

Biyobenzetim Tabanlı Enerji Yutucu Zırh Sistemlerinin Tasarımı ve Optimizasyonu

Program Kodu: 1001

Proje No: 214M339

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Alper TAŞDEMİRCİ

Araştırmacı(lar):
Prof. Dr. Mustafa GÜDEN

Bursiyer(ler):
Emine Fulya AKBULUT
Erkan GÜZEL
Fırat TÜZGEL

MAYIS 2017
İZMİR

Önsöz

Bu proje kapsamında bir deniz kabuklusu olan balan canlısının geometrisinden ilham alınarak iç çekirdek ve dış kabuk yapıdan oluşan ve üstün enerji emme kapasitesine sahip biyobenzetim tabanlı enerji yutucu bir yapı geliştirilmiştir. Bu amaçla farklı konfigürasyonlarda sandviç yapılar geliştirilmiş ve bu yapıların ezilme-patlama etkileri karşısındaki davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Proje sonucunda milli ve yerli imkânlar kullanılarak patlama ve dinamik yükleme koşullarında yüksek enerji emme performansı gösteren enerji yutucu bir zırh sistemi geliştirilmiştir. Proje TÜBİTAK tarafından desteklenmiş ve İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü bünyesinde bulunan Dinamik Test ve Modelleme Laboratuvarında yürütülmüştür.

İÇİNDEKİLER

Tablo Listesi	iv
Şekil Listesi	v
Özet	xi
Abstract	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	2
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	12
3.1 Çekirdek Malzemelerin Üretimi ve Üretim Nümerik Modeli	12
3.2 Sandviç Yapıların Tasarımı ve Üretimi	18
3.3 Biyobenzetim Yapıların Statik ve Orta Hızlarda Ezilme Deney ve Nümerik Modelleri ..	26
3.4 Sandviç Yapıların Statik ve Orta Hızlarda Ezilme Deney ve Nümerik Modelleri	27
3.5 Doğrudan Basınç Dalgası Deneyi ve Nümerik Modeli	29
3.6 Penetrasyon Deneyleri ve Nümerik Modelleri.....	30
3.7 Patlama Nümerik Modelleri	33
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	36
4.1 Biyobenzetim Yapıların Nümerik Üretimi	36
4.2 Statik ve Dinamik Mekanik Karakterizasyon Sonuçları	42
4.3 Malzeme Modeli Sabitlerinin Doğrulanması	59
4.4 Sandviç Yapıların Statik ve Dinamik Ezilme Karakteristikleri	99
4.5. Sandviç Yapıların Patlama Yükleri Altındaki Davranışları.....	149
5. SONUÇLAR	166
KAYNAKLAR.....	171

Tablo Listesi

Tablo 1. AISI 304L paslanmaz çeliğin Johnson-Cook malzeme model parametreleri.	47
Tablo 2. Hasar tarihçesi değişkenleri (Tasdemirci, 2014).	52
Tablo 3. Kompozit malzeme MAT162 model parametreleri (Tasdemirci, 2014).	55
Tablo 4. Statik testler sonucunda malzemeler tarafından emilen enerji.	80
Tablo 5. Düşen ağırlık testleri sonucunda malzemeler tarafından emilen enerji.	80

Şekil Listesi

Şekil 1. (a) Termitlerden esinlenen Zimbabwe'deki Eastgate Center (Kaynak: www.inhabitat.com), (b) Shinkansen-500 treni ve yalıçapkını kuşu (Kaynak: www.plexusinstitute.org) ve (c) Mimar Sinan'ın Süleymaniye Camii – İnsan damağının benzerliği (Güvenir, 2006).	3
Şekil 2. (a) Altıgen şekilli pal peteği (Kaynak: www.inhabitat.com) (b) Akbaba ile günümüzde kullanılan truss-core yapısı (Meyers vd., 2011) ve (c) Femur kemiği ile Eiffel Kulesi (Kaynak: www.personal.strath.ac.uk).	4
Şekil 3. (a) Balan (Kaynak: www.giovannipinto.it)ve (b) Kaya yüzeyine yapışarak yaşayan örnek balan habitatı (Tsang vd., 2012).	5
Şekil 4. (a) Balanın hayat döngüsü (Kaynak: www.asnailsodyssey.com) ve (b) anatomik yapısı (Brusca ve Brusca, 2003).....	6
Şekil 5. Konvansiyonel malzemeler; a) Kare şekilli bal peteği (Nia ve Parsapour, 2013) b) Üçgen oluklu ve Y-Şekilli çekirdekli (Tilbrook vd., 2007) c) Altıgen bal peteği yapısı (X. Zhang vd., 2014) d) Baklava dilimli geometriler (Cote vd., 2006) e) Metalik köpük dolgululu (Szyniszewski vd., 2012) ve e) Piramit yapılı (Liu vd., 2015) sandviç yapılar.	7
Şekil 6. İç çekirdek geometrisinin üretim adımları; (a) birinci kademe, (b) ikinci kademe ve (c) son boya kesme.	12
Şekil 7. Dış kabuk geometrisinin üretim adımları; (a) birinci kademe, (b) ikinci kademe ve (c) son boya kesme.	12
Şekil 8. Geometrilerin imalat resimleri; (a) iç çekirdek ve (b) dış kabuk.	13
Şekil 9. Derin çekme kalıpları; (a) dış kabuk ve (b) iç çekirdek.	14
Şekil 10. İç çekirdek; (a) kalıntı gerilme değerleri ve (b) ölçüm alınan noktalar.	16
Şekil 11. Dış kabuk; (a) kalıntı gerilme değerleri ve (b) ölçüm alınan noktalar.	17
Şekil 12. Derin çekme nümerik modeli (kırmızı: zimba, yeşil: kalıp, sarı: iş parçası, mavi: iş parçası tutucusu).	18
Şekil 13. (a) VARTM metodu ile kompozit üretimi ve (b) yüzey malzemeleri.....	19
Şekil 14. Core-drill ile kompozit yüzey malzemesi kesimi.	20
Şekil 15. Sandviç üretim mastarı.	20
Şekil 16. Sandviç yapıların üretim kademeleri; (a) mastara yerleştirilme, (b) merkezleme, (c) yüzey malzemesi yerleştirme ve (d) tek yüzeyli yapı.	21

Şekil 17. Sandviç yapılar; (a) iç çekirdekli, (b) dış kabuklu ve (c) balanlı (iç çekirdek ve dış kabuk birlikte).....	22
Şekil 18. Poliüretan köpük malzeme ve içi doldurulmuş numuneler.....	23
Şekil 19. (a) Statik çekme numuneleri ve (b) Hopkinson çekme numunesi.....	24
Şekil 20. Split Hopkinson çekme barı.....	25
Şekil 21. Split Hopkinson basınç barı voltaj tarihçesi.....	25
Şekil 22. Ezilme nümerik modeli.....	26
Şekil 23. Sandviç nümerik modeli.....	28
Şekil 24. Numune tutucu kalıplar (a) kapalı ve (b) açık.....	29
Şekil 25. Gaz tabancası ve çarpma haznesi.....	30
Şekil 26. Numune tutucu.....	31
Şekil 27. Hızölçerler; (a) giriş ve (b) çıkış.....	31
Şekil 28. Penetratörler; (a) küre ve (b) küp.....	32
Şekil 29. Penetrasyon testinde kullanılan sandviç numuneler.....	32
Şekil 30. Patlama dalgası basınç tarihçesi.....	33
Şekil 31. Patlama nümerik modeli basınç tarihçesi.....	35
Şekil 32. (a) Nümerik model kesit görüntüsü ve (b) efektif plastik şekil değiştirme dağılımı.....	36
Şekil 33. Birinci kademe derin çekme sırasında farklı numune yükseklikleri için iç çekirdek kalınlık dağılımı tarihçesi.....	37
Şekil 34. İkinci kademe derin çekme sırasında farklı numune yükseklikleri için iç çekirdek kalınlık dağılımı tarihçesi.....	38
Şekil 35. Birinci kademe derin çekme sırasında farklı numune yükseklikleri için dış kabuk kalınlık dağılımı tarihçesi.....	39
Şekil 36. İkinci kademe derin çekme sırasında farklı numune yükseklikleri için dış kabuk kalınlık dağılımı tarihçesi.....	40
Şekil 37. İç çekirdek kalınlık dağılımı.....	41
Şekil 38. Dış kabuk kalınlık dağılımı.....	41
Şekil 39. Gerçek gerilme-gerçek plastik şekil değiştirme eğrileri.....	42
Şekil 40. Dinamik gerilme-şekil değiştirme eğrisi ve test görüntüleri.....	43
Şekil 41. Dinamik gerçek gerilme-gerçek plastik şekil değiştirme eğrileri.....	44

Şekil 42. Mukavemet modeli parametrelerinin bulunuşu.	45
Şekil 43. C parametresinin bulunuşu.	46
Şekil 44. Deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması.	47
Şekil 45. Statik çekme testleri sonuçları, (a) X ve Y yönü çekme ve (b) X ve Y yönü basma (Tasdemirci, 2014).	53
Şekil 46. Z yönü basma test sonuçları (Tasdemirci, 2014).	54
Şekil 47. 12 yönü kayma testi sonuçları (Tasdemirci, 2014).	55
Şekil 48. Modifiye Split Hopkinson Basınç Barı.	57
Şekil 49. Köpük için statik ve dinamik gerilme şekil değiştirme eğrileri.	57
Şekil 50. Poliüretan köpük dinamik deformasyon tarihçesi.	58
Şekil 51. İç çekirdek statik ezilme test sonuçları; (a) $10^{-3} s^{-1}$, (b) $10^{-2} s^{-1}$, (c) $10^{-1} s^{-1}$ ve (d) şekil değiştirme hızına bağlı değişim.	61
Şekil 52. İç çekirdek deformasyon tarihçesi.	63
Şekil 53. Dış kabuk statik ezilme test sonuçları; (a) $10^{-3} s^{-1}$, (b) $10^{-2} s^{-1}$, (c) $10^{-1} s^{-1}$ ve (d) şekil değiştirme hızına bağlı değişim.	65
Şekil 54. Dış kabuk deformasyon tarihçesi.	67
Şekil 55. Balan statik ezilme test sonuçları; (a) $10^{-3} s^{-1}$, (b) $10^{-2} s^{-1}$, (c) $10^{-1} s^{-1}$ ve (d) şekil değiştirme hızına bağlı değişim.	69
Şekil 56. Balan deformasyon tarihçesi.	71
Şekil 57. (a) İç çekirdek dinamik ezilme davranışı ve (b) şekil değiştirme hızı etkisi.	72
Şekil 58. İç çekirdek dinamik ezilme tarihçesi.	74
Şekil 59. (a) Dış kabuk dinamik ezilme davranışı ve (b) şekil değiştirme hızı etkisi.	75
Şekil 60. Dış kabuk dinamik ezilme tarihçesi.	77
Şekil 61. (a) Balan dinamik ezilme davranışı ve (b) şekil değiştirme hızı etkisi.	78
Şekil 62. Balan dinamik ezilme tarihçesi.	80
Şekil 63. İç çekirdek ve dış kabuk arasındaki etkileşimden kaynaklı kuvvet artışı; (a) statik ve (b) dinamik.	82
Şekil 64. Köpük ile çekirdek arasındaki etkileşimden kaynaklı kuvvet artışı; (a) statik ve (b) dinamik.	83
Şekil 65. Dış kabuk – iç çekirdek ara yüzey basıncı tarihçesi; (a) statik ve (b) dinamik.	84

Şekil 66. Dış kabuk ve iç çekirdek yapılarının enerji emme oranları dağılımı.	85
Şekil 67. Düşen ağırlık testi sırasında sıcaklıktaki artış; (a) iç çekirdek, (b) dış kabuk ve (c) balan.	86
Şekil 68. Farklı çarpma hızları için sıcaklık artışındaki değişim.	87
Şekil 69. Farklı çarpma hızlarında kuvvet-deformasyon eğrileri; (a) iç çekirdek , (b) dış kabuk ve (c) balan.	89
Şekil 70. Farklı çarpma hızlarında balandaki dış kabuk ve iç çekirdek yapının enerji paylaşma yüzdeleri; (a) 10 m/s, (b) 20 m/s, (c) 50 m/s ve (d) 100 m/s.	91
Şekil 71. Köpük ihtiva eden balan nümerik modeli; (a) tam ve (b) kesit.	92
Şekil 72. Köpük ihtiva eden numunelerin statik ezilme davranışı; (a) iç çekirdek ve (b) balan.	93
Şekil 73. Deneysel ve nümerik ezilmiş numuneler (statik); (a) iç çekirdek ve (b) balan.	94
Şekil 74. Statik ezilme davranışı; (a) iç çekirdek ve (b) balan.	95
Şekil 75. Dinamik ezilme davranışı; (a) iç çekirdek ve (b) balan.	96
Şekil 76. Köpük ihtiva eden numunelerin dinamik ezilme davranışı; (a) iç çekirdek ve (b) balan.	97
Şekil 77. Deneysel ve nümerik ezilmiş numuneler (dinamik); (a) iç çekirdek ve (b) balan.	98
Şekil 78. Sandviç yapıların statik ezilme davranışları; (a) iç çekirdek, (b) dış kabuk ve (c) balan.	100
Şekil 79. İç çekirdek ve dış kabuk etkileşimi.	101
Şekil 80. Sandviç yapı ve tekli numune ezilme karakteristikleri; (a) iç çekirdek, (b) dış kabuk ve (c) balan.	103
Şekil 81. Yüzey malzemesinin ezilme davranışına etkisi; (a) iç çekirdek, (b) dış kabuk ve (c) balan.	105
Şekil 82. Sandviç yapının statik deformasyon tarihçesi (iç çekirdek).	107
Şekil 83. Sandviç yapının statik deformasyon tarihçesi (dış kabuk).	109
Şekil 84. Sandviç yapının statik deformasyon tarihçesi (balan).	111
Şekil 85. Sandviç yapının statik nümerik deformasyon tarihçesi (iç çekirdek).	113
Şekil 86. Sandviç yapının statik nümerik deformasyon tarihçesi (dış kabuk).	115
Şekil 87. Sandviç yapının statik nümerik deformasyon tarihçesi (balan).	118

Şekil 88. Deneysel ve nümerik(statik) ezilmiş sandviç yapılar; (a) iç çekirdek, (b) dış kabuk ve (c) balan.	119
Şekil 89. İç çekirdek sandviç yapının dinamik deformasyon tarihçesi.	121
Şekil 90. Dış kabuk sandviç yapının dinamik deformasyon tarihçesi.....	123
Şekil 91. Balan sandviç yapının dinamik deformasyon tarihçesi.	125
Şekil 92. Deneysel ve nümerik(dinamik) ezilmiş sandviç yapılar; (a) iç çekirdek, (b) dış kabuk ve (c) balan.	126
Şekil 93. Balan sandviç yapının farklı sabit hızlardaki ezilme davranışı; (a) 50 m/s, (b) 100 m/s ve (c) 150 m/s.....	129
Şekil 94. Deforme olmuş balan sandviç yapılar; (a) düz ve (b) çapraz.....	130
Şekil 95. Balan sandviç yapının enerji-deformasyon eğrileri.	130
Şekil 96. Nümerik deforme olmuş balan sandviç yapılar; düz; (a) 50 m/s, (b) 100 m/s ve (c) 150 m/s; çapraz; (d) 50 m/s, (e) 100 m/s ve (f) 150 m/s.....	131
Şekil 97. İç çekirdek sandviç yapının; (a) DBDD sonucu ve (b) ezilmiş numune.	133
Şekil 98. Dış kabuk sandviç yapının; (a) DBDD sonucu ve (b) ezilmiş numune.	134
Şekil 99. Balan sandviç yapının; (a) DBDD sonucu ve (b) ezilmiş numune.....	135
Şekil 100. Farklı çarpma hızlarında deforme olmuş plakalar.....	136
Şekil 101. Farklı çarpma hızları için kuvvet tarihçeleri.	137
Şekil 102. Deforme olmuş plakalar; (a) DBDD-patlama modeli ve (b) DBDD modeli-DBDD deneyi.	138
Şekil 103. Deformasyon profilleri.	139
Şekil 104. Penetrasyon testi hızlı kamera görüntüleri (küre penetratör, 180 m/s).....	140
Şekil 105. Penetrasyon testi hızlı kamera görüntüleri (küp penetratör, 235 m/s).....	140
Şekil 106. Penetrasyon test sonucu (küre penetratör, 150 m/s).....	141
Şekil 107. Penetrasyon test sonucu (küre penetratör, 180 m/s).....	142
Şekil 108. Penetrasyon test sonucu (küp penetratör, 120 m/s).....	143
Şekil 109. Penetrasyon test sonucu (küp penetratör, 125 m/s).....	144
Şekil 110. Penetrasyon test sonucu (küp penetratör, 150 m/s).....	145
Şekil 111. Penetrasyon test sonucu (küp penetratör, 180 m/s).....	146
Şekil 112. Penetrasyon test sonucu (küp penetratör, 235 m/s).....	147

Şekil 113. Penetrasyon testi nümerik modeli.	148
Şekil 114. Ön yüzey plakasında meydana gelen delaminasyon hasarı (küre penetratör, 180 m/s).....	149
Şekil 115. Patlama nümerik modelleri; (a) düz ve (b) ters.....	150
Şekil 116. Deforme olmuş sandviç yapılar; (a) düz ve (b) ters.	152
Şekil 117. Sandviç yapıların; (a) hız-zaman, (b) deformasyon-zaman ve (c) kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....	154
Şekil 118. Enerji-deformasyon eğrileri.	154
Şekil 119. Deforme olmuş sandviç yapılarda meydana gelen sıcaklık artışı; (a) düz ve (b) ters.....	156
Şekil 120. Farklı mesafelerden 5 kg patlayıcıya maruz bırakılan sandviç yapılar.....	157
Şekil 121. Sandviç yapıların ön yüzey plakası maksimum hız değerleri.....	157
Şekil 122. 400 mm mesafeden farklı miktarlarda patlayıcıya maruz bırakılan sandviç yapılar.	158
Şekil 123. Sandviç yapıların ön yüzey plakası maksimum hız değerleri.....	158
Şekil 124. Sandviç yapıların maksimum kuvvet değerleri.	159
Şekil 125. Sandviç yapıların ön yüzey plakası maksimum hız değerleri.....	160
Şekil 126. Sandviç yapının SAE değerleri.....	160
Şekil 127. Balan yapının deformasyon görüntüleri; (a) düz ve (b) ters.	161
Şekil 128. Sandviçlerin deforme olmamış halleri ; (a) Düz, (b) ters, (c) ters-düz ve (d) bir sıra ters bir sıra düz.....	163
Şekil 129. Sandviçlerin son deforme olmuş halleri ; (a) Düz, (b) ters, (c) ters-düz ve (d) bir sıra ters bir sıra düz.....	165

Özet

Proje kapsamında bir deniz kabuklusu olan balandan ilham alınarak geliştirilmiş bir yapının enerji emme karakteristikleri incelenmiştir. Bu amaçla öncelikli olarak biyobenzetim sistemin tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen yapının konvansiyonel enerji yutucu geometrilere göre aynı ağırlık seviyelerinde çok daha üstün enerji emme kabiliyetine sahip olduğu tespit edilmiştir. Yapıların üretimi için derin çekme metodu tercih edilmiştir. Bu metot hem seri üretime oldukça uygundur hem de üretilen malzemelerin artık gerilme ve şekil değiştirme ihtiva etmelerinden dolayı mekanik özellikleri daha yüksek seviyelerde elde edilmektedir. Balan yapısı iki bileşenden oluşmaktadır, bunlar iç çekirdek ve dış kabuktur. Deformasyon sırasında bu iki bileşen arasında etkileşim meydana gelmekte ve yapının toplam enerji emme ve yük taşıma kapasitesi artmaktadır. Statik hızlarda bu artış % 50 seviyelerinde iken dinamik hızlarda bu artış % 150 seviyelerine ulaşmaktadır. Geliştirilen sandviç yapının statik ve dinamik ezilme karakteristikleri de incelenmiştir. Ayrıca bu yapılara nümerik olarak patlama yükleri etkilerine maruz bırakılmışlardır. Bu çalışma sırasında balan yapıların diziliminin davranışa olan etkisi de incelenmiştir. Seçilmiş alternatif konfigürasyonlar (tamamı düz, tamamı ters, bir ters bir düz ve bir sıra ters bir sıra düz) arasından düz olarak dizilmiş sandviç yapının en yüksek tepe kuvvetine sahip olduğu en düşük tepe noktası kuvvetinin ise bir ters bir düz yapıda elde edildiği gösterilmiştir. Geliştirilen sandviç yapı 5 kg TNT patlayıcı yüküne 350 mm mesafeden koruma sağlamayı başarmıştır.

Abstract

Within the scope of current project, the energy absorption characteristics of a sea shell, balanus, inspired structure was investigated. For this purpose, the design and manufacturing of the biomimetic structure was done. The developed structure presented far superior energy absorption capability over the conventional energy absorption geometries at the similar values of weight. Deep drawing process was selected for the production of the structures. This method is not only suitable for mass production but also higher levels of mechanical properties are observed in the structures manufactured due to the intrinsic residual stress and strain. Balanus structure consists of two components, which are inner core and outer shell. During the course of deformation, an interaction occurred between those two components resulting increases in the total energy absorbed and load carrying capability. As for the quasi static rates the level of increase was around 50 %, while for the dynamic rates around 150 %. The static and dynamic crushing characteristics were also investigated. In addition, the developed structures were exposed to blast type of loading. The effect of balanus-placement in the structure was also discussed. Among the chosen configurations (all front, all back, one-front / one-back and front-row / back row), it was shown that the lowest peak force was observed in the all-front configuration and the highest was in the one-front / one-back configuration. The developed sandwich structure was able to resist against a blast load of 5 kg TNT / 350 mm stand-off distance.

1. GİRİŞ

Bu proje kapsamında biyobenzetim tabanlı enerji yutucu bir zırh sisteminin tasarımı ve üretimi hedeflenmiştir. Biyobenzetimin esas alındığı geometri bir deniz kabuklusu olan balana aittir ve bu geometri dış kabuk ile iç çekirdek yapıdan oluşmaktadır. Üstün enerji emme özelliklerine sahip bu geometrik yapı metalik malzemedan derin çekme yöntemiyle üretilmiştir.

Öncelikli olarak bahsi geçen yapının statik ve dinamik mekanik karakterizasyonu yapılması ve uygun malzeme modellerinin seçimi ve yine bu malzeme modellerine ait sabitlerin tespiti hedeflenmiştir. Bu hedeflerin başarılmasından sonra enerji yutucu yapının düşük ve yüksek deformasyon hızlarında enerji emme karakteristikleri deneysel ve nümerik olarak incelenmesi projenin önemli bir odak noktasıdır. Geliştirilen yapının enerji emme kapasitesini arttırmak amacıyla iç çekirdek içerisine de destekleme amaçlı polimerik köpük doldurulması ve ezilme davranışının incelenmesi ayrıca amaçlanmıştır. Bu sayede ezilerek katlanma sırasında meydana gelen katlar ile takviye elemanları arasında etkileşim (interaction) sağlanacak ve enerji emme kapasitesi arttırmak stratejik olarak hedeflenmiştir.

Tamamen yerli imkânlar kullanılarak üretilen biyobenzetim tabanlı bu yapının özellikle savunma sektöründeki patlama yüklerine karşı koruma yapılarına entegrasyonu ve taşıtlarda ezilme kutusu tasarımlarında kullanabilme potansiyeli oldukça yüksektir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

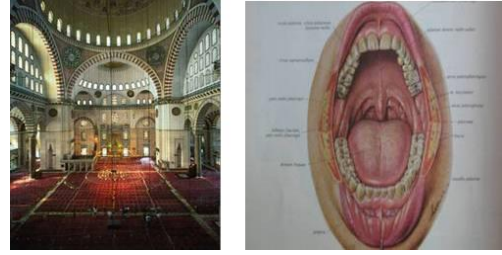
Doğadaki canlılar optimum tasarıma sahiptirler ve bu tasarımları sayesinde yaşamlarını sürdürmektedirler. Biyobenzetim, doğada bulunan canlı sistemlerin mikro veya makro boyutlarda incelenmesiyle elde edilen bilgilerin benzetim yolu ile kompleks mühendislik problemlerinin çözülmesini hedeflemektedir. Biyobenzetim teknolojiler, canlıların tasarımlarından yararlanarak, biyolojik bilimler sayesinde elde edilen fikirlerin mühendislik uygulamalarına entegre edilmesidir (Bar-Cohen, 2006). Doğal dünyadan alınan bu bilgiler birbirlerinden oldukça farklı disiplinler olan malzeme teknolojilerinden, mimari uygulamalara, bilgisayar bilimlerinden, robotik bilimlerine kadar uzanan geniş bir yelpaze içerisinde günümüzdeki yeni araştırma ve tasarımlara yol göstermektedir (Lepora vd., 2013). Biyobenzetim kavramı terim olarak 1950'li yıllarda ilk olarak Otto Schmitt tarafından kullanılmasına (Lepora vd., 2013) ve son yıllarda gittikçe önem kazanmasına rağmen bundan yıllar hatta yüzyıllar önce dahi insanoğlunun başvurduğu bir tasarım metodudur. 1500'lü yıllarda Leonardo Da Vinci uçan makinesinin tasarımını yaparken kuşları incelemiştir, aynı şekilde Wright kardeşler de ilk uçağı tasarlarlarken kuşların ve böceklerin kanat yapılarını taklit etmişler ve başarıya ulaşmışlardır. Kuşkusuz ki doğa, insanoğluna rehberlik edebilecek kadar eski ve bir o kadar da geniş bir tecrübe sahibidir. Bu kapsam doğrultusunda özellikle son yıllarda birçok mühendislik ve mimari uygulamalarında biyobenzetim esaslı izlere rastlamak mümkündür (Chen vd., 2012; French ve Ahmed, 2010). Termit adı verilen akkarıncaların yuvaları taklit edilerek inşa edilen Zimbabwedeki Eastgate Center binası tropikal ikliminin hüküm sürdüğü bir bölgede olmasına rağmen, iklimlendirici herhangi bir sisteme sahip olmaksızın soğutulabilmektedir (French ve Ahmed, 2010). Yine Japonya'da bulunan Shinkansen-500 treninin yalıçapkını kuşu örnek alınarak yapılan tasarımı ile trenin yarattığı ses problemi çözülmüş hem de %15 daha az elektrik tüketmesi biyobenzetim çalışmalarıyla sağlanmıştır (Chen vd., 2012). Mimar Sinan'ın ustalık eserim dediği Süleymaniye Camii'nin mükemmel akustik yapısının insanın damak yapısına benzerliğinden dolayı etkilendiğine dair bulgularda bulunmaktadır (Güvenir, 2006).



