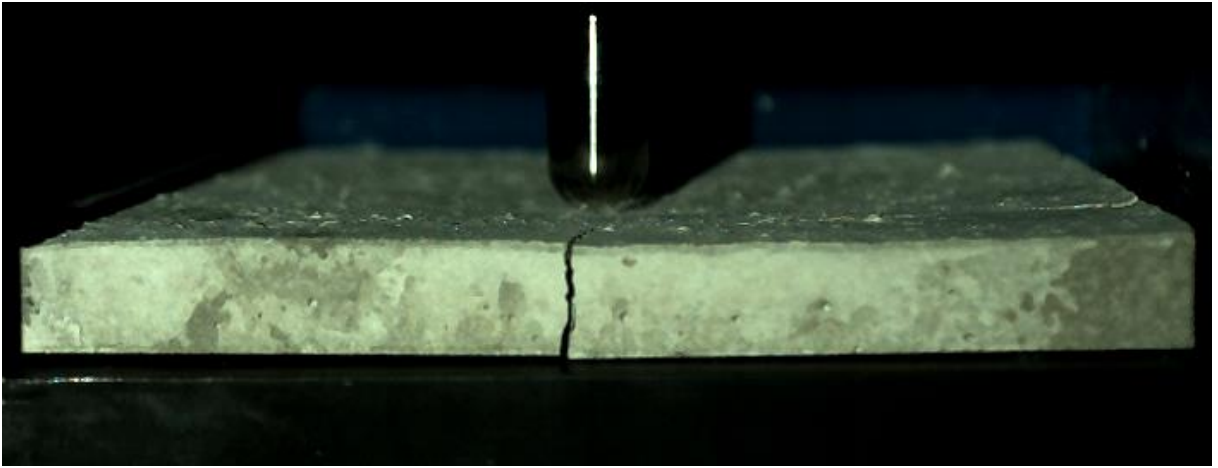
Şekil 97' de sunulan numune hasar tarihçesi incelendiğinde 0.3 milisaniyede çatlak yanal yüzeyde gözlemlenmiş olup, söz konusu çatlak deney sonuna doğru ilerlemiştir. Ayrıca Şekil 98 (a) ve (b)' de sunulan numune ön ve arka yüzey hasarı incelendiğinde, numunenin orta bölümünün bir önceki 3 m/s' lik testte olduğu gibi delik çapıyla orantılı bir şekilde hasar aldığı görülmüştür. Her iki yüzeyde gözlemlenen çatlak uzunlukları Tablo 7' de sunulmuştur. Numunenin tabanındaki destekleme alanının azalması ve çarpma hızının artması ile birlikte numunede radyal kırıkların yanı sıra çevresel kırıkların da meydana gelme eğiliminin arttığı tespit edilmiştir.



0 ms



0.3 ms



1 ms

Şekil 97. Düşen ağırlık test-6 hasar tarihçesi (10000 fps).



(a)



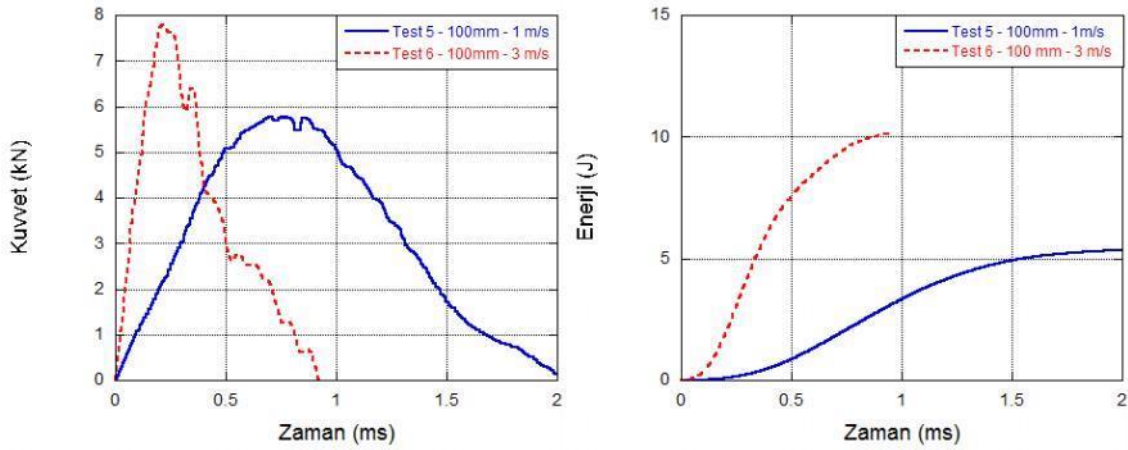


(b)

Şekil 98. Deney sonrası numunede oluşan hasar: (a) ön yüzey ve (b) arka yüzey.

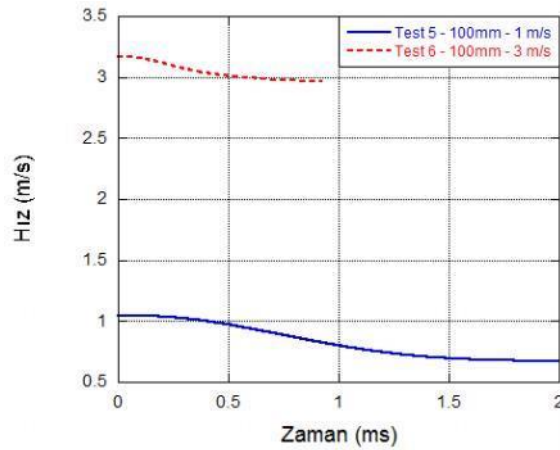
Şekil 99' da 100 mm boşluk sınır şartına sahip iki testin kuvvet, enerji ve hız değerlerinin zamana göre değişimleri karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Şekil 99 (a)' da kuvvet – zaman grafiği sunulmuştur. Çarpma hızının 1 m/s olduğu beşinci testte maksimum kuvvete 0.7 milisaniyelik sürede ulaşılmış ve maksimum kuvvet değeri ise 5.7 kN civarında çıkmıştır. Diğer taraftan uç hızının 3 m/s olduğu testte kuvvet %35 daha fazladır. Şekil 99 (b)' de testlerde enerjiler birbirleri ile kıyaslanmıştır. Beklendiği gibi çarpma hızının 3 m/s olduğu testte enerji seviyeleri testin her anında çarpma hızının 1 m/s olduğu teste göre daha yüksek çıkmıştır. Şekil 100' de 1 m/s çarpma hızı için üç farklı sınır şartına sahip testlerin kuvvet, enerji ve hız parametrelerinin zamana göre değişimi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Kuvvet zaman tarihçeleri incelendiğinde, alt yüzeyin kapalı olduğu sınır şartına sahip ilk test,

60 mm boşluk sınır şartına sahip 3. testte ulaşılan en yüksek kuvvet değerinin altında kalmıştır. Yüzeyin 100 mm açıklığa sahip sınır şartlı durumda ise kuvvet en düşük seviyelerde kalmıştır. 1 m/s çarpma hızında yapılan testlerde deliksiz olan sınır şartında numunede gözle görülebilir çatlak oluşumu meydana gelmezken diğer iki sınır şartına sahip numunelerde katastrofik hasar meydana gelmiştir. Enerjiler incelendiğinde ise yine kuvvet tarihçeleri ile ilgili yapılan yorumlarla uyumlu olarak en yüksek enerji seviyeleri ilk testte ve en düşük enerji seviyeleri ise beşinci testte özetlenmiştir. Son olarak hız tarihçesi incelenmiş ve ilk test hariç diğer testlerde hızdaki zamana bağlı azalmanın, sınır şartı boşluğu ile ters orantılı olarak değiştiği tespit edilmiştir.



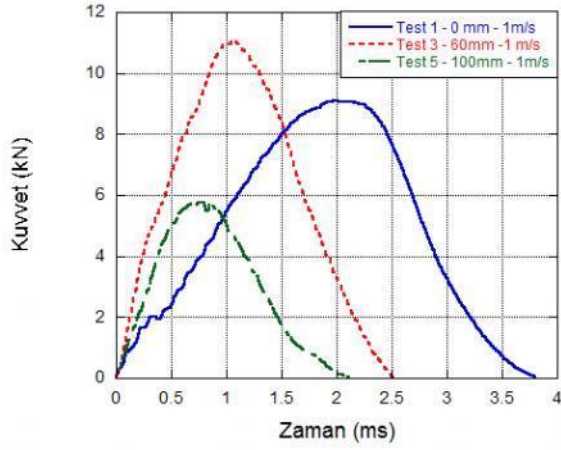
(a)

(b)

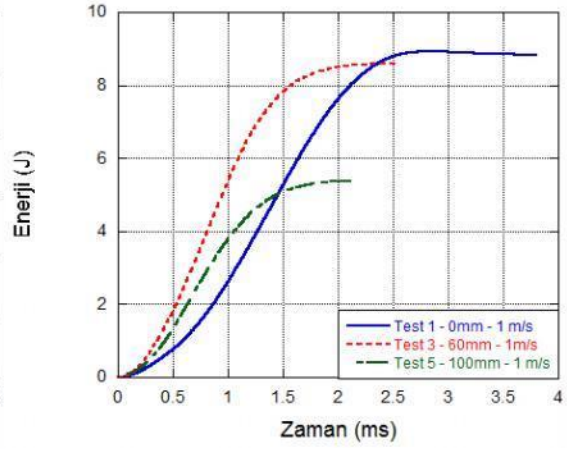


(c)

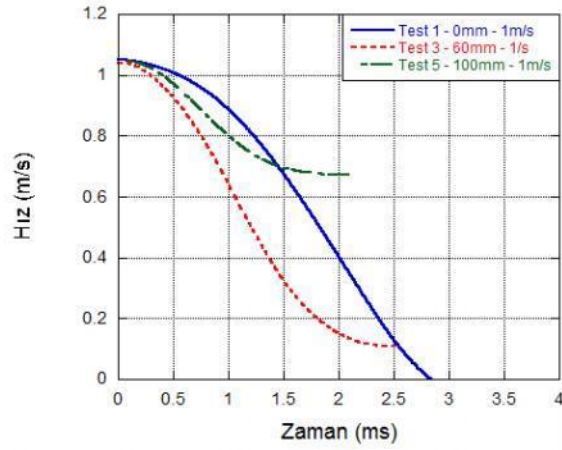
Şekil 99. Test 5 ve 6 karşılaştırması.



(a)



(b)

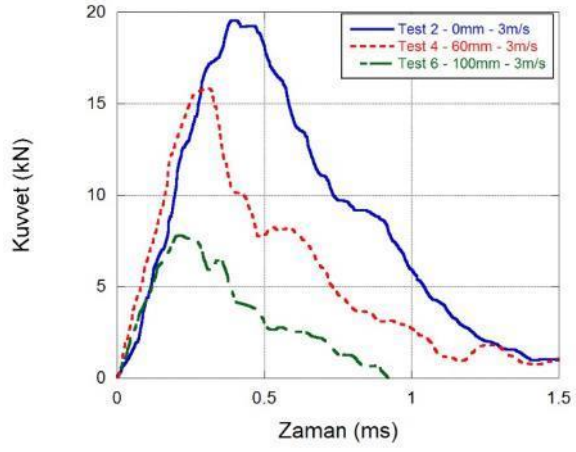


(c)

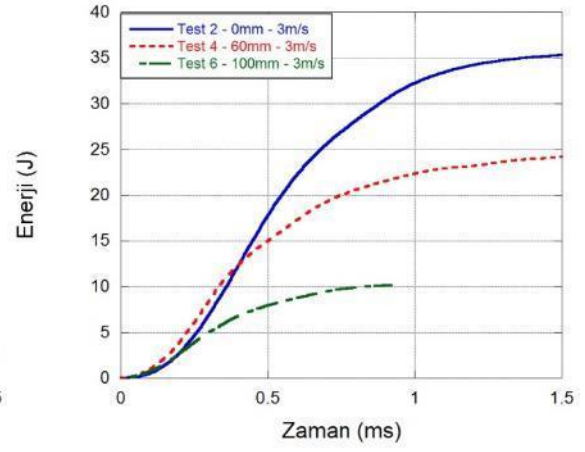
Şekil 100. 1 m/s çarpma hızının; kuvvet-zaman, enerji-zaman ve hız-zaman eğrileri üzerine etkileri.

Benzer bir karşılaştırma çarpma hızının 3 m/s olduğu diğer testler için de yapılmış ve Şekil 101' de kuvvet, enerji ve hız tarihçeleri sunulmuştur. En yüksek kuvvet, sınır şartı olarak alt yüzeyin tam kapalı olduğu testte elde edilmiştir. Beklendiği gibi boşluk çapı büyüdükçe kuvvette azalma tespit edilmiştir, Tablo 6. Diğer taraftan enerji tarihçesi incelendiğinde boşluk çapı arttıkça düşüş gözlemlenmiştir. Son olarak testlerin hız tarihçeleri Şekil 101 (c)' de kıyaslanarak sunulmuştur.

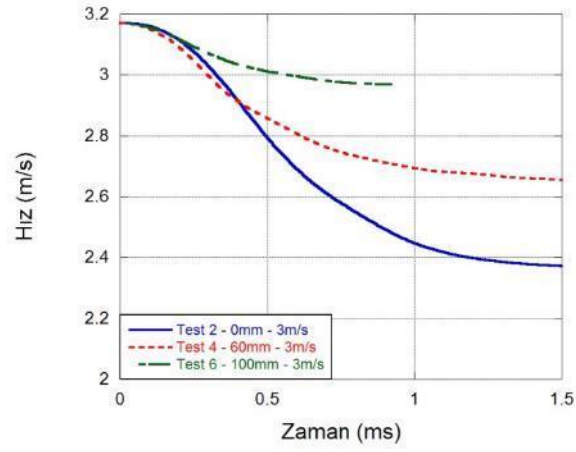




(a)



(b)



(c)

Şekil 101. 3 m/s çarpma hızının; kuvvet-zaman, enerji-zaman ve hız-zaman eğrileri üzerine etkileri.

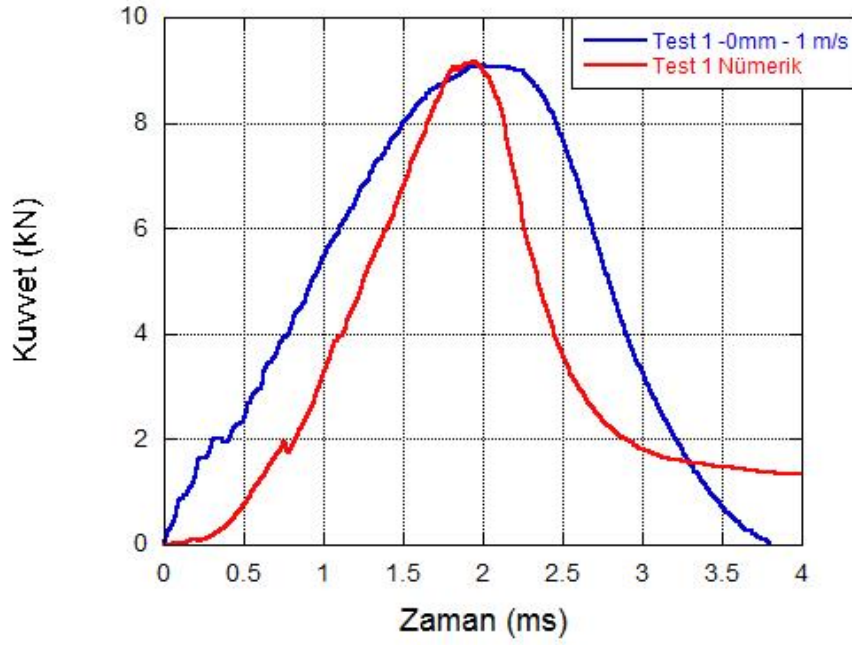
Tablo 6. Değişen sınır ve çarpma hızı şartlarında kuvvetin incelenmesi.

Test Numarası	Delik Çapı (mm)	Hız (m/s)	En Yüksek Kuvvet (kN)	Ortalama Kuvvet (kN)
Test 1	0	1	9.10	4.88
Test 3	60	1	11	5.97
Test 5	100	1	5.80	3.05
Test 2	0	3	20	6.30
Test 4	60	3	15.70	4.35
Test 6	100	3	7.80	3.61

Tablo 7. Değişen sınır ve çarpma hızı şartlarında çatlak incelenmesi.

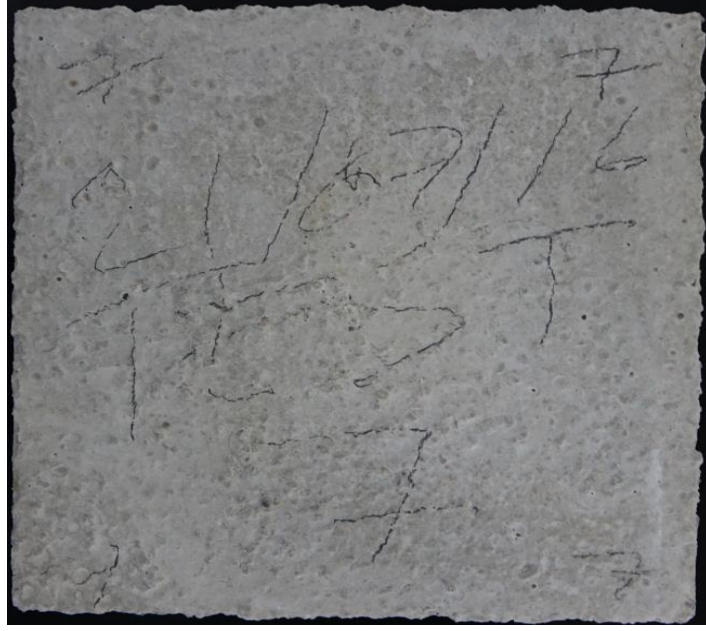
Test Numarası	Delik Çapı (mm)	Hız (m/s)	Üst Yüz Çatlak Uzunluğu (mm)	Alt Yüz Çatlak Uzunluğu (mm)
Test 1	0	1	0	0
Test 3	60	1	552	531
Test 5	100	1	487.20	478.71
Test 2	0	3	389	369.45
Test 4	60	3	576.67	570.46
Test 6	100	3	1128.43	1218.63

Nümerik analiz ve testten elde edilen kuvvet-zaman eğrisi karşılaştırmalı olarak Şekil 102' de sunulmuştur.

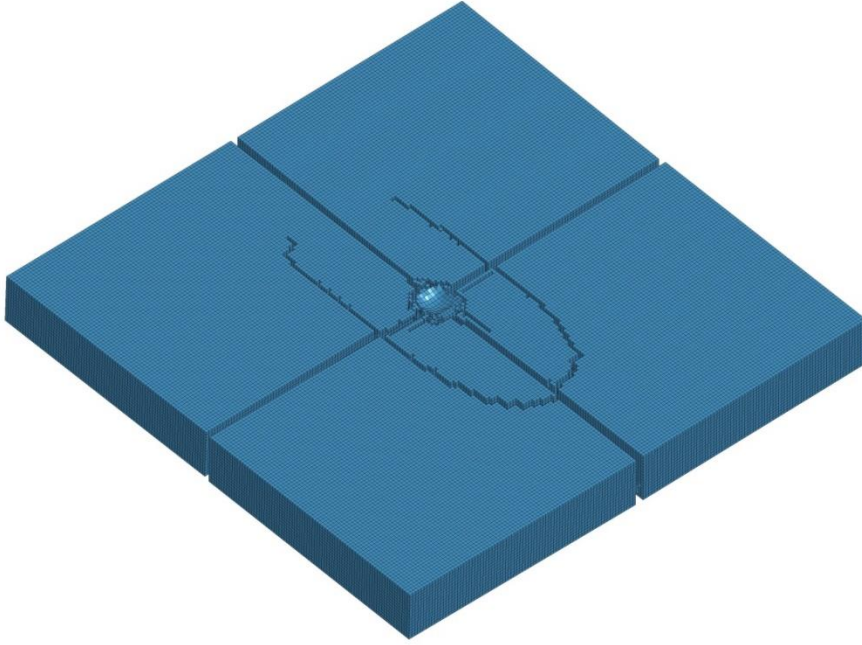


Şekil 102. Deneysel ve nümerik analiz kuvvet – zaman eğrisi karşılaştırılması (1 m/s çarpma hızı ve 0 mm boşluk sınır şartı).

Test ve nümerik analiz kuvvet eğrisi 2 milisaniye (ms) civarında 9 kN' luk pik değere ulaşmış ve zamana bağlı olarak hızla azalmıştır. Ayrıca simülasyon ve test süresi boyunca (4 ms) elde edilen ortalama kuvvet sırasıyla 3.40 kN ve 4.88 kN olarak tespit edilmiştir. Şekil 103 ve Şekil 104' te deney ve nümerik analizin tamamlandığı andaki numune ön ve arka yüzey hasarı sunulmuştur. Deneysel numunenin ön ve arka yüzeyinde herhangi bir makroskopik hasara rastlanmamış ancak simülasyon numunesi simetrik dört ana parçaya ayrılmış ve çarpmanın meydana geldiği noktada betonda ezilme olduğu gözlemlenmiştir.



(a)

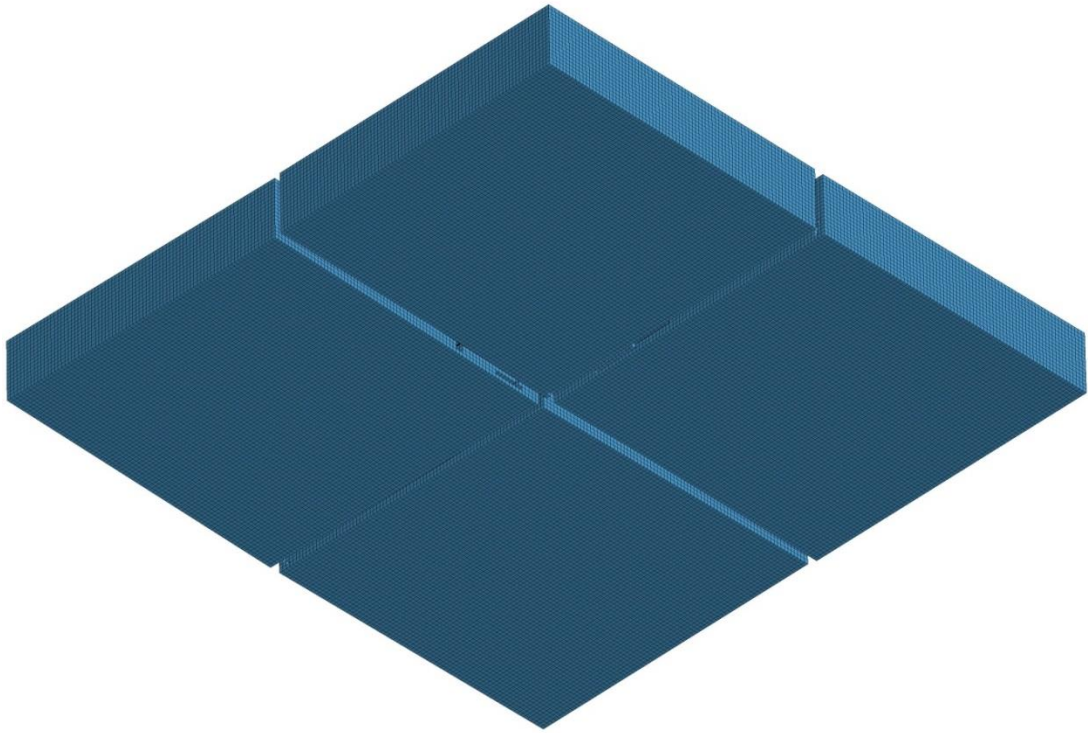


(b)

Şekil 103. Numune ön yüzey hasarı: (a) deney (b) nümerik analiz.