(a)



(b)



(c)

Şekil 1. (a) Termitlerden esinlenilen Zimbabwedeki Eastgate Center (Kaynak: www.inhabitat.com), (b) Shinkansen-500 treni ve yalıçapkını kuşu (Kaynak: www.plexusinstitute.org) ve (c) Mimar Sinan'ın Süleymaniye Cami – İnsan damağının benzerliği (Güvenir, 2006).

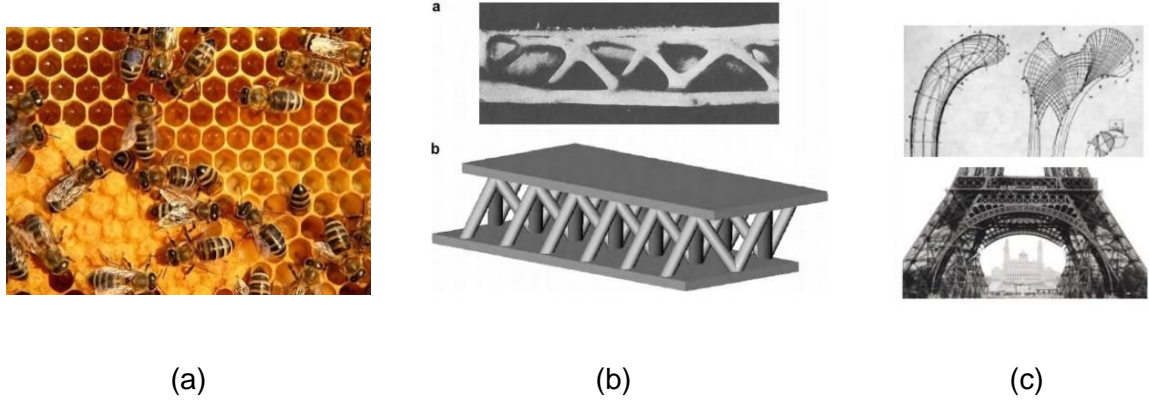
Biyobenzetim araştırmalarının yaygın olarak yürütüldüğü alanlardan en önemlilerinden birisi ileri malzeme teknolojileridir. Bu araştırmalardan elde edilen bilgilerin ileri malzeme teknolojilerine etkisi üç ana başlık altında toplanabilir, Bunlar: 1) Biyolojik malzemeler, 2) Doğadan ilham alınan tasarımlar, 3) Biyo-Malzemeler (canlı organizmalar ile uyumlu çalışabilen malzemeler) (Meyers vd., 2011).

Biyobenzetim tabanlı yapı denilince akla gelen ilk örneklerden birisi altıgen şekilli bal peteğidir. Bal peteği yapı oldukça hafif ve yüksek mukavemete sahiptir. Bu yapının günümüzde oldukça geniş kullanım alanı (kara/hava/deniz taşıtları, savunma sanayi vs...) bulunmaktadır.

Kuşların kemik yapılarından etkilenen tasarımlar da yine temel biyobenzetim yapılarına örnek olarak verilebilirler. Şekil 2 (a)'da görüldüğü üzere bir akbabanın kemik yapısı ile günümüzde kullanılan truss-core sandviç yapılar oldukça benzerlik göstermektedir (Meyers vd., 2008).

Paris'te bulunan ünlü Eiffel Kulesinin tasarımında da biyobenzetim mevcuttur. Şekil 2 (c)'de görüldüğü üzere kulenin tasarımı yapılırken insanların femur (uyluk) kemiğinin anatomisinden

esinlenilmiştir (Forbes, 2005). Femur kemiği, sahip olduğu karmaşık yapısı (trabecullae) sayesinde yüksek kuvvetlere dayanabilmektedir.



Şekil 2. (a) Altıgen şekilli pal peteği (Kaynak: www.inhabitat.com) (b) Akbaba ile günümüzde kullanılan truss-core yapısı (Meyers vd., 2011) ve (c) Femur kemiği ile Eiffel Kulesi (Kaynak: www.personal.strath.ac.uk).

Biyobenzetim tabanlı araştırmaların zırh ve korunma sistemlerine etkisi yoğun şekilde olmuştur. Doğadaki canlıların kendilerini dış etkenlerden korumak için geliştirdiği sistemler insanlara ilham vermiştir. Canlıların sahip olduğu kabuklu yapılar onların hem karada hem de su altında korunabilmesini sağlamaktadır. Bu canlılar içerisinde akla ilk gelen örnekler kuşkusuz ki kaplumbağalar, salyangozlar ve deniz kabuklularıdır (Bar-Cohen, 2006). Özellikle denizlerde yaşayan yumuşakçaların bazı türleri eşsiz tasarımlara sahip ve dış etkilere karşı kendilerini koruyacak şekilde tasarlanmış sert ve güçlü kabuklara sahiptirler (Raman ve Kumar, 2011).

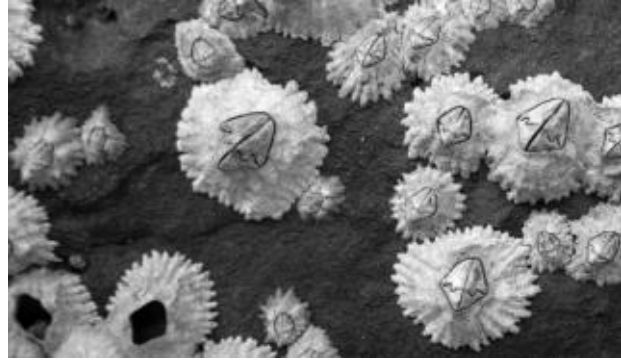
Bu bilgiler ışığında yapılan temel araştırmaları sonucunda, proje konusu olan biyobenzetim tabanlı enerji yutucu koruma sistemleri için "BALANUS" adı verilen deniz kabuklusunun tasarımından ilham alınmıştır.

Balanlar taksanomik sınıflandırmaya göre hayvanlar âleminden örümcek ve böceklerin dâhil olduğu eklem bacaklılar şubesindedir. Genellikle kayalara, başka canlıların (limpet,yengeç vb...) yüzeylerine, dubalara ve gemilerin yüzeylerine yapışık olarak yaşamaktadırlar. Dünya üzerinde farklı coğrafyalarda yaşayan farklı türleri mevcuttur ve ülkemiz sahillerinde de bazı türleri görülmektedir. Balanların yaşam döngüleri üç ana evreden meydana gelmektedir. Balanlar hermafrodit yani dişi ve erkek organa beraber sahip olan kendi kendini dölleyebilen canlılardır. Hermafrodit olmalarına rağmen genellikle kendilerine yakın olan ve üreme dönemi içerisindeki başka bir balanı dölleyerek çoğalırlar. Balanlar, döllenen sonra naupli adı

verilen larvalar olarak hayatlarına başlarlar. Bu aşamada denizde serbestçe yüzebilen planktonlardır. İlk evreden sonra, cyprid evresine geçerek gelişimlerine devam ederler. Gerekli yetişkinlik seviyesine ulaştıklarında ve ortam şartlarının yeterli olması ile üzerlerinde bulunan ayakları (cirri) sayesinde uygun bir yüzeye tutunurlar. Ardından kireç türevi bir madde salgılayarak, hareketli ve farklı katmanlardan meydana gelen dış kabuklarını meydana getirirler ve bu şekilde kendileri için korunaklı bir yapı oluşturduktan sonra erişkin balan halini alırlar. Şekil 3 (a)'da görüldüğü üzere dışını saran bu kalkerli konik yapı balanı dış etkilerden korurken, ortasında görülen kısım ise ağız görevi görmektedir. Kabuğunun hemen arkasında yer alan kaslar yardımıyla ağzını açabilen balanlar, deniz suyu içerisinde bulunan gıda partikülleri sayesinde beslenirler (Anderson, 1994; Kaynak: www.asnailsodyssey.com).



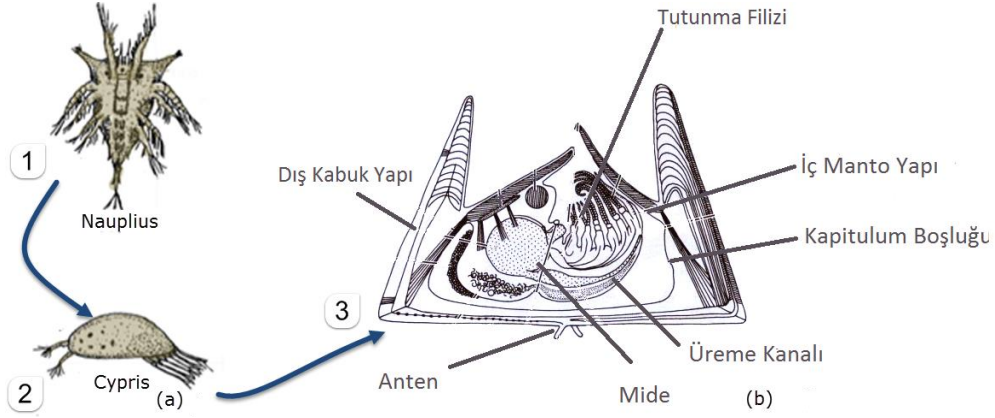
(a)



(b)

Şekil 3. (a) Balan (Kaynak: www.giovannipinto.it) ve (b) Kaya yüzeyine yapışarak yaşayan örnek balan habitatı (Tsang vd., 2012).

Balanların boyutsal ölçüleri türlerine ve yaşadıkları dış ortam koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Balanlar nispeten küçük boyutlarına rağmen yüksek darbe enerjisi içeren deniz dalgaları karşısında yapısı bozulmayan, gemilerin hızını kesebilen veya denizin derinliklerinde yaşayabilen güçlü canlılardır. Balanların geometrik formları incelendiğinde alt çaplarının 25-30 mm yüksekliklerinin ise 25-50 mm arasında değiştiği tespit edilmiştir (Anderson, 1994; H. Barnes ve Barnes, 1954; Pope, 1945).

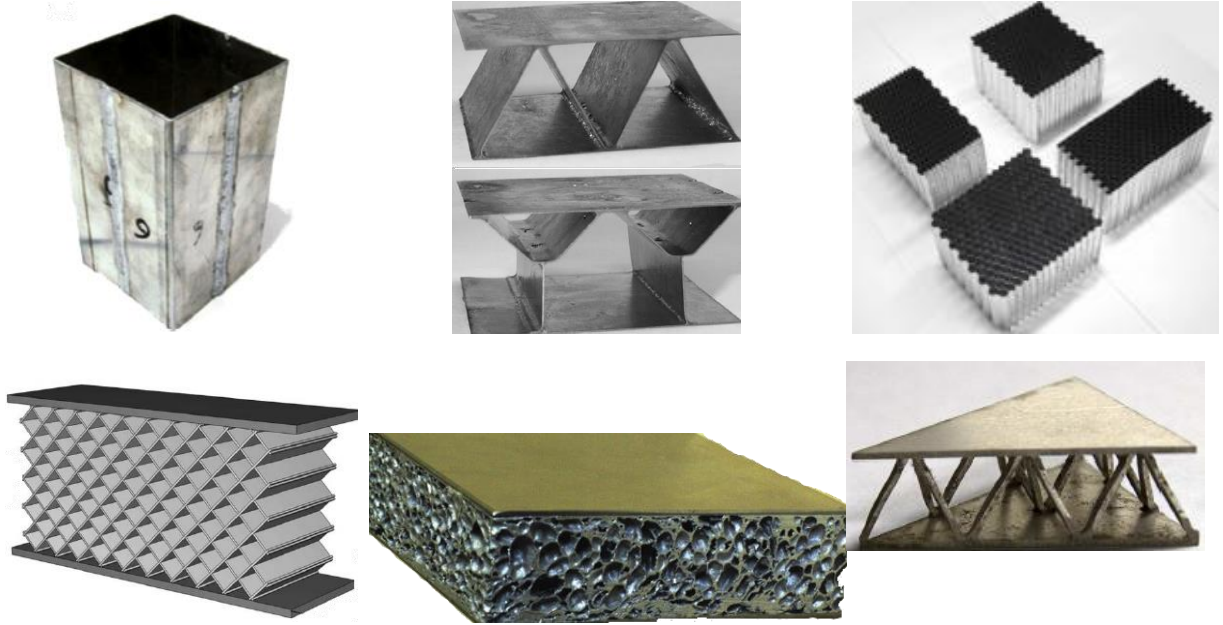


Şekil 4. (a) Balanın hayat döngüsü (Kaynak: www.asnailsodyssey.com) ve (b) anatomik yapısı (Brusca ve Brusca, 2003).

Günümüzde darbe ve patlama yüklerine karşı koruma yapılarında genellikle sandviç malzemeler kullanılmaktadır. Burada esas amaç yapının ezilerek deforme olması esnasında mümkün olduğu kadar fazla enerji emmesini sağlamaktır. Sandviç yapılarda iki yüzey malzemesi (face) arasına bir çekirdek malzeme (core) yerleştirilmektedir. Burada özellikle çekirdek malzemesi olarak farklı malzemeler ve geometrik şekiller kullanılmaktadır. Sandviç yapıların hafif ve yüksek eğilme rijiditesine sahip olmaları bu alanda yaygın olarak kullanım şansı bulmalarına sebep olmuştur. Sandviç yapılarda çok çeşitli çekirdek malzemeleri günümüze kadar olan çalışmalarda denenmiştir. Kare şekilli metalik bal petekler (Bambach vd., 2009; Nia ve Parsapour, 2013, 2014; Othman vd., 2014; Z. Y. Xue ve Hutchinson, 2004; H. Zarei ve M. Kroger, 2008; C. J. Zhang vd., 2010), altıgen şekilli metalik bal petekler (Crupi vd., 2012; Dharmasena vd., 2011; Hou vd., 2012; Hu ve Yu, 2010, 2013; Li vd., 2007; Wilbert vd., 2011), metalik köpükler (Ahmad ve Thambiratnam, 2009; A. T. Barnes vd., 2014; Guden vd., 2007; Jung vd., 2014; Szymszewski vd., 2012; Tran vd., 2014; H. R. Zarei ve M. Kroger, 2008), polimerik köpükler (Cui vd., 2009; Mamalis vd., 2009; Mantena ve Mann, 2003; Meguid vd., 2004; Othman vd., 2014; Palanivelu vd., 2010), balsa ağacı (Atas ve Sevim, 2010; Toson vd., 2014), metal piramit yapılar (Dharmasena vd., 2011; Liu vd., 2015; Wadley vd., 2008), üçgen ve baklava dilimi şeklinde oluklu yapılar (Cote vd., 2006; Radford, Fleck vd., 2006; Rejab ve Cantwell, 2013; Tilbrook vd., 2007; Yan vd., 2013), Y şekilli metal yapılar (Rubino vd., 2008, 2009; St-Pierre vd., 2015) ve I şekilli metal yapılar (Hamada vd., 1999; Rhodes ve Nash, 1998) çekirdek malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu çekirdek yapıların kullanıldığı enerji emici yapılar askeri alanlarda patlama ve balistik tehditlere karşı koruma sağlarken, sivil alanda da ezilme kutuları gibi kaza anında darbe enerjisinin emildiği pek çok

uygulamada kendilerine yer bulmaktadırlar. Bu yapıların koruma etkinliklerinin incelenmesinde deneysel ve nümerik çalışmalar literatürde mevcuttur.

Koruma amaçlı kullanılan enerji yutucu yapı örnekleri Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5. Konvansiyonel malzemeler; a) Kare şekilli bal peteği (Nia ve Parsapour, 2013) b) Üçgen oluklu ve Y-Şekilli çekirdekli (Tilbrook vd., 2007) c) Altıgen bal peteği yapısı (X. Zhang vd., 2014) d) Baklava dilimli geometriler (Cote vd., 2006) e) Metalik köpük dolgulu (Szyniszewski vd., 2012) ve e) Piramit yapıları (Liu vd., 2015) sandviç yapıları.

Nia ve Parsapour'a ait bir çalışmada hem tek hem de çoklu-hücre yapısına sahip üçgen, altıgen, sekizgen ve kare şekilli alüminyum tüplerin statik olarak ezilme davranışları incelenmiş, nümerik ve deneysel sonuçlar karşılaştırılarak enerji yutma etkinlikleri ortaya konmuştur. Elde edilen bilgiler ışığında çoklu hücre yapısına sahip yapıların daha etkin olduğu görülmüştür. İncelenen geometriler arasında ise üçgen geometrili yapının daha fazla enerji emme kapasitesine sahip olduğunu ortaya konmuştur (Nia ve Parsapour, 2014).

Düz ve çoklu hücreye sahip kare şekilli bal peteğinin enerji yutma karakteristiklerinin nümerik, analitik ve deneysel olarak incelendiği ve karşılaştırıldığı bir diğer Nia ve Parsapour çalışmasında çoklu hücreye sahip yapıların enerji yutma etkinliği düz kare şekilli yapılara göre oldukça yüksek çıkmıştır (Nia ve Parsapour, 2013). Bir önceki çalışmaya benzer olarak yapılan başka bir çalışmada ise X. Zhang ve Cheng bu kez köpük dolgulu ve çoklu hücreye sahip kare şekilli bal peteklerini incelemişlerdir (X. Zhang ve Cheng, 2007). İncelenen yapılar

farklı ezilme davranışı göstermiş ve çoklu hücre yapısına sahip kare şekilli bal peteği daha üstün performans sergilemiştir. Ayrıca ezilme başlangıcında meydana gelen tepe kuvvetin azaldığı gözlenmiştir.

Köpük dolgulu kare şekilli alüminyum tüplerin araç ezilme kutularında kullanılmasına yönelik optimizasyon çalışması yapılmıştır (H. R. Zarei ve M. Kroger, 2008). Öncelikle boş alüminyum tüpler ile köpük dolgulu tüplerin optimizasyon çalışması yapılarak etkinlikleri ortaya konulmuştur. Yapılan çalışma sonucunda köpük dolgunun tüple olan etkileşimden dolayı daha fazla enerji absorbe ettiği ve aynı enerji seviyesinde köpük dolgulu yapının %19 daha hafif olduğu gözlenmiştir.

X. Zhang'ın bir diğer çalışmasında farklı hücre konfigürasyonlarına sahip alüminyum bal peteği yapısında hücre sayısının ve hücre duvarları arasındaki açının statik ve dinamik yüklemelerde ezilme karakteristiğine olan etkileri deneysel ve nümerik olarak incelenmiş, literatürdeki örneklerin teorik çözümlenmeleri ile karşılaştırılmıştır. Açık değişiminin %10'dan daha az bir etki yarattığı görülmektedir (X. Zhang vd., 2014).

Çok köşeli kolon yapıların dinamik ezilme davranışlarının nümerik olarak incelendiği X. Zhang ve Huh çalışmasında çift kenar sayısına sahip yapıların tek olanlara kıyasla daha düzgün ezildiği görülmüştür. Çok köşeli yapılarda kenarlar arasındaki açının, ezilme karakteristiği üzerindeki etkisi oldukça yüksektir (X. Zhang ve Huh, 2010).

Hong ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada ise çok hücreli üçgen yapıların ve Kagome kafes yapısına sahip malzemelerin enerji emilim karakteristikleri analitik ve deneysel olarak incelenmiştir. Tek hücreli yapılar ile karşılaştırıldığında ortalama ezilme kuvvet tarihçesinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Çok hücreli yapıların daha küçük hücre yapılarına sahip olması ve et kalınlığının da daha ince olmasından dolayı dalga boyunun azalarak ezilme esnasında daha çok kat oluşmasını sağladığı gösterilmiştir. Bu sayede çok hücreli yapıların enerji emme verimliliği açıklanmaktadır (Hong vd., 2014).

Ezilmenin meydana geldiği yöndeki ağız kapalı alüminyum silindirin içi boş ve poliüretan köpükle beraber statik ve dinamik ezilme davranışları incelenmiştir. Ghamarian ve Tahaye'nin yapmış olduğu bu çalışmanın sonucunda, poliüretanın kuvvet ve enerji kapasitesine bir etkisinin olmadığı aksine özgül enerji emilimini düşürdüğü görülmüştür. İlk kuvvet değerinin kapalı olan geometrilere açık olan geometrilere nazaran daha düşük olduğu ortaya konmuş ve şok yüklerini emebilen yapılar olarak uygulanabilirliği ifade edilmiştir (Ghamarian ve Abadi, 2011).

Deneysel ve sayısal metodoloji kullanılarak küresel alüminyum kabuk geometrinin statik ve dinamik davranışlarının incelendiği çalışmada yapının yarıçapının kalınlığına oranı farklı

tutulurken enerji emilimi karakteristiklerine olan etkileri gözlenmiştir. Yarıçapın kalınlığa oranı düşük olduğu durumlarda deformasyonun simetrik katlanarak gerçekteştiği, aksi durumlardaysa bölgesel loblar oluşarak katlanmanın gerçekteştiği görülmüştür. Bunun yanı sıra dinamik enerji emilim kapasitesinin ve ortalama ezilme kuvvetinin statik olandan daha yüksek olduğu görülmüştür (Gupta ve Venkatesh, 2004).

Dörtüzlü kafes sandviç yapıların statik ve dinamik davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Yapılan bu çalışmanın sonucunda deformasyon hızı hassasiyeti alüminyum 3003-O malzemesi kullanılmıştır. Dinamik ve statik kuvvet-deformasyon tarihçelerinde ilk tepe noktaları arasındaki farkın mikro atalet etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Liu vd., 2015).

Üçgen oluklu ve baklava dilimli geometriye sahip çekirdek malzemelerinin kullanıldığı sandviç yapılarının dinamik olarak farklı yönlerden gelen yüklemeler karşısındaki davranışları incelenmiştir. Elde edilen verilere göre kare şekilli balpeteği ve piramit yapılı çekirdeklerin baklava dilimli çekirdeklere göre daha iyi sonuçlar vermişlerdir (Cote vd., 2006).

Yan ve çalışma arkadaşları tarafından yapılan başka bir çalışmada üçgen oluklu çekirdeğe sahip sandviç yapıların içerisine alüminyum köpük ile doldurularak enerji yutma karakteristiği incelenmiştir. Köpük dolgululu ile yanal yönlerden de desteklenerek oluşturulan hibrit yapının, tekli üçgen oluklu çekirdekten ve köpüğün tek başına olduğu durumdan daha fazla enerji emdiği görülmüştür (Yan vd., 2013).

Konvansiyonel yapılardan bir diğeri olan piramit (lattice) yapılarının statik ve dinamik davranışlarının incelendiği çalışmalar literatürde bulunmaktadır. Piramit yapıların yüklemeler altında art arda burkulmaları gerçekteştirerek kademeli bir ezilme sergilediği görülmüştür (Wadley vd., 2008). Benzer şekilde Lee ve çalışma arkadaşlarının piramit kafes geometrili çekirdek malzemesinin statik ve dinamik ezilme davranışları incelendiği bir çalışmada dinamik şartlar altında deformasyon hızına bağlı olarak ezilme karakteristiğinin değiştii görülmüştür. Bu değişimin, geometriden kaynaklı mikro atalet etkisinden olduğu belirtilmiştir (S. Lee vd., 2006).

Zhang ve arkadaşlarının bir diğer çalışmasında, poliüretan köpük ile beraber piramit kafes çekirdek sandviç malzemesinin statik ve düşük hızlarda dinamik davranışları kullanılan köpük açısından incelenmiştir. Gerçekteştirilen deneyler sonucunda köpük ihtiva eden yapıların kuvvet tarihçelerinin sadece köpük yapı ve köpük kullanılmayan yapıların kuvvet tarihçelerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Ancak yoğunluğu yüksek köpük malzemelerinin kullanıldığı bu yapılarda enerji emilim verimliliğinin kütle artışından dolayı köpük kullanılmayan yapıya nazaran daha düşük çıktığı görülmektedir. Sonuç olarak düşük

hızlı dinamik testlerde, bu tarz yapılar için köpük kullanımının etkili olmadığı tespit edilmiştir (G. Q. Zhang vd., 2014).

Paslanmaz çelikten imal edilen piramit, üçgen oluklu ve alüminyum köpük dolgulu çekirdek malzemeleri ihtiva eden sandviç yapıların şok yüklemeleri karşısındaki davranışlarının incelendiği ve Radford tarafından yürütülen bir çalışmada metal köpük fırlatılarak oluşturulan yüklemeler karşısında üçgen oluklu yapıların piramit yapılarla karşı daha iyi dayanım sergilediği gözlenmiştir (Radford vd., 2006).

Alüminyumdan imal edilen konik tüpün farklı yoğunluklarda köpükler doldurularak dinamik ezilme davranışları sayısal olarak incelenmiştir. Köpük yoğunluğunun, et kalınlığının, koniklik açısının, düşen ağırlığın ve çarpma hızının parametre olduğu çalışmada, ortalama ezilme kuvveti ve enerji emilimi, köpük yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Ayrıca et kalınlığı daha baskın olmak üzere, et kalınlığının ve koniklik açısının da bu artışa sebep olduğu görülmüştür. Köpüğün kullanıldığı tüplerin boş tüplere nazaran daha çok kat yaptığı ve kademeli ezildiği görülmüştür. Ayrıca köpüğün yoğunluğu ile dinamik ezilme karakteristiğinin [DAF] kontrol edilebilmesi mümkündür (Ahmad ve Thambiratnam, 2009).

Proje yürütücüsünün daha önceki yıllardaki bir çalışmasında (Guden vd., 2007) hibrit tüp yapıların (kompozit + Alüminyum tüp + metalik köpük) statik ezilme performanslarını incelemiştir. Doldurulan köpük malzemenin ezilme sırasında diğer yapıları sınırlandırmasından dolayı ortaya çıkan etkileşim sayesinde yapının enerji yutma karakteristiğinin değiştiği ve köpük içeren yapının farklı ezilme davranışı gösterdiği ortaya konmuştur.

Üç farklı yoğunluğa sahip polimerik köpükler, 0.8 mm cidar kalınlığına sahip boş silindirik tüplerin içlerine doldurularak nümerik olarak yavaş hızlar altında aksel olarak ezilerek incelenmiştir. Elde edilen bilgiler ışığında köpük yoğunluğunun artmasının yapının enerji emme kapasitesini artırdığı görülmüştür ayrıca yüksek yoğunluklu köpüklerin, düşük-orta yoğunluklu olanlara göre daha etkin olduğu ifade edilmiştir (Mantena ve Mann, 2003).

Polimerik ve metalik köpük dolgulu kare şekilli kompozit tüpler aksel yönde statik olarak ezilmiş ve davranışları incelenerek enerji yutma etkinlikleri incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda alüminyum köpükler enerji/ kütle ve enerji/ hacim olarak daha etkin enerji yutabildikleri görülmüştür. Ancak üretim kolaylığı ve maliyet anlamında polimerik köpük daha avantajlı olduğu ifade edilmiştir (Mamalis vd., 2009).

Bu çalışmaların yanı sıra I şekilli metal yapılarında incelendiği çalışmalarda literatürde mevcuttur (Hamada vd., 1999; Rhodes ve Nash, 1998). Kiriş yapılarının burkulma sonrası davranışları analitik ve deneysel olarak incelenmiştir (Rhodes ve Nash, 1998). Benzer

yapının incelendiği bir çalışmada ise kompozitten üretilen I Şekli kirişlerinin ezilme davranışları incelenerek etkinlikleri ortaya konmuştur (Hamada vd., 1999).

Y Şekli çekirdeklerin de koruma amaçlı geliştirilen sandviç yapılar da kullanıldığı çalışmalar literatürde mevcuttur (Rubino vd., 2008, 2009; St-Pierre vd., 2015). Metalik köpüklerin sandviç yapılar a fırlatılması ile oluşturulan Şok yüklerinin etki ettiği çalışmada sandviç yapının davranışı eş değer ağırlıktaki üçgen oluklu yapı ve tek katmanlı yapılar la karşılaştırılmıştır (Rubino vd., 2009). Aynı yükleme Şartları altında üçgen oluklu yapılar daha iyi performans sergilemişlerdir.

Bütün bu çalışmalar incelendiğinde üstün özellikli enerji yutucu bir koruma sisteminden yüksek enerji emme kapasitesi ve yüksek penetrasyon direncinin beklendiği görülmektedir.

Proje kapsamında geliştirilen yapının emsalleriyle kıyaslandığında ulaşılması istenen hedefleri aşağıda sunulmuştur.

- a) Aynı ağırlık seviyelerinde oldukça yüksek enerji emme kapasitesi
- b) Darbe yükünün korunan yapıya geciktirilerek iletimi ve yk Őiddetinin azaltılabilmesi
- c) Yüksek penetrasyon direnci ve çarpan cismin rotasını saptırma kabiliyeti
- d) Farklı yükleme yönlerinde yüksek yük taşıma kapasitesi
- e) Yerli imalata uygunluk ve düşük üretim masrafları
- f) oklu dizilebilme imknı ve boyutsal sınırın olmayışı
- g) İten sınırlandırma imknının olması (constraining effect)
- h) Farklı yüzey konturlarını izleyebilecek Şekilde dizilim imknı

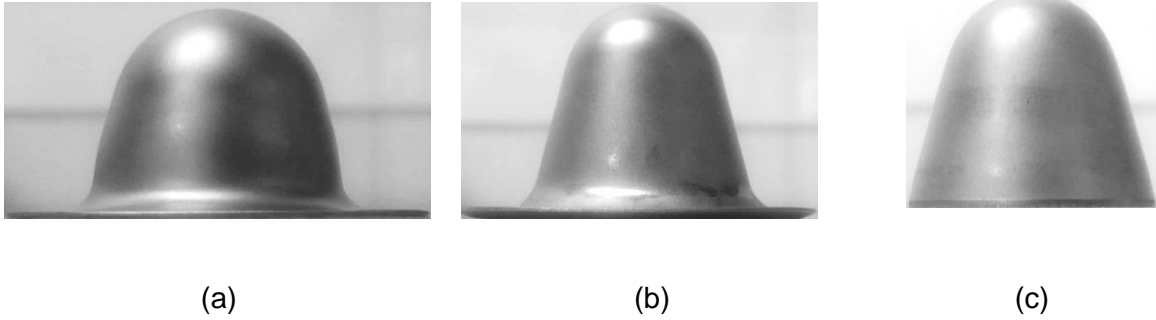
3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1 Çekirdek Malzemelerin Üretimi ve Üretim Nümerik Modeli

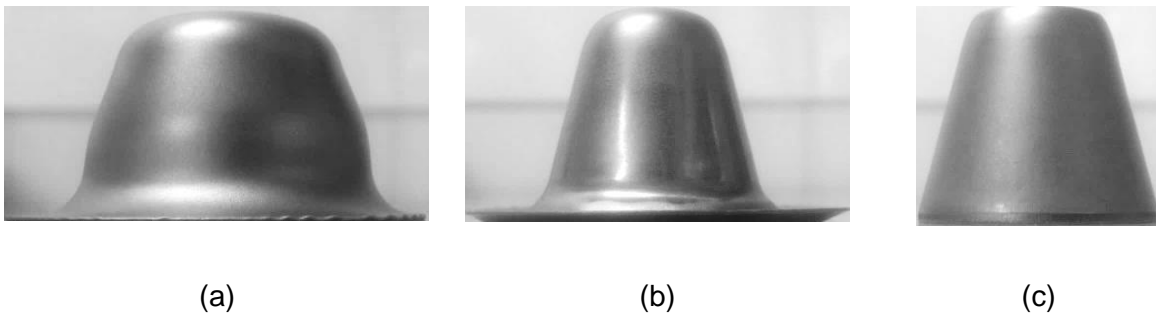
Proje kapsamında öncelikli olarak biyobenzetim esaslı enerji yutucu yapının malzemesi temin edilmiştir. Daha sonra dış kabuk ve iç çekirdekten oluşan bu yapı 0.5 mm kalınlıktaki AISI 304L paslanmaz çelik sac malzemedan derin çekme yöntemiyle imal edilmiştir.

Üretim, üç kademe tamamlanmıştır. Bunlar; birinci kademe derin çekme, ikinci kademe derin çekme ve son boya getirmedir. Yapının etek bölgesinde üretim yönteminin doğası gereği homojen olmayan uzama meydana gelmektedir. Her iki yapının alt kısımlarının boyu kalıpta kesim işlemi ile kısaltılmıştır. Kalıpta kesim işlemi dış kabuk geometrisin üst bölgesi için de ayrıca gerçekleştirilmiştir.

Şekil 6 ve Şekil 7'de üretimi tamamlanmış olan iç çekirdek ve dış kabuk yapılarına ait görüntüler verilmiştir.

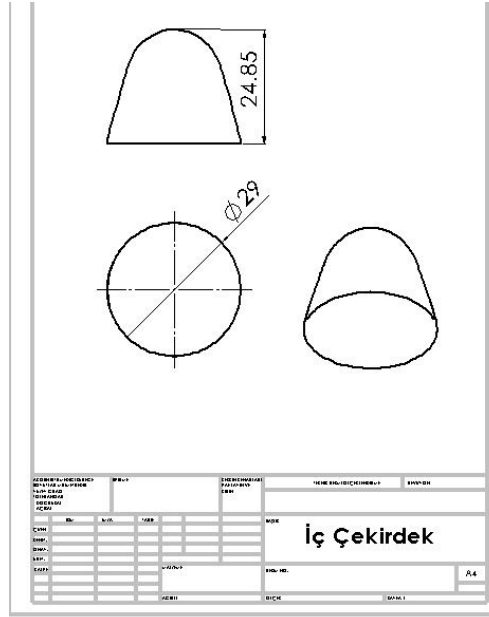


Şekil 6. İç çekirdek geometrisinin üretim adımları; (a) birinci kademe, (b) ikinci kademe ve (c) son boya kesme.

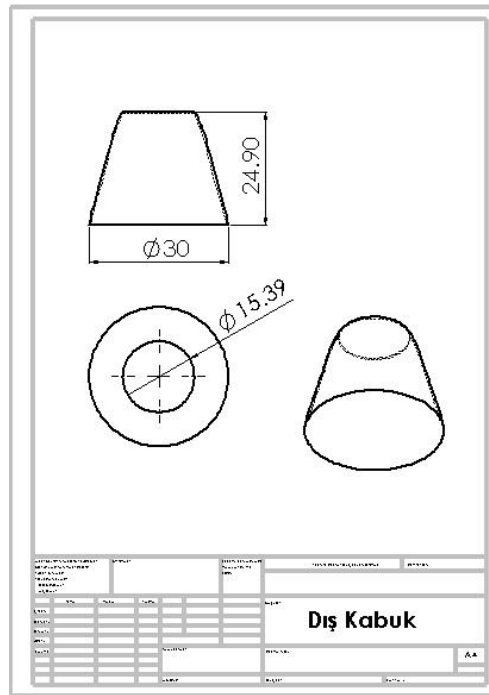


Şekil 7. Dış kabuk geometrisinin üretim adımları; (a) birinci kademe, (b) ikinci kademe ve (c) son boya kesme.

Üretimi yapılacak olan geometrilerin imalat resimleri Şekil 8’de verilmiştir.



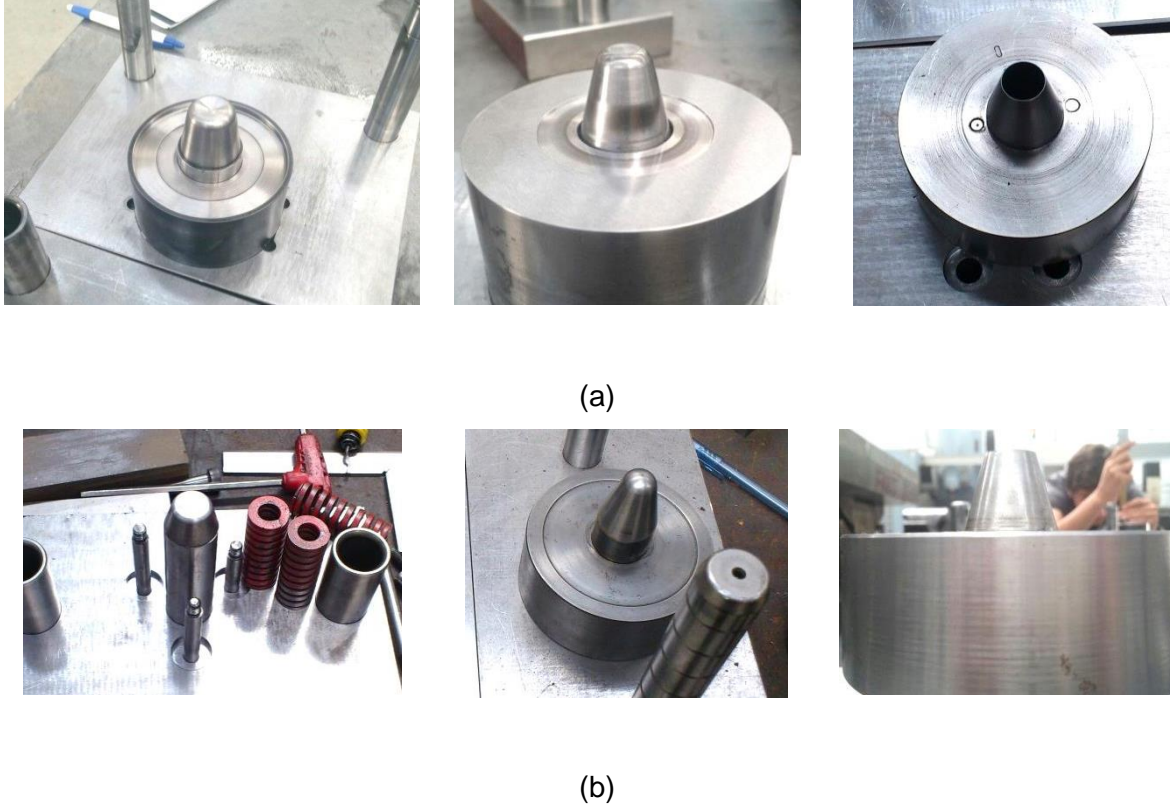
(a)



(b)

Şekil 8. Geometrilerin imalat resimleri; (a) iç çekirdek ve (b) dış kabuk.

Üretim için kullanılan kalıpların görüntüleri Şekil 9'da verilmiştir.

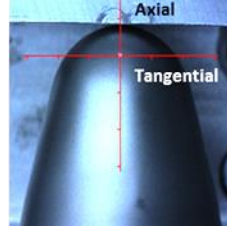


Şekil 9. Derin çekme kalıpları; (a) dış kabuk ve (b) iç çekirdek.

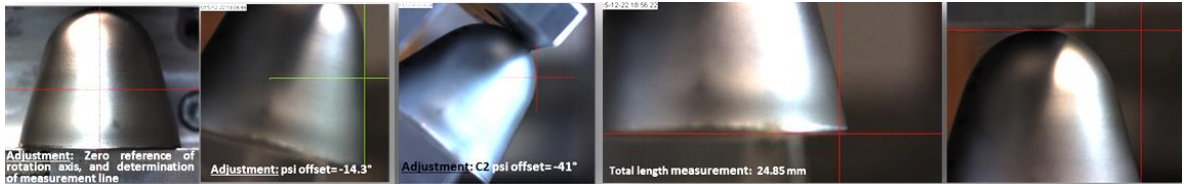
Seçilen üretim yöntemi seri imalat için son derece uygundur. Projede elde edilecek bilgiler doğrultusunda proje sonuçlarının ticari ürüne dönüşmesi durumunda çok sayıda üretim rahatlıkla gerçekleştirilebilecektir. Seçilen üretim yöntemi üretilen numune içerisinde artık gerilme ve şekil değiştirmelerin bulunmasına sebebiyet vermektedir. Kalıcı plastik deformasyon sonucunda malzemelerin mukavemet seviyelerinde artış meydana gelmektedir. Kırılma şekil değiştirme değerinin şekil değiştirme hızına bağlı değişiminden faydalanılarak bazı kilit noktalarda kırılmanın başlangıcı teşvik edilerek bu yapıların enerji emme potansiyelleri ve korudukları yapılara ilettikleri kuvveti azaltabilme imkânları proje kapsamında incelenmiştir. Kısaca çok yüksek imalat teknolojisi gerektirmeyen nispeten ucuz ve çok sayıda üretime son derece uygun olan bu yöntemle projenin ticari uygulanabilme potansiyeli arttırılmıştır. Yukarıda bahsi geçen numune bünyesindeki artık gerilme ve şekil değiştirmelerin incelenebilmesi amacıyla hem dış kabuk hem de iç çekirdek malzemenin artık gerilme analizleri Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezinde yapılmıştır. Şekil 10 ve Şekil 11'de numuneler üzerinden alınan ölçüm sonuçları ve ilgili

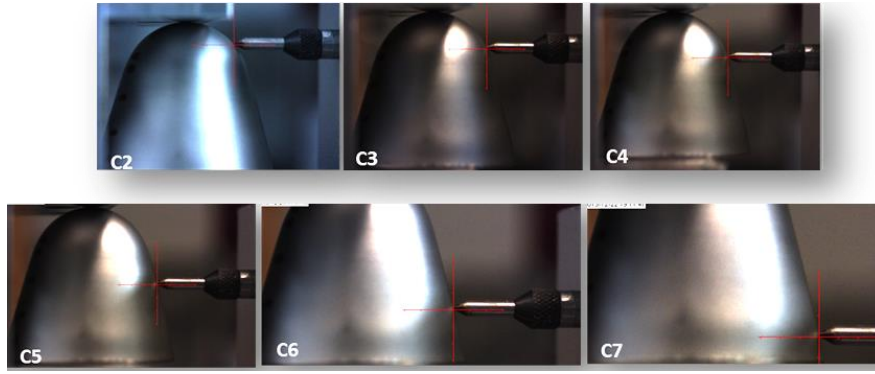
noktalar belirtilmiştir. İç çekirdek ve dış kabuğa ait sonuçlar incelendiğinde özellikle normal yöndeki gerilme bileşeninin yüksek seviyelerde olduğu ve numune üzerinde ilerledikçe işaret değiştirdiği, özellikle kesimlerin gerçekleştiği bölgelerde gerilme seviyelerinin oldukça arttığı tespit edilmiştir. Yine dış kabuk malzeme için teğetsel yöndeki gerilme değerinin numunenin üst yüzeyinde maksimum değerler alıp numunenin alt kısımlarına ilerledikçe azaldığı ve işaret değiştirdiği tespit edilmiştir.

Tepe noktasından uzaklık (mm)	Nokta kodu	Eksenel yöndeki kalıntı gerilme (MPa)				Teğetsel yöndeki kalıntı gerilme (MPa)			
		σ (MPa)	\pm (MPa)	τ (MPa)	\pm (MPa)	σ (MPa)	\pm (MPa)	τ (MPa)	\pm (MPa)
2.5	C2	33.2	11.6	NA	NA	50.4	11.2	-9.4	2
6	C3	17.5	16	11.7	2.9	-208.8	8.7	9.8	1.6
8	C4	-127.3	43.7	4.6	7.8	-182.9	20.3	9.1	3.7
12.5	C5	135.8	24.6	-11.6	4.3	-200.9	16.1	-2	2.9
18	C6	0.1	14	7.4	2.5	-73.3	14.7	1.1	2.7
22	C7	600.7	58.6	-25.3	12.1	-89.8	15.6	-1.3	2.8



(a)

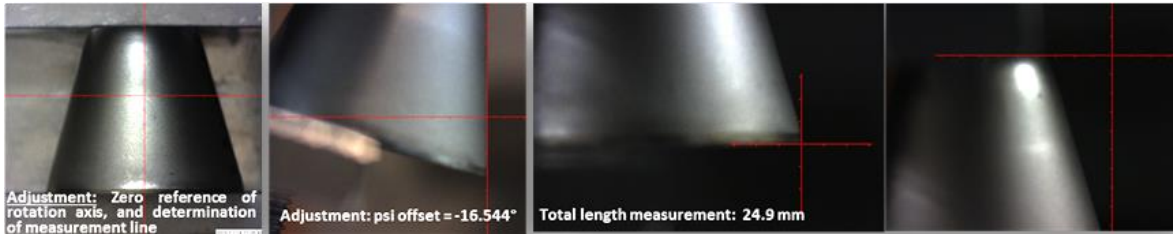




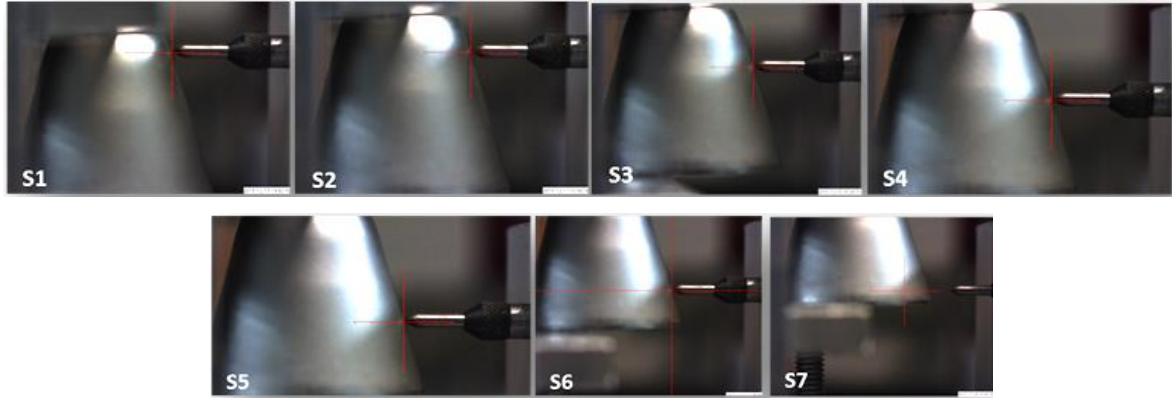
(b)

Şekil 10. İç çekirdek; (a) kalıntı gerilme değerleri ve (b) ölçüm alınan noktalar.

Tepe noktasından uzaklık (mm)	Nokta kodu	Eksenel yöndeki kalıntı gerilme (MPa)				Teğetsel yöndeki kalıntı gerilme(MPa)			
		σ (MPa)	\pm (MPa)	τ (MPa)	\pm (MPa)	σ (MPa)	\pm (MPa)	τ (MPa)	\pm (MPa)
2.5	S1	191.3	28	-30.6	5	-417.4	17.3	-24.3	3.1
5	S2	-210.8	21.4	-22.7	3.9	-430.2	18	28.5	3.3
9	S3	-210.6	28.6	-31.7	5.2	-151.8	11.4	14.7	2.1
12	S4	-22.3	7.5	-18.5	1.3	-20.4	11.5	10.7	2.1
15	S5	-24.4	8	-11.4	1.5	-1.5	9.3	10.1	1.7
18	S6	-26	7.2	-4.5	1.3	47.3	9.7	11.7	1.8
22	S7	-173.9	19.8	-22.3	3.6	38.7	20.4	7.3	3.7



(a)



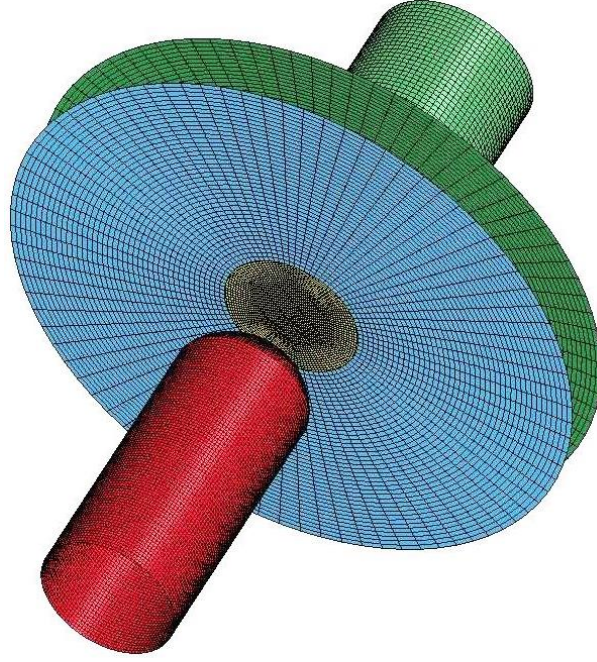
(b)

Şekil 11. Dış kabuk; (a) kalıntı gerilme değerleri ve (b) ölçüm alınan noktalar.