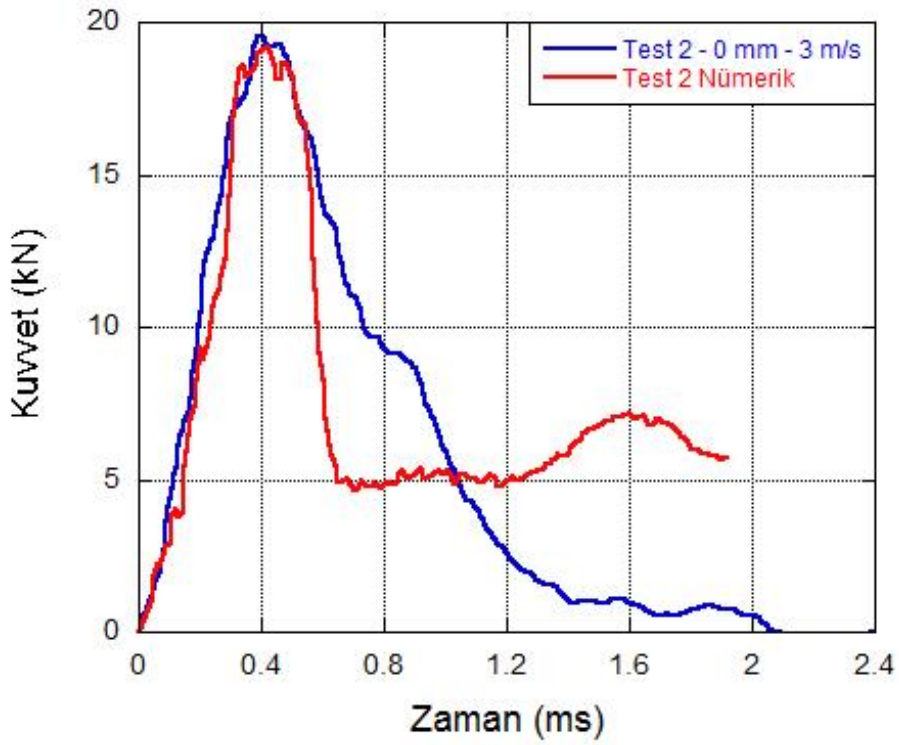
(a)



(b)

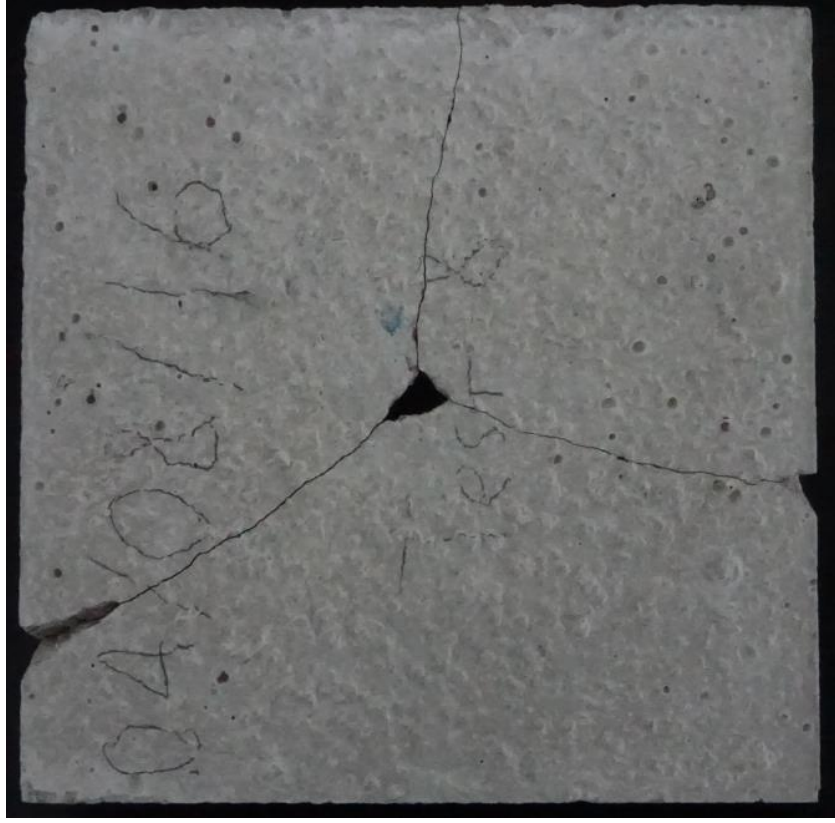
Şekil 104. Numune arka yüzey hasarı: (a) deney (b) nümerik analiz.

Çarpma hızı 3 kat artırıldığında test ve nümerik analizde elde edilen pik kuvvet değeri 19 kN olarak ölçülmüştür, Şekil 105. Bu değere her iki durumda 0.4 ms' de ulaşılmıştır. Simülasyon ve test süresi boyunca (2 ms) elde edilen ortalama kuvvetler ise sırasıyla; 7.60 kN ve 6.50 kN olmuştur. Şekil 106 ve Şekil 107' de deney ve nümerik analizin tamamlandığı anda numune ön ve arka yüzey hasarı sunulmuştur. Deneysel numune üç parçalı bir yapı haline gelmiş ve çarpma bölgesinde beton malzeme ezilmiş ve toz haline dönüşmüştür. Simülasyon numunesi incelendiğinde çarpma bölgesinde malzemedeki ezilme görülmele birlikte, dört parçalı bir yapı söz konusudur.

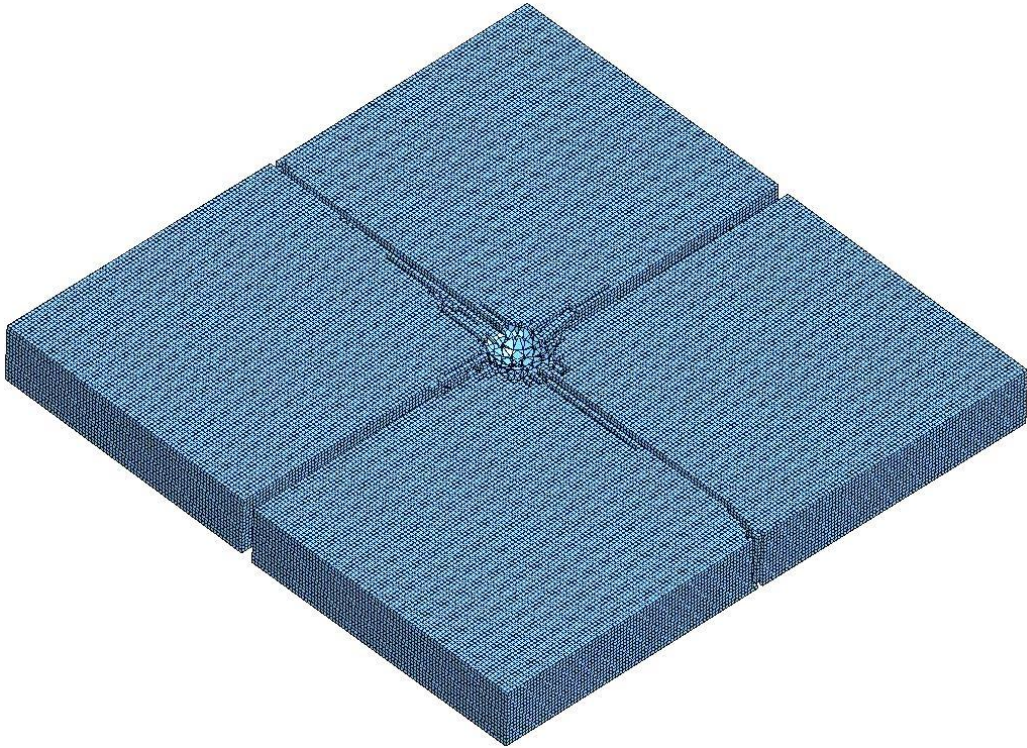


Şekil 105. Deneysel ve nümerik analiz kuvvet – zaman eğrisi karşılaştırılması (3 m/s çarpma hızı ve 0 mm boşluk sınır şartı).



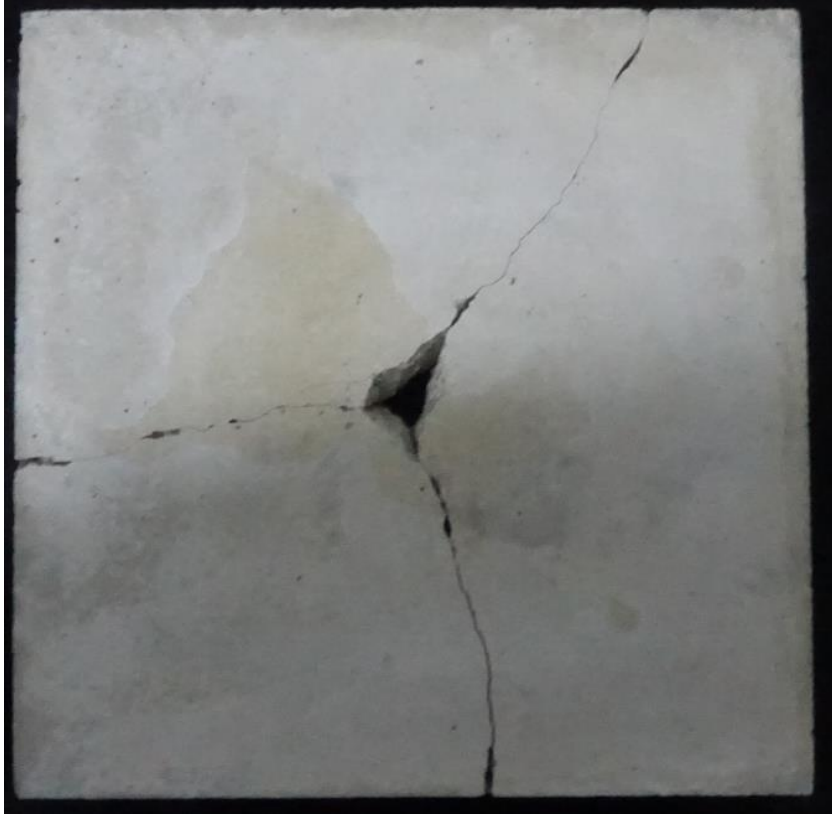


(a)

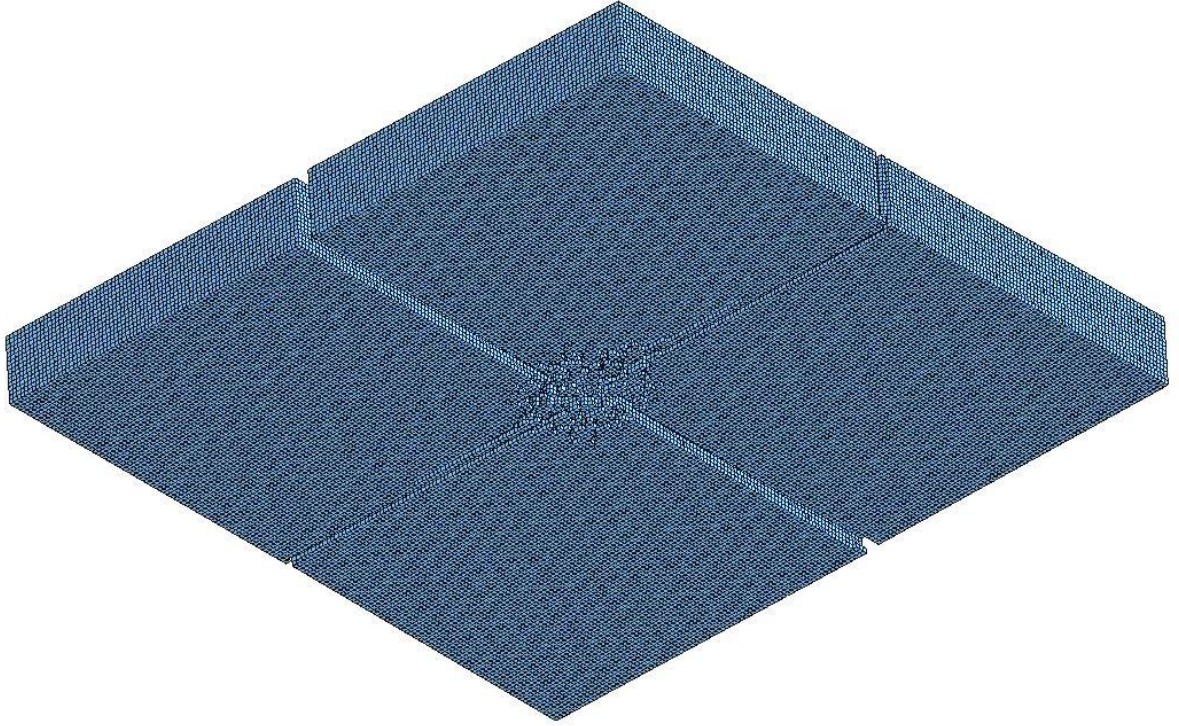


(b)

Şekil 106. Numune ön yüzey hasarı: (a) deney (b) nümerik analiz.



(a)

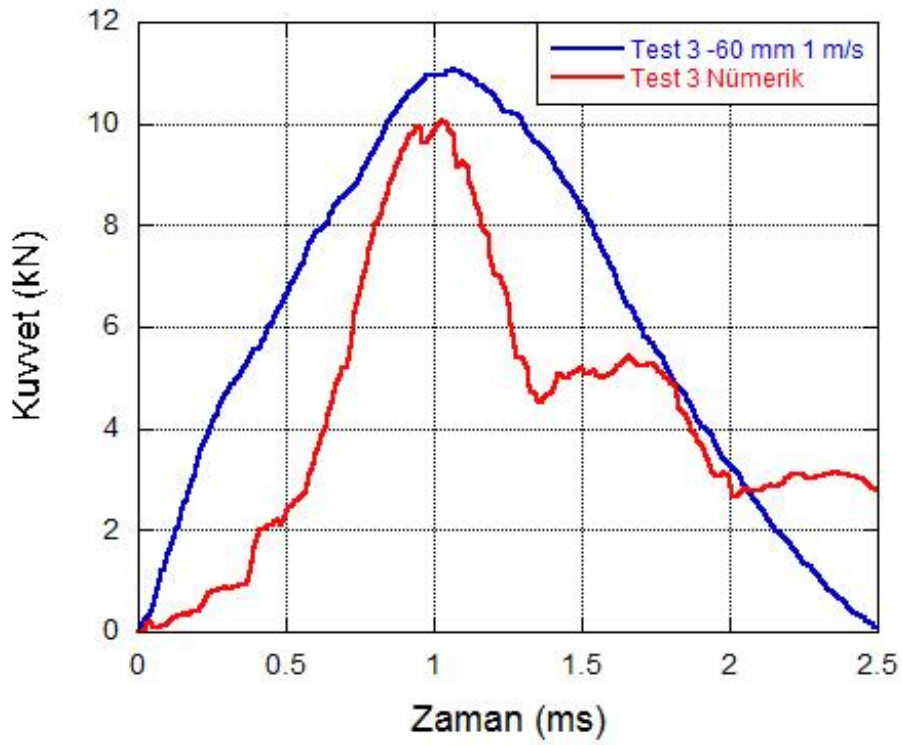


(b)

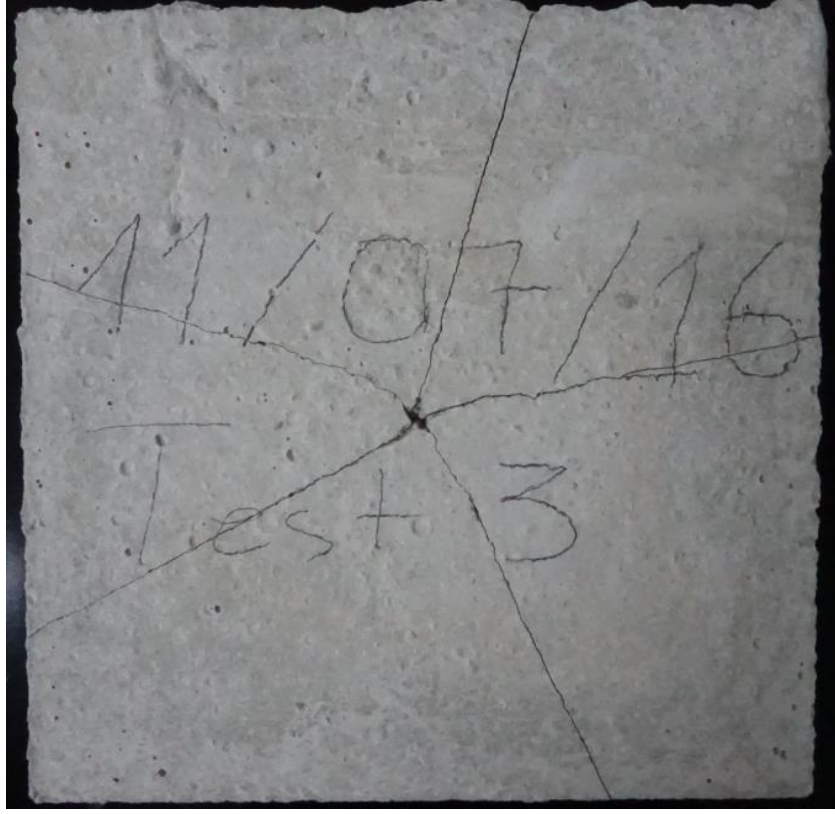
Şekil 107. Numune arka yüzey hasarı: (a) deney (b) nümerik analiz.



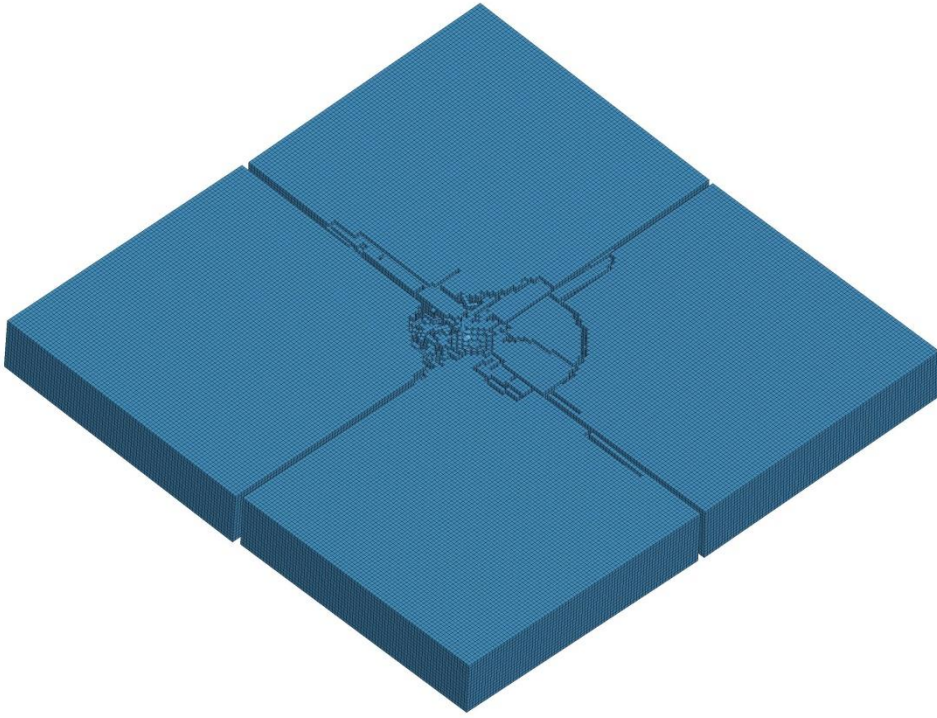
Sonraki test 60 mm boşluk sınır şartı ve 1 m/s çarpma hızına sahiptir. Test ve nümerik analizde pik kuvvet değerine 1 ms civarında ulaşılmış olup değerler sırasıyla; 11 ve 10 kN olarak tespit edilmiştir, Şekil 108 Simülasyon ve test süresi boyunca (2.5 ms) elde edilen ortalama kuvvetler ise 4.35 kN ile 5.96 kN olmuştur. Şekil 109 ve Şekil 110' da deney ve nümerik analiz tamamlandığı andaki numune ön ve arka yüzey hasarı sunulmuştur. Deneysel numune simetrik olmayan beş parçalı bir yapı haline gelmiş, simülasyon numunesi ise simetrik dört parçaya ayrılmıştır. Ayrıca simülasyon numunesinin ön yüzeyinde 60 mm sınır şartına benzer olarak radyal bir çatlak başlangıcı gözlenmiştir.



Şekil 108. Deneysel ve nümerik analiz kuvvet – zaman eğrisi karşılaştırılması (1 m/s çarpma hızı ve 60 mm boşluk sınır şartı).



(a)

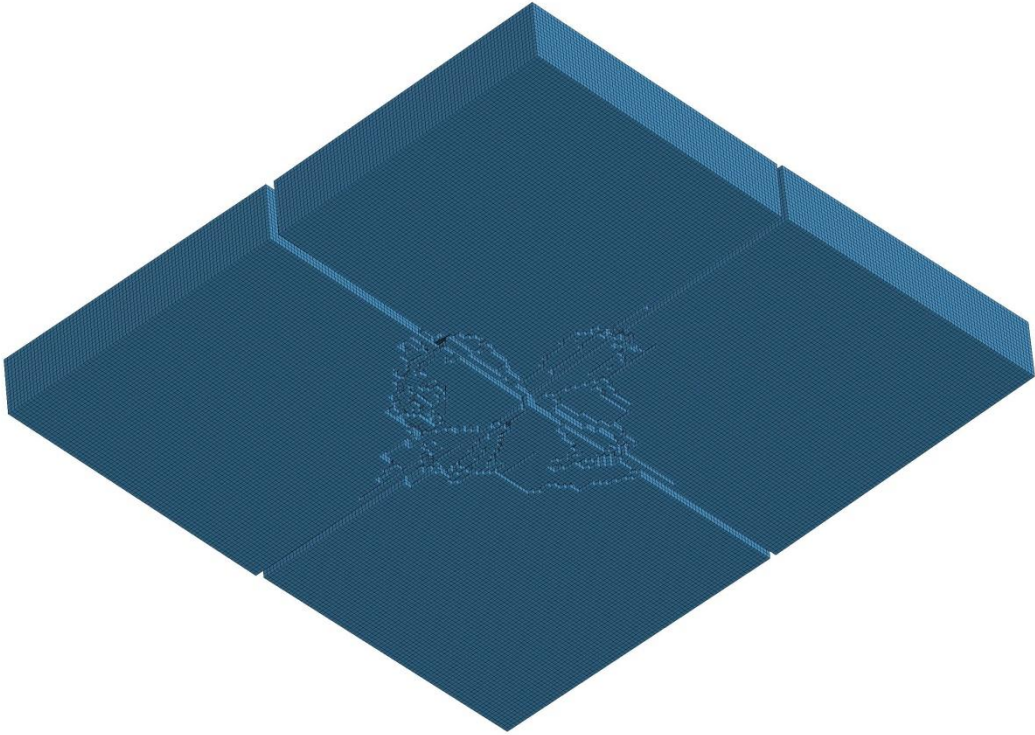


(b)

Şekil 109. Numune ön yüzey hasarı: (a) deney (b) nümerik analiz.



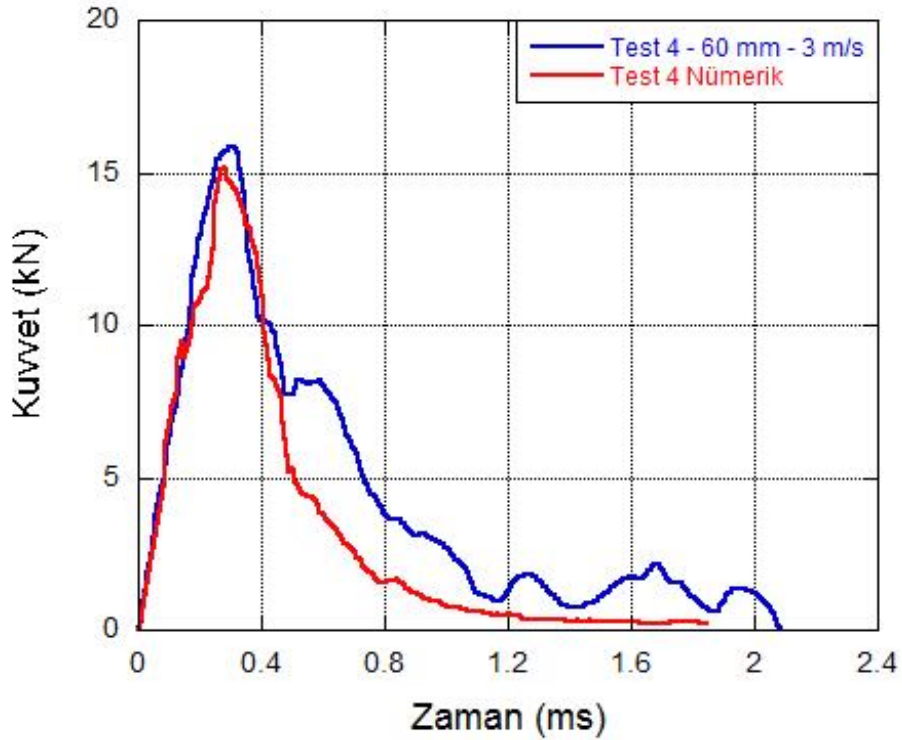
(a)



(b)

Şekil 110. Numune arka yüzey hasarı: (a) deney (b) nümerik analiz.

Sınır şartının sabit tutulması ve çarpma hızının 3 m/s' ye çıkarılmasıyla beklendiği gibi test ve nümerik analizde pik kuvvet değerine daha erken ulaşılmış (0.3 ms civarında) olup değerler sırasıyla; 15.70 ve 15.10 kN olarak tespit edilmiştir. Şekil 111. Simülasyon ve test süresi boyunca (2 ms) elde edilen ortalama kuvvetler ise 3.35 kN ile 4.35 kN olmuştur. Şekil 112 ve Şekil 113' te deney ve nümerik analiz tamamlandığı andaki numune ön ve arka yüzey hasarı sunulmuştur. Deneysel numune simetrik olmayan beş parçalı bir yapı haline gelmiş ve numunenin arka yüzeyinde spall oluşumu tespit edilmiştir. Simülasyon numunesi ise temelde simetrik dört parçaya ayrılmakla birlikte her bir parça kendi içerisinde parçalanmıştır. Ayrıca simülasyon numunesinin ön ve arka yüzeyinde 60 mm sınır şartına benzer olarak radyal bir çatlak gözlenmiştir.

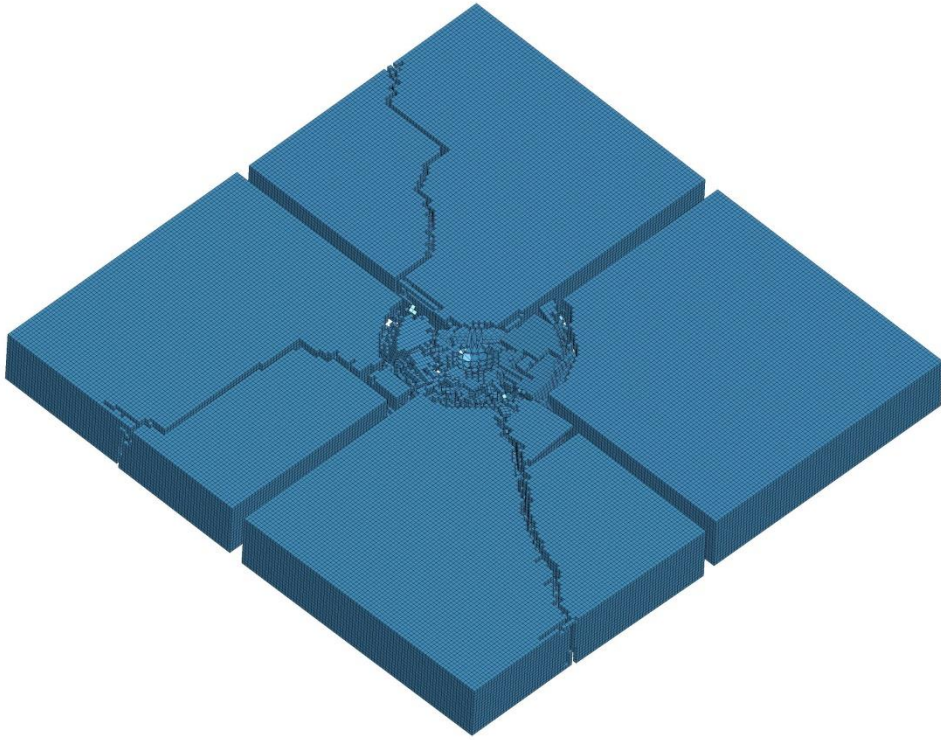


Şekil 111. Deneysel ve nümerik analiz kuvvet – zaman eğrisi karşılaştırılması (3 m/s çarpma hızı ve 60 mm boşluk sınır şartı).





(a)

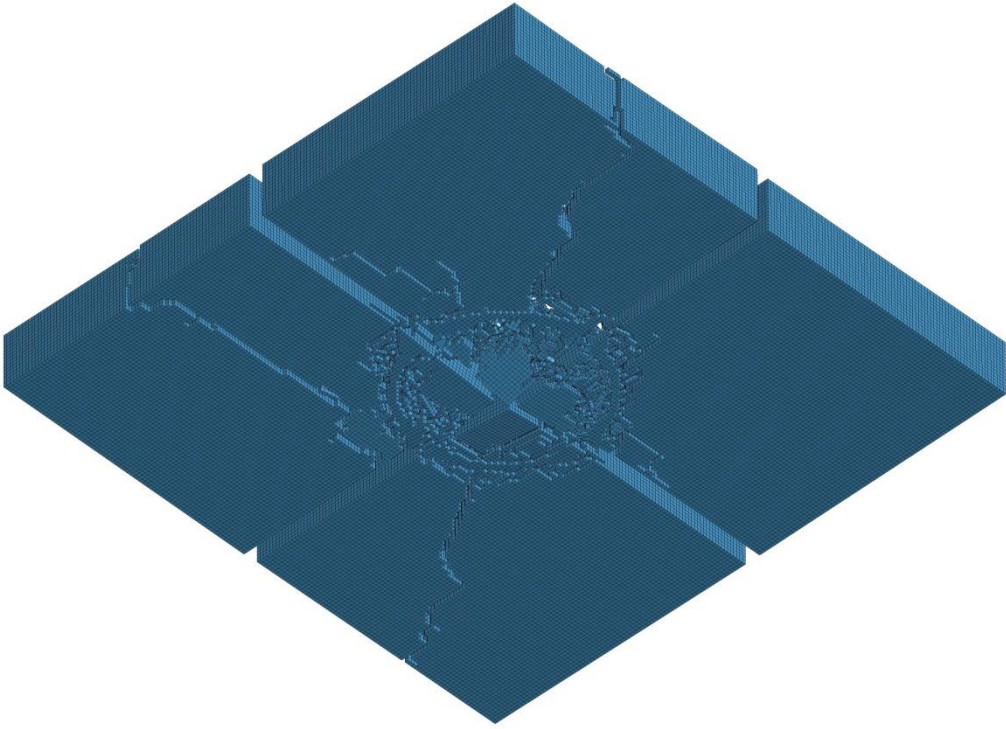


(b)

Şekil 112. Numune ön yüzey hasarı: (a) deney (b) nümerik analiz.



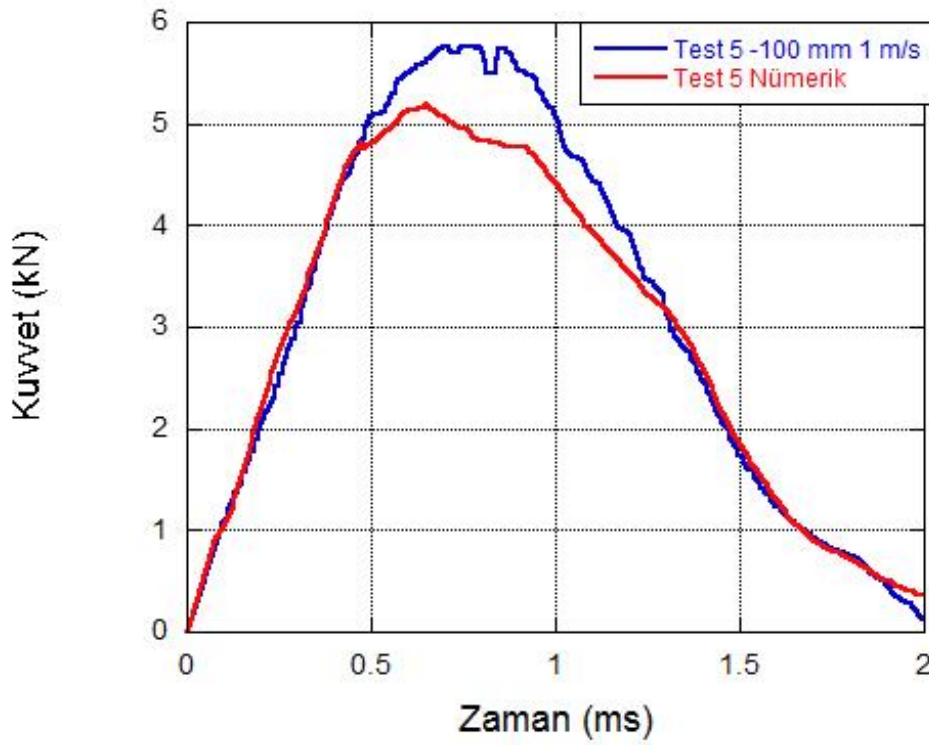
(a)



(b)

Şekil 113. Numune arka yüzey hasarı: (a) deney (b) nümerik analiz.

Bu testte sınır şartı 100 mm' ye çıkarılmış ve çarpma hızı ise 1 m/s olarak seçilmiştir. Test ve nümerik analizde pik kuvvet değeri 0.65 ve 0.75 ms' de 5.80 ve 5.20 kN olarak tespit edilmiştir, Şekil 114. Simülasyon ve test süresi boyunca (2 ms) elde edilen ortalama kuvvetler ise sırasıyla 2.85 kN ile 3.05 kN olmuştur. Şekil 115 ve Şekil 116' da deney ve nümerik analiz tamamlandığı andaki numune ön ve arka yüzey hasarı sunulmuştur. Deneysel numune simetrik dört parçalı bir yapı haline gelmiş, simülasyon numunesi ise temelde simetrik dört parçaya ayrılmıştır. Ayrıca simülasyon numunesinin ön yüzeyinde malzeme ezilmiş ve sınır şarta benzer şekilde radyal bir çatlak başlangıcı gözlenmiştir.

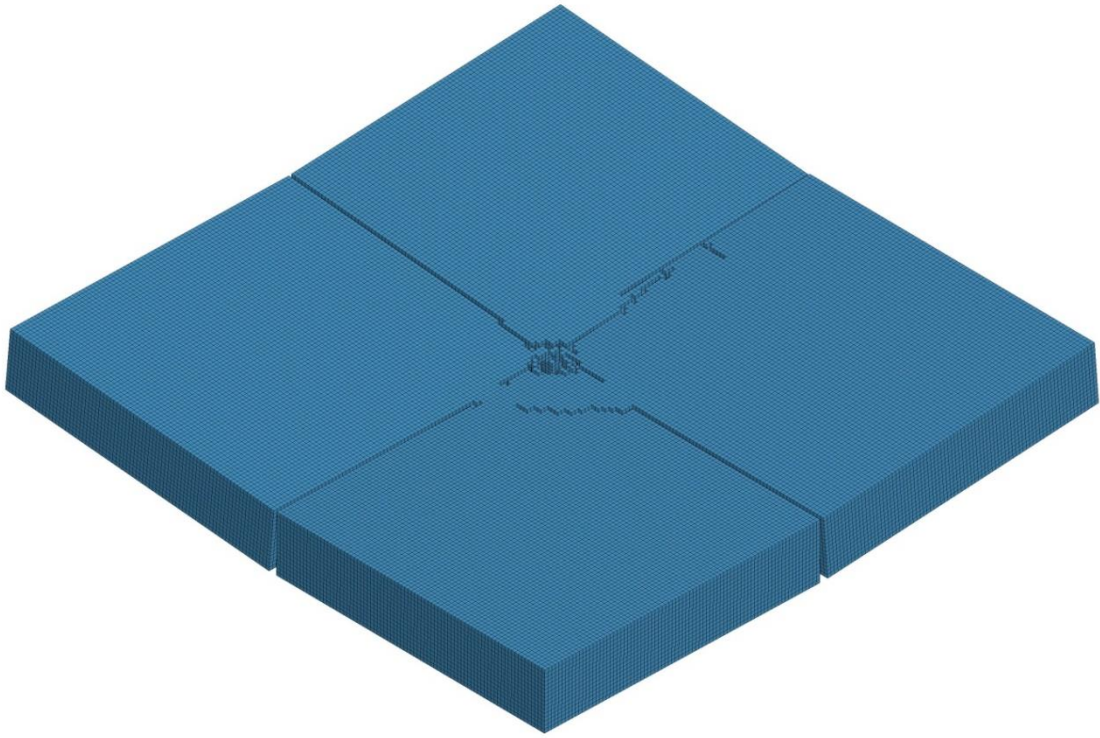


Şekil 114. Deneysel ve nümerik analiz kuvvet – zaman eğrisi karşılaştırılması (1 m/s çarpma hızı ve 100 mm boşluk sınır şartı).





(a)

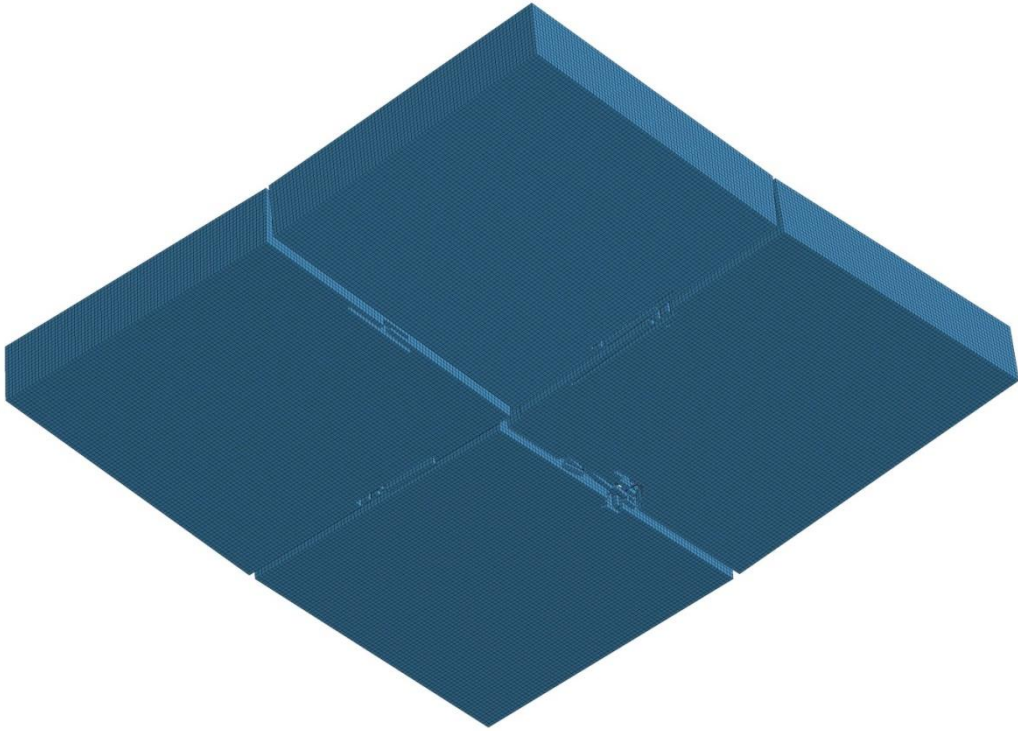


(b)

Şekil 115. Numune ön yüzey hasarı: (a) deney (b) nümerik analiz.



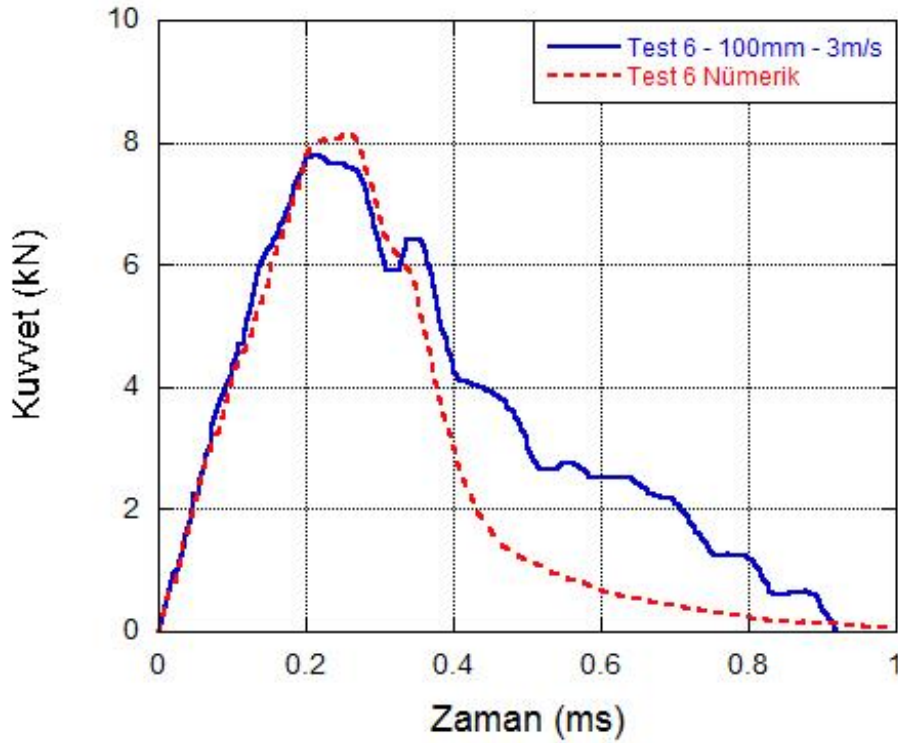
(a)



(b)

Şekil 116. Numune arka yüzey hasarı: (a) deney (b) nümerik analiz.

Sınır şartının sabit tutulması ve çarpma hızının 3 m/s' ye çıkarılmasıyla test ve nümerik analizde pik kuvvet değerine 0.25 ve 0.28 ms' de ulaşılmış, değerler ise sırasıyla 7.80 ve 8.15 kN olarak tespit edilmiştir, Şekil 117. Simülasyon ve test süresi boyunca (1 ms) elde edilen ortalama kuvvetler ise 2.45 kN ile 3.60 kN olmuştur. Şekil 118 ve Şekil 119' da deney ve nümerik analiz tamamlandığı andaki numune ön ve arka yüzey hasarı sunulmuştur. Deneysel numunenin orta bölümünde bir önceki 3 m/s' lik testte olduğu gibi delik çapıyla orantılı bir şekilde hasar aldığı görülmüştür. Numunenin tabanındaki destekleme alanının azalması ve çarpma hızının artması ile birlikte numunede radyal kırıkların meydana gelme eğiliminin arttığı tespit edilmiştir. Benzer bir durum simülasyon numunesi için de gözlemlenmiştir.

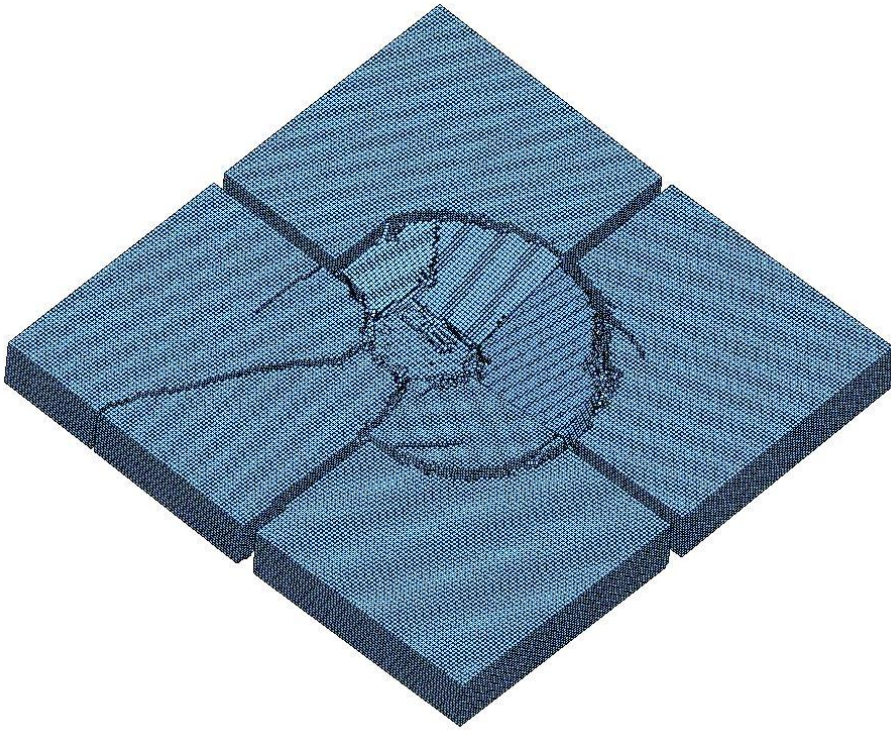


Şekil 117. Deneysel ve nümerik analiz kuvvet – zaman eğrisi karşılaştırılması (3 m/s çarpma hızı ve 100 mm boşluk sınır şartı).





(a)



(b)

Şekil 118. Numune ön yüzey hasarı: (a) deney (b) nümerik analiz.



(a)



(b)

Şekil 119. Numune arka yüzey hasarı: (a) deney (b) nümerik analiz.

#### 4.4 Gerilme Dağılımına Etki Eden Faktörler

Nümerik modelleme çalışmaları kapsamında, numunedeki gerilme dağılımına etki eden faktörlerin incelenmesi amacıyla hem numune geometrisi hem de gerilme dalgası üzerine bir takım varyasyonlar içeren nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile birlikte SHBB numunesinin hangi değişkenler kullanıldığı zaman daha homojen gerilme dağılımına sahip olduğu R denge parametresi ile belirlenecek ve bu sayede SHBB test düzeneğinde kullanılacak başta numune geometrisi olmak üzere önemli değişkenlerin etkinlikleri tespit edilecektir.

SHBB testlerinde numune içerisindeki gerilme dağılımının üniform ve tek eksenli olmasının sağlanabilmesi testin geçerliliği açısından son derece önemlidir. Özellikle gevrek malzemelerin SHBB testlerinde numune içerisinde üniform olmayan gerilme dağılımları oluşabilmekte ve bu da numunenin prematüre kırılmasına yol açabilmektedir. Ayrıca gevrek malzemelerin testleri esnasında numunenin alan ve ileten çubukların ara yüzeylerini deforme etmesi ihtimali mevcuttur. Bu durum yapılan testin geçerli bir test olmasını önleyecektir. Çubuk yüzeylerinde meydana gelen deformasyon oluşumu, numune ara yüzeylerinde gerilme yığılmaları oluşturacağından prematüre kırılmayı tetikleyecektir. Bu durumda numune içerisinde gerilme dengesi meydana gelmeden numunede kırılma meydana gelecektir. Prematüre kırılma eğilimi numune çubuk çap oranı birbirine yakın tutularak azaltılabilir.