Derin çekme esnasında numune kesiti boyunca kalınlık ve gerilme/şekil değiştirme değerlerinde değişimlerinin meydana geleceği aşıkardır ve bu durum malzemenin mekanik davranışı üzerinde doğrudan etki edecektir. Bu sebeple iç çekirdek ve dış kabuk yapılarının nominal kalınlık (numunenin her noktası 0.5 mm kalınlıkta kabul edildiği durum) ve artık gerilme/şekil değiştirmesiz olarak kabul edilerek yapılacak olan analizler doğru sonuçlar vermeyecektir. Bu durumun önüne geçmek için nümerik modelleme çalışmalarında üretim aşamasının ilk adımı olan derin çekme de doğrudan modellenmiş ve işlem sonucunda elde edilen nümerik numune bir sonraki ezilme modeli için giriş bilgisi olarak tanımlanmıştır. Böylelikle hem kalınlık değişimi hem de artık gerilme/şekil değiştirmeler ezilme problemine başlangıç değerleri olarak alınmıştır.

Proje kapsamındaki nümerik modelleme çalışmalarında LS-DYNA yazılımı kullanılmıştır. Nümerik modelleme çalışmalarının ilk aşaması olarak iç çekirdek ve dış kabuk geometrilerinin derin çekme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen geometriler statik ve dinamik testlerin simülasyonlarında kullanılmıştır. Derin çekme ve statik ezilme simülasyonlarında kütle ölçekleme (mass scaling) metodu kullanılarak çözüm zamanları makul değerler seviyelerinde tutulmuştur. Bu yöntemde numune malzemesinin yoğunluğu 1000 kat azaltılırken, simülasyonun yükleme hızı 100 kat artırılmaktadır. Simülasyon süresince kinetik enerji değişimi takip edilmiş olup değerinin, toplam iç enerjinin %10'undan daha az değerlerde kalıp kalmadığı kontrol edilmiştir. Toplam iç enerji / kinetik enerji oranının düşük seviyelerde tutulması simülasyonun statik deformasyon karakteristiklerini verip veremeyeceğinin tespiti açısından kullanılan bir referans parametredir.

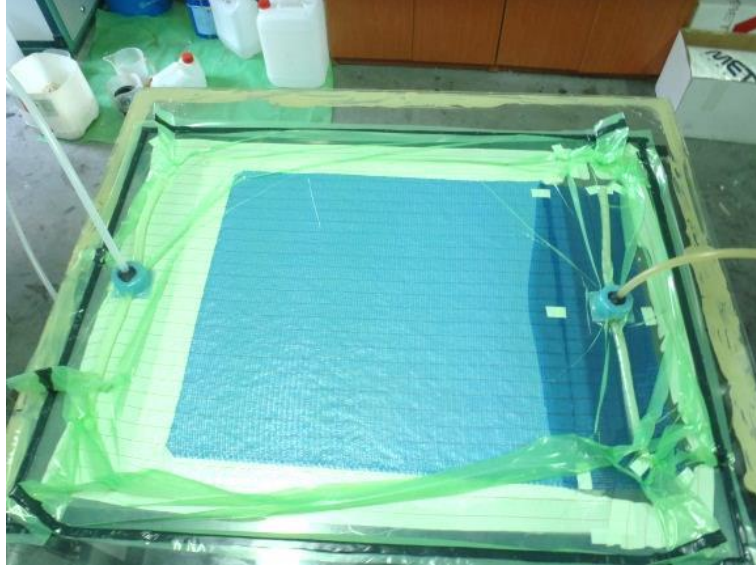
Derin çekme nümerik modeli dört ana parçadan oluşmaktadır; zimba, iş parçası tutucusu, iş parçası ve kalıp (Şekil 12).



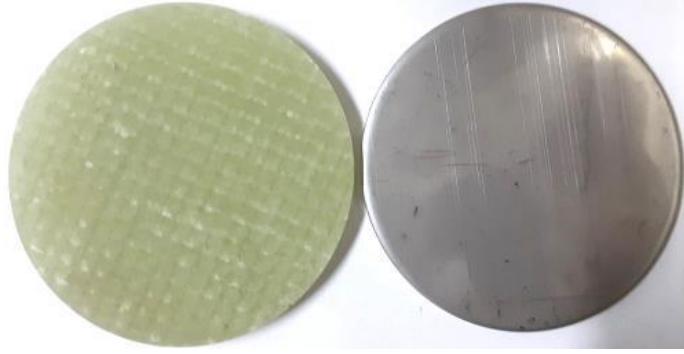
Şekil 12. Derin çekme nümerik modeli (kırmızı: zımba, yeşil: kalıp, sarı: iş parçası, mavi: iş parçası tutucusu).

3.2 Sandviç Yapıların Tasarımı ve Üretimi

İlk olarak kompozit yüzey malzemesi üretimi hakkında bilgi verilecektir. Kompozit yüzey malzemesi $0^{\circ}/90^{\circ}$ oryantasyona sahip E-Camı (0.6 kg/m^2) / Polyester (Crystic PAX 703) malzemelerden VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer molding) tekniği ile üretilmiştir (Şekil 13 a). Bu amaçla 6 mm kalınlığa sahip kompozit plakalar üretilmiştir. Üretilen kompozit plakaların istenilen boyutlara getirilmesi için yüzey taşlama uygulanmış ve 75 mm dış çapında kesilmiştir. Ayrıca 304L paslanmaz çelik malzemeden 3 mm kalınlığında ve 75 mm çapında diskler kesilerek yüzey malzemelerinin hazırlanması tamamlanmıştır. Şekil 13 (b)'de kompozit ve metalik yüzey malzemeleri görülmektedir.



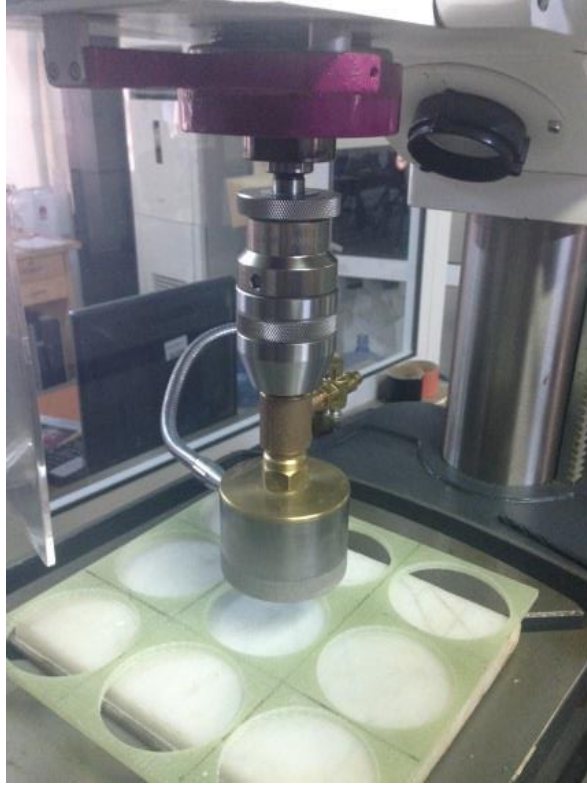
(a)



(b)

Şekil 13. (a) VARTM metodu ile kompozit üretimi ve (b) yüzey malzemeleri.

Kompozit yüzey malzemesi için uygulanan dış çap kesme işlemi Şekil 14'de görülmektedir.



Şekil 14. Core-drill ile kompozit yüzey malzemesi kesimi.

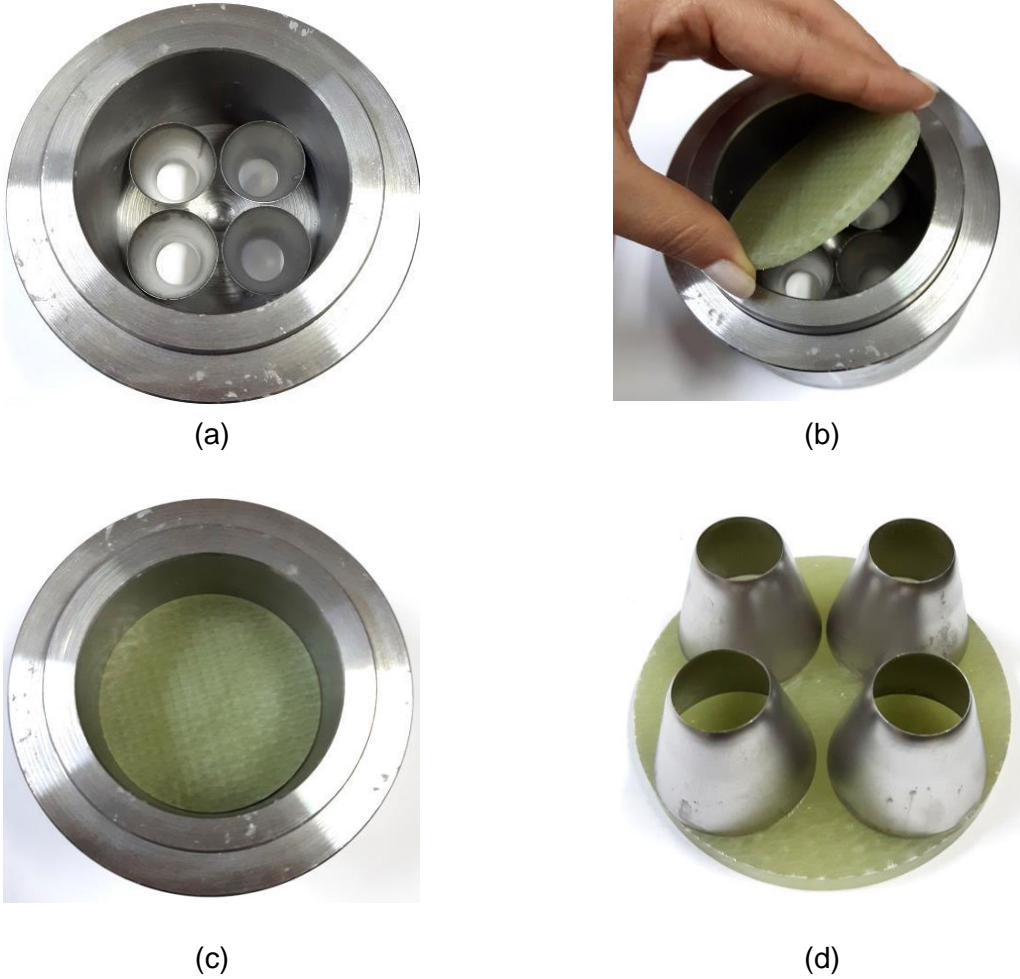
Sandviç malzemenin üretiminde en önemli hususlardan birisi çekirdek malzemelerin iki yüzey plakası arasında doğru ve standardize olarak pozisyonlanmasının sağlanmasıdır. Standart sandviç yapılar elde etmek için özel masterlar tasarlanmış ve üretilmiştir (Şekil 15).



Şekil 15. Sandviç üretim mastarı.

Sandviç üretim adımları Şekil 16'da verilmiştir. Yüzey ve çekirdek malzemelerinin yapıştırılması için Loctite EA 3450 kullanılmıştır. Burada yapıştırıcının esas görevi ezilme sırasında bileşenleri mümkün olduğu kadar bir arada tutmaktır. Sandviç yapıların ezilerek deformasyonu sırasında çok farklı deformasyon modları meydana gelmekte ve ince cidarlı çekirdek malzemesinin katlanarak deforme olması sırasında özellikle iç çekirdek malzemesinin tepe noktasında deformasyonun başlangıcı ile birlikte içe doğru ezilmektedir.

Sandviç yapı elde etmek için izlenen işlem adımları sırayla özetlenecek olursa; ilk olarak yüzeylere yapıştırıcı sürülür, daha sonra malzemeler mastardaki boşluklara yerleştirilir ve merkezleme sağlanarak yapışmanın gerçekleşmesi sağlanır. Sandviç yapıya ait diğer yüzey de benzer adımlar izlenerek yapıştırılır ve sandviç yapının üretimi tamamlanmış olur.



Şekil 16. Sandviç yapıların üretim kademeleri; (a) mastara yerleştirilme, (b) merkezleme, (c) yüzey malzemesi yerleştirme ve (d) tek yüzeyli yapı.

Üretimi tamamlanan sandviç yapılar Şekil 17’de görülmektedir.



(a)



(b)



(c)



Şekil 17. Sandviç yapılar; (a) iç çekirdekli, (b) dış kabuklu ve (c) balanlı (iç çekirdek ve dış kabuk birlikte).



Şekil 18. Poliüretan köpük malzeme ve içi doldurulmuş numuneler.

Bazı deneylerde çekirdek malzemenin içerisine köpük doldurulmuştur. Bu tarz numuneler üretmek için kullanılan malzemeler ve köpük dolgulu üretimi yapılmış numuneler Şekil 18'de görülmektedir.

Nümerik modelleme çalışmaları kapsamında öncelikli olarak malzeme modellerinin seçilmesi ve bu modellere ait sabitlerin belirlenmesi gerekmektedir. Malzemelere uygun malzeme modellerinin seçimi ve bu modellere ait sabitlerin doğru olarak belirlenmesi nümerik çalışmanın başarısına doğrudan etki edecektir. Yine aynı zamanda söz konusu malzemeler dinamik yüklemelere maruz kalacaklarından şekil değiştirme hızı hassasiyetlerinin de modelleme çalışmalarında dikkate alınması gerekmektedir. Ayrıca malzemelerde yüksek miktarda kalıcı plastik deformasyon oluşacak ve sandviç yapıyı oluşturan bazı bileşenlerde hasar meydana gelecektir. Bu sebeple proje kapsamında yapılacak olan karakterizasyon, hem mukavemet modeli hem de hasar modeli sabitlerinin tayinlerini de içeren oldukça detaylı bir çalışmadır.

Mekanik karakterizasyon çalışmasına öncelikli olarak AISI 304L paslanmaz çelik malzemeden başlanmıştır. Paslanmaz çelik plakalardan statik çekme (ASTM: E8M-04) ve Split Hopkinson Barı çekme numuneleri hazırlanmış ve testler gerçekleştirilmiştir (Şekil 19). 304L paslanmaz çeliğinin yüksek şekil değiştirme hızı hassasiyeti gösterdiği literatürdeki çalışmalardan bilinmektedir (W. S. Lee ve Lin, 2001). Bu amaçla statik çekme testleri üç

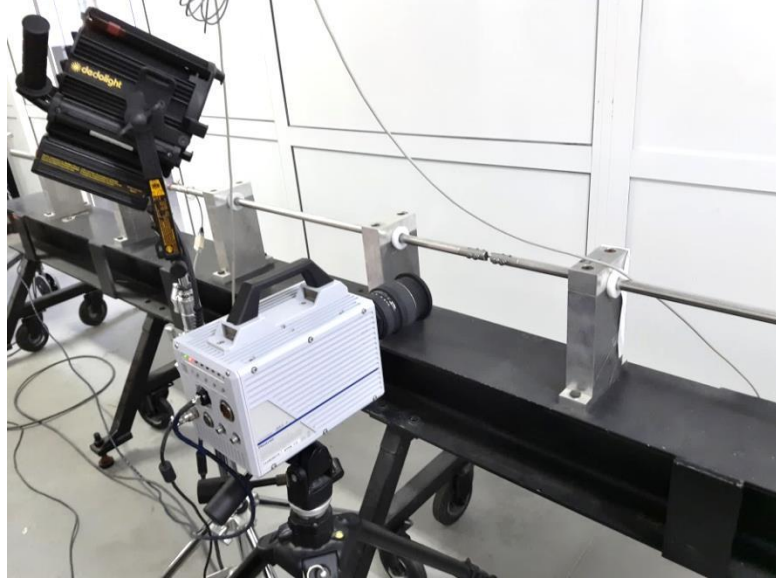
farklı (10^{-3} , 10^{-2} ve 10^{-1} s⁻¹) ve Hopkinson basınç barı testleri de iki farklı şekil değiştirme hızında (1580 ve 2235 s⁻¹) gerçekleştirilmiştir. Dinamik testlerin gerçekleştirildiği Split Hopkinson Çekme Barı Şekil 20'de görülmektedir. Split Hopkinson Çekme Barı; çarpan çubuk, alan çubuk ve ileten çubuk gibi üç ana elemandan meydana gelmektedir. Numune, alan ve ileten çubuklara özel bir aparat vasıtasıyla sabitlenmektedir. Bir gaz tabancası tarafından fırlatılan çarpan çubuk, hızla alan çubuğu çekmektedir. Bu sayede alan çubuk içerisinde çekme gerilme dalgası ilerlemektedir. Bu çekme gerilme dalgası, numuneye ulaştığı anda numuneyi hızla çekerek deforme etmektedir. Malzemelerin akustik empedans farklarına bağlı olarak dalganın bir kısmı ileten çubuğa iletilmekte diğer kısmı da alan çubuğa tekrar geri dönmektedir. Gerilme dalgaları çubukların üzerindeki şekil değişim ölçerler tarafından kaydedilmektedir (Şekil 21). Hopkinson Basınç Barı gerilme dalgası teorisi kullanılarak malzemeye ait dinamik gerilme ve şekil değiştirme eğrileri elde edilmektedir. Yine dinamik deformasyonun başlangıcı ve ilerleyişini izleyebilmek amacıyla testler yüksek hızlı kamera kullanılarak kaydedilmiştir.



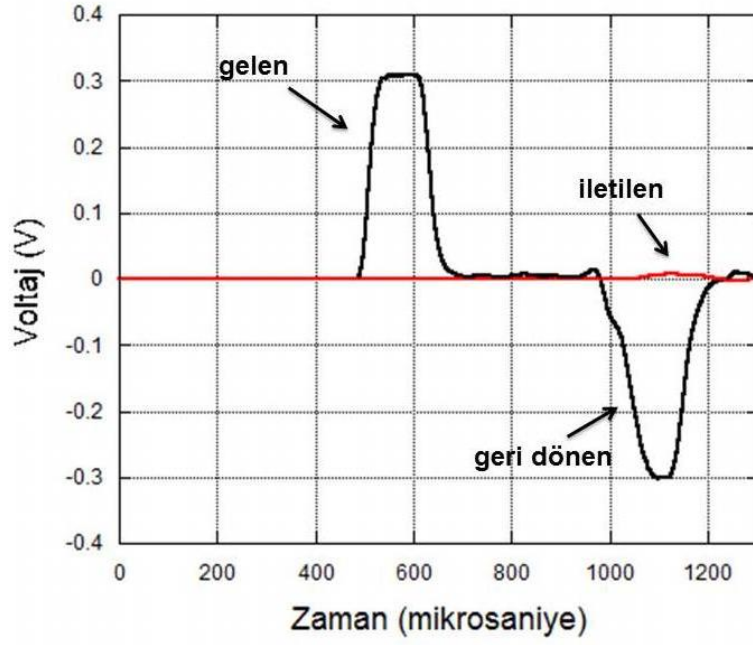
(a)

(b)

Şekil 19. (a) Statik çekme numuneleri ve (b) Hopkinson çekme numunesi.



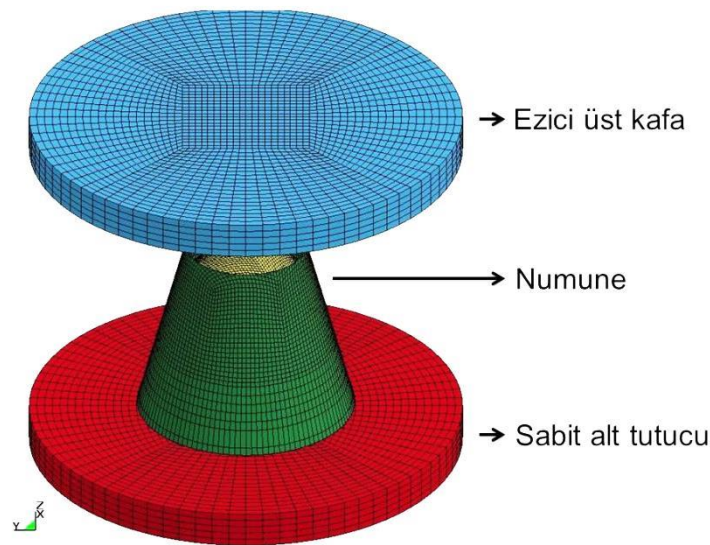
Şekil 20. Split Hopkinson çekme barı.



Şekil 21. Split Hopkinson basınç barı voltaj tarihçesi.

3.3 Biyobenzetim Yapıların Statik ve Orta Hızlarda Ezilme Deney ve Nümerik Modelleri

Tekli yapıların statik ve dinamik ezilme karakteristiklerinin detaylı olarak incelenebilmesi için bu deneyler nümerik olarak modellenmiştir (Şekil 22). Statik ve dinamik ezilme testlerinin nümerik modelleri üç ana elemandan oluşmaktadır. Bunlar; hareketli üst ezici kafa, numune (dış kabuk, iç çekirdek, balan) ve sabit alt tutucu. Statik ezilme testi nümerik modelinde hareketli üst kafaya zamana bağlı bir yer değiştirme eğrisi tanımlanmaktadır. Dinamik ezilme testi (düşen ağırlık) nümerik modelinde ise hareketli üst kafaya bir ilk hız verilmekte ve deneyde kullanılan düşen ağırlık kütlesi üst kafanın toplam ağırlığı olarak tanımlanmaktadır. Her iki modelde de numunede oluşacak katların kendi içlerinde oluşacak temasları SINGLE_SURFACE temas algoritması ile dikkate alınmıştır. Her iki testin nümerik modelinde numune ve plakalar arasındaki temas SURFACE_TO_SURFACE temas algoritmasıyla tanımlanmıştır. Numune ve plakalar arasındaki statik ve dinamik sürtünme katsayıları sırasıyla 0.3 ve 0.2 olarak alınmıştır. Statik ezilme nümerik modellerinde kütle ölçekleme (mass scaling) metodu kullanılmıştır. Bu yöntemde numunenin yoğunluğu azaltılıp ezilme hızı artırılmıştır. Buradaki ana amaç dinamik bir çözüm kodu olan LS-DYNA'da statik bir ezilme probleminin çözüm zamanını kabul edilebilir sınırlarda tutabilmektir. Kütle ölçekleme yapılırken nümerik modelde numuneye ait iç enerji ve kinetik enerji tarihçeleri kaydedilmiştir ve ikisi arasındaki oran yaklaşık %5 seviyelerinde kalmıştır. Bu değer literatürde kabul edilen sınırlar dâhilindedir (Tasdemirci, 2011). Alt ve üst ezilme plakaları rijit olarak modellenmiştir. Numuneler için detayları bu raporun ilgili kısmında belirtildiği gibi Johnson Cook malzeme modeli seçilmiştir.



Şekil 22. Ezilme nümerik modeli.

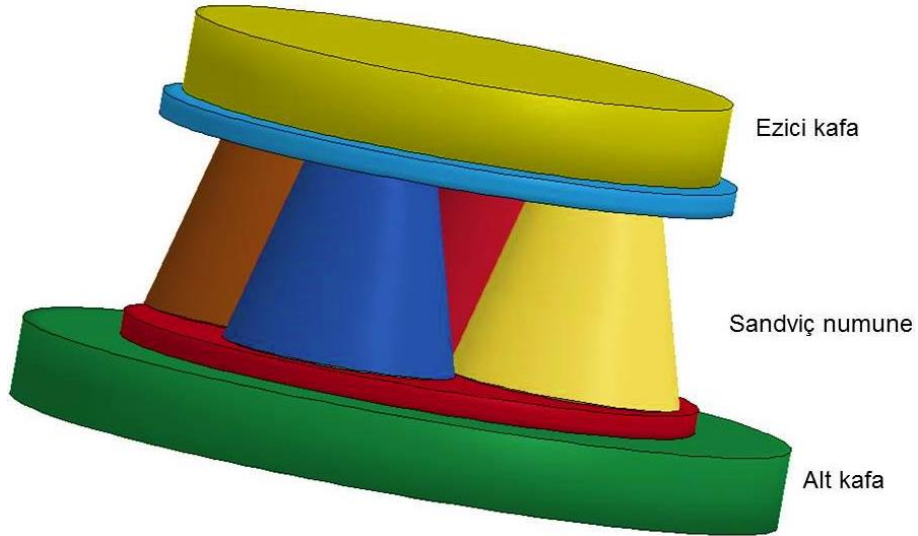
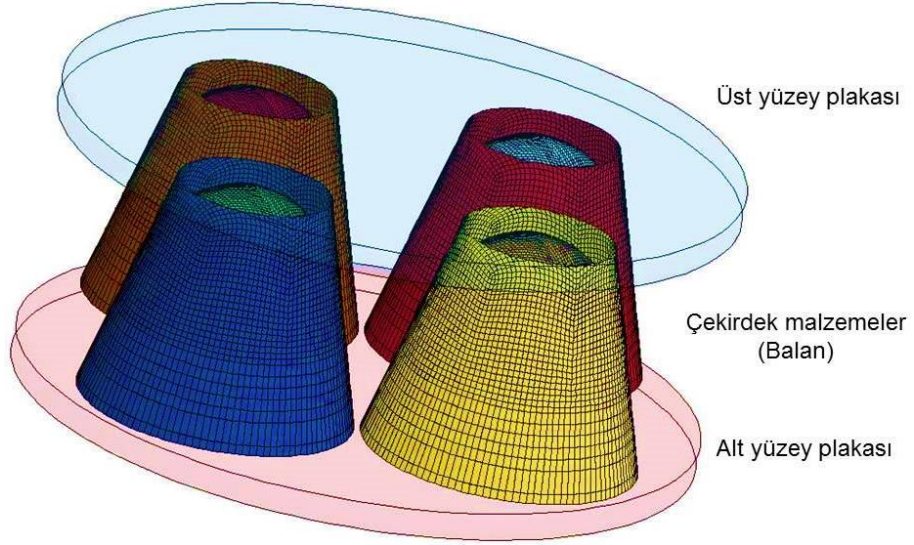
Ezilme testlerine iç çekirdek, dış kabuk ve balan (iç çekirdek + dış kabuk) geometrilerinin statik basma testleriyle başlanmıştır. Bu testler için 300 kN kapasiteye sahip Shimadzu AG-X üniversal basma test cihazı kullanılmıştır.