Çentik oluşumunu önleme amaçlı kullanılan yöntemlerden ilki numune ve çubuk ara yüzeylerine insert yerleştirmektir. Gevrek malzemeler genellikle çubukların sertliğinden daha yüksek sertliğe sahip oldukları için numune çubuk ara yüzeyine yerleştirilecek yüksek mukavemete ve sertliğe sahip insert, çentik oluşumunun önüne geçebilir. Özellikle çubuk çapından daha küçük çapa sahip numunelerle gerçekleştirilen testlerde çubuklarda çentik oluşumu gözlemlenmesi olasıdır. Bunun önüne geçebilmek ve çubuk çapından daha küçük çapta numune kullanımını sağlayabilmek amacıyla insert kullanımı önem arz etmektedir. Ayrıca farklı insert geometrileriyle farklı uzunluk – çap oranına sahip numuneler birlikte denenebilir ve numune üzerinde daha homojen ve tek eksenli gerilme dağılımı elde edilebilme potansiyeli mevcuttur. Bu raporun ilgili kısımlarında da gösterildiği gibi eldeki mevcut malzeme modeli ve SHBB modeli farklı yükleme koşulları altında başarılı olarak sonuçlar vermektedir. Bu noktadan sonra farklı parametrelerin etkinliklerinin incelenmesi amacıyla nümerik model güvenle kullanılabilir. Test düzeneğinde uygulaması ve maliyeti yüksek olan insert kullanımı ile ekstra işlem ve üretim süreci gerektiren numune geometrisi varyasyonları nümerik olarak modellenip, analizleri gerçekleştirilerek SHBB' de geçerli test varsayımlarını en iyi şekilde sağlayan kombinasyonların elde edilmesi

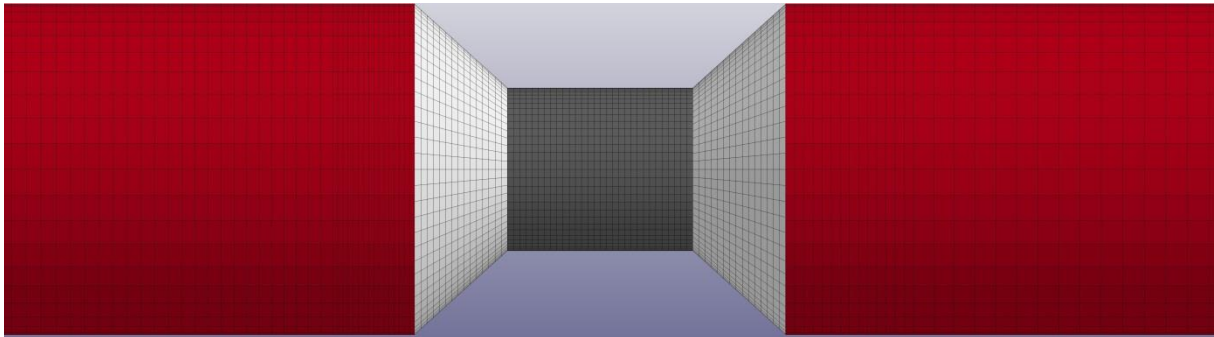
amaçlanmıştır. Bu amaçla kesik koni ve köpek kemiği (dog-bone) geometriye sahip insertler SHBB test modeline entegre edilmiş ve mevcut SHBB modelinde farklı numune geometrileri için nümerik analizler gerçekleştirilmiştir.

Numunenin ön ve arka yüzey eksenel kuvvet tarihçeleri numunenin çubuklar ile temasta bulunan ara yüzeylerinden direkt olarak okunabildiğinden ekstra bir işlem yapmadan bu kuvvet değerleri numune kesit alanına bölünerek gerilme değerleri bulunabilir. Numunenin çubuklarla temasta bulunan yüzeylerindeki gerilme değerlerinin bulunmasıyla numunedeki gerilme dengesi denklem (22) ile hesaplanır. Burada R denge parametresi ara yüzey gerilme değerleri farkının ara yüzey gerilmesi ortalamasına bölünmesiyle hesaplanır.

$$R(t) = \left| \frac{\Delta\sigma(t)}{\sigma_{avg}(t)} \right| = 2 \left| \frac{F_1 - F_2}{F_1 + F_2} \right| \quad (22)$$

Numune ve çubuk ara yüzeyine yerleştirilen insertler ile farklı numune geometri modelleri hazırlanmıştır. Bu modellerde çubuk malzemesiyle aynı malzemeden olan insertler sayesinde daha farklı çap ve uzunluğa sahip numunelerin kullanılmasıyla birlikte insertlerin gerilme dağılımına etkisi incelenmiştir.

Kesik koni şekilli metalik insert Şekil 120' deki gibi tasarlanmıştır. Numune geometrisi yine testlerdeki gibi 1.14 uzunluk/çap oranı korunarak 22.5 mm uzunluk ve 19.75 mm çapa sahip ölçülerde tasarlanmıştır. Oluşturulan insertlerin ileten ve alan çubuklara bakan yüzeyleri çubuk çaplarıyla aynı uzunluğa sahiptir.

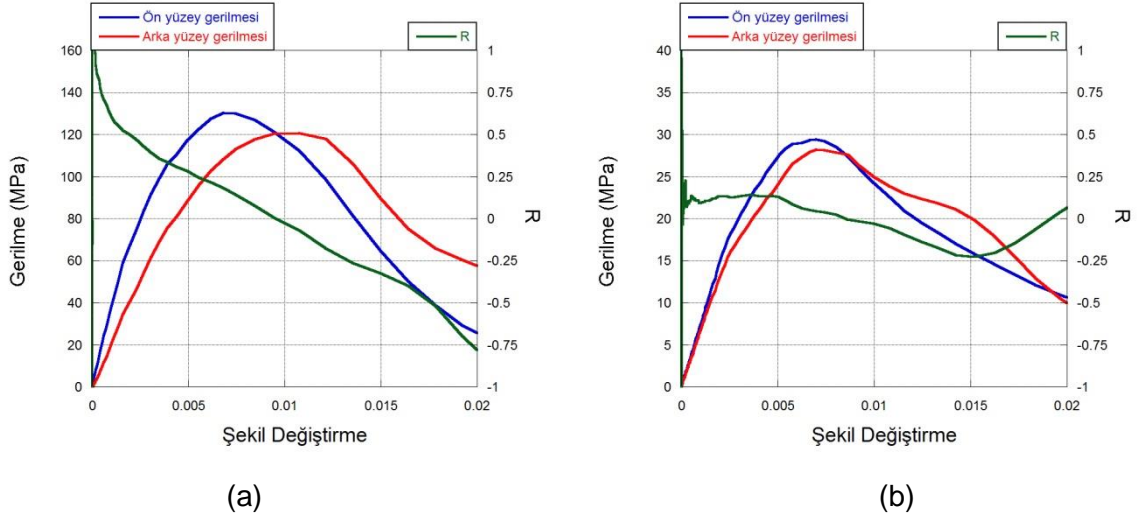


Şekil 120. Kesik koni şekilli metalik insert - numune modeli.

Şekil 121' de kesik koni geometrinin hem darbe şekillendiricisiz hem de darbe şekillendiricili nümerik modellerinden elde edilen ön ve arka yüz gerilmeleri ve R denge parametrelerinin şekil değiştirmeye karşı değişimleri verilmiştir. Darbe şekillendirici kullanılmayan modelden

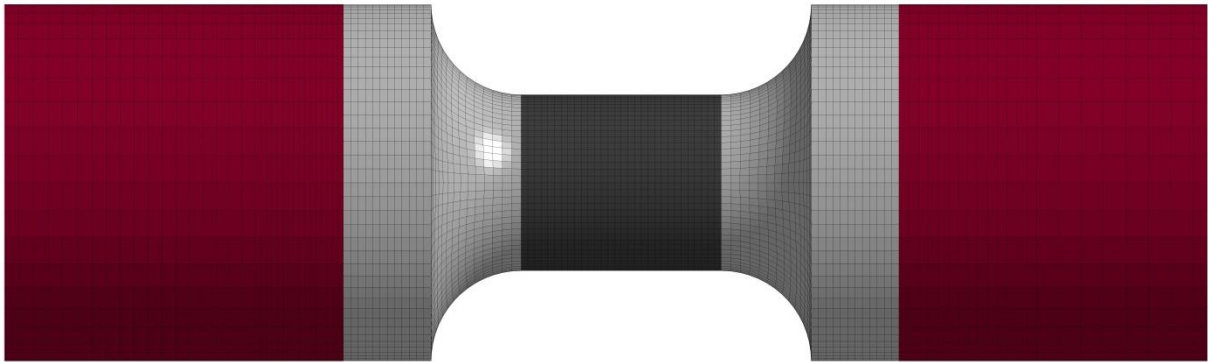


ön ve arka yüzeyden elde edilen gerilmeye karşı şekil değiştirme eğrisi ve buna bağlı olarak R denge parametresi darbe şekillendirici kullanılan durumdan daha yüksek farklılıklar göstermiştir.



Şekil 121. Kesik koni şekilli metalik insert - numune şekil değiştirme, gerilme ve R dengesi (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili

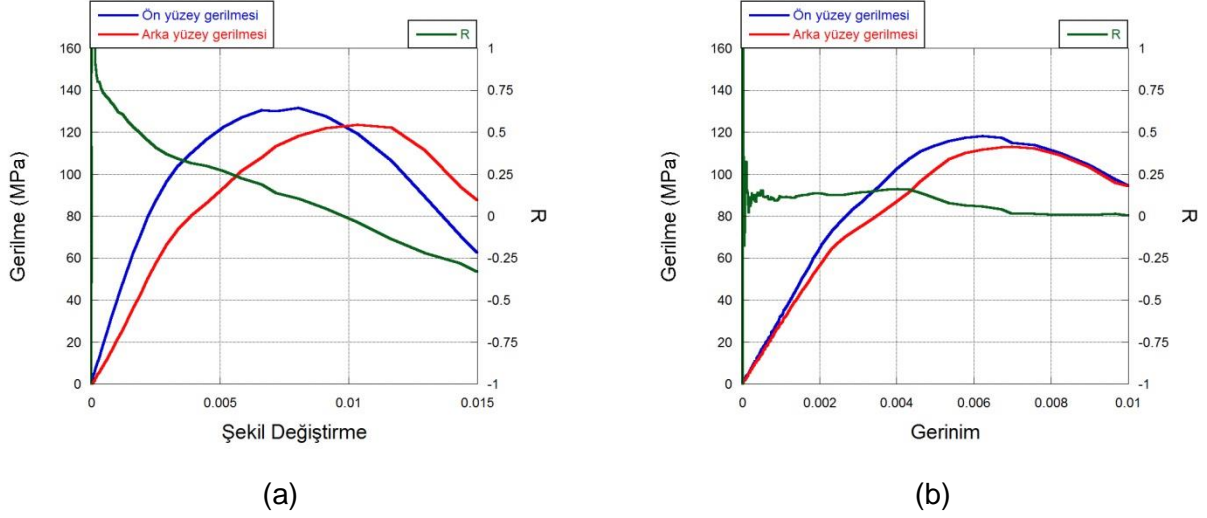
Farklı bir geometri olarak dog-bone (köpek kemiği) insert denenmiştir. Dog-bone şekilli numune – insert geometrisinde alan ve ileten çubuk yüzeylerine bakan taraflar çubuk çapıyla aynı, numune yüzeylerine bakan taraflar numune çapıyla aynı seçilmiştir. Oluşturulan numune insert geometrisi modeli Şekil 122' de verilmiştir.



Şekil 122. Dog-bone şekilli insert - numune modeli.

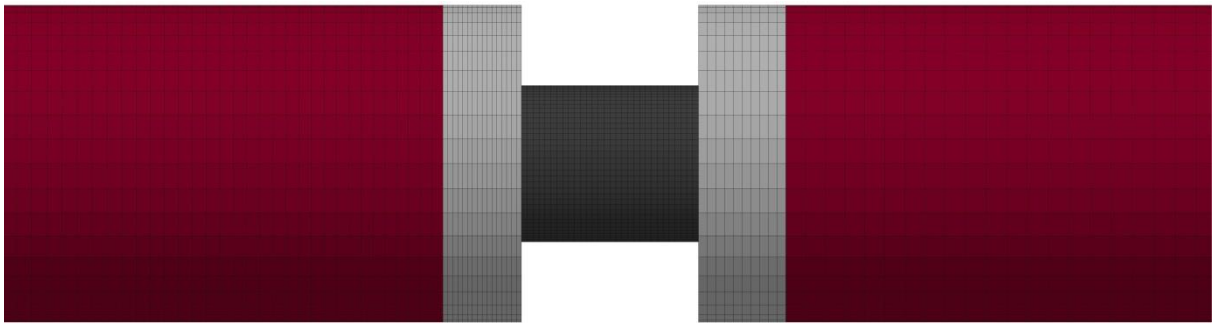
Şekil 123 (a)' da darbe şekillendiricisiz model ve (b)' de darbe şekillendiricili modelden elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Darbe şekillendiricisiz nümerik modelin gerilme şekil değiştirme

eğrileri incelendiğinde ön ve arka yüzey gerilmelerinin tepe noktalarına karşılık gelen şekil değiştirme değerleri arasında darbe şekillendiricili modele göre büyük ölçüde farklılık olduğu gözlemlenmektedir. Darbe şekillendiricili model daha başarılı sonuçlar vermiştir.



Şekil 123. Dog-bone geometrilili insert - numune şekil değiştirme, gerilme ve R dengesi (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili.

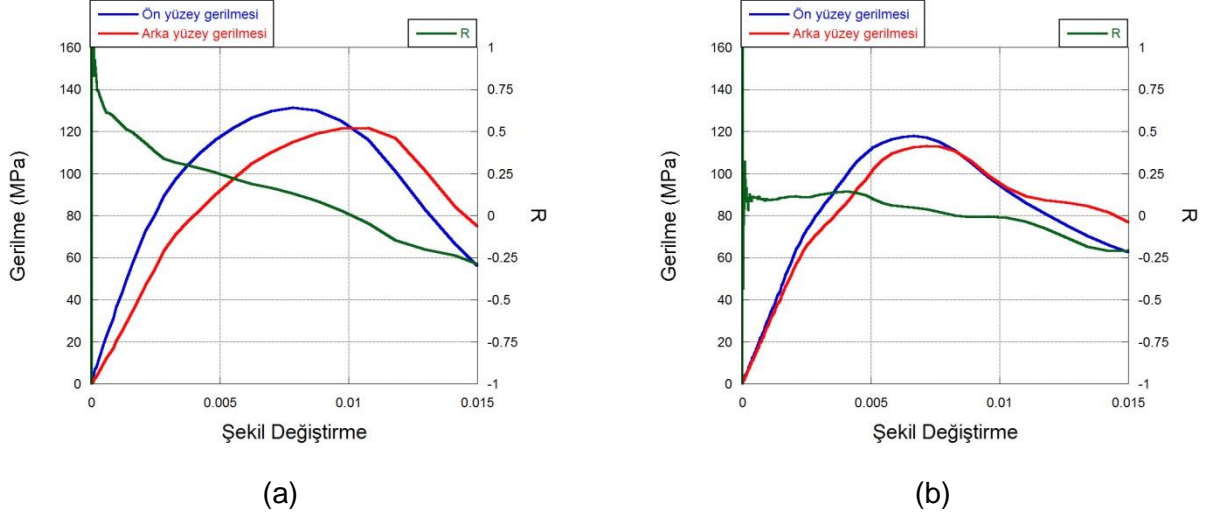
İnsert geometrilerinin etkinliklerini görmek adına farklı bir konfigürasyon olarak numune Şekil 125' te görüldüğü gibi insert parçalar olmadan modellenmiş ve analizi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 124. İnsert kullanılmayan 22.5 mm uzunluk, 19.75 mm çapa sahip numune.

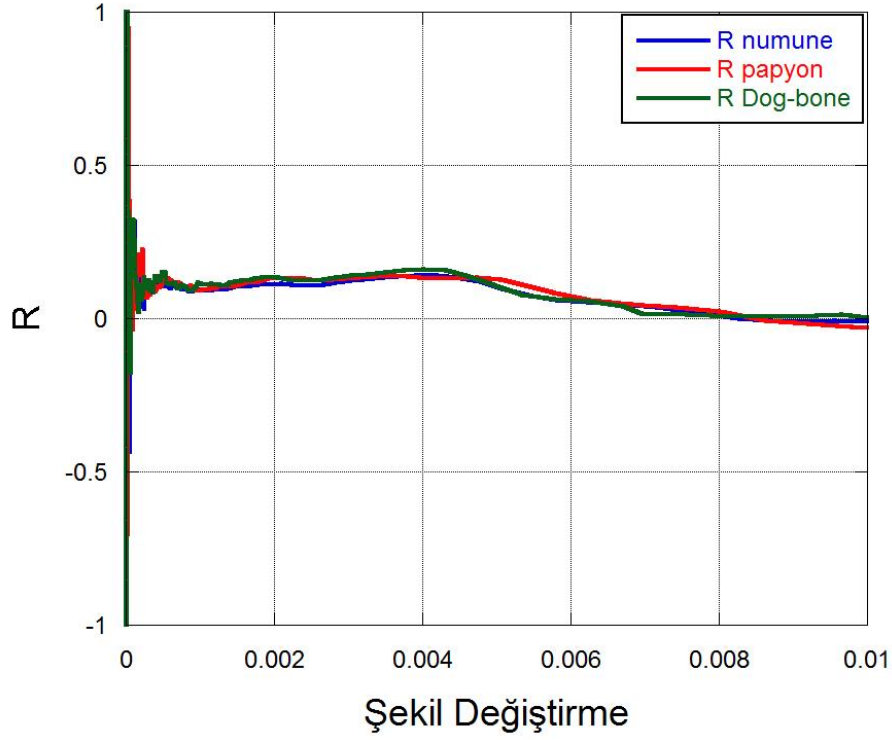
Şekil 125' te görüldüğü gibi dalga şekillendiricili modelde gerilme dengesi çok daha iyi sonuçlar vermektedir. İnsert kullanılan modellerle kıyaslandığında hem dalga şekillendirici kullanılan hem de dalga şekillendirici kullanılmayan model sonuçlarında benzerlik bulunmaktadır. Buradan insert parçaların numunenin gerilim ve şekil değiştirme eğrileri üzerinde önemli miktarda farklılık oluşturmadığı görülmüştür. Kısaca insert parçaların test düzeneğine entegre edilmesiyle hem farklı çap ve uzunluğa sahip numunelerin kullanımı

hem de çubuk çapından küçük çapta numune kullanılması durumunda çubuk yüzeylerine zarar gelmeyecek ve çentik oluşmayacaktır.



Şekil 125. İnsert olmadan numune çubuk modeli (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili.

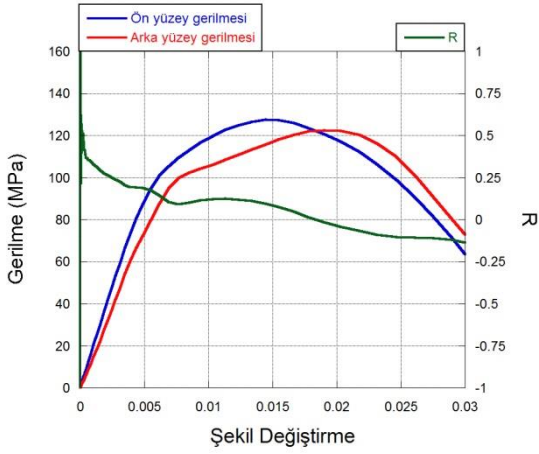
Şekil 126' da numunedeki gerilme dengesinin kullanılan insert geometrisinden önemli ölçüde etkilenmediği gözlemlenmektedir. SHBB testlerinde üretimi en kolay insert geometrisi kullanılarak gerçekleştirilen testler, çentik oluşumunu önlemede yeterli olacaktır.



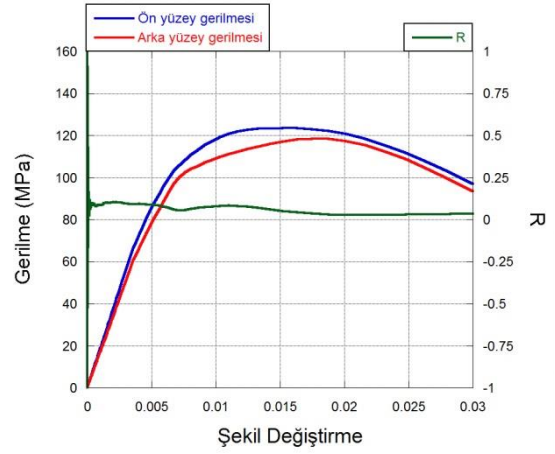
Şekil 126. R denge parametresine insert etkisi.

Insert geometrisinin etkinliğinin incelenmesinden sonra çalışmalara numune geometrisi ile devam edilmiştir ve farklı uzunluk-çap oranlarına sahip numuneler denenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan silindirik numuneler 45 mm uzunluğunda 39.50 mm çapa sahip olup uzunluk-çap oranı (L/D) 1.14' tür. Modellerde 39.50 mm çapa sahip numunenin çap değerleri deneylerle aynı tutulup sadece uzunluğu değiştirilerek farklı numuneler oluşturulmuştur. Bu sayede L/D etkisi incelenmiştir. İncelenen numune uzunluk-çap oranları sırasıyla 0.25, 0.50, 0.75, 1, ve 1.25' tir. Modellerden numune ön ve arka yüzeydeki gerilme dağılımı incelenmiştir. L/D etkisi hem dalga şekillendiricisiz hem de dalga şekillendiricili durumlar için incelenmiştir.

Şekil 127' de uzunluk çap oranı 0.25 olan numune için sonuçlar verilmiştir. Numune uzunluğu ve çapı sırasıyla 9.875 mm ve 39.50 mm' dir. Numune nispeten kısa olduğu için numune-çubuk ön ve arka yüzey gerilmeleri arasındaki zaman ve gerilme farkı oldukça azdır. Bu nedenle hem dalga şekillendiricili hem de dalga şekillendiricisiz modelde numune içerisinde gerilme dengesi söz konusudur.



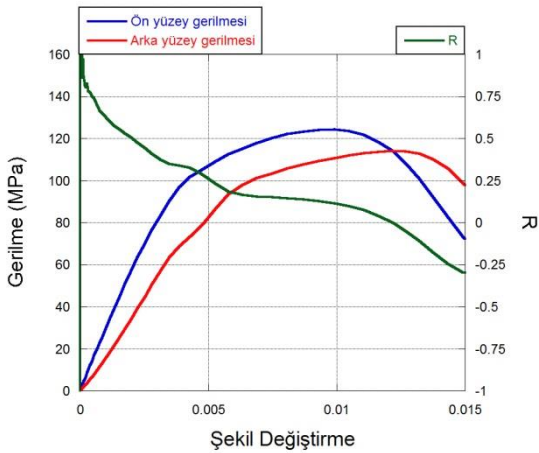
(a)



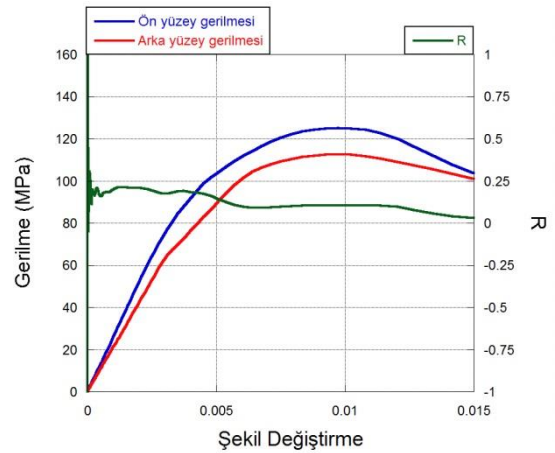
(b)

Şekil 127. Uzunluk/çap oranı 0.25 (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili.

Şekil 128' de uzunluk çap oranı 0.50 olan numune için sonuçlar verilmiştir. Numune uzunluğu ve çapı sırasıyla 19.75 mm ve 39.50 mm' dir. Dalga şekillendirici kullanılmayan modelde ön ve arka yüzlerdeki gerilmelere karşılık gelen şekil değişirme değerlerinde farklılıklar mevcuttur. Ancak dalga şekillendirici kullanılan modelde gerilme değerlerine karşılık gelen şekil değişirme değerleri benzerlik gösterirken, kabul edilebilir derecede ön ve arka yüz gerilme farkı mevcuttur. Dalga şekillendirici kullanılan modelde daha başarılı gerilme dengesi sağlanmıştır.



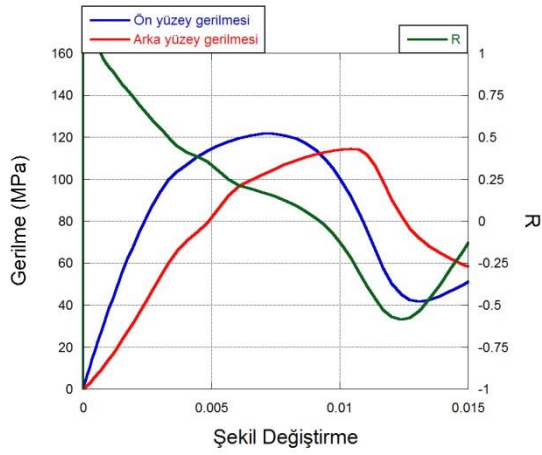
(a)



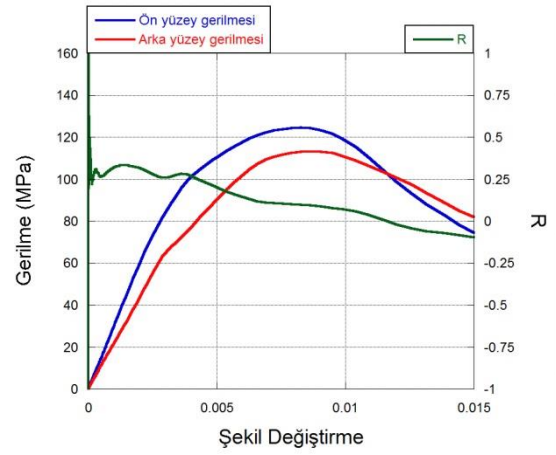
(b)

Şekil 128. Uzunluk/çap oranı 0.50 (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili.

Şekil 129' da uzunluk çap oranı 0.75 olan numune kullanılmıştır. Numune uzunluğu ve çapı sırasıyla 29.625 mm ve 39.50 mm' dir.



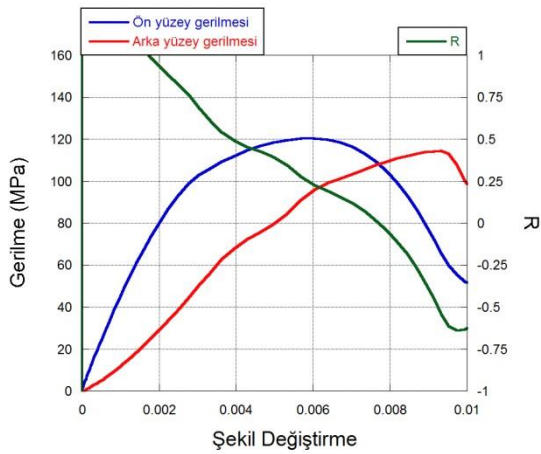
(a)



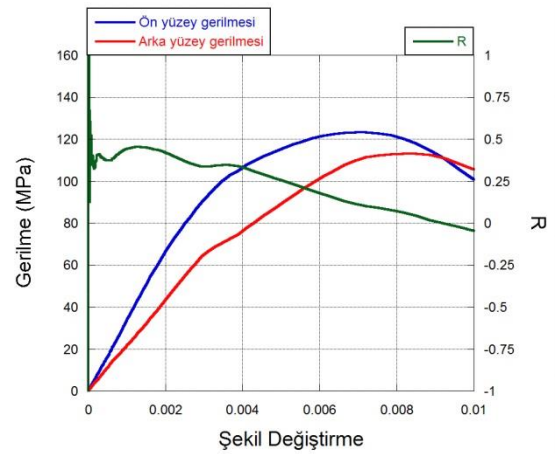
(b)

Şekil 129. Uzunluk/çap oranı 0.75 (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili.

Numune uzunluğunun numune çapına eşit olduğu (39.50 mm) simülasyon sonuçları Şekil 130' da sunulmuştur.



(a)

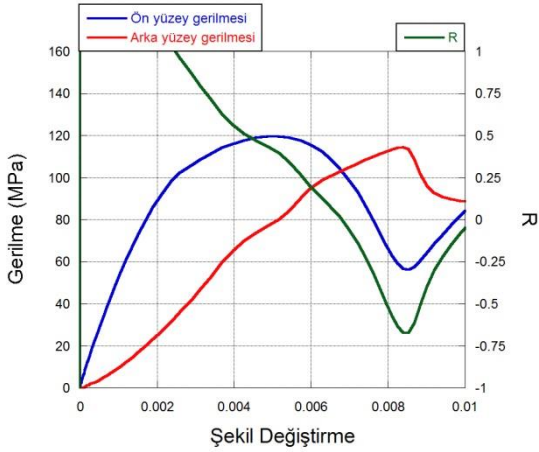


(b)

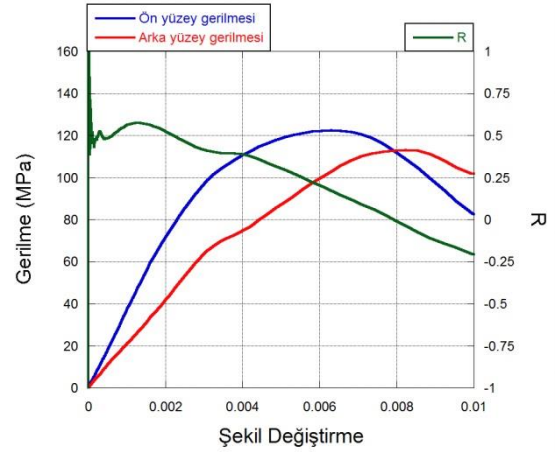
Şekil 130. Uzunluk/çap oranı 1 (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili.

Numune uzunluğu çap oranının incelendiği simülasyonların sonucusu olan 1.25 orana sahip simülasyon sonuçları Şekil 131' de gösterilmiştir.





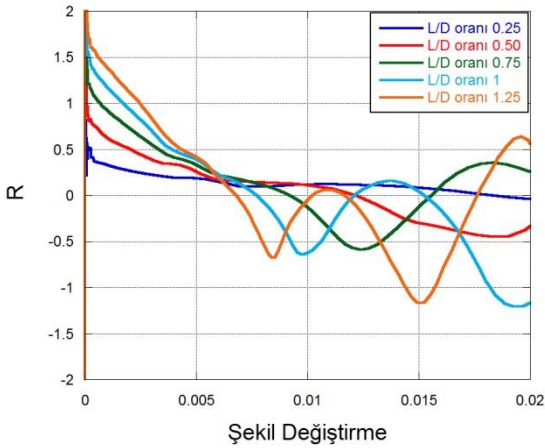
(a)



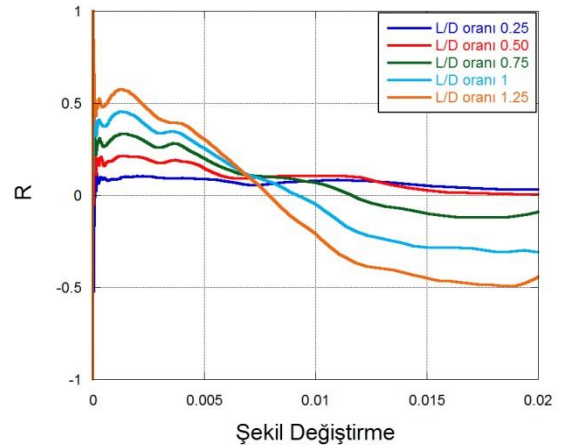
(b)

Şekil 131. Uzunluk/çap oranı 1.25 (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili.

Şekil 132' de numune uzunluk/çap oranının şekil değiştirme – R dengesine etkisi gösterilmiştir. Görüldüğü gibi uzunluk/çap oranı arttıkça numune içerisindeki denge azalmaktadır. Bu nedenle betonun üretim standartları ve test koşulları da göz önünde bulundurularak oluşturulabilecek en kısa boya sahip numuneler ile testlerin gerçekleştirilmesi, gerilme dengesi için en iyi sonucu verecektir.



(a)



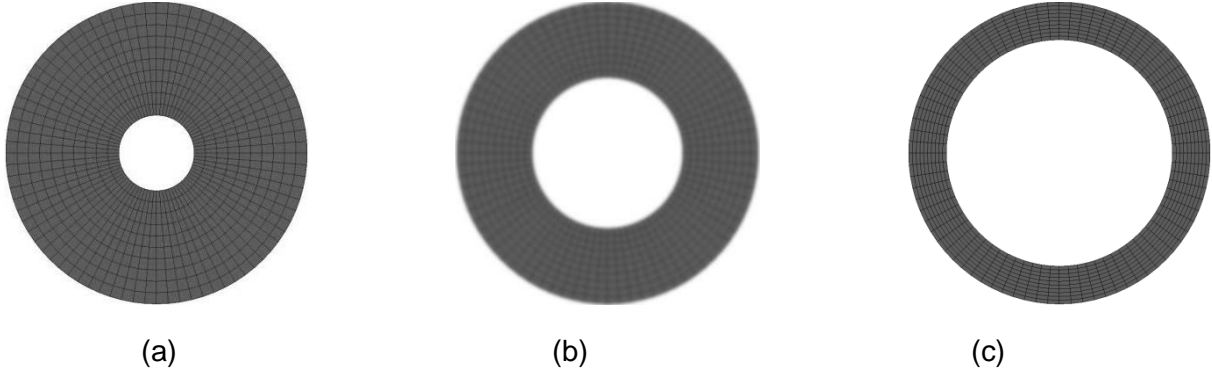
(b)

Şekil 132. Silindirik numune uzunluk/çap oranı varyasyonları şekil değiştirme – R karşılaştırması (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili.

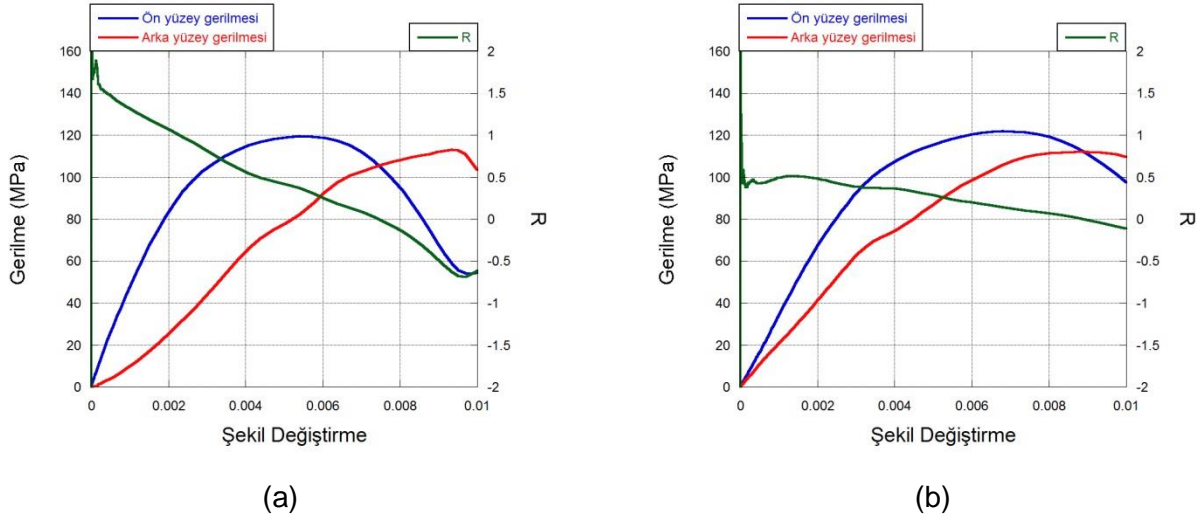
Nümerik modelleme çalışmalarında numune geometrisinin etkinliğinin incelenmesi amacıyla seçilmiş bir diğer çalışma içi boş halka şeklinde numune seçimidir. Mevcut 45 mm uzunluğa ve 39.50 mm çapa sahip standart numunelerin merkezlerinden çeşitli oranlarda silindirik



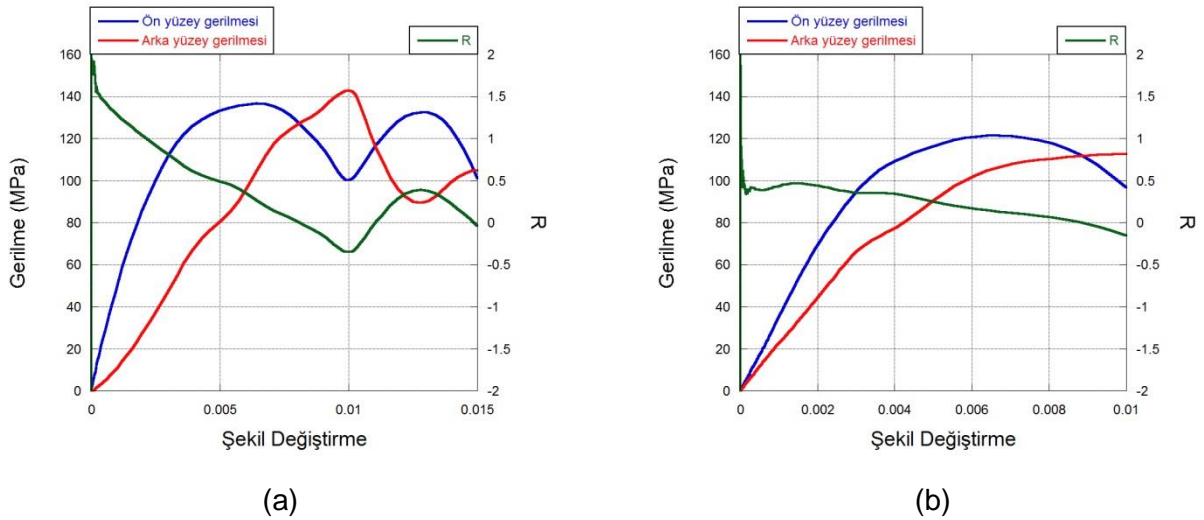
parçaların çıkarılmasıyla halka şekline benzer numuneler oluşturulmuştur. Bu oranlar iç çapın dış çapa oranı ( $r/R$ ) şeklinde belirlenmiştir ve değerleri sırasıyla 0.25, 0.50 ve 0.75' tir.



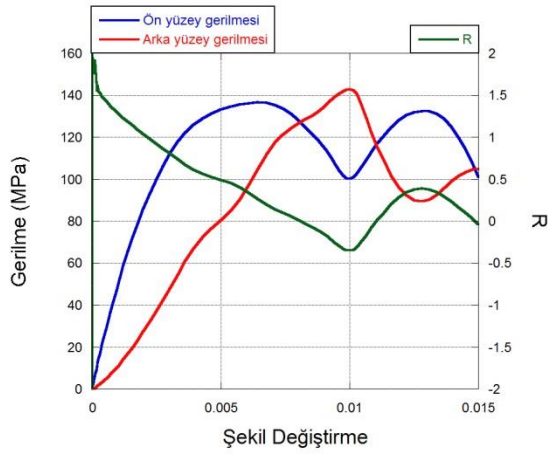
Şekil 133. Halka numuneler boş iç çap:  $r$ , dış çap  $R$  (a)  $r/R=0.25$  (b)  $r/R=0.50$  (c)  $r/R=0.75$ .



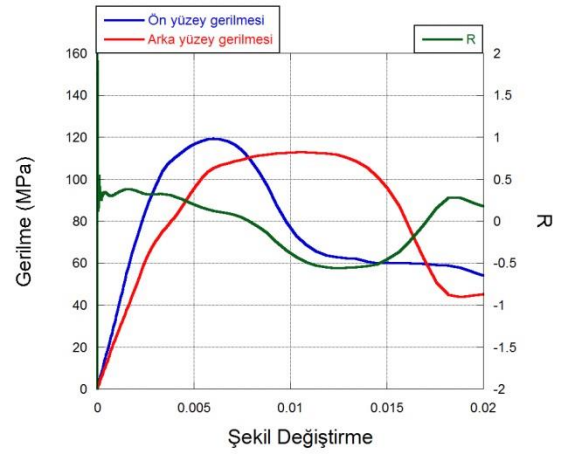
Şekil 134. İç çap dış çap oranı 0.25 (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili.



Şekil 135. İç çap dış çap oranı 0.50 (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili.

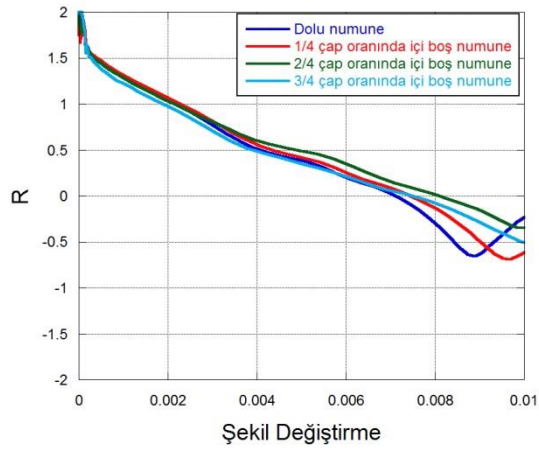


(a)

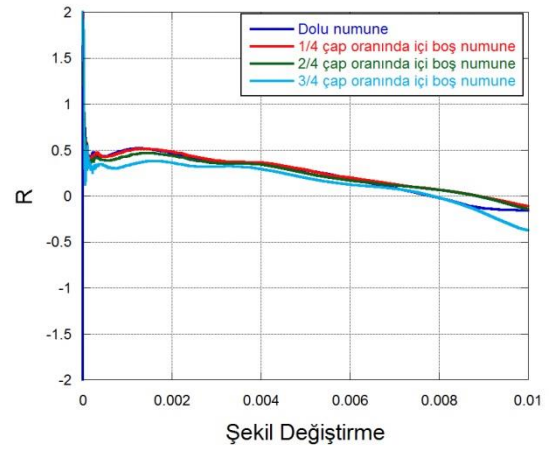


(b)

Şekil 136. İç çap dış çap oranı 0.75 (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili.



(a)



(b)

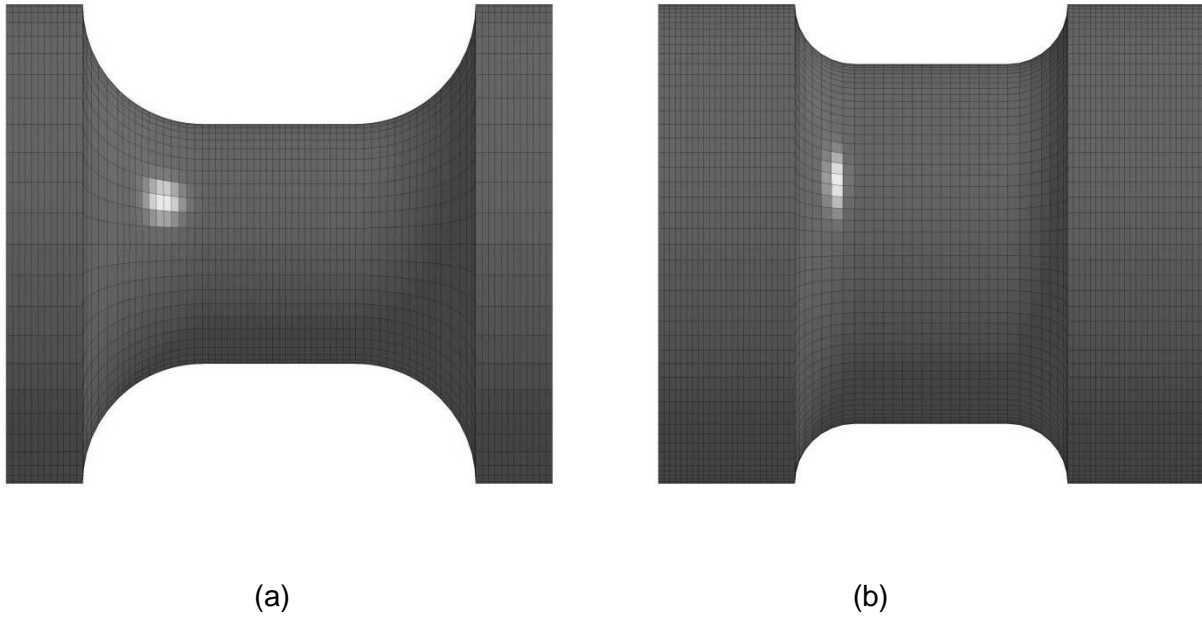
Şekil 137. Dolu ve içi boş numune varyasyonları şekil değiştirme – R karşılaştırması (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili.

Sonuçlar incelendiğinde 0.75 orana sahip ve darbe şekillendirici kullanılan durumda en homojen gerilme dağılımının elde edildiği tespit edilmiştir.

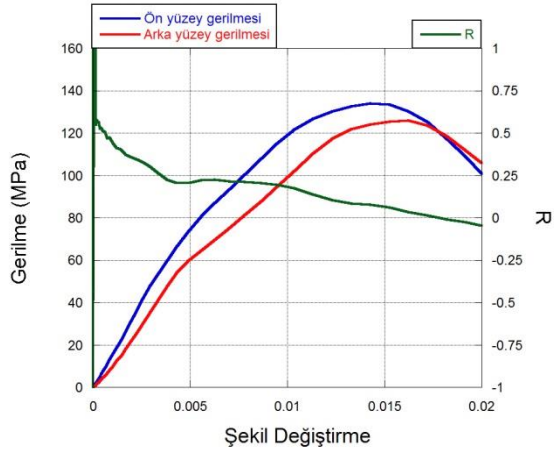
Insert geometrisi çalışmasında yürütülen dog-bone (köpek kemiği) şeklindeki geometri doğrudan numune geometrisi olarak da modellenmiştir. Daha önce farklı malzemeler üzerine yapılan çalışmalarda gerilme konsantrasyonu, çentik yapmayı önleme ve numune üzerinde üniform gerilim sağlamada dog-bone şekle sahip numunelerin genelde iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Ancak bu tarz grift geometrilerin üretimi ve test aşamalarında kullanımı genellikle ekstra maliyet gerektirmektedir ve alan / ileten çubuklarda bulunan gerilim

ölçerlerden elde edilen verilerin tam olarak numune içerisindeki davranışı temsil edip etmediğinin kontrol edilmesi gibi bazı zorunluluklar da mevcuttur. Genellikle bu tarz geometrilerde, numunenin silindirik kısmına gerinim ölçerler yapıştırılır fakat bu da ekstra bir maliyet getirmektedir.