Statik testlerin tamamlanmasının ardından çalışmaya düşen ağırlık testleri ile devam edilmiştir. Düşen ağırlık test cihazında belirli ağırlıktaki kütle belirli bir mesafeden numune üzerine düşürülmektedir. Deneyler sırasında kullanılan test cihazının çarpma hızını arttırabilmek amacıyla yayla ilave tahrik düzeneği de mevcuttur ve bu sayede 19 m/s çarpma hızlarına kadar çıkabilmek mümkündür. Statik deneyler yer değiştirme kontrollü deneylerdir ve deney esnasında cihaza ezme kafasının ne kadar ilerleyeceği programlanır. Cihaz o miktar mesafeyi kat ederken aynı zamanda yük hücresi buna karşılık gelen kuvvet değerlerini kaydeder. Düşen ağırlık testi ise kuvvet kontrollü bir deney türüdür. Sisteme verilecek olan toplam enerji kontrol edilebilir ve bu enerji yapı içerisinde deformasyona sebep olarak ezilme (sürtünme ve deformasyondan kaynaklı ısınma gibi bazı yan faktörler de mevcuttur fakat bahsi geçen deneysel hızlar bu etkilerin etkinliklerinin küçük olduğu seviyelerdedir) sağlanır. Testler sırasında düzen ağırlık test cihazında 72.5 mm çap ve 40 mm yüksekliğe sahip bir ezici uç kullanılmış ve numunelere dinamik ezilme testleri gerçekleştirilmiştir. Proje kapsamında alınan 222 kN'luk striker sisteme başarıyla entegre edilmiş ve deneyler sırasında kullanılmıştır.

3.4 Sandviç Yapıların Statik ve Orta Hızlarda Ezilme Deney ve Nümerik Modelleri

Proje kapsamındaki çalışmalara iç çekirdek, dış kabuk ve balan ihtiva eden sandviç yapıların statik ve dinamik deformasyon testleri ve nümerik modelleri ile devam edilmiştir. Bu sandviçlerin davranışlarının incelenmesi bahsi geçen yapıların potansiyel uygulama alanlarındaki davranışlarının anlaşılabilmesine önemli oranda ışık tutacaktır. Bu sayede, çoklu dizilimden kaynaklanan komşu yapıların birbirlerini sınırlandırma veya birbirlerinin deformasyon modlarına etki etme gibi bazı faktörlerin etkisini anlamak mümkün olacaktır. Sandviç yapıların ezilme davranışının incelenmesinde kullanılan nümerik model örneği Şekil 23'de görülmektedir. Derin çekme esnasında numune kesiti boyunca kalınlık ve gerilme/şekil değiştirme değerlerinde değişimler meydana gelmektedir. Bu durum malzemenin mekanik davranışı üzerine doğrudan etki ettiğinden nümerik modelleme çalışmalarında üretim aşamasının ilk adımı olan derin çekme de modellenmiş ve işlem sonucunda elde edilen nümerik numune sandviç yapılarda kullanılmak üzere nümerik modele giriş bilgisi olarak tanımlanmıştır. Böylelikle hem kalınlık değişimi hem de artık gerilme/şekil değiştirmeleri

bünyesinde bulunduran nümerik numuneler, ezilme problemlerine başlangıç değerleri olarak alınmıştır.



Şekil 23. Sandviç nümerik modeli.

Sandviç yapıların ezilme nümerik modellerinde çekirdek malzemeler ile yüzey malzemeleri arasındaki temaslar `AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE` algoritması ile tanımlanmıştır. Yüzey malzemelerinin ezme plakalarına olan temasları ise `AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE` algoritması kullanılarak modellenmiştir.

Simülasyon sonuçları, deneylerle hem kuvvet-yer değiştirme eğrileri hem de deformasyon tarihçesi / şekli açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Proje kapsamında sandviç yapıların Doğrudan Basınç Dalgası Testleri gerçekleştirilmiştir. Doğrudan Basınç Dalgası Testlerinde (DBDT) açık veya kapalı kalıplar kullanılarak farklı testler yapmak mümkündür.

3.5 Doğrudan Basınç Dalgası Deneyi ve Nümerik Modeli

Doğrudan Basınç Dalgası Test cihazındaki temel bileşenler; çarpan çubuk, piston, numune tutucu ve ileten çubuktur. Deney sırasında cihaza ait gaz tabancası çarpan çubuğu bir namlu içerisinde hızlandırmakta ve bu çubuk pistonu çarparak yapıya yükü iletmektedir. Yapılacak testin konfigürasyonuna bağlı olarak şekilde (açık ve kapalı kalıp) (Şekil 24) poliüretan malzemedeki bir yükleme yastığı da kullanılabilir. Açık ve kapalı kalıplar bir ileten çubuğa bağlıdır ve ileten çubuk üzerindeki şekil değişim ölçerlerden gelen sinyallerin osiloskopta kaydedilmesiyle kuvvet tarihçesine ait bilgiler elde edilebilmektedir.



(a)

(b)

Şekil 24. Numune tutucu kalıplar (a) kapalı ve (b) açık.

Sandviç yapılar için Doğrudan Basınç Dalgası Testleri kapalı kalıp kullanılarak (40 m/s hız, 142 mm çarpan çubuk ve 46 mm piston boyları) gerçekleştirilmiştir.

3.6 Penetrasyon Deneyleri ve Nümerik Modelleri

Proje kapsamındaki çalışmalara balan ihtiva eden sandviç yapıların penetrasyon ve perforasyon davranışlarının incelenmesiyle devam edilmiştir. Bu amaçla penetrasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında kullanılan gaz tabancası, numune tutucu ve hızölçer Şekil 25, Şekil 26 ve Şekil 27'de görülmektedir.

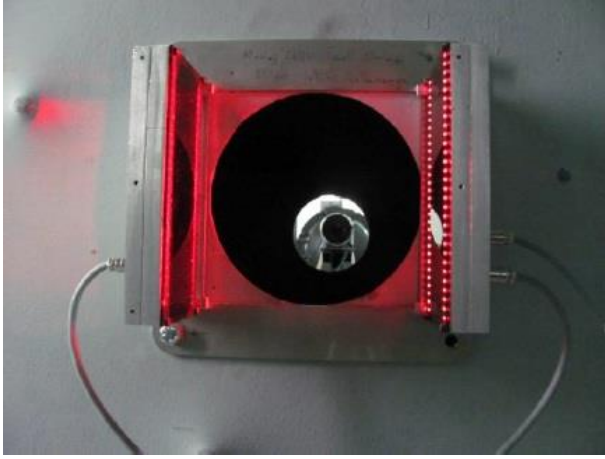


Şekil 25. Gaz tabancası ve çarpma haznesi.

Numune, deney düzeneğinde çarpma haznesi içerisindeki tutucuyla sabitlenmektedir. Yine çarpma haznesi üst bölgesinde yüksek hızlı kamera kullanılarak deneyi izlemek ve kaydedebilmek mümkündür. Deneyler sırasında iki farklı penetratör kullanılmıştır. Bunlardan ilki 30 mm çapında ve 110 g ağırlığındaki küre ve diğeri ise 11.9 mm kenar ölçüsüne sahip ve 13 g ağırlığındaki küp şeklindeki penetratördür (Şekil 28). Deneyler sırasında bu penetratörler farklı çarpma hızlarıyla sandviç yapılara fırlatılmışlardır. Sisteme entegre hız ölçer hem penetratörün çarpma hızını hem de şayet delinme mevcutsa penetratörün çıkış hızını ölçebilme özelliğine sahiptir.



Şekil 26. Numune tutucu.



(a)



(b)

Şekil 27. Hızölçerler; (a) giriş ve (b) çıkış.



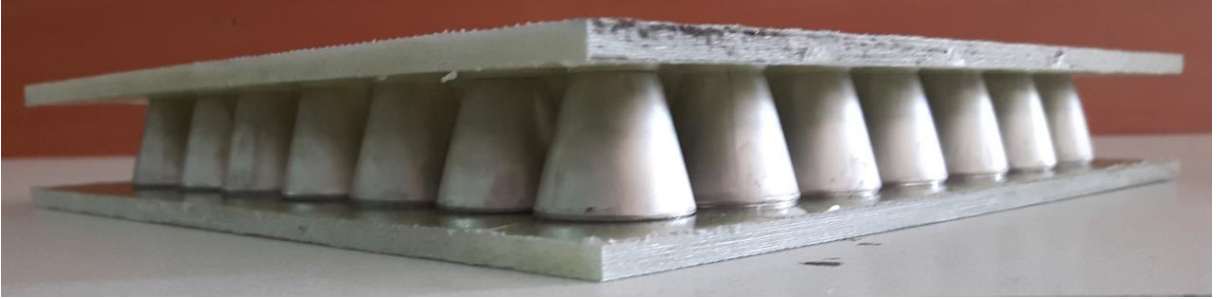
(a)



(b)

Şekil 28. Penetratörler; (a) küre ve (b) küp.

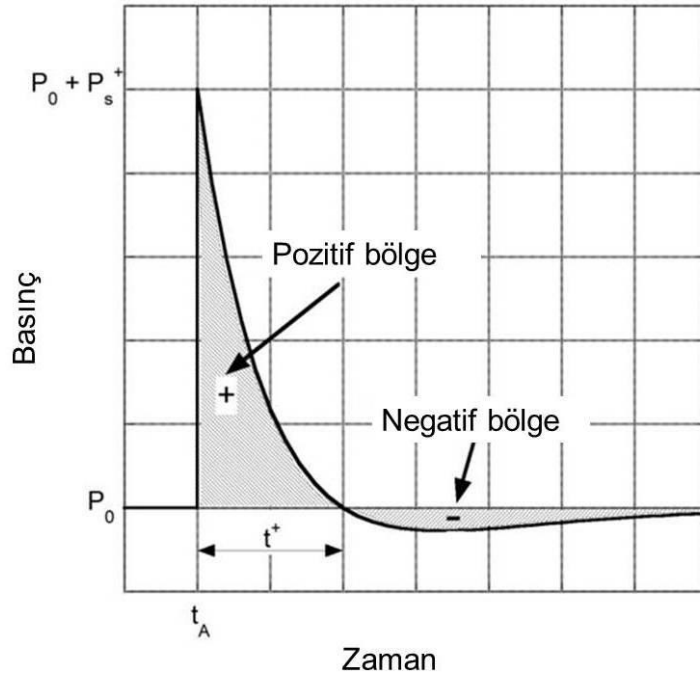
Balan yapısı ihtiva eden sandviç numuneler 25 cm x 25 cm kenar uzunluklarına sahiptir ve kullanılan yüzey malzemelerinin kalınlıkları 5.5 mm olarak seçilmiştir (Şekil 29).



Şekil 29. Penetrasyon testinde kullanılan sandviç numuneler.

3.7 Patlama Nümerik Modelleri

Patlama yüklerinin yapılara etkisini nümerik olarak incelemek için çalışmalarda genellikle iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan ilki patlayıcının, patlayıcının gömülü olduğu ortamın (genellikle toprak) ve patlama yükünün etki ettiği yapının bulunduğu ortamın (genellikle hava veya su) fiziksel olarak modellendiği ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) metodudur. İkinci metot ise patlayıcının meydana getirdiği basınç yükünün doğrudan yapıya etki ettirildiği ConWep metodudur. ConWep metodu kullanılarak hem serbest hava (free air blast) hem de ortama gömülü patlayıcıların etkileri simüle edilebilmektedir. Bu metodun kullanılması durumunda analizlerin çözüm süreleri nispeten kısa olmakta ve böylece karmaşık yapıların analizleri daha hassas örgü boyutları kullanılarak kabul edilebilir sürelerde analizlerin yapılabilmesine olanak sağlanmaktadır. Bütün bu avantajlardan dolayı proje kapsamında yapılan patlama analizlerinde ConWep metodu tercih edilmiştir. Bu metot aynı zamanda parametrik çalışmalar için de (farklı patlayıcı kütleleri ve mesafeleri) oldukça uygundur.



Şekil 30. Patlama dalgası basınç tarihçesi.

Tipik bir patlama olayında meydana gelen basıncın tarihçesi Şekil 30'da görülmektedir. Basıncın zamana bağlı değişimi Denklem 14 ile formülize edilebilmektedir.

Friedlander (Smith ve Hetherington, 1994) denklemini kullanılarak belirli bir mesafe için, patlama dalgasından kaynaklanan basınç modellenebilir:

$$P(t) = P_{S^+} \left(1 - \frac{t}{t^+}\right) e^{-b \frac{t}{t^+}} \quad (1)$$

Burada P_{S^+} gelen basınç pik değeri, t zaman, t^+ pozitif bölge süresi, b sönümlenme parametresi ve t_A varış zamanını temsil etmektedir.

Patlama olaylarında en önemli parametreler patlayıcının miktarı ve patlama mesafesidir. İki patlama etkisini birbirleri ile karşılaştırma amacıyla ölçeklenmiş mesafe tanımı sıklıkla kullanılmaktadır. Ölçekleme mesafesi denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$Z = \frac{d}{\sqrt[3]{W}} \quad (2)$$

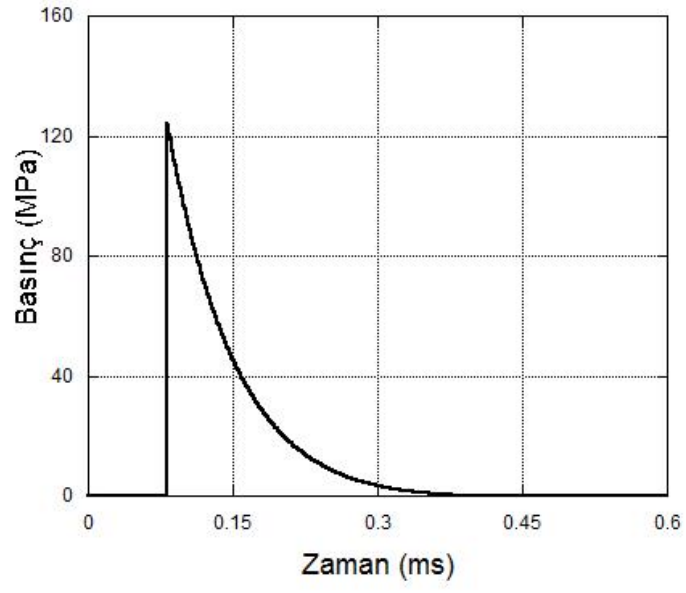
Burada Z ölçeklenmiş mesafede meydana gelen basıncı, d patlama mesafesini, W ise patlayıcı kütesini ifade eder. Patlama nümerik simülasyonlarında kullanılan patlayıcı miktarı değiştirildiğinde eşdeğer basıncı oluşturacak patlama mesafeleri de değişmektedir.

Denklem 3'de patlama ile meydana gelen basınç dalgası teorik olarak ifade edilmiştir:

$$P(\tau) = P_r * \cos^2\theta + P_i * (1 + \cos^2\theta - 2 * \cos\theta) \quad (3)$$

Burada θ geliş açısı, P_i gelen basınç ve P_r ise yansıyan (geri dönen) basınçtır (Zhu ve Lu, 2007).

Balan sandviç yapının patlama yüklerine karşı davranışlarını incelemek için öncelikli olarak iki farklı konfigürasyon hazırlanmıştır. Bunlardan ilki; çekirdek malzemelerin üst kısmını patlama yönüne göre düz yerleştirilerek oluşturulan model, diğeri ise çekirdek malzemelerin tepe noktasının patlama yönüne ters yerleştirildiği modeldir. Analizlerde 280x280 mm ebatlarında sandviç yapı 400 mm'den 5 kg TNT yüküne (tipik bir kara mayını yükü ve patlayıcı mesafesi) tabi tutulmuştur. Sandviç yapıda, 3mm kalınlığa sahip 304L paslanmaz çelik yüzey malzemeleri kullanılmıştır ve sandviç yapı 20 mm kalınlığında bir çelik plaka ile desteklenmiştir. Burada amaç hem patlama enerjisinin emilim performansını değerlendirebilmek hem de korunan yapıya iletilen kuvvetin şiddet ve iletim zamanı gecikmelerini inceleyebilmektir. Geleneksel bir patlayıcının basınç yükünü hesap etmek için LSDYNA'da bulunan hava patlama fonksiyonu *LOAD_BLAST_ENHANCED kartı kullanılarak tanımlanmıştır.



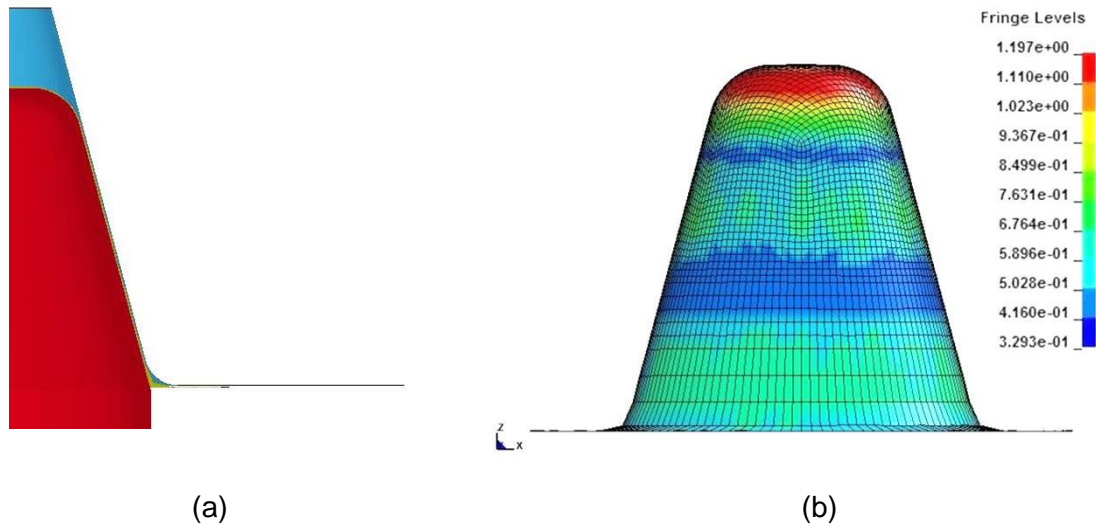
Şekil 31. Patlama nümerik modeli basınç tarihçesi.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Biyobenzetim Yapıların Nümerik Üretimi

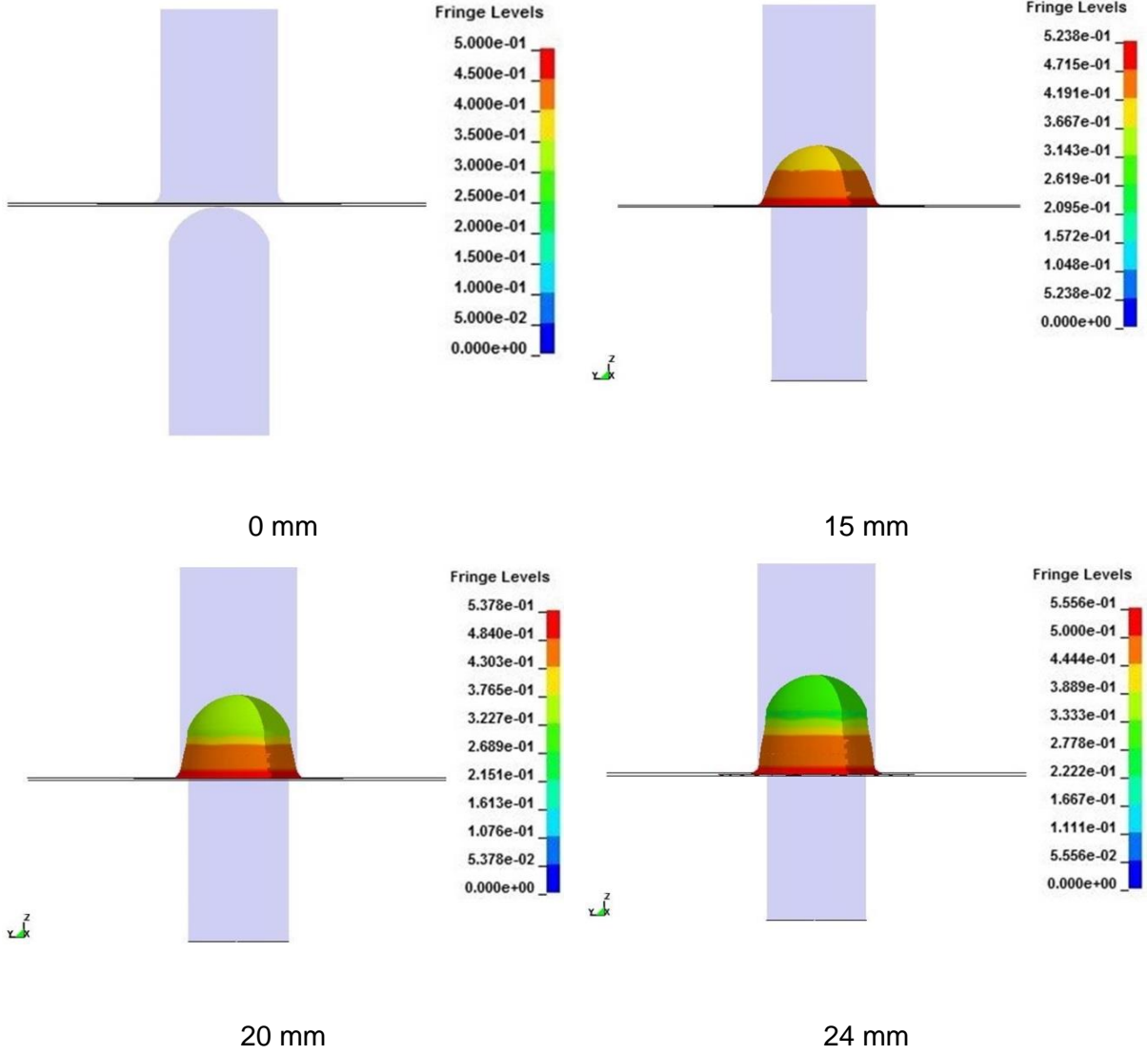
Sonuç raporunun ilgili kısmında detayları verildiği gibi öncelikli olarak yapıların üretimi nümerik modellenmiştir. Bu noktada üretim yöntemini ayrıca detaylı olarak modellenmesinin ana sebepleri derin çekme sonrasında numunede meydana gelen artık gerilme/gerinimlerin ve lineer olmayan kalınlık dağılımının bulunduğu nümerik numunenin elde edilme zorunluluğudur. Detayları daha sonra açıklanacağı gibi bu nümerik numune ezilme nümerik modellerine giriş bilgisi olarak kullanılmıştır.

Derin çekme sırasında numunede meydana gelen plastik şekil değiştirme değeri Şekil 32'de görülmektedir. Buna göre; numunede yüksek plastik deformasyon seviyelerinin meydana geldiği tespit edilmiştir. Plastik deformasyon sonucunda meydana gelen pekleşmeden kaynaklı malzeme dayanım değerlerinde artış meydana gelmektedir. Bu durum ince cidarlı ve yüksek mukavemetli numunenin yüksek enerji emme karakteristiklerine sahip olarak yüksek performans göstermesine sebep olmaktadır.

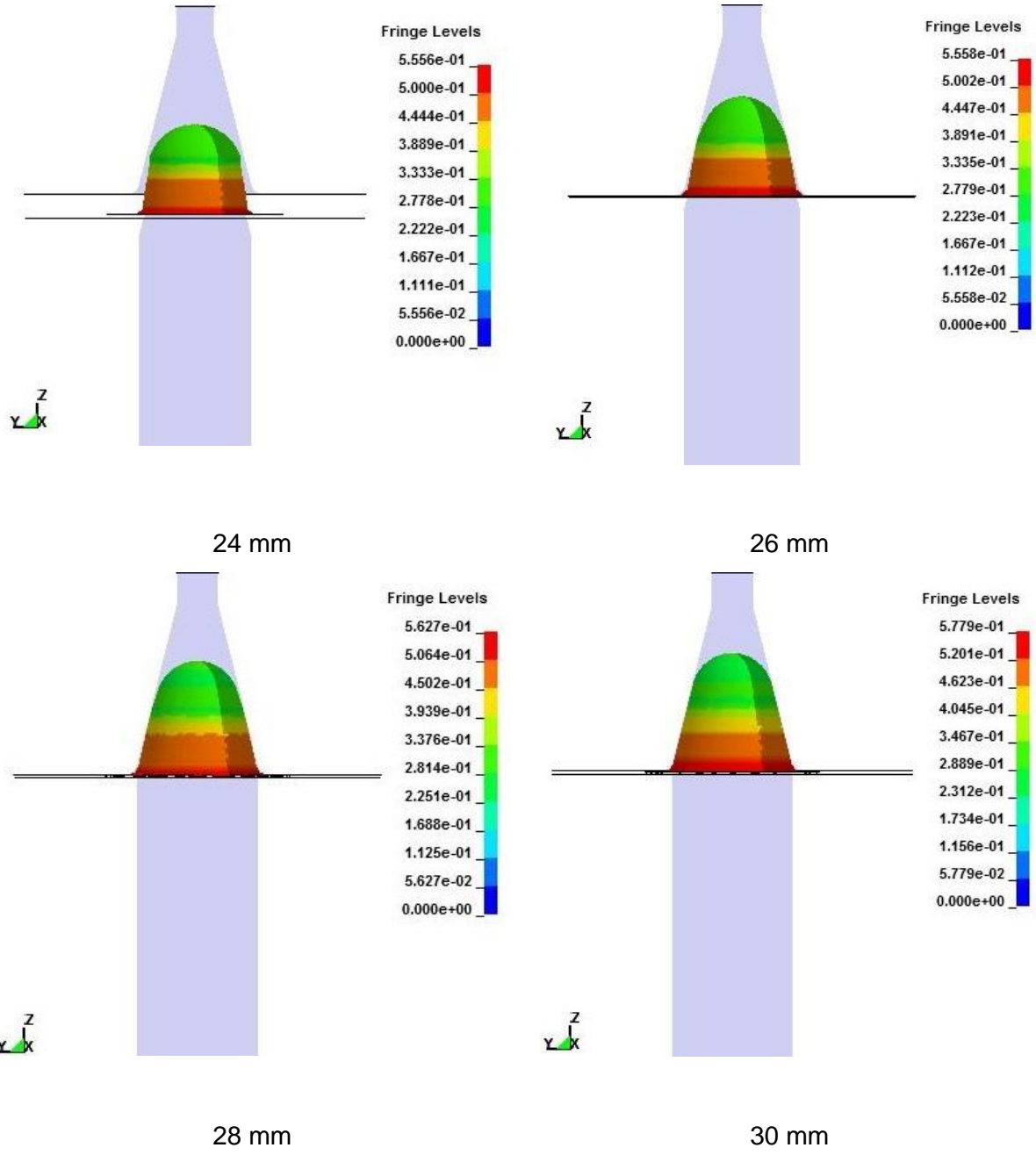


Şekil 32. (a) Nümerik model kesit görüntüsü ve (b) efektif plastik şekil değiştirme dağılımı.

İç çekirdek numunesinin birinci ve ikinci kademe derin çekilmesi esnasında numune kalınlığı değerinin zımba deplasmanına bağlı değişimi Şekil 33 ve Şekil 34'de verilmiştir.

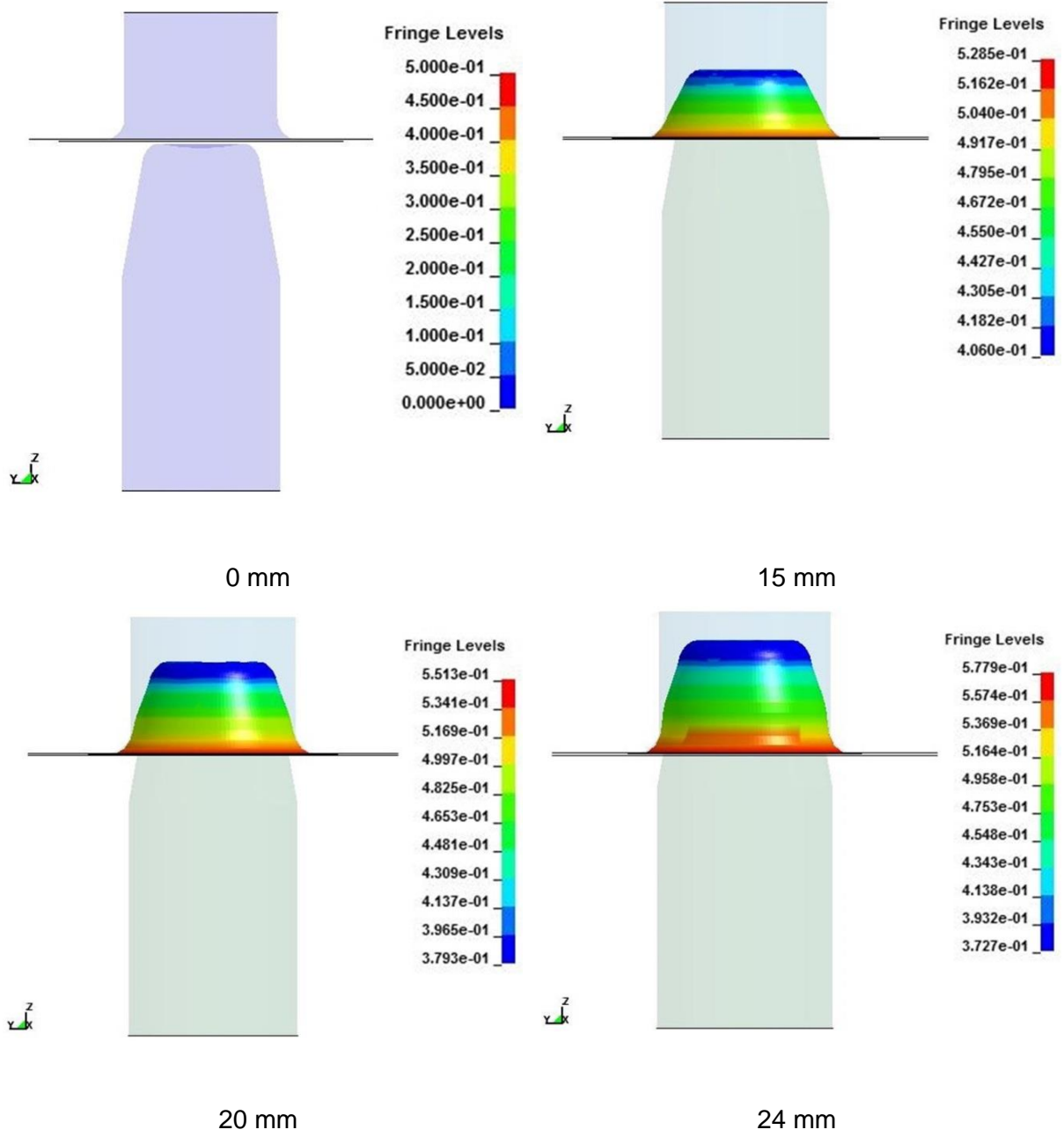


Şekil 33. Birinci kademe derin çekme sırasında farklı numune yükseklikleri için iç çekirdek kalınlık dağılımı tarihçesi.

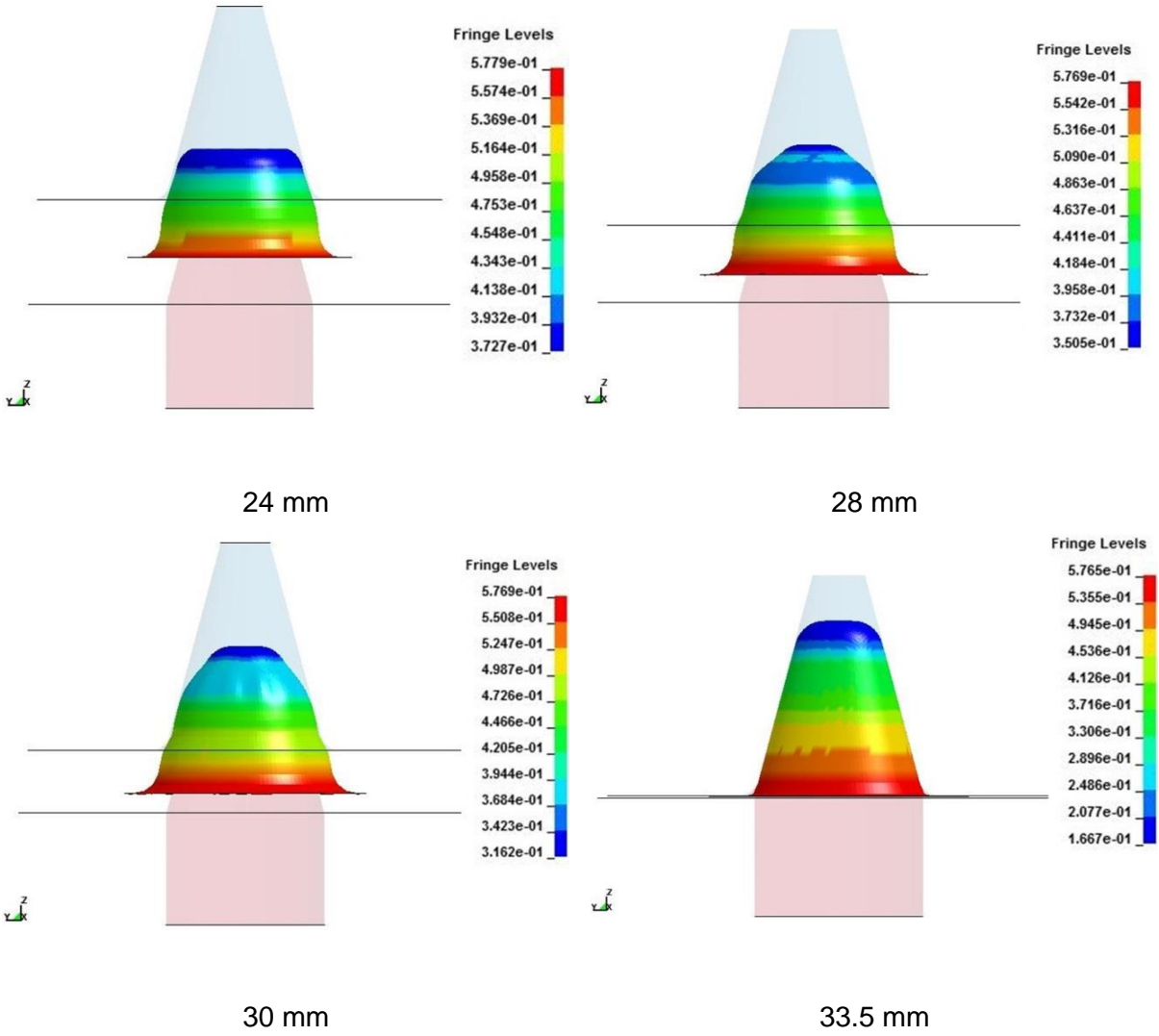


Şekil 34. İkinci kademe derin çekme sırasında farklı numune yükseklikleri için iç çekirdek kalınlık dağılımı tarihçesi.

Benzer şekilde dış kabuk numunesinin birinci ve ikinci kademe derin çekilmesi esnasında numune kalınlığı değerinin zımba deplasmanına bağlı değişimi Şekil 35 ve Şekil 36'da verilmiştir.

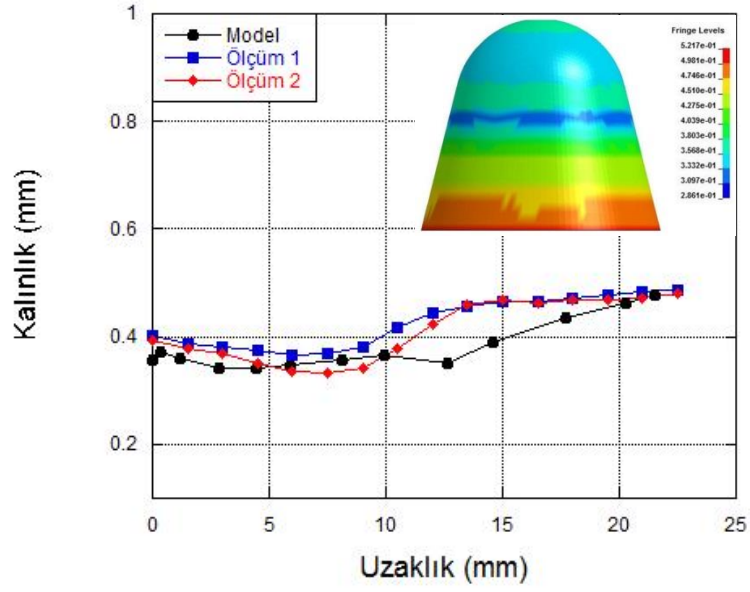


Şekil 35. Birinci kademe derin çekme sırasında farklı numune yükseklikleri için dış kabuk kalınlık dağılımı tarihçesi.

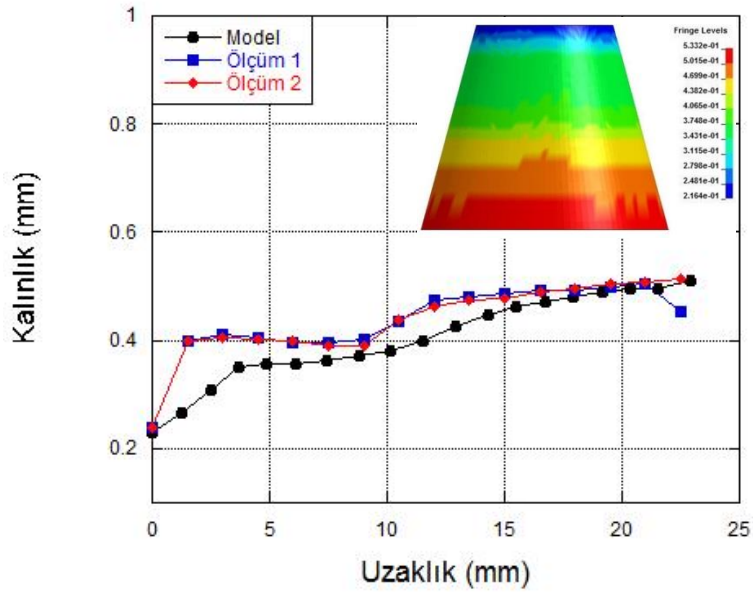


Şekil 36. İkinci kademe derin çekme sırasında farklı numune yükseklikleri için dış kabuk kalınlık dağılımı tarihçesi.

Derin çekilerek üretilen numunelerdeki kalınlık dağılımları CMS Jant Sanayii A.Ş. firmasında kurulu Mitutoyo CMM (Coordinate Measuring Machine) cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Yapıların tamamı üzerinde geometrik ölçümler gerçekleştirilmiş ve kalınlık değişimleri tespit edilmiştir. Elde edilen nokta bulutu bir bilgisayar destekli tasarım (CAD) programı kullanılarak üç boyutlu olarak modellenmiştir. Nümerik modellerden elde edilmiş kalınlık değişimlerinin deneysel ölçümlerle karşılaştırılması Şekil 37 ve Şekil 38'de verilmiştir. Noktaların uzaklıklarının hesaplanmasında referans olarak numunenin tepe noktası (0 mm) alınmıştır.



Şekil 37. İç çekirdek kalınlık dağılımı.



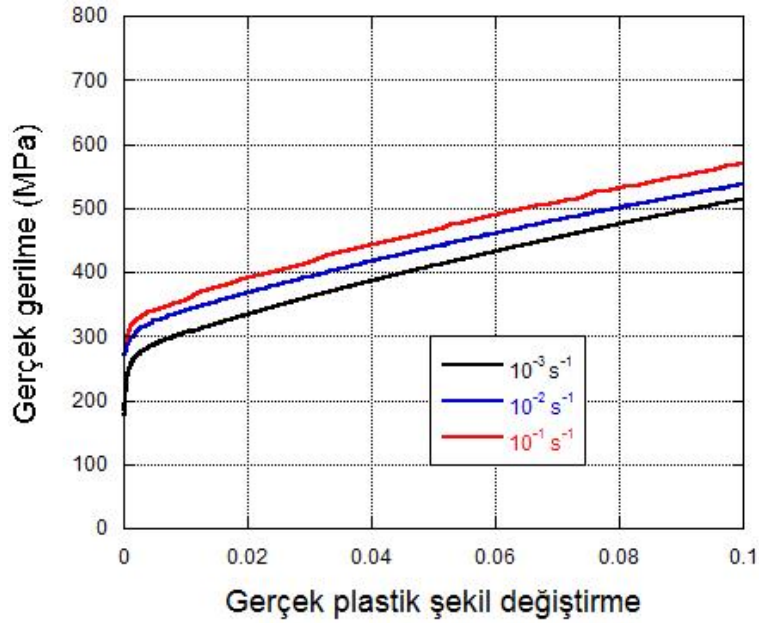
Şekil 38. Dış kabuk kalınlık dağılımı.

Şekillerden de görülebileceği gibi nümerik modeller kalınlık değerlerini ve dağılımını başarıyla yakalamışlardır. Bu doğru dağılım ezilme analizlerinin deneysel sonuçlarla uyumunu ve nümerik modellerin sonuçlarının hassasiyetini arttırmaktadır.

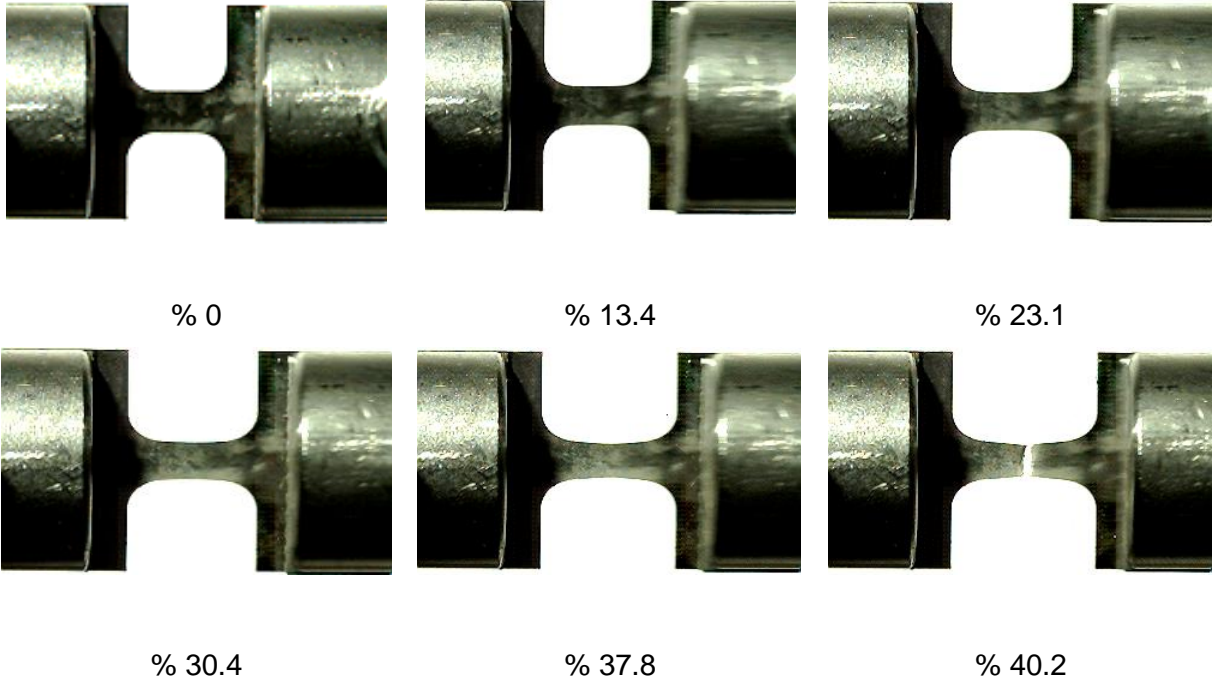
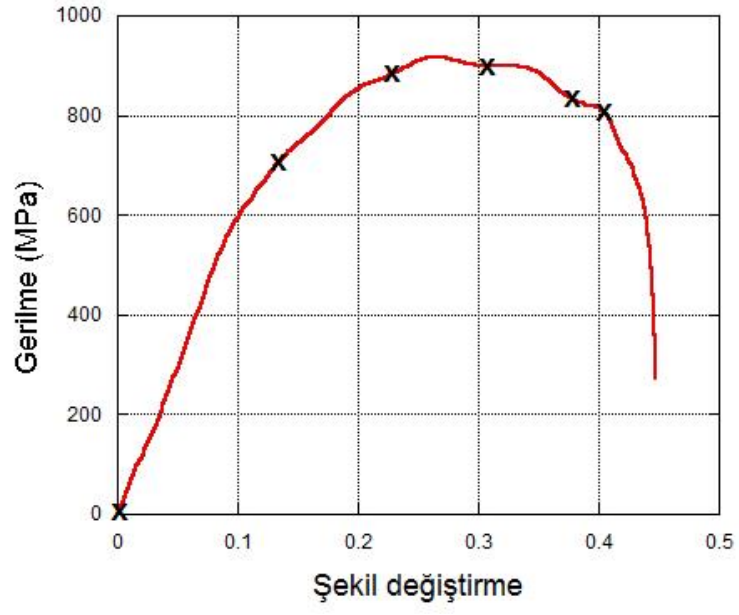
4.2 Statik ve Dinamik Mekanik Karakterizasyon Sonuçları

Proje kapsamında izlenen yöntem deneysel ve nümerik çalışmanın bir arada yürütülmesini hedeflemiştir. Bu amaçla, enerji yutucu sistemi oluşturan malzemelerin karakterizasyonunun yapılması gerekmektedir. Söz konusu yapı dinamik yüklere maruz kalacağından malzemelerin şekil değiştirme hızı hassasiyetlerinin tespiti kaçınılmazdır. Bu amaç doğrultusunda düşük ve yüksek şekil değiştirme hızlarında mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Düşük şekil değiştirme hızı testleri için statik basma ve çekme test cihazı (Shimadzu AG-X 300kN), yüksek şekil değiştirme hızları içinse Split Hopkinson Basınç Barı kullanılmıştır. Statik ve dinamik karakterizasyon sırasında deneyler yüksek hızlı kamera ile kayıt altına alınmış ve yapıdaki deformasyon ilerleyişi izlenmiş ve hasar mekanizmaları incelenmiştir. Mekanik karakterizasyon tamamlanmasının ardından uygun malzeme modellerinin seçimine geçilmiş ve gerekli malzeme modeli sabitleri belirlenmiştir.

Çekirdek malzeme üretiminde kullanılan 304L paslanmaz çelik malzemeye ait statik ve dinamik gerilme şekil değiştirme eğrileri ve dinamik deformasyon tarihçesi sırasıyla Şekil 39 ve Şekil 40'da sunulmuştur.

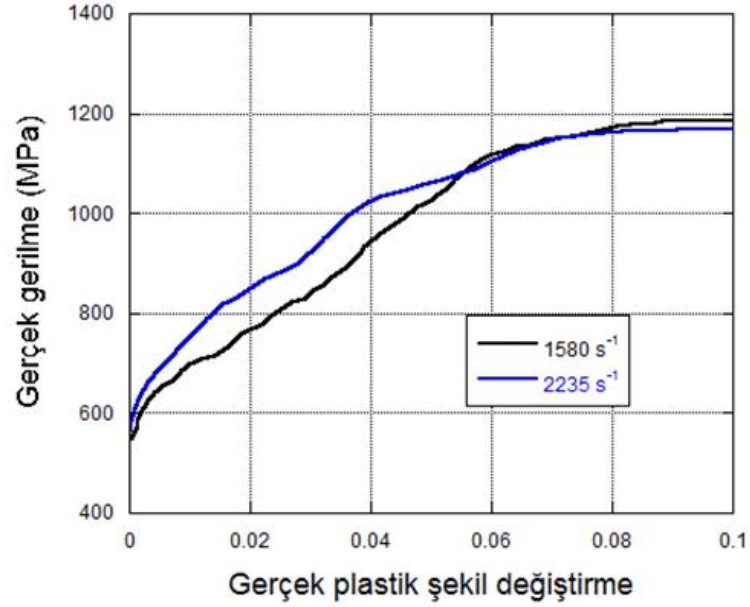


Şekil 39. Gerçek gerilme-gerçek plastik şekil değiştirme eğrileri.



Şekil 40. Dinamik gerilme-şekil değıştirme eğrisi ve test görüntüleri.

Farklı şekil değiştirme hızları için gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme eğrileri Şekil 41’de sunulmuştur.



Şekil 41. Dinamik gerçek gerilme-gerçek plastik şekil değiştirme eğrileri.