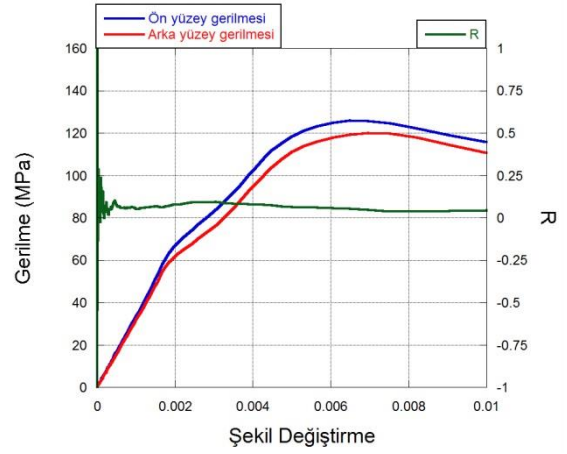
Dog-bone numunenin katı modeli hazırlanırken orta kısımda bulunan silindirik kısmın çapının numunenin çubuk ara yüzleriyle temasta bulunan çapına oranına göre varyasyonları denenmiştir. Bu oranlar sırasıyla 0.50 ve 0.75' tir. Dog-bone şekilli numuneler hem dalga şekillendiricili hem de dalga şekillendiricisiz nümerik modellere entegre edilmiş olup bu nümerik modellerden numune üzerinde oluşan gerilme dalgası ilerleyişi ve gerilme dengesi incelenmiştir (Şekil 139 ve 140).



Şekil 138. Dogbone numune (a) iç çap dış çap oranı 0.50 (b) iç çap dış çap oranı 0.75.

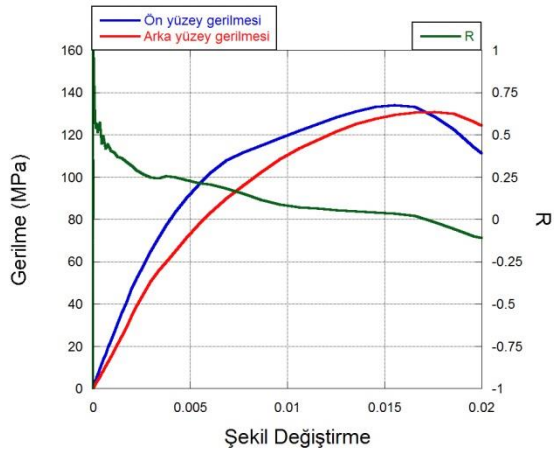


(a)

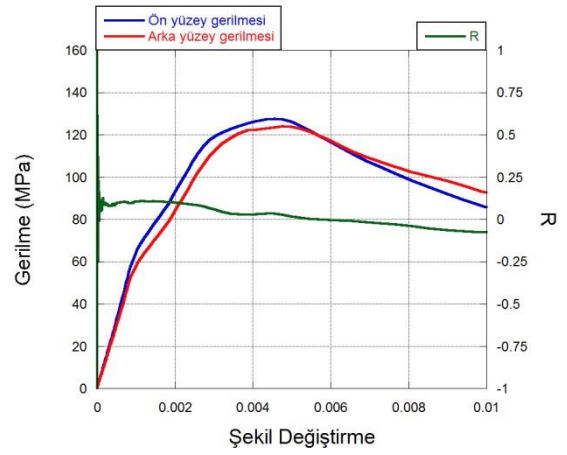


(b)

Şekil 139. Orta numune çapının çubuk çapına oranı 0.50 (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili.

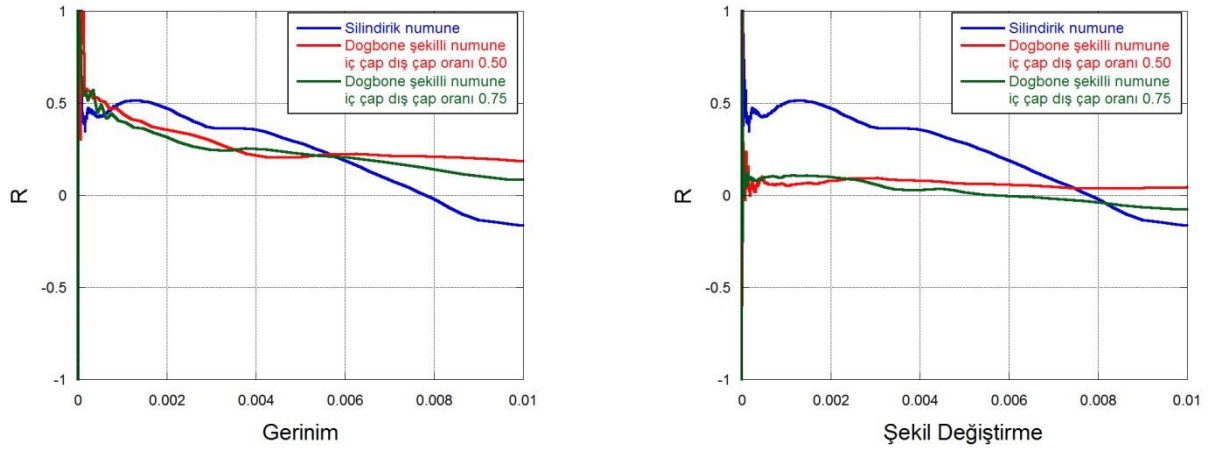


(a)



(b)

Şekil 140. Orta numune çapının çubuk çapına oranı 0.75 (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili.

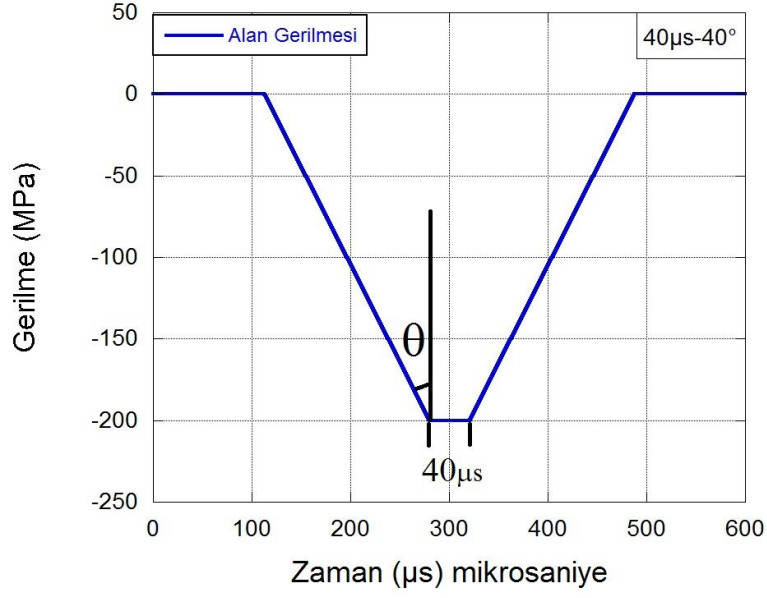


Şekil 141. Silindirik numune ve Dogbone numune varyasyonları şekil değiştirme – R karşılaştırması (a) darbe şekillendiricisiz (b) darbe şekillendiricili.

Şekil 141' den de görülebileceği gibi 0.75 oran ve darbe şekillendirici kullanımı gerilme dengesi dağılımını oldukça homojen hale getirmiştir.

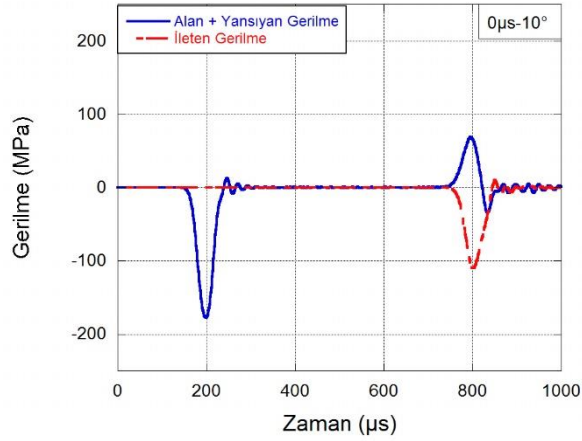
Beton gibi gevrek malzemelerde numune içerisinde gerilme dağılımının homojenliğini sağlamak ve prematüre kırılma eğilimini önlemek amacıyla gerçekleştirilebilecek bir diğer çalışma da gerilme dalgasının yükleme hızını ve şeklini kontrol etmektir. Bu amaçla deneysel çalışmalarda SHBB testlerinde alan çubuğun çarpan çubuk tarafındaki yüzeyine dalga şekillendirici yerleştirilmiş ve dalga şekillendiricinin deformasyonu ile birlikte alan dalga gerilmesinin yükleme hızının düşürülmesi sağlanmıştır. Bu etkinin verimliliğinin incelenmesi amacıyla nümerik olarak oluşturulan farklı karakterdeki gerilme dalgaları nümerik modele girdi olarak tanımlanmış ve bu dalgaların numune şekil değiştirme hızına ve R denge parametresine olan etkileri incelenmiştir.

Testlerdeki çubuk gerilme değerlerine yakın olduğu için ve karşılaştırmayı kolaylaştıracağından dolayı nümerik çalışmada ki gerilme tepe değeri de 200 MPa olarak seçilmiştir. Daha sonraki dalga alternatiflerini üretebilmek adına iki farklı parametre daha belirlenmiştir; bunlar yükleme hızı açısı değeri ve tepe gerilme değeri zamanıdır. Şekil 142' de örnek olarak 40 mikro saniye tepe noktası zamanı ve  $\theta = 40^\circ$  derece yükleme hızı açısı hali görülmektedir.



Şekil 142. Örnek Alan Gerilmesi – Zaman Grafiği.

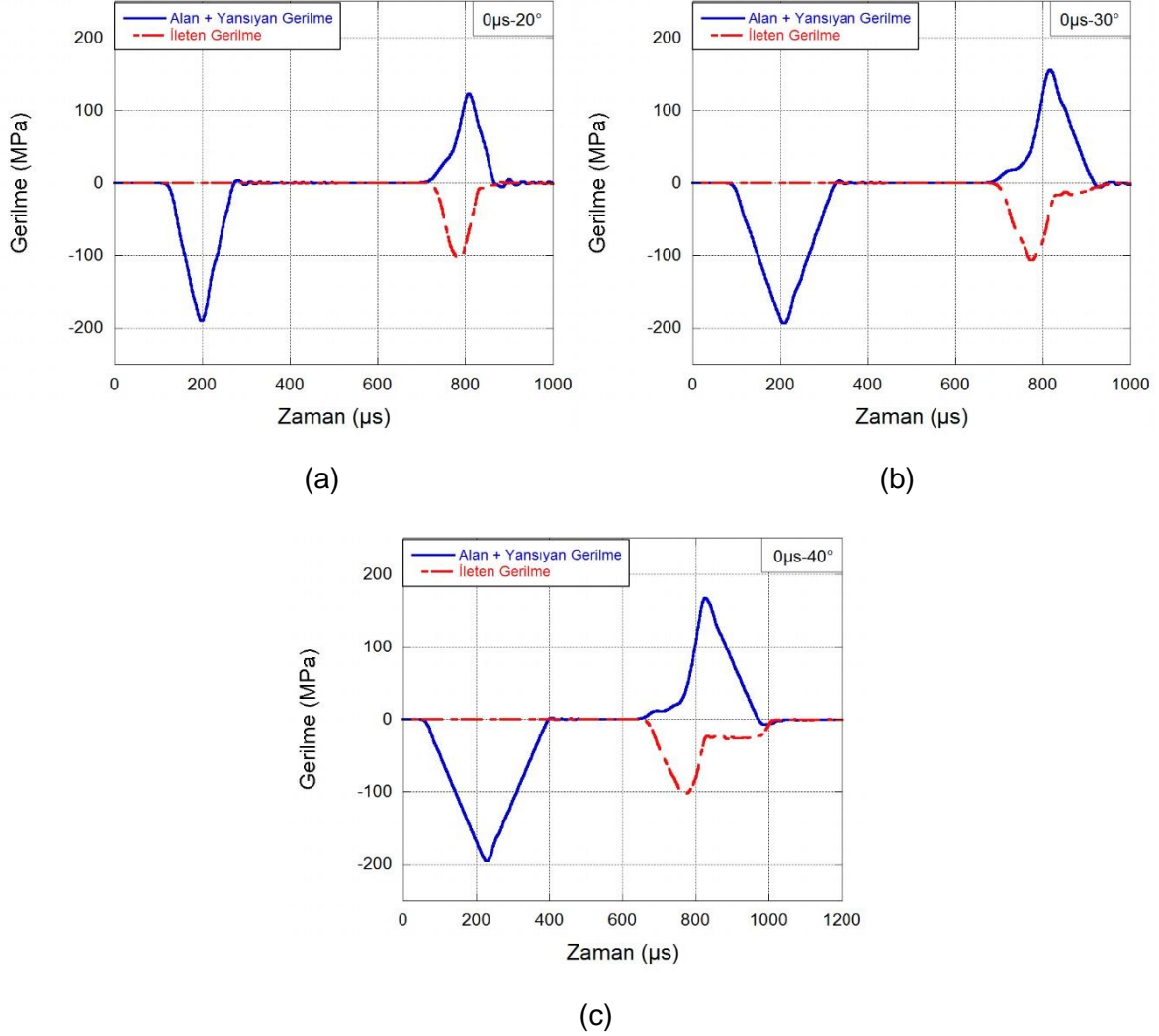
Nümerik olarak oluşturulan gerilme fonksiyonları alan çubuk ön yüzüne zamana bağlı olarak tanımlanmaktadır. Tanımlanan bu gerilme dalgalarının ilerleyişi SHBB test düzeneklerindeki gerinim ölçerlerin bulunduğu noktalara karşılık gelen elemanlar üzerinden okunmaktadır (Şekil 143).



Şekil 143. 0µs-10° için Gerilme – Zaman Grafiği.

Öncelikli olarak 0µs tepe genliğine sahip 20, 30 ve 40° derecede yükleme hızına sahip alan çubuk gerilmelerinin modellerinin sonuçları incelenmiştir. SHBB çubuklarının üzerinde oluşan gerilme dalgaları aşağıdaki gibi gözlemlenmiştir. Alan gerilmesindeki açının büyümesiyle

numuneye etki eden gerilme dalgasının etki etme süresinin uzadığı şekillerden de görülmektedir.

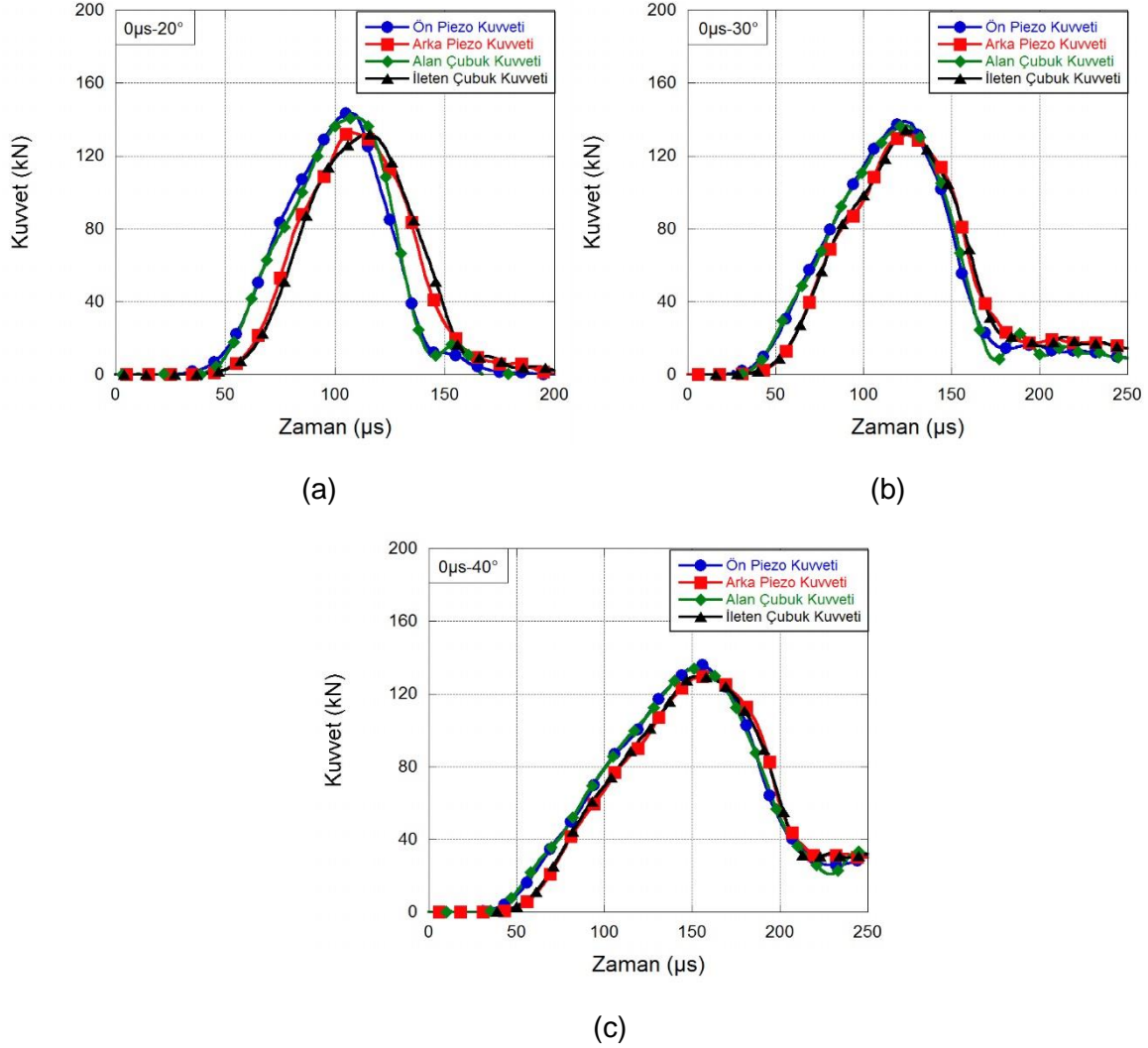


Şekil 144. Çubuk Gerilme – Zaman Grafikleri (a) 0µs-20° (b) 0µs-30° (c) 0µs-40°.

0 µs tepe genliğine ve 20, 30 ve 40° derece yükleme açılarına sahip modellerde numunenin hemen ön ve arkasındaki kuvvet ile çubuk ve piezo kuvvetleri karşılaştırmaları yer almaktadır. Bu noktadan sonra çubuk kuvveti adını verdiğimiz kuvvet, klasik SHBB formülleri kullanılarak model üzerinden gerinim ölçerlerin pozisyonlarında bulunan elemanlardan okunan değerler ile hesaplanan kuvvet değerlerini gösterecektir. Piezo kuvvet ise deneysel çalışmalarda kullandığımız ve numune çubuk ara yüzeylerine yerleştirilen piezo elektrik kristallerin bulunduğu noktalardan ölçülen ara yüzey kuvvetlerini gösterecektir. Ayrıca karşılaştırma yapabilmek için çubuklarda gerinim ölçer noktasından okunan kuvvetler zamanda kaydırma yapılarak, numunenin hemen ön ve arka yüzeylerinden okuma alan piezo

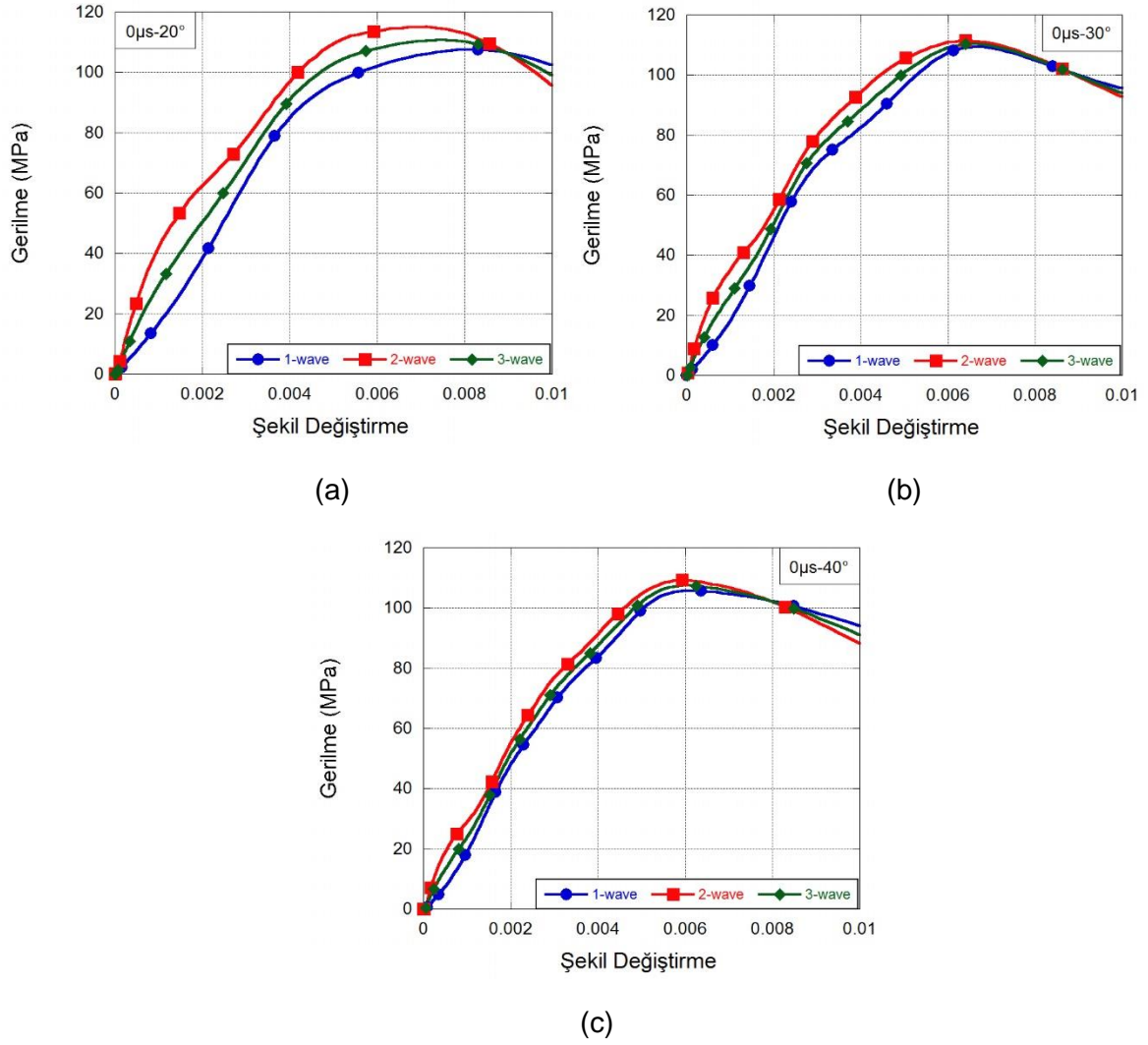


kristal noktaları üzerlerine alınmıştır. Böylelikle ön piezo kuvveti & alan çubuk kuvveti ve arka piezo kuvveti & iletken çubuk kuvveti karşılaştırılmıştır, Şekil 145.