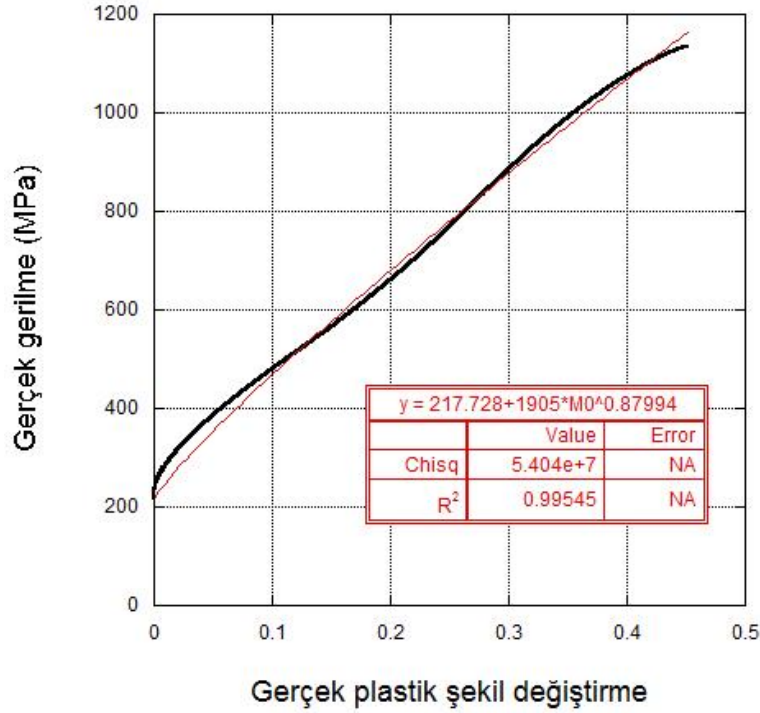
Şekillerden de görülebileceği gibi 304L paslanmaz çeliği yüksek şekil değiştirme hızı hassasiyeti göstermektedir ve bu hususun numerik modelleme çalışmaları sırasında kullanılacak malzeme modelinde hesaba katılması zorunludur. 304L paslanmaz çeliğinin mekanik davranışının modellenmesi için Johnson-Cook malzeme modeli seçilmiştir. Johnson-Cook (JC) gerilme denklemi aşağıdaki gibidir:

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] [1 - (T^*)^m] \quad (4)$$

Yukarıdaki denklemde ilk parantez uzama sertleşmesini, ikinci parantez şekil değişimi hassasiyetini vermektedir. Üçüncü parantez ise sıcaklığa bağlı mukavemetteki değişimi temsil etmektedir. A , B , C ve m statik ve dinamik testlerden elde edilen verilerin işlenmesi sonucu bulunacak olan malzeme sabitleridir. $\dot{\varepsilon}$ ve $\dot{\varepsilon}_0$ sırası ile şekil değiştirme hızı ve referans şekil değiştirme hızıdır. Referans şekil değiştirme hızı istenilen bir şekil değiştirme hızı (genellikle 1 s^{-1}) alınabilir. Sıcaklığın mekanik özelliklere etkisinin özellikle patlama yükleri karşısında sandviç yapının davranışı üzerinde etkili olacağı düşünülmektedir. Bu sebeple

sıcaklık etkisinin mekanik özellikler üzerindeki etkisini hesaba katabilen bir malzeme modeli tercih edilmiştir.

Statik test sonuçları kullanılarak (4) numaralı denklemdaki malzeme parametrelerinden uzama sertleşmesi ile ilgili olan A , B ve n değerleri bulunmuştur. Şekil 42'de fit edilen eğri görülmektedir.

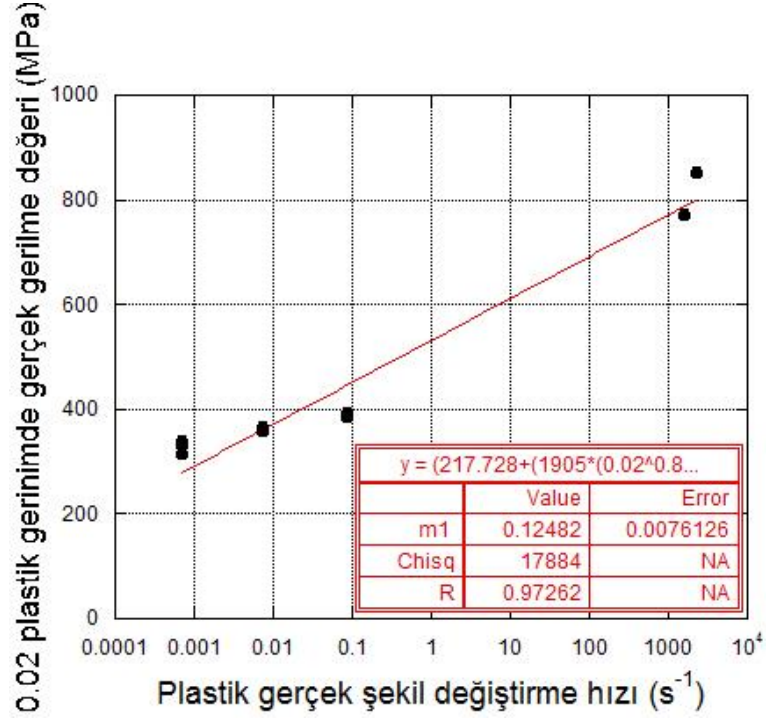


Şekil 42. Mukavemet modeli parametrelerinin bulunuşu.

Şekil 42'de görülebileceği gibi model oldukça yüksek hassasiyet ile malzemenin mekanik davranışını karakterize edebilmektedir. Burada esas önemli olan husus malzemenin ilgili mekanik problem dâhilinde karşılaşıcağı şekil değiştirme değerlerini doğru olarak tespit edebilmektir. Şekilde verilen eğri yüksek şekil değiştirme seviyelerine kadar davranışı karakterize edebilmektedir. Proje konusu olan yapının ezilerek deformasyona uğraması sırasında da bu tarz yüksek seviyeli şekil değiştirme değerlerinin meydana geleceği aşikârdır.

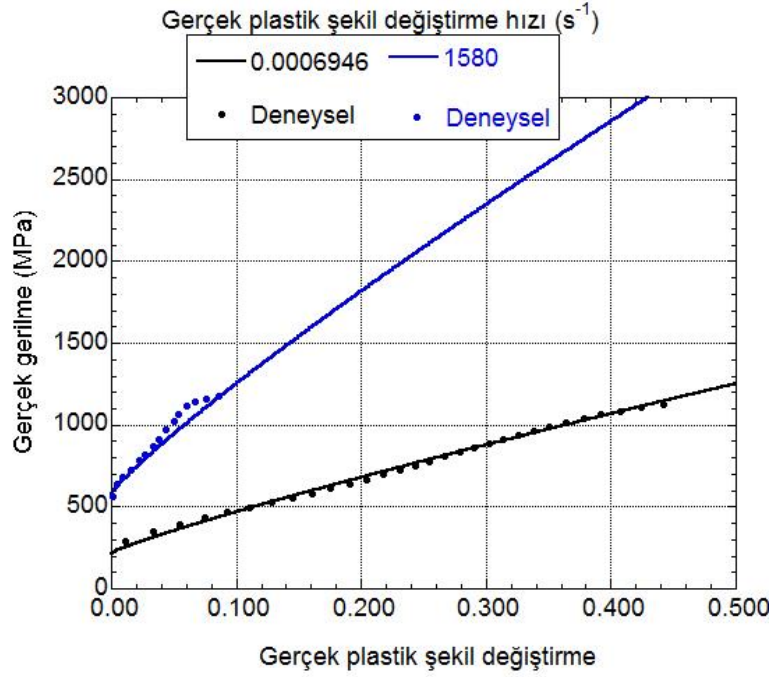
Şekil değiştirme hızı hassasiyetinin belirlenmesi amacıyla statik ve dinamik gerilme şekil değiştirme eğrileri kullanılmıştır. Bu amaçla 0.02 plastik gerçek şekil değiştirme değerine karşılık gelen gerçek gerilme değerleri farklı şekil değiştirme hızları için deneysel olarak

belirlenmiştir. Bu sonuçlar kullanılarak ikinci parantez içerisindeki C parametresi Şekil 43'de görüldüğü gibi tespit edilmiştir. Seçilmiş referans şekil değiştirme hız değeri 0.0006946 s⁻¹'dir.



Şekil 43. C parametresinin bulunuşu.

Şekil 44'de model ve deneysel sonuçlar bir arada verilmiştir.



Şekil 44. Deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması.

Tespit edilen JC malzeme modeli parametreleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. AISI 304L paslanmaz çeliğin Johnson-Cook malzeme model parametreleri.

E (GPa)	A (MPa)	B (MPa)	n	C	$\dot{\epsilon}_0$ (s^{-1})	m (Q. Xue, Nesterenko, ve Meyers, 2003)
193	217.728	1905	0.87994	0.12482	0.00069	1.0

Mekanik karakterizasyon çalışmalarına kompozit yüzey malzemesi ile devam edilmiştir. Kompozit malzemelerin anizotropik davranışlarından dolayı üç farklı malzeme yönünde karakterize edilmeleri zorunludur. Kompozit malzemenin modellenmesi için seçilmiş olan malzeme modeli, MAT162, bu davranışı oldukça başarılı şekilde temsil edebilmektedir.

MAT162 malzeme modeli, tek yönlü ve örgülü kompozit katmanlarının hasar analizlerinde kullanılmaktadır. Progresif katman hasar kriterleri, Hashin (Hashin, 1981) tarafından geliştirilen ve yüksek basma gerilmesinin kompozit hasarı üzerindeki etkilerini de içerecek şekilde bir metodoloji üzerine kurulmuştur. Bahsi geçen hasar modları; fiber hasarını, matris hasarını ve delaminasyon hasarını (açılma, kapanma, hasar yüzeylerinin birbirleri üzerinde kayması) tanımlanabilir (LSTC, 2007). Bu malzeme modelinde bütün mukavemet modeli kriterleri, katmanlar üzerindeki gerilmeler (σ_a , σ_b , σ_c , τ_{ab} , τ_{bc} , τ_{ca}) ve ilgili elastik modüller (E_a , E_b , E_c , G_{ab} , G_{bc} , G_{ca}) cinsinden ifade edilmektedir. Burada a, b ve c sırasıyla eksen içi atkı yönünü (in-plane fill), eksen içi çözüğü yönünü (in-plane warp) ve eksene dik yönleri temsil etmektedir (LSTC, 2007).

Hashin'in fiber mukavemet modeli kriterleri (Hashin, 1981), dokuma örgülerindeki fiber hasarını gerilme bileşenleri cinsinden temsil edecek şekilde genelleştirilmiştir. Atkı ve çözüğü yönlerindeki fiber çekme/kayma hasarları, ilgili aksenal ve kayma gerilmeleri arasındaki ikinci mertebeden ilişki ile tanımlanmıştır.

$$H_1 = \left(\frac{\langle\sigma_a\rangle}{S_{aT}}\right)^2 + \frac{(\tau_{ab}^2 + \tau_{ca}^2)}{S_{aFS}^2} - 1 = 0 \quad (5)$$

$$H_2 = \left(\frac{\langle\sigma_b\rangle}{S_{bT}}\right)^2 + \frac{(\tau_{ab}^2 + \tau_{bc}^2)}{S_{bFS}^2} - 1 = 0 \quad (6)$$

Burada S_{aT} ve S_{bT} atkı ve çözüğü yönlerindeki aksenal çekme mukavemetleridir. S_{aFS} ve S_{bFS} ise atkı ve çözüğü yönlerindeki fiber kayma hasarına karşılık olan katman kayma mukavemetleridir. Bu mukavemet modeli kriterleri, sadece ilgili σ_a veya σ_b değerleri pozitif olduğunda uygulanabilir. $S_{aFS} = SFS$ olduğu varsayılırken S_{bFS} ile ilgili ise aşağıdaki ifade kullanılmaktadır;

$$S_{bFS} = SFS * S_{bT}/S_{aT} \quad (7)$$

σ_a veya σ_b negatif iken, atkı ve çözüğü yönlerinin ikisinde de eksen içi basma hasarı aşağıdaki maksimum gerilme kriteri ile verilmektedir;

$$H_3 = \left(\frac{\langle \dot{\sigma}_a \rangle}{S_{aC}} \right)^2 - 1 = 0, \quad \dot{\sigma}_a = -\sigma_a + \langle -\sigma_c \rangle \quad (8)$$

$$H_4 = \left(\frac{\langle \dot{\sigma}_b \rangle}{S_{bC}} \right)^2 - 1 = 0, \quad \dot{\sigma}_b = -\sigma_b + \langle -\sigma_c \rangle \quad (9)$$

Burada S_{aC} ve S_{bC} atkı ve çözüğü yönlerindeki aksenal basma mukavemetleridir. Basınç altındaki ezilme hasarı ise aşağıdaki denkleme göre ifade edilmektedir;

$$H_5 = \left(\frac{\langle p \rangle}{S_{FC}} \right)^2 - 1 = 0, \quad p = -\frac{\sigma_a + \sigma_b + \sigma_c}{3} \quad (10)$$

Bir dokuma örgüsü katmanı, fiber kırılması oluşmadan eksen içi kayma gerilmesine maruz kalabilir. Bu eksen içi matris hasar modu aşağıdaki şekilde verilmektedir;

$$H_6 = \left(\frac{\tau_{ab}}{S_{ab}} \right)^2 - 1 = 0 \quad (11)$$

Burada S_{ab} matris kayma hasarı ile ilgili katman kayma mukavemetidir.

Kalınlık boyunca etkiyen gerilmelerin arasındaki ikinci dereceden ilişki ile ifade edilen bir diğer hasar modu ise matris hasarıdır. Kalınlık yönündeki matris hasarı kriteri ise şöyledir;

$$H_7 = S^2 \left\{ \left(\frac{\langle \sigma_c \rangle}{S_{cT}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{bc}}{S_{bc}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{ca}}{S_{ca}} \right)^2 \right\} - 1 = 0 \quad (12)$$

Burada S_{cT} kalınlık boyunca olan çekme mukavemeti, S_{bc} ve S_{ca} ise kayma gerilmeleridir ve aşağıdaki şekilde ifade edilebilirler;

$$\begin{Bmatrix} S_{ca} \\ S_{bc} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S_{ca}^{(0)} \\ S_{bc}^{(0)} \end{Bmatrix} + \tan(\varphi) \langle -\sigma_c \rangle \quad (13)$$

Bu hasar modu katman ara yüzeyinin komşuluğundaki elemanlarda gerçekleşir, hasar düzleminin katman düzlemlerine paralel olması beklenir ve bu mod delaminasyon olarak kabul edilebilir. Bu hasar modunda bir S sabiti, delaminasyon alanının deneylerle uyumlu

olmasını sağlamak için eklenmiştir. S sabiti, nümerik hesaplamaların deneylerden elde edilen delaminasyon alanı ölçümleri ile karşılaştırılmasıyla bulunabilir.

Bir katmandaki fiber çekme/kayma hasarı H_1 ve H_2 ile belirlendiğinde, ilgili yöndeki katmanın yük taşıma kapasitesi tamamen ortadan kalkar. H_3 ve H_4 modları ile oluşan basma yönündeki fiber hasarında, katmanın hasarlı yönde hala kalıcı bir eksenel yük taşıyabileceği kabul edilmektedir, bu yöne dik yöndeki yük taşıma kapasitesi ise sabit kabul edilmektedir. Katmandaki eksenel bası gerilmesinin eksenel bası mukavemetine (S_{aC} ve ya S_{bC}), eksenel düzlem içi gerilmesinin kalıcı S_{aRC} veya S_{bRC} mukavemetlerine düştüğü kabul edilmektedir. Burada $S_{aRC} = SFFC^* S_{aC}$ ve $S_{bRC} = SFFC^* S_{bC}$ şeklinde ifade edilmektedir. Sürekli bası yüklemesi altında, eksenel gerilmenin sabit olduğu kabul edilirken ($\sigma_a = - S_{aRC}$ ve ya $\sigma_b = - S_{bRC}$), müteakip geri yükleme eğrileri azalan bir eksenel modülü takip etmektedir. Fiber ezilme hasarı oluştuğunda ise, malzemenin basma altında, $p > 0$, elastik davranış gösterdiği ve çeki basıncında, $p < 0$, yük taşımadığı kabul edilir.

Eksen içi matris kayma hasarı H_6 , hasar almış bir elemandaki eksenel kuvvet taşıma kapasitesinin değişmediğini ve eksen içi kayma gerilmesinin sıfıra düştüğünü kabul etmektedir. H_6 ile verilen kalınlık yönü matris hasarı (delaminasyon) için, düzlem içi yük taşıma kapasitesi elastik kabul edilirken, çekme modundaki mukavemet değerleri $S_{ca}^{(0)}$ ve $S_{bc}^{(0)}$ sıfıra eşitlenir. Çekme modu için, $\sigma_c > 0$, kalınlık boyunca olan gerilme bileşenleri sıfıra düşürülür. Bası modu için, $\sigma_c < 0$, σ_c nin elastik olduğu kabul edilir, T_{bc} ve T_{ca} nın ise kırılma mukavemeti yüzeyi üzerinde ideal plastik malzemelerde olduğu gibi “kaydığı” ve geri yüklemenin sıfır gerilme ve şekil değiştirme değerine kadar düşürülmüş bir kayma modülünü takip ettiği söylenebilir.

Şekil değiştirme hızının katman mukavemeti $\{S_{RT}\}$ değerlerine etkisi şekil değiştirme hızına bağlı olarak aşağıdaki gibidir;

$$\{S_{RT}\} = \{S_0\} \left(1 + C_{rate1} \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \quad (14)$$

$$\{S_{RT}\} = \begin{Bmatrix} S_{aT} \\ S_{aC} \\ S_{bT} \\ S_{bC} \\ S_{FC} \\ S_{FS} \end{Bmatrix} \quad \text{ve} \quad \{\dot{\epsilon}\} = \begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_a \\ \dot{\epsilon}_a \\ \dot{\epsilon}_b \\ \dot{\epsilon}_b \\ \dot{\epsilon}_c \\ (\dot{\epsilon}_{ca}^2 + \dot{\epsilon}_{bc}^2)^{1/2} \end{Bmatrix}$$

Burada C_{rate} şekil değiştirme hızı sabitidir $\{S_0\}$ ve $\{S_{RT}\}$ olarak ifade edilen mukavemet değerlerinin referans şekil değiştirme hızındaki $\dot{\varepsilon}_a$ karşılığıdır.

MAT162 hasar modeli, Matzenmiller, Lubliner ve Taylor (1995) tarafından önerilen ve hasar başlangıcından sonraki yumuşama davranışının karakterizasyonu için kullanılan bir hasar mekaniği yaklaşımıdır. Katman seviyesindeki nominal şekil değiştirmeler cinsinden ifade edilen hasar fonksiyonları, yukarıda anlatılan fiber ve matris hasar modlarından Poisson etkilerinin çıkarılması şeklinde dönüştürülmüştür. Elastik modüllerdeki azalimler ilgili hasar parametreleri ϖ_i cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\dot{E}_i = (1 - \varpi_i)E_i \quad (15)$$

$$\varpi_i = 1 - \exp(-r_i^{m_i}/m_i) \quad r_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, 6$$

Burada E_i başlangıç elastik modülü, \dot{E}_i düşürülmüş elastik modülü, r_i ilgili fiber matris ve delaminasyon hasar fonksiyonlarından hesap edilen hasar eşiği ve m_i malzeme hasar parametresidir ve şekil değiştirme hızından bağımsız kabul edilmektedir. Hasar fonksiyonu başlangıçtaki “sertleşme” ve maksimum mukavemetten sonraki yumuşama davranışını da içerecek şekilde katmanın lineer olmayan elastik davranışını da hesaba katacak şekilde formülize edilmiştir.

MAT162 hasar modelinde, şekil değiştirme hızının, kompozit katmanının lineer olmayan gerilme-şekil değiştirme davranışı üzerindeki etkisi elastik modüller $\{E_{RT}\}$ için şu şekilde ifade edilmektedir;

$$\{E_{rt}\} = \{E_0\} \left(1 + \{C_{rate}\} \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \quad (16)$$

$$\{E_{RT}\} = \begin{Bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \\ G_{ab} \\ G_{bc} \\ G_{ca} \end{Bmatrix}, \quad \{\dot{\varepsilon}\} = \begin{Bmatrix} |\dot{\varepsilon}_a| \\ |\dot{\varepsilon}_b| \\ |\dot{\varepsilon}_c| \\ |\dot{\varepsilon}_{ab}| \\ |\dot{\varepsilon}_{bc}| \\ |\dot{\varepsilon}_{ca}| \end{Bmatrix} \text{ ve } \{C_{rate}\} = \begin{Bmatrix} C_{rate2} \\ C_{rate2} \\ C_{rate4} \\ C_{rate3} \\ C_{rate3} \\ C_{rate3} \end{Bmatrix}$$

Burada $\{C_{rate}\}$ şekil değiştirme hızı sabitleridir. $\{E_0\}$ değerleri $\{E_{RT}\}$ değerlerinin referans şekil değişimi hızındaki $\dot{\varepsilon}_0$ karşılıklarıdır.

Bu modelde, hasara uğramış bir eleman aşağıdaki üç kriterden birine uyduğu takdirde hesaplamalardan çıkarılır ve silinir;

- Eğer eksen içi yönlerde hasar gerçekleştiyse ve şekil değiştirme E_LIMT değerini aştı ise eleman silinir,
- Hasar alan bir elemanda basma relatif hacmi $ECRSH$ den küçükse eleman silinir,
- Hasar alan bir elemanda çekme relatif hacmi $EEXPN$ den büyükse eleman silinir.

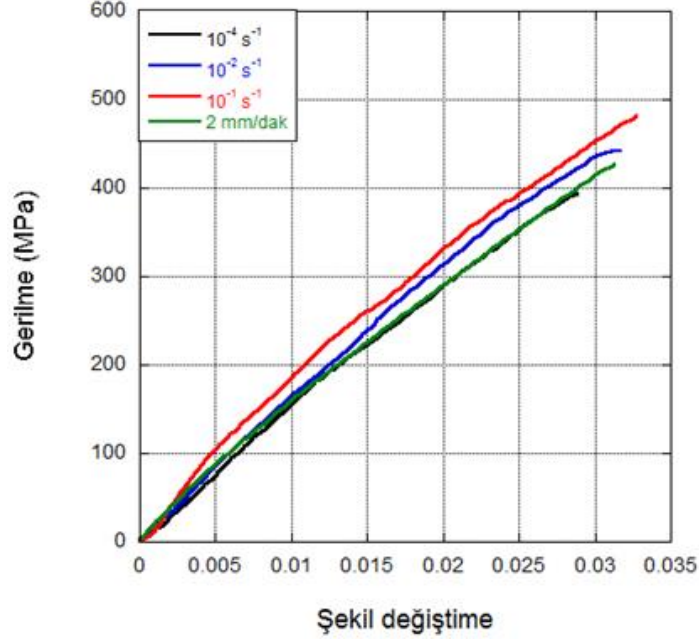
İlgili hasar modları için hasar tarihçe değişkenleri LS-PrePost yazılımı kullanılarak çizdirilebilir. Bu ekstra hasar tarihçe değişkenleri Tablo 2’de listelenmiştir (Tasdemirci, 2014).

Tablo 2. Hasar tarihçesi değişkenleri (Tasdemirci, 2014).