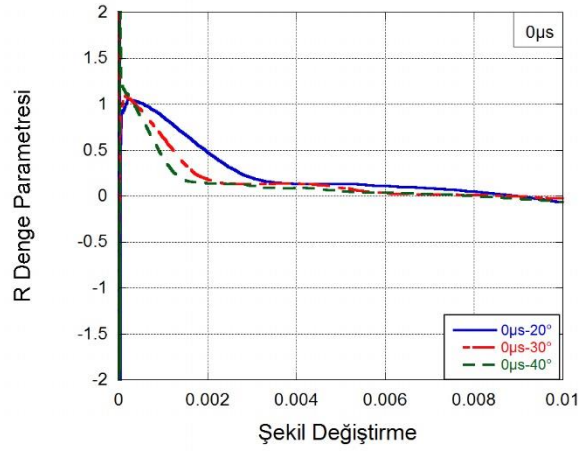
Şekil 145. Kuvvet – Zaman Grafikleri (a) 0µs-20° (b) 0µs-30° (c) 0µs-40°.

Üç farklı yükselme açısı hızı için 1-wave, 2-wave, 3-wave gerilme – şekil değiştirme analizleri incelenmiş ve yükleme hızının azalmasıyla (açının artışıyla) 1, 2 ve 3-wave gerilmelerinin birbirine yaklaştığı ve gerilme dengesinin daha homojen şekilde meydana geldiği görülmüştür, Şekil 146.



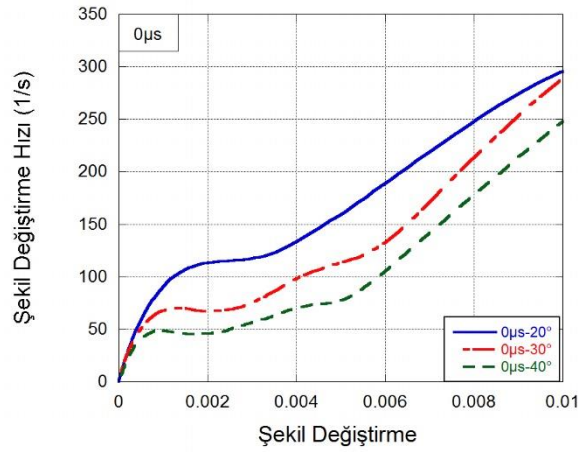
Şekil 146. Gerilme – Şekil Değişirme Grafikleri (a)  $0\mu\text{s}-20^\circ$  (b)  $0\mu\text{s}-30^\circ$  (c)  $0\mu\text{s}-40^\circ$ .

R Denge Parametresi – Şekil Değişirme grafiğinde alan ve ileten çubuk kuvvetlerinden elde edilen R Parametresi karşılaştırılması görülmektedir. Açıda yapılan değişikliğin dengeye etkisi incelendiğinde, açı arttıkça numune daha düşük şekil değişirme değerlerinde dengeye gelmektedir, Şekil 147.



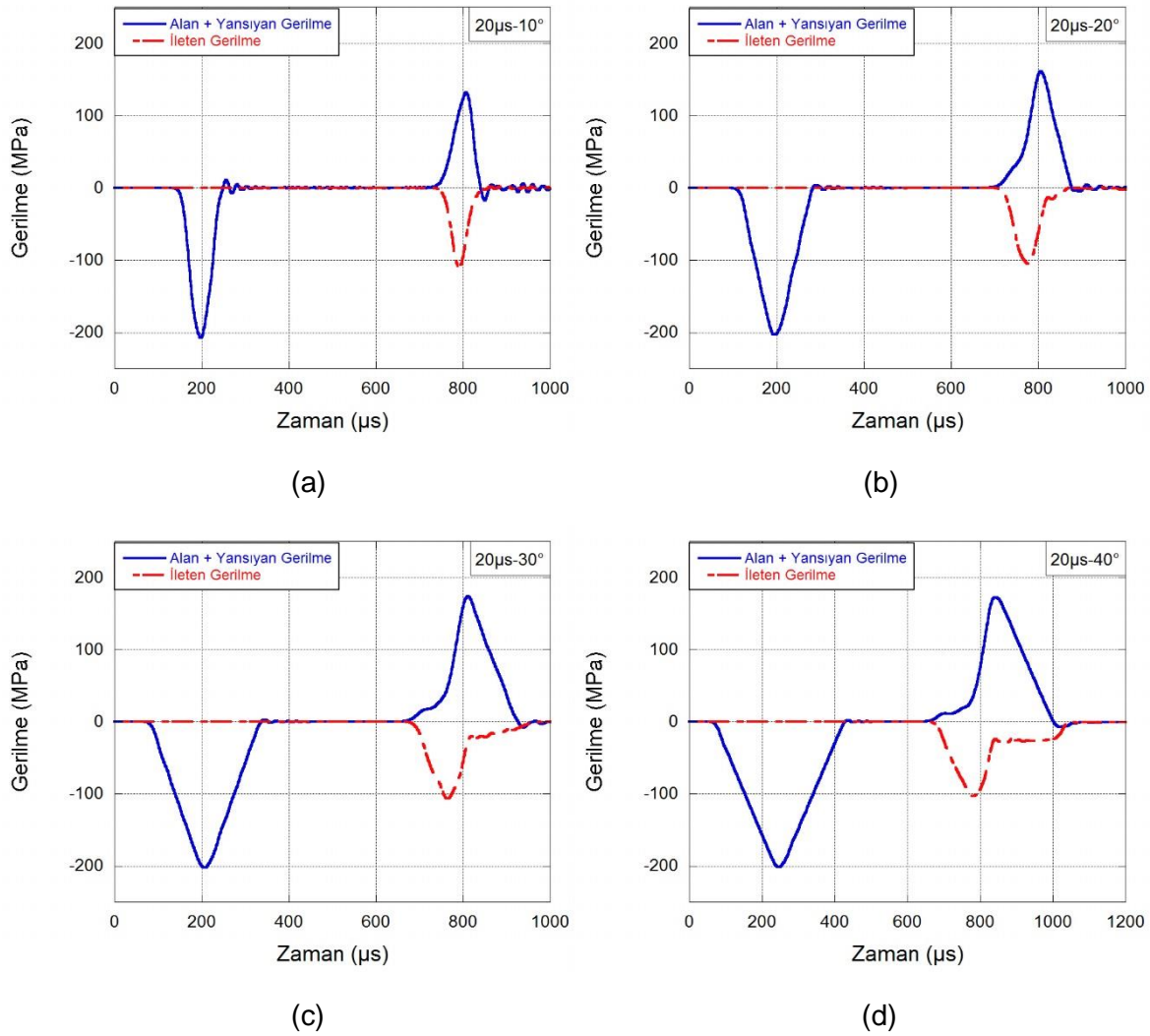
Şekil 147. R Denge Parametresi – Şekil Değişirme Grafiği.

Ayrıca yükleme açısı arttıkça yani yükleme hızı düştükçe doğal olarak şekil değişirme hızı da azalmaktadır, Şekil 148.



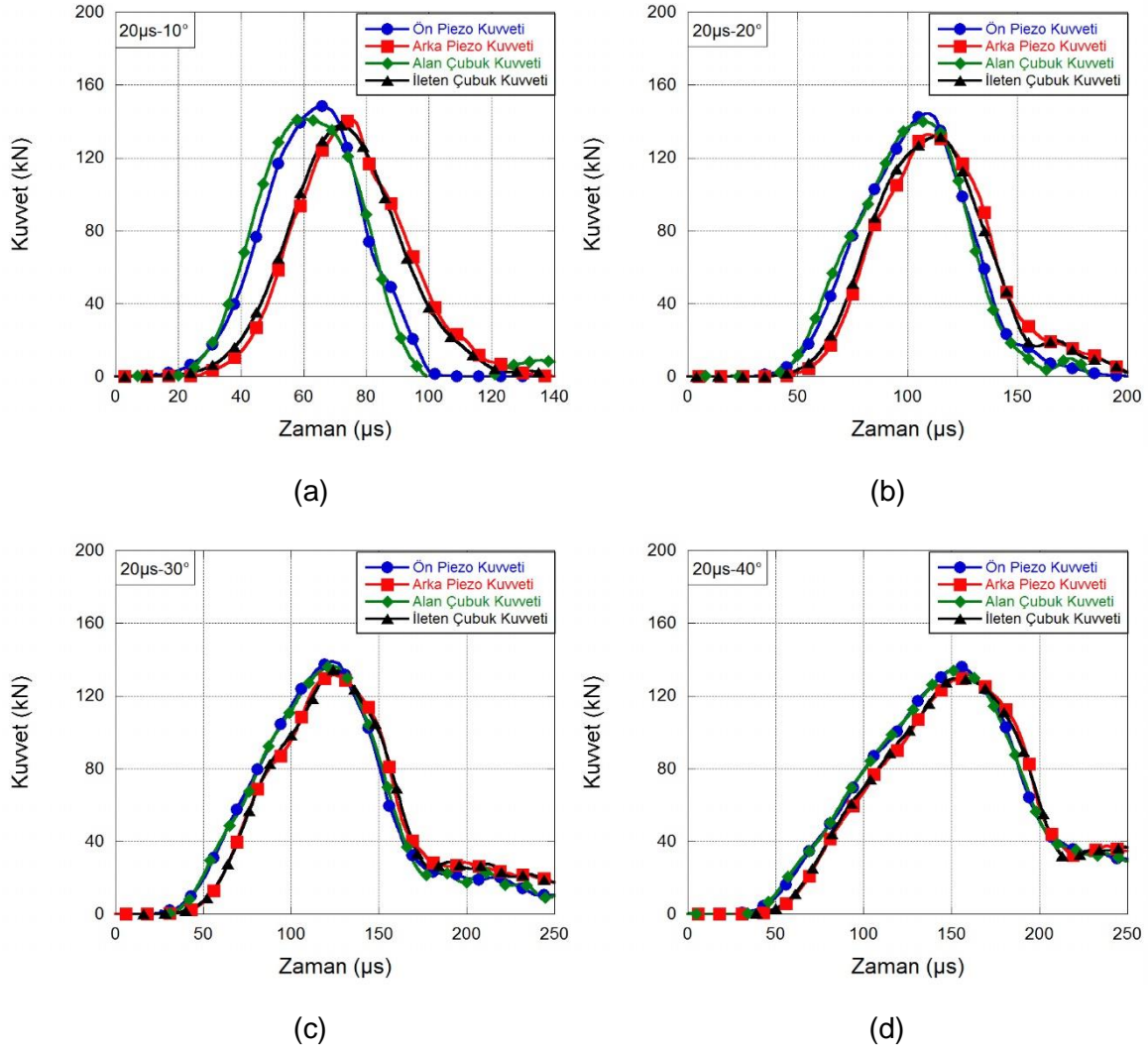
Şekil 148. Şekil Değişirme Hızı – Şekil Değişirme Grafiği.

Daha sonra 20 µs tepe genliğine ve 10°, 20°, 30° ve 40° derece yükleme açlarına sahip modellerin sonuçları incelenmiş, SHBB alan ve ileten çubuklarının üzerinde oluşan gerilme tarihçeleri aşağıdaki gibi gözlemlenmiştir, Şekil 149.



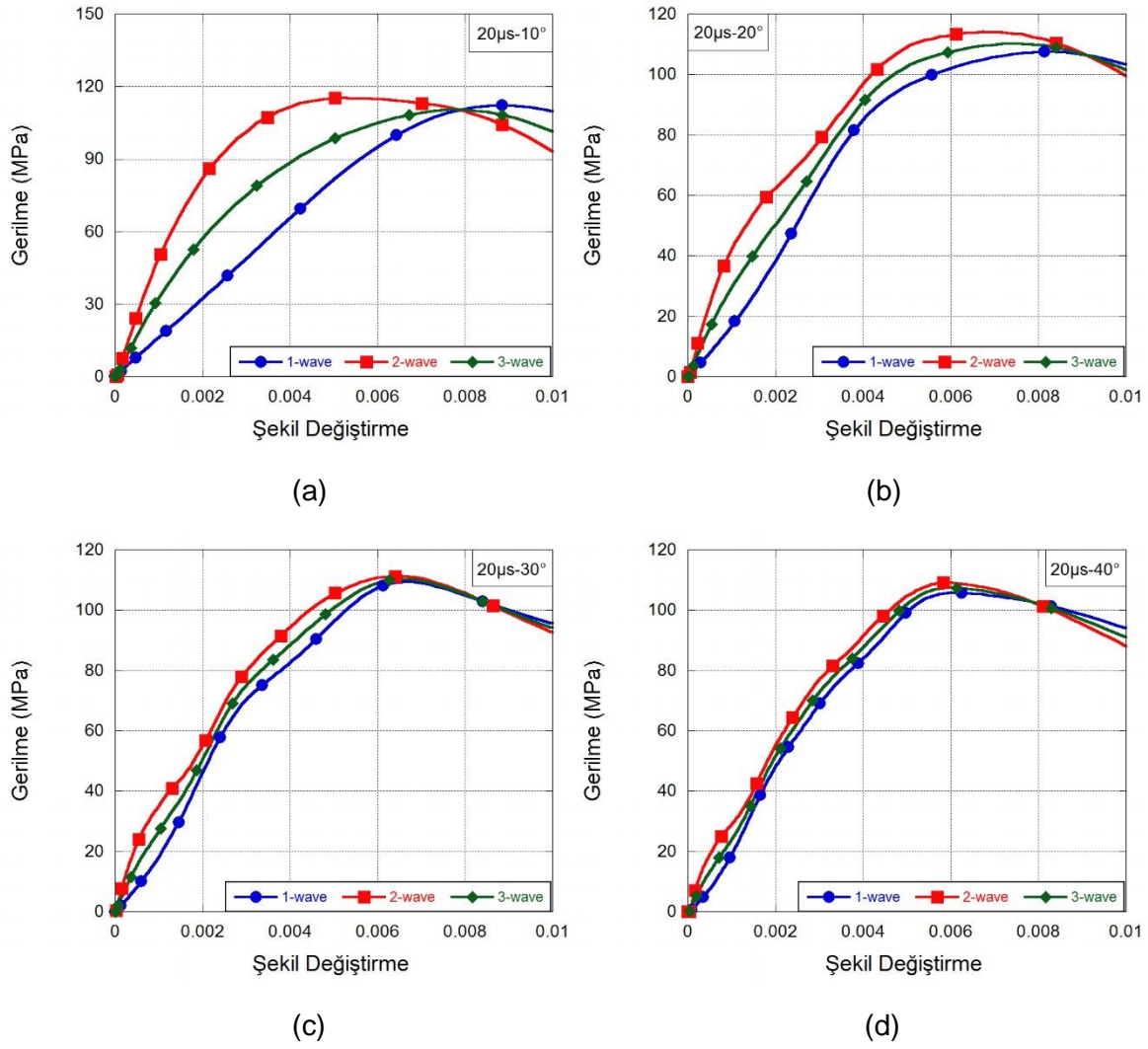
Şekil 149. Çubuk Gerilme – Zaman Grafikleri (a)  $20\mu\text{s}-10^\circ$  (b)  $20\mu\text{s}-20^\circ$  (c)  $20\mu\text{s}-30^\circ$  (d)  $20\mu\text{s}-40^\circ$ .

$20\ \mu\text{s}$  tepe genişliğini olan ve  $10^\circ - 40^\circ$  gerilme yükselme açılarındaki modellerde numunenin ön ve arkasında oluşan kuvvetler ile çubuk ve piezo kuvvetleri incelenmiştir. Açı arttıkça yani yükleme hızı düştükçe ön piezo kuvveti ile alan çubuk kuvveti, arka piezo kuvveti ile ileten çubuk kuvveti arasındaki fark oldukça azalmıştır;  $40^\circ$  yükleme hızına sahip çalışmada ise neredeyse birebir örtüşme gözlenmiştir, Şekil 150.



Şekil 150. Kuvvet – Zaman Grafikleri (a)  $20\mu\text{s}-10^\circ$  (b)  $20\mu\text{s}-20^\circ$  (c)  $20\mu\text{s}-30^\circ$  (d)  $20\mu\text{s}-40^\circ$ .

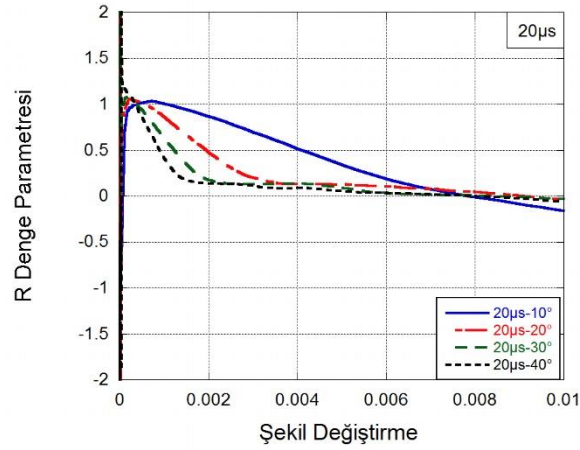
Dört farklı yükselme açısı için 1-wave, 2-wave, 3-wave Gerilme – Şekil Değiştirme grafikleri aşağıda incelenmiş; açı da yapılan artış (alan şekil değiştirme dalgasının yükselme hızını azaltma) 1, 2 ve 3-wave gerilmelerinin birbirine yakınlığı, şekil değiştirme değerlerinin benzeştiği görülmüştür, Şekil 151.



Şekil 151. Gerilme – Şekil Değişirme Grafikleri (a) 20µs-10° (b) 20µs-20° (c) 20µs-30° (d) 20µs-40°.

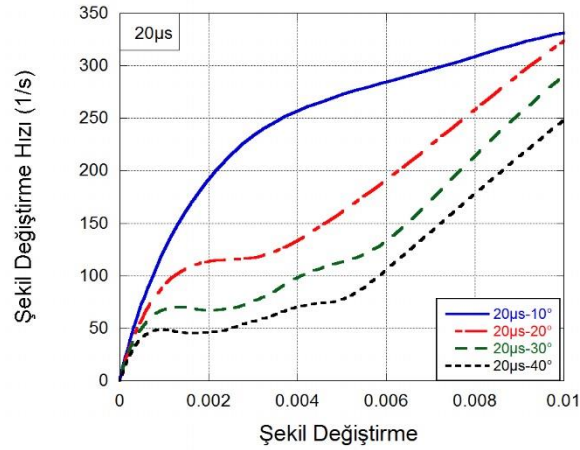
R Denge Parametresi – Şekil Değişirme grafiğinde, alan ve ileten çubuk kuvvetlerinden elde edilen R Parametresi karşılaştırılması görülmektedir. Açıda yapılan değişikliğin dengeye etkisi incelenmiş, buna göre açı arttıkça numune daha küçük şekil değiştirme değerlerinde dengeye yaklaşmıştır, Şekil 152.





Şekil 152. R Denge Parametresi – Şekil Değişirme Grafiği.

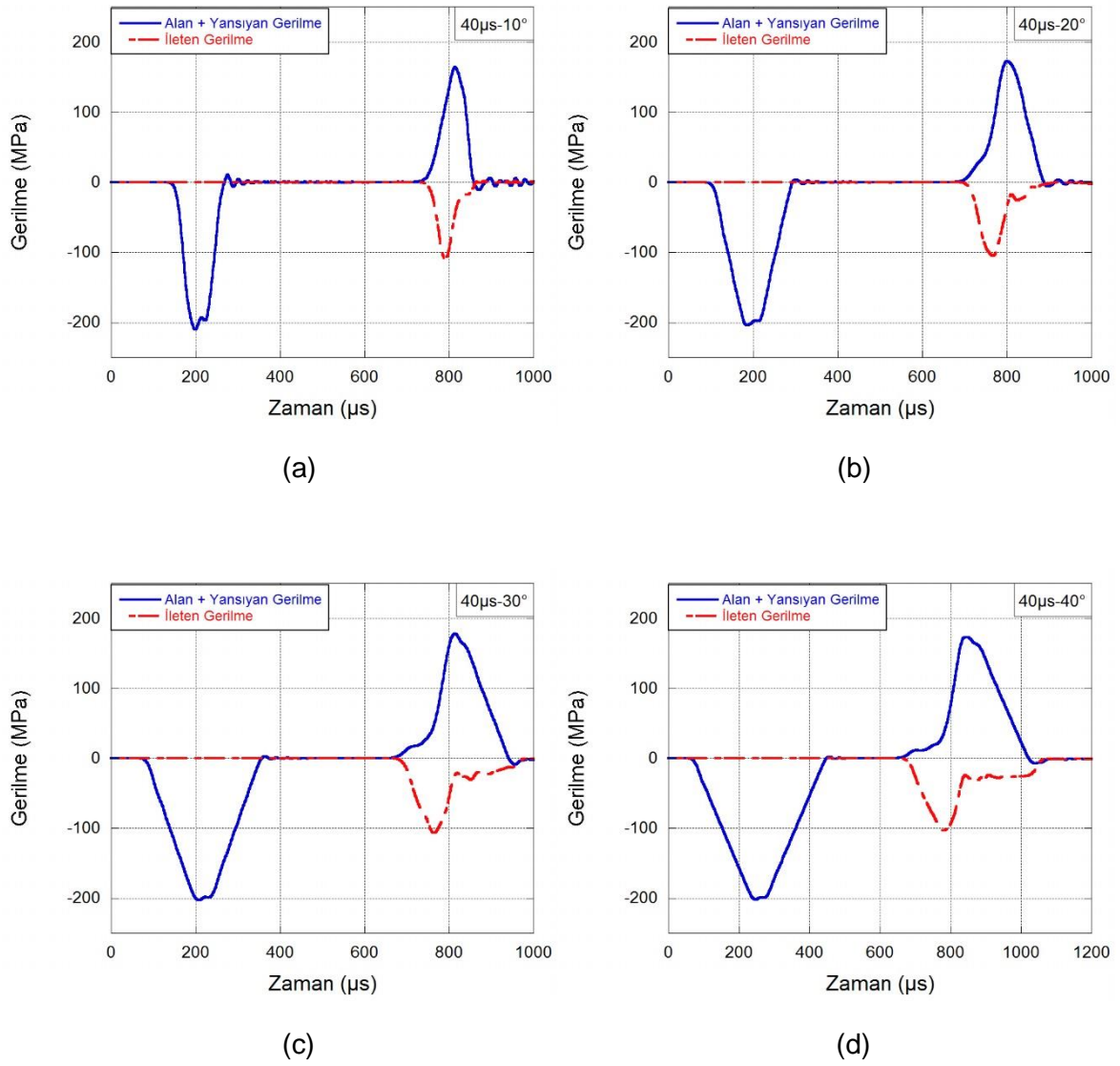
Yine benzer şekilde yüklemeye açısı arttıkça numunede meydana gelen şekil değişirme hızı değeri azalmaktadır, Şekil 153.



Şekil 153. Şekil Değişirme Hızı – Şekil Değişirme Grafiği.

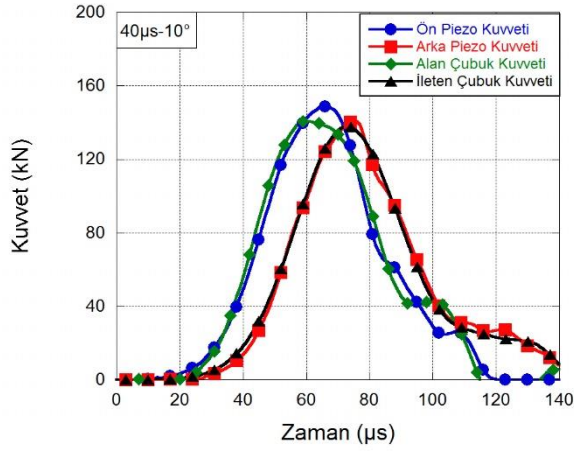
Son olarak alan gerilmesinin tepe genliği 40 µs ve açı değerleri 10°, 20°, 30° ve 40° derece yüklemeye hızları incelenmiş, SHBB alan ve iletken çubuklarının üzerinde oluşan gerilme dalgaları aşağıdaki gibi elde edilmiştir, Şekil 154.



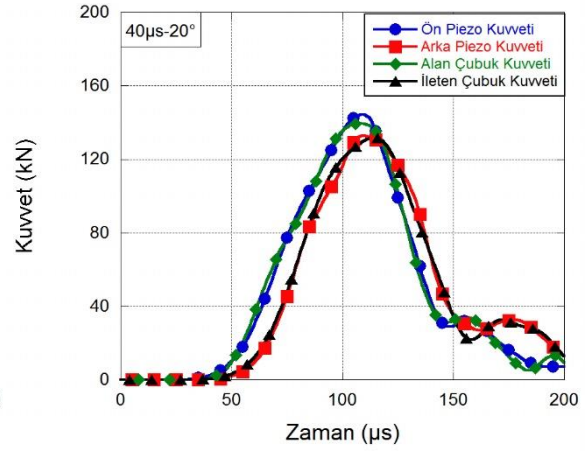


Şekil 154. Gerilme – Zaman Grafikleri (a) 40μs-10° (b) 40μs-20° (c) 40μs-30° (d) 40μs-40°.

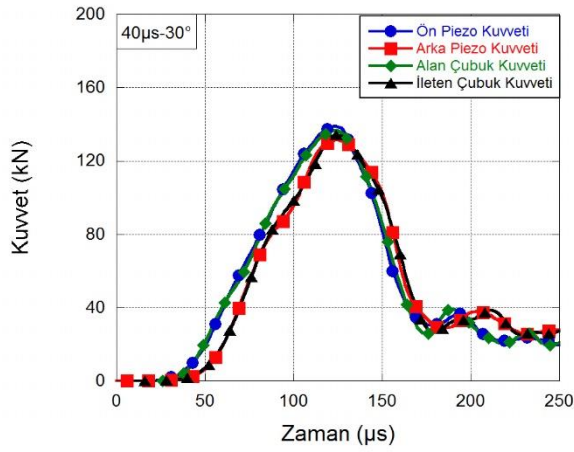
40 μs tepe genliği 10°, 20°, 30° ve 40° sahip modellerde numunenin ön ve arkasına göre çubuk ve piezo kuvvetleri karşılaştırmaları yer almaktadır. Sürenin uzaması ile birlikte kuvvet değerleri arasındaki fark oldukça hızlı şekilde azalmaktadır, Şekil 155.



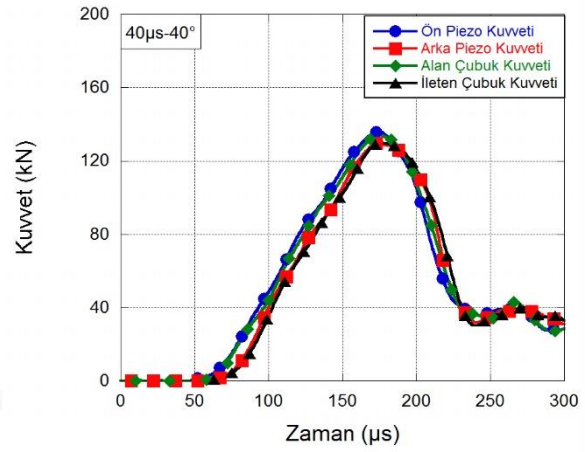
(a)



(b)



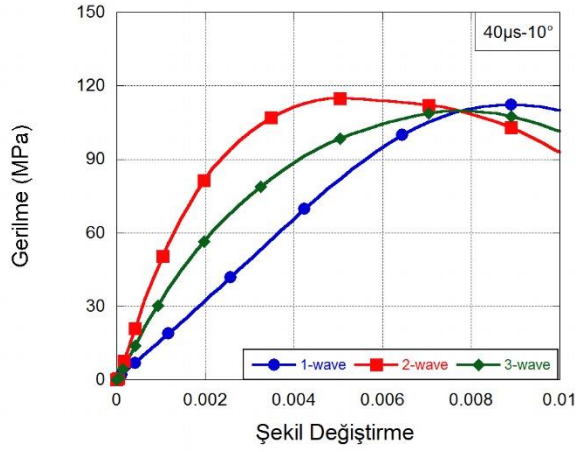
(c)



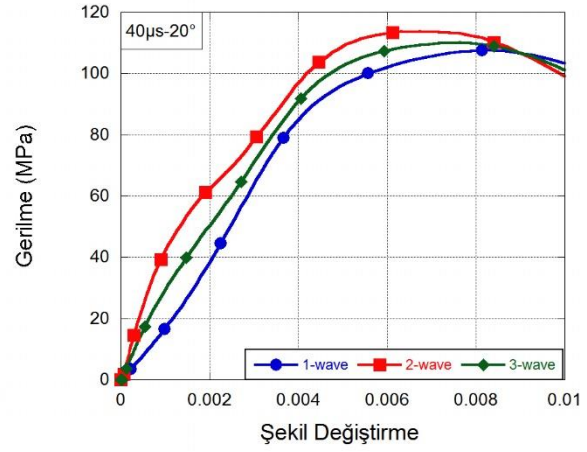
(d)

Şekil 155. Kuvvet – Zaman Grafikleri (a)  $40\mu\text{s}-10^\circ$  (b)  $40\mu\text{s}-20^\circ$  (c)  $40\mu\text{s}-30^\circ$  (d)  $40\mu\text{s}-40^\circ$ .

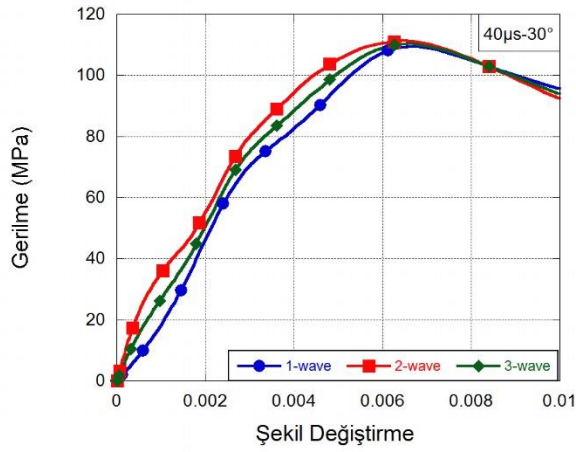
Benzer şekilde numune içerisindeki gerilme dengesi açının artışı ve sürenin uzaması ile birlikte daha kolay ve hızlı şekilde oluşmaktadır, Şekil 156.



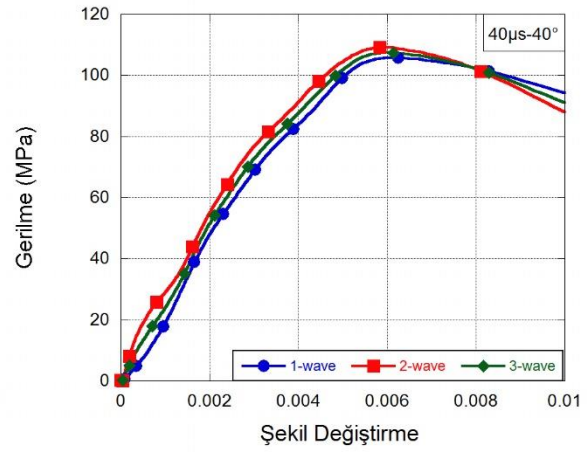
(a)



(b)



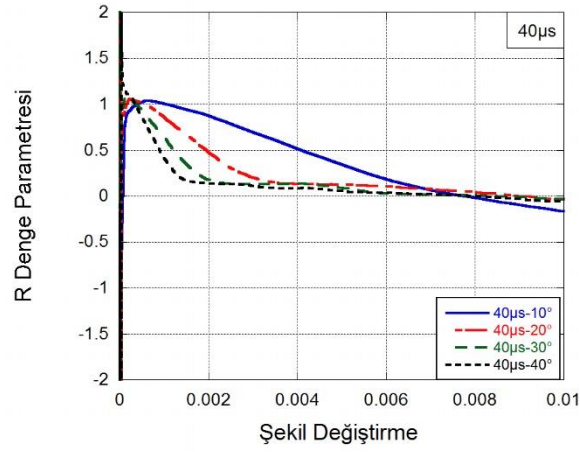
(c)



(d)

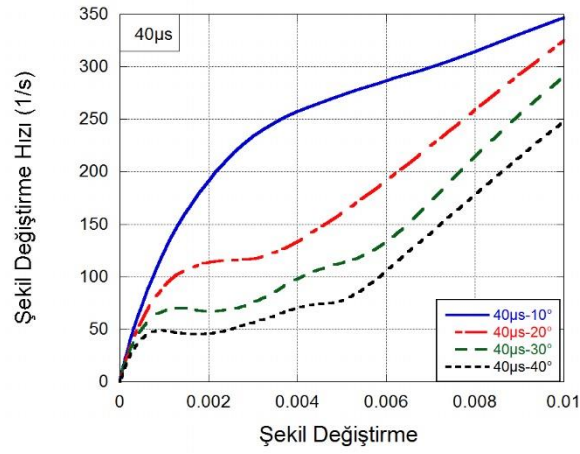
Şekil 156. Gerilme – Şekil Değişirme Grafikleri (a)  $40\mu\text{s}-10^\circ$  (b)  $40\mu\text{s}-20^\circ$  (c)  $40\mu\text{s}-30^\circ$  (d)  $40\mu\text{s}-40^\circ$ .

Bu açı değerleri için R Denge Parametresi – Şekil Değişirme grafiğinde, alan ve ileten çubuk kuvvetlerinden elde edilen R Parametresi karşılaştırılması görülmektedir. Açıda yapılan değişikliğin dengeye etkisi incelenmiş, buna göre açı artışının dengeye olumlu bir etkisi gözlemlenmiş, daha küçük şekil değişirme değerlerinde dengeye yaklaşmıştır, Şekil 157.



Şekil 157. R Denge Parametresi – Şekil Değişirme Grafiği.

Numunede elde edilen şekil değişirme hızları açının artışıyla birlikte azalmaktadır, Şekil 158.



Şekil 158. Şekil Değişirme Hızı – Şekil Değişirme Grafiği.

## 5. SONUÇLAR

Proje kapsamında yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar kısaca özetlenecek olursa

- Beton malzemenin statik ve dinamik mekanik karakterizasyonu için bir metodoloji geliştirilmiştir. Bu metodoloji deneysel ve nümerik çalışmaların bir arada kullanılmasıyla anlam kazanmıştır.
- Gevrek doğaya sahip beton malzemenin özellikle dinamik mekanik karakterizasyonu sırasında SHBB deney cihazının kullanılmasının uygun olduğu fakat klasik set-up yeterli olmadığı tespit edilmiştir.
- Beton malzemenin SHBB testlerinde gerilme dalgası şekillendirici kullanımının numune içerisindeki gerilme dengesi dağılımını oldukça iyileştirdiği tespit edilmiştir ve deneyler sırasında kesinlikle kullanılması tavsiye edilmektedir.
- Dünyada bir ilk olarak piezoelektrik kristaller betonun SHBB testlerinde kullanılmıştır. Beton malzemenin SHBB testlerinde kullanılan numune çapları genellikle diğer malzemelerinkilere göre daha büyüktür. Numune çapı büyüdükçe testlerin gerçekleştirildiği çubukların çapları da büyümek zorundadır. Çubukların çapları büyüdükçe gerilme dalgasının dispersiyon etkisi artmaktadır. Kristaller doğrudan numune ara yüzeylerinden kuvvet değerlerini okuduğundan gerilme dalgasında dispersiyon meydana gelmeden oldukça hassas okumalar yapılmıştır.
- Yapılan incelemeler sonucunda beton malzemenin şekil değiştirme hızı hassasiyetinin ana olarak iki etkiden meydana geldiği tespit edilmiştir. Bunlardan ilki yüksek hızda meydana gelen deformasyon esnasında oluşan mikro atalet etkisi, ikincisi ise beton malzemenin muhteviyatındaki su ve gözenekli yapının viskoz etkiye neden olmasıdır. Bu ikinci etki malzemenin şekil değiştirme hızı hassasiyeti olarak kabul edilebilir. Deneysel ve nümerik çalışmalar sayesinde bu etkilerin toplam mukavemet artışındaki etkinlikleri bireysel olarak incelenmiştir.
- Yapılan çalışmalar ile birlikte yüksek şekil değiştirme hızındaki testlerde atalet etkisinin önemli miktarda mukavemet artışı sağladığı görülmüştür. Hem nümerik hem de analitik olarak bulunan sonuçlarda atalet etkisinin ve radyal gerilme artışının 10-20 MPa seviyelerinde olduğu görülmüştür.
- Numune üzerindeki gerilme dağılımını iyileştirmeye yönelik çalışmalarda en iyi sonucu veren silindirik geometrinin minimum uzunluk/çap oranında olduğu görülmüştür. Bu oranda gözetilmesi gereken önemli hususlar ise numune çapının çubuk çapından büyük olmaması ve maksimum agrega boyutunun numune uzunluğuna göre beton standartlarını sağlamasıdır.

- Nümerik olarak içi boş halka şeklindeki numune geometrileriyle gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre halka geometrili silindirik numune geometrisinin gerilme dengesine önemli ölçüde etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir.
- SHBB çubuk ara yüzlerine yerleştirilen insert malzemelerin kullanımının gerilme dağılımına ve gerilme dalgasına etkisinin olmadığı bu sayede farklı geometri veya çapa sahip geometrilerin SHBB testlerinde test sonucuna etki etmeden kullanılabilceği ve çubuk yüzeylerinde çentik oluşumunun önüne geçilebileceği görülmüştür.
- Ayrıca Dog-bone (köpek kemiği) geometrili numunenin SHBB nümerik analizinde en iyi gerilme dengesi gösterdiği görülmüştür.
- Gerilme dalgasının şekli numune içerisinde elde edilen gerilme dengesi üzerinde doğrudan etkili bulunmuştur.
- Nümerik olarak oluşturulan alan gerilmesindeki yükleme hızının direkt olarak şekil değiştirme hızı ve R denge parametresini olan etkisi gözlenmiştir. Buna göre yükleme hızı yavaşladıkça şekil değiştirme hızı azalmış ve numune daha düşük şekil değiştirme değerlerinde dengeye ulaşmıştır. Alan gerilmesinin tepe genliğini farklı zaman varyasyonlarında ise gerilme, şekil değiştirme hızı ve numune ön arka yüzey gerilme dengesinde herhangi bir değişim gözlenmemiştir.

Bütün bu sonuçların ışığı altında ülkemiz imkânları kullanılarak dünya literatürüne oldukça büyük katkıda bulunulmuştur. Bu alanda ileriki zamanlarda çalışılması gereken en önemli hususlardan birisi yanal sınırlandırılmış numunelerin mekanik davranışlarının incelenmesi olacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] Zhang, Q. B. ve Zhao, J. 2013. "A Review of Dynamic Experimental Techniques and Mechanical Behavior of Rock Materials", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, 1411-1478.
- [2] Eibl, J. et al. 1988. "Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading", *Comité Euro-International du Béton, Bulletin d'Information*, 187.
- [3] Bischoff, P. H. ve Perry, S. H. 1991. "Compressive Behavior of Concrete at High Strain Rates." *Materials and Structures*, 24, 425-450.
- [4] Li, Q. M. ve Meng, H. 2003. "About the Dynamic Strength Enhancement of Concrete-Like Materials in a Split Hopkinson Pressure Bar Test.", *International Journal of Solids and Structures*, 40, 343-360.
- [5] Chen, W. W. ve Song, B. 2011. *Split Hopkinson (Kolsky) Bar: Design, Testing and Applications*, Springer. New York: 2011
- [6] Grote, D. L., Park, S. W. ve Zhou, M. 2001. "Compressive Dynamic Behavior of Concrete at High Strain Rates and Pressures: I. Experimental Characterization." *International Journal of Impact Engineering*, 25, 869-886.
- [7] Abrams, D. A. 1917. "Effect of Rate of Application of Load on the Compressive Strength of Concrete", *ASTM Journal*, 17(2), 364-377.
- [8] Malvern, L. E. ve Ross, C. A. 1985. "Dynamic Response of Concrete and Concrete Structures", Final Report, U. S. Air Force Office of Scientific Research, Aerospace Science Directorate.
- [9] Malvern, L. E., Jenkins, D. A., Tang, T., Ross, C. A. 1985. "Dynamic Compressive Testing of Concrete", *Proceedings of 2nd Symposium on the Interaction of Non-Nuclear Munitions with Structures*, Florida (U.S. Dept. of Defense), 194-199.
- [10] Ross, C. A., Thompson, P. Y., Tedesco, J. W. 1989. "Split-Hopkinson Pressure-Bar Tests on Concrete and Mortar in Tension and Compression.", *ACI Materials Journal*, 86(5), pp.475-781.
- [11] Takeda, J. ve Tachikawa, H. 1962. "The Mechanical Properties of Several Kinds of Concrete at Compressive, Tensile, and Flexural Tests in High Rates of Loading.", *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, 77, 1-6.



- [12] Atchley, B. L. ve Furr, H. L. 1967. "Strength and Energy Absorption Capabilities of Plain Concrete under Dynamic and Static Loadings.", *ACI Journal*, 64, 745-756.
- [13] Hughes, B. P. ve Gregory, R. 1972. "Concrete Subjected to High Rates of Loading in Compression", *Magazine of Concrete Research*, 24, 25-36.
- [14] Bresler, B. ve Bertero, V. V. 1975. "Influence of High Strain Rate and Cyclic Loading of Unconfined and Confined Concrete in Compression", *Proceedings of 2nd Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Hamilton, Ontario, 1-13.
- [15] Hughes, B. P. ve Watson, A. J. 1978. "Compressive Strength and Ultimate Strain of Concrete under Impact Loading", *Magazine of Concrete Research*, 30, 189-199.
- [16] Dilger, W. H., Koch, R., Kowalczyk, R. 1984. "Ductility of Plain and Confined Concrete under Different Strain Rates", *ACI Journal*, 81(1), 73-81.
- [17] Ahmed, S. H. ve Shah, S. P. 1985. "Behavior of Hoop Confined Concrete under High Strain Rates.", *ACI Journal*, 82(5), 634-647.
- [18] Jawed, I., Childs, G., Ritter, A., Winzer, S., Johnson, T., Barker, D. 1987. "High-Strain Rate Behavior of Hydrated Cement Pastes." *Cement and Concrete Research*, 17 (3), 433-440.
- [19] Gran, J. K., Florence, A. L., Colton, J. D. 1989. "Dynamic Triaxial Tests of High-Strength Concrete.", *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 115(5), 891-904.
- [20] Reinhardt, H.W. 1985. "Strain Rate Effects on the Tensile Strength of Concrete as Predicted by Thermodynamics and Fracture Mechanics Models", *MRS Proceedings*, 64.
- [21] Tedesco, J. W. ve C. A. Ross 1998. "Strain Rate Dependent Constitutive Equations for Concrete." *Journal of Pressure Vessel Technology*, 120(4), 398-405.
- [22] Bischoff, P. H., Perry, S. H. 1991. "Compressive Behavior of Concrete at High Strain Rates." *Materials and Structures*, 24, 425-450.
- [23] Ozbolt, J. And Sharma, A. 2012. "Numerical Simulation of Dynamic Fracture of Concrete Through Uniaxial Tension and L-Specimen." *Engineering Fractures Mechanics*, 85, 88-102
- [24] Chen, T. Li, Q. And Guan, J. 2013. " Effect of Radial Inertia Confinement on Dynamic Compressive Strength of Concrete in SHPB Tests" *Applied Mechanics and Materials*, 438-439, 215-219.
- [25] Forrestal, M.J., Wright, T. W. and Chen, W. 2007. " The Effect of Radial Inertia on Brittle Samples During the Split Hopkinson Pressure Bar Test." *International Journal of Impact Engineering*, 37, 405-411.

[26] Hao, H. ve Y. Hao 2011. "Numerical Evaluation of the Influence of Aggregates on Concrete Compressive Strength at High Strain Rate." *International Journal of Protective Structures*, 2(2), 177-206.

[27] Hao, Y., et al. 2013. "Influence of end Friction Confinement on Impact Tests of Concrete Material at High Strain Rate." *International Journal of Impact Engineering*, 60, 82-106.

**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. ALPER TAŞDEMİRCİ
Proje No:	115M534
Proje Başlığı:	Beton İçin Yeni Bir Statik Ve Dinamik Mekanik Karakterizasyon Metodolojisi Geliştirilmesi
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	MUSTAFA GÜDEN, SELÇUK SAATCI
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	İZMİR YÜKSEK TEKNOLOJİ ENS. MÜHENDİSLİK F. MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/09/2015 - 01/09/2017
Onaylanan Bütçe:	495871.0
Harcanan Bütçe:	290899.45
Öz:	<p>Günümüze kadar beton malzemesi üzerine yapılan çalışmalarda betonun şekil değiştirme hızına bağlı olarak mukavemetinin değişimi konusunda bir fikir birliği oluşturulamamıştır. Betonun yüksek deformasyon hızı testleri esnasında karşılaşılan zorluklar nedeniyle test verilerinden elde edilen sonuçlar farklı şekillerde yorumlanmaktadır. Günümüzde Split Hopkinson Basınç Barı testi bu amaçla en yaygın olarak kullanılan test metodudur. Fakat testler esnasında numune homojen olmayan gerilme dağılımı meydana gelme riski ve gerilme dalgasında dispersiyon eğilimi vardır. Bahsi geçen problemleri aşmak amacıyla proje kapsamında dinamik test düzeneklerinde bazı inovatif iyileştirmeler uygulanmıştır. Bunlar piezoelektrik kuartz kristal ve dalga şekillendirici kullanımınıdır. Piezoelektrik kuartz kristaller numune çubuk ara yüzelerine doğrudan yerleştirildiği için gerilme dalgasındaki dispersiyon etkisi minimize edilir. Böylece numunede meydana gelen gerilme tarihçesi daha yüksek hassasiyetle ve farklı noktalardan ölçülebilir. Numune içerisinde gerilme dengesinin sağlanması beton gibi gevrek karakterli bir malzemede prematüre kırılma eğiliminin önlenmesi açısından oldukça önemlidir. Proje kapsamındaki deneylerde gerilme dalgası şekillendiricisi kullanılarak gerilme dalgasının şiddeti ve yükleme hızı kontrol edilebilmiştir. Bu sayede numune içerisinde homojen bir gerilme dağılımı sağlanmış ve prematüre kırılma eğilimi önlenmiştir. Statik ve dinamik mekanik karakterizasyon sonuçları incelenerek beton malzemenin mekanik davranışına uygun bir malzeme modeli seçilmiş ve gerekli parametreler belirlenmiştir. Belirlenen parametrelerin doğrulukları farklı yükleme koşulları altında test edilmiştir. Bu amaçla düşen ağırlık testleri icra edilmiş ve numunelerde meydana gelen hasarların ve kuvvet tarihçelerinin deneylerle olan uyumları nümerik model sonuçlarıyla tayin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde betonun mukavemetinde şekil değiştirme hızının artışıyla birlikte bir artışın meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu artışın iki ana sebebi vardır. Bunlardan ilki yüksek hızda meydana gelen hasar esnasında oluşan mikro atalet etkisidir. İkincisi ise beton malzemenin ihtiva ettiği su ve gözenekli yapısından kaynaklanan viskoz davranışdır. Bu ikinci etkiye malzemenin şekil değiştirme hızı hassasiyeti olarak bakılabilir. Yürütülen deneysel ve nümerik çalışma sayesinde bu etkilerin bireysel olarak toplam mukavemet artışındaki etkinlikleri tespit edilebilmiştir. Bu sonuç dünya literatürüne oldukça önemli bir katkıdır.</p>
Anahtar Kelimeler:	Beton, Mekanik Karakterizasyon, Şekil Değiştirme Hızı Hassasiyeti, LS-DYNA
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- The effect of pulse shaping on the dynamic mechanical behavior of concrete (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),