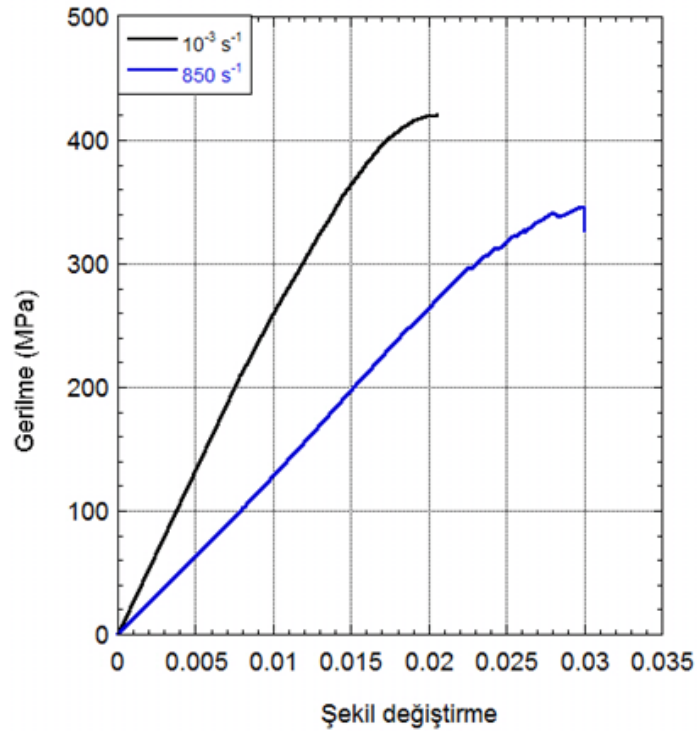
Deformasyon tarihçesi değişkeni	Değer	LS-PrePost Değişkeni
a yönü fiber modu		7
b yönü fiber modu	0-elastik	8
Fiber ezilme modu		9
Dikey yön matris modu	≥ 1 -hasarlı	10
Paralel matris/delaminasyon modu		11
Delaminasyon modu		12

Proje kapsamında kullanılan kompozit malzemenin statik ve dinamik mekanik karakterizasyon metodolojisi proje yürütücüsünün 2007-2011 yılları arasında başarıyla yürütmüş olduğu “Patlama ve Balistik Tehditlere Karşı Koruyucu Çok Katmanlı Malzeme Sistemlerinin Yüksek Deformasyon Hızlarında Mekanik ve Nümerik Test Metotlarının Geliştirilmesi ve Optimizasyonu, 106M353” projesi kapsamında geliştirilmiştir (Tasdemirci, 2011) ve bu proje kapsamında da kullanılacak kompozit malzemeye ait mekanik karakterizasyon çalışması yine proje yürütücüsünün 2012-2014 yılları arasında başarıyla yürütmüş olduğu “Patlamaya Dayanıklı Yarı Küresel Tekrarlı Çekirdek Malzemesi İhtiva Eden

Sandviç Yapıların Geliştirilmesi Ve Optimizasyonu, 112M141” başlıklı projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir



(a)



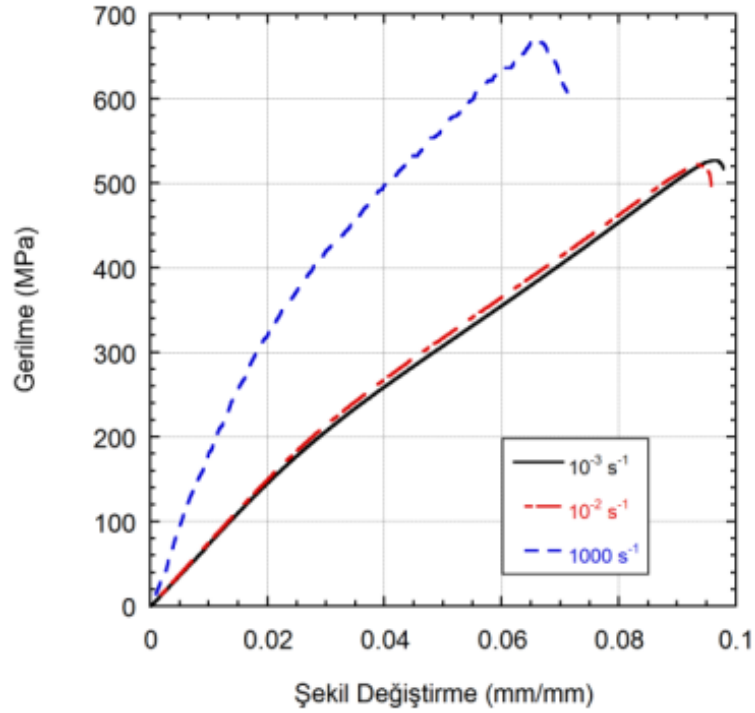
(b)

Şekil 45. Statik çekme testleri sonuçları, (a) X ve Y yönü çekme ve (b) X ve Y yönü basma (Tasdemirci, 2014).

Karakterizasyon için öncelikle kompozit malzeme düzlem içi yönde (X ve Y) çekme ve basma testlerine tabi tutulmuştur (Şekil 45 a ve b) (Tasdemirci, 2014).

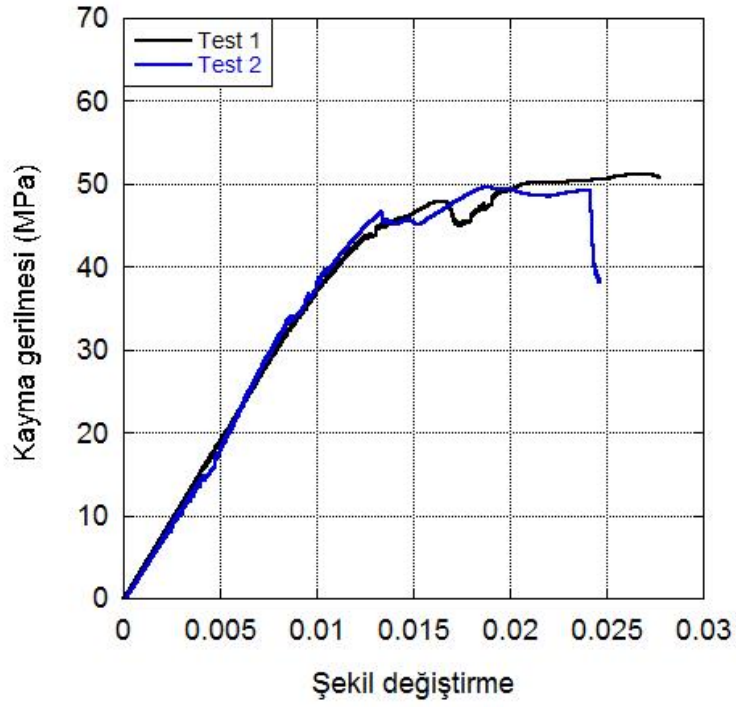
Kompozit malzemenin düzlem içi yöndeki şekil değiştirme hassasiyetini belirlemek amacıyla dinamik (850 s^{-1}) hızlarda basma testleri de uygulanmıştır (Şekil 45 b). Yine kompozit malzeme kalınlık yönünde statik ve dinamik basma testine tabi tutulmuştur (Şekil 46) (Tasdemirci, 2014).

Deney sonuçlarından da görülebileceği gibi polimer matrisli kompozit malzeme yüksek seviyelerde şekil değiştirme hızı hassasiyeti göstermektedir ve malzemenin elastiklik modülü, kopma mukavemeti ve kopma şekil değiştirme değerleri şekil değiştirme hızı ile birlikte oldukça değişmektedir. MAT162 malzeme modeli bütün bu değişimleri hesaba katabilmektedir.



Şekil 46. Z yönü basma test sonuçları (Tasdemirci, 2014).

Çekme ve basma testlerinde numuneler üzerine şekil değişim ölçerler yerleştirilmiş ve Poisson oranları tespit edilmiştir. Fiber ezilme mukavemeti ve fiber kayma modu mukavemeti değerlerinin tespiti için yanal baskılı basma testi uygulanmıştır. Kayma modulu ve mukavemetinin tespiti için kayma testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 47) (Tasdemirci, 2014).



Şekil 47. 12 yönü kayma testi sonuçları (Tasdemirci, 2014).

MAT162 malzeme modeli parametreleri Tablo 3'de özetlenmiştir.

Tablo 3. Kompozit malzeme MAT162 model parametreleri (Tasdemirci, 2014).

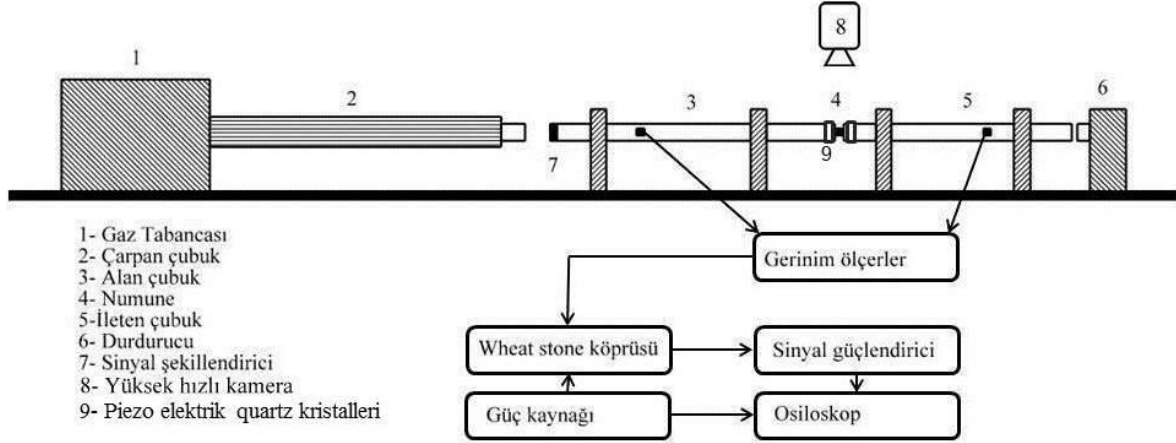
Elastik modülleri $E_A, E_B, E_C,$ E_b, E_c (GPa)	18.5, 18.5, 7.14	Fiber ezilmesi, S_{FC} , (MPa)	609.3
Poisson oranı, $\nu_{ab}, \nu_{ca}, \nu_{cb}$	0.13, 0.243, 0.0723	Kayma mukavemetleri, $S_{AB},$ $S_{BC}, S_{CA}, S_{AB}, S_{BC}, S_{CA}$ (MPa)	46.5
Kayma modülleri, $G_{AB}, G_{BC},$ G_{CA} , (GPa)	3.9, 3.9, 3.9	SFFC ^{SFFC}	0.3
Çekme mukavemetleri, $S_{AT},$ S_{BT}, S_{CT} (MPa)	480, 480, 70	Kayma açısı, ϕ_{HC}	10

Basma mukavemetleri, S_{AC} , S_{BC} , (MPa)	374.4, 374.4	Delaminasyon katsayısı, S_{DELM}	1.2
Hasar parametreleri, AM1, AM2, AM3, AM4	2.0, 2.0, 0.5, 0.35	Fiber kayma mukavemeti, S_{FS} , (MPa)	265.6
Erozyon parametreleri, E_LIMT, EEXPN, E_CRSH	0.2, 1.5, 0.8	Şekil değiştirme hızı sertleşmesi, C_1, C_2, C_3, C_4	0.0236, 0.04, 0.03 0.0284

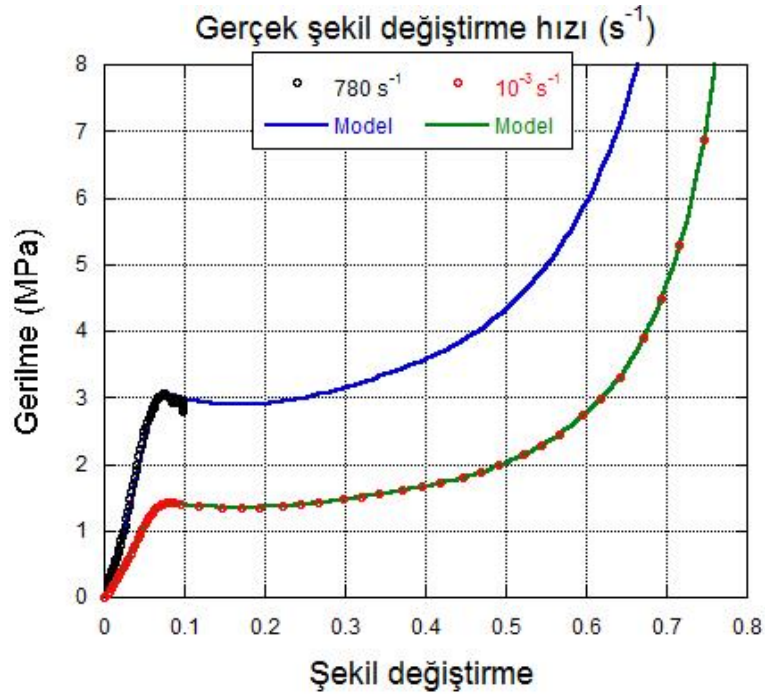
Proje kapsamında bazı testler için çekirdek malzemelerin iç boşluğuna köpük doldurulması da planlanmıştır. Çekirdek yapının içerisine doldurulacak olan köpüğün özellikle dinamik deformasyon sırasında etkinliği göstermesi ve çekirdek malzemeyi iç kısmından destekleyerek enerji emilim karakteristiklerini iyileştirmesi beklenmektedir. Bu amaçla kullanılacak olan poliüretan köpük malzemenin de mekanik karakterizasyonu yapılmıştır. Köpük malzemenin modellenmesi için *MAT_MODIFIED_CRUSHABLE_FOAM modeli seçilmiştir. Bu malzeme modeli statik ve dinamik gerilme şekil değiştirme eğrilerini input olarak kabul etmektedir. Şayet farklı şekil değiştirme hızları için gerilme şekil değiştirme eğrileri mevcutsa bu eğriler ayrı ayrı tanımlanabilmektedir. Nümerik çözüm esnasında şekil değiştirme hızının artışı ile birlikte LSDYNA eldeki mevcut eğriler arasında interpolasyon yaparak şekil değiştirme hızının etkisini malzemenin mekanik davranışına ilave edebilmektedir. Köpük malzemenin dinamik mekanik karakterizasyonu için Split Hopkinson Basınç Barı kullanılmıştır. Köpük gibi çok düşük akustik empedansa sahip malzemelerin Hopkinson Basınç Barı testleri sırasında; numuneden, ileten çubuğa iletilen sinyal oldukça düşük seviyelerde kaldığından ve sinyalin gerçek değerinin sinyalin içerisinde mevcut gürültü mertebelerine düşmesinden dolayı klasik Hopkinson Basınç Barı ile bu malzemelerin testlerini yapmak mümkün değildir. Yine bu tarz malzemelerin testleri sırasında dinamik gerilme dengesi (numune ön ve arka yüzeylerinde meydana gelen kuvvetler farkı) deformasyonun başlangıcından ilerleyen deformasyon değerlerine kadar elde edilemeyeceğinden bu tarz malzemelerin testleri sırasında oldukça özel teknikler kullanılması gerekmektedir. Bu tekniklerden en önemlisi, ileten çubuk-numune ara yüzeyine piezo elektrik quartz kristalleri yerleştirmektir. Bu kuartz kristalinin akustik empedansı testlerin yapıldığı Hopkinson Barında kullanılan 7075-T6 alüminyum malzemeye oldukça yakındır ve

gerilme/kuvvet ölçme hassasiyeti çok yüksektir. Proje kapsamında poliüretan malzeme için bu teknik kullanılarak karakterizasyon gerçekleştirilmiştir.

Kullanılan modifiye Split Hopkinson Basınç Barı'na ait şematik Şekil 48'de gösterilmiştir.



Şekil 48. Modifiye Split Hopkinson Basınç Barı.

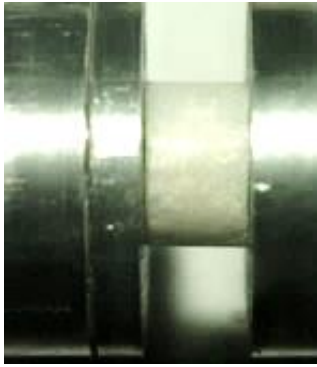


Şekil 49. Köpük için statik ve dinamik gerilme şekil değiştirme eğrileri.

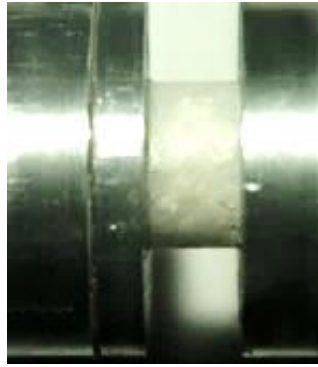
Şekil 49'da ise köpük malzemeye ait statik ve dinamik gerilme şekil değiştirme eğrileri verilmiştir. Bu eğriler nümerik modelde ilgili malzeme modeli için bir input bilgisi olarak

kullanılmaktadır. Köpük malzemeden beklendiği gibi şekil değiştirme hızı hassasiyeti oldukça yüksek seviyelerdedir.

Köpük malzemenin dinamik deformasyon tarihçesini incelemek amacıyla testler yüksek hızlı kamera ile kaydedilmiştir (Şekil 50). Yaklaşık olarak % 25 şekil değiştirme değerinden sonra malzemede hasar oluşumu meydana gelmektedir. Proje kapsamında nümerik modelde köpük malzeme için kullanılacak olan malzeme modeli bu davranışı başarıyla yakalayabilmektedir.



% 0



% 10.5



% 22.9



% 43.8



% 60



% 68.6

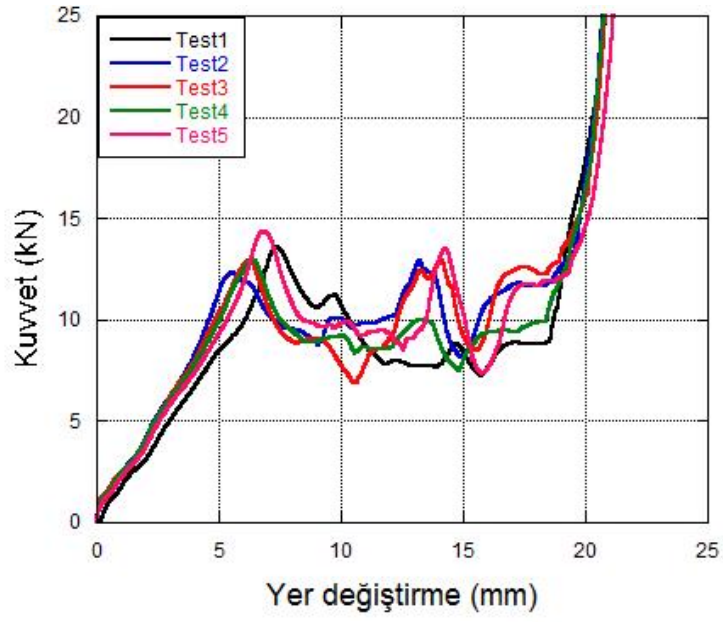
Şekil 50. Poliüretan köpük dinamik deformasyon tarihçesi.

4.3 Malzeme Modeli Sabitlerinin Doğrulanması

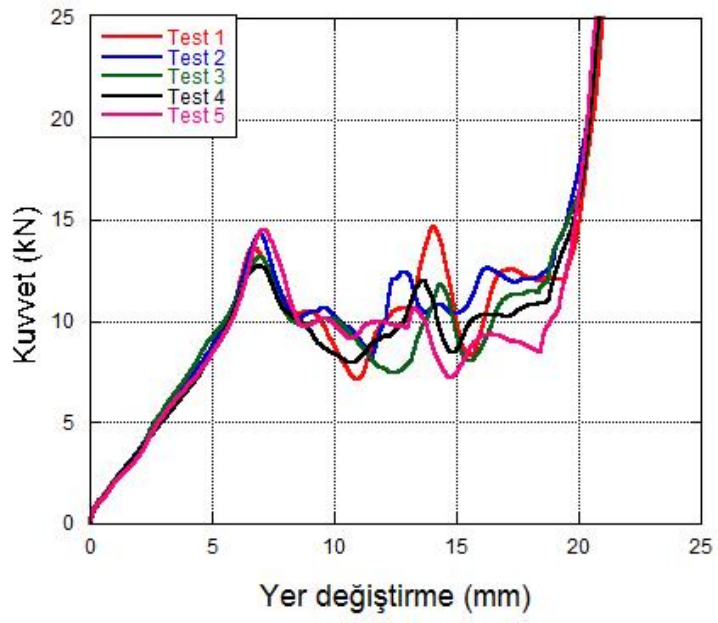
Malzeme modeli sabitlerinin doğrulanması çalışmalarına iç çekirdek ve dış kabuk yapıların düşük ve yüksek deformasyon hızlarında ezilme testleri ile başlanmıştır. Bu testler ile hem nümerik modelde kullanılacak olan malzeme modeli parametrelerinin doğrulanması yapılmış hem de yapıların enerji emme karakteristikleri incelenmiştir. Ayrıca bu yapıların sandviçlerin içerisinde çoklu olarak kullanılması durumundaki enerji emme seviyeleri hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Çoklu yapıların kullanılmasıyla elde edilecek test sonuçlarında sınırlandırma etkisinin deformasyon ve enerji emme özellikleri üzerine olan etkinliği de görülmüştür.

Testlere iç çekirdek yapıların (24.85 mm ilk boy) 10^{-3} s^{-1} , 10^{-2} s^{-1} ve 10^{-1} s^{-1} şekil değiştirme hızlarında ezilmeleri ile başlanmıştır. Her şekil değiştirme hızı için beşer adet numune test edilmiştir. Şekil 51'de iç çekirdek yapılara ait kuvvet - yer değiştirme eğrileri sunulmuştur. Eğriler incelendiğinde; iç çekirdek yapının tepesindeki küresel bölgenin ezilmesi sırasında kuvvet artışının lineer olarak arttığı ve ezilmenin tamamlanmasından sonra kat oluşumunun meydana geldiği görülmektedir. Kat oluşumu, kuvvet deformasyon eğrisinde pik oluşumu ile kendini göstermektedir. Deformasyonun ilerleyişi ile birlikte yeni katların oluşumları devam etmiştir ve bu durum kendisini kuvvet deformasyon eğrilerinde lokal maksima ve minima noktaları olarak göstermiştir. İlk katın oluşumundaki simetrik deformasyon modu ilerleyen kat oluşumlarında yaklaşık üçgen kesite geçerek kendini göstermiştir (Şekil 52). En son katın oluşumundan sonra; çekirdek malzemenin ilk katının oluşması esnasında gözlemlenen içe doğru katlanmış tepe noktası, ezme kafalarına temas ederek yeniden yukarıya doğru deforme olmaktadır (Şekil 52).

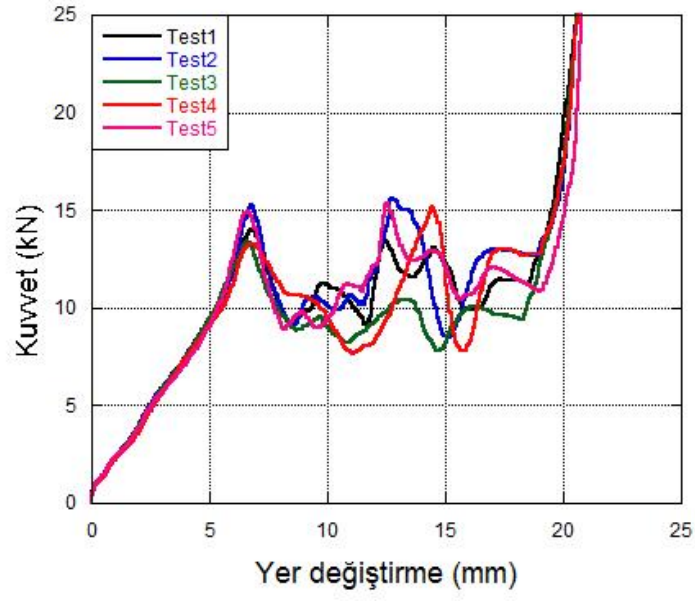
Kuvvet deformasyon eğrileri incelendiğinde statik şekil değiştirme hız aralığında iç çekirdek malzemenin deformasyon karakteristiğinin şekil değiştirme hızına bağlı olarak önemli miktarda değişmediği tespit edilmiştir. Şekil 52'de deneysel ve nümerik sonuçlar beraber verilmiştir. Şekillerden görülebileceği gibi nümerik model deneysel sonucu oldukça başarılı şekilde yakalamaktadır. Hem kuvvet deformasyon eğrisi hem de deformasyon modları deneysel sonuçlarla oldukça tutarlıdır. Nümerik modelin geçerliliği tespit edildikten sonra model sonuçları güvenilir bir şekilde farklı konfigürasyonlar için kullanılacaktır. Burada esas amaçlardan birisi yapıları, farklı yükleme koşullarına ve hızlarına nümerik olarak maruz bırakabilme esnekliğidir. Aynı zamanda deneysel olarak tespiti oldukça zor ve hatta bazıları imkânsız olan gerilme ve şekil değiştirme bileşenlerinin zamana bağlı değişimleri, temas kuvvetleri, farklı komponentlerin enerji emilimlerine katkısı vb. gibi birçok hayati ekstra bilgiyi nümerik modelden elde etmek mümkündür.



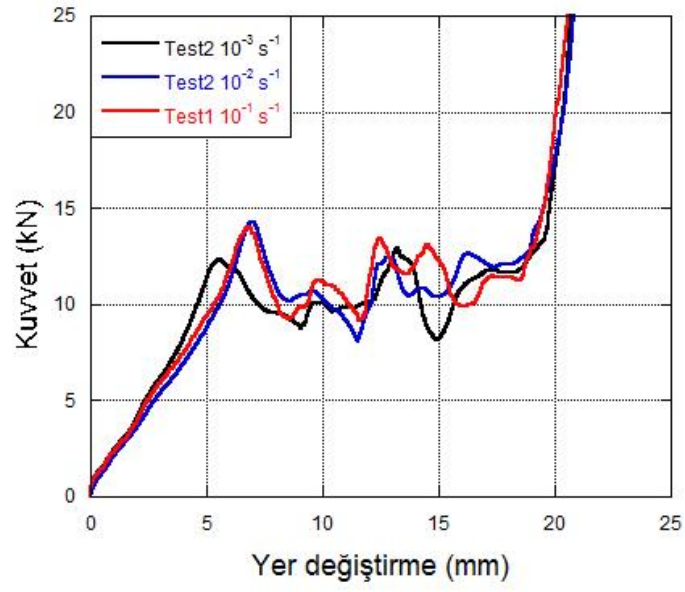
(a)



(b)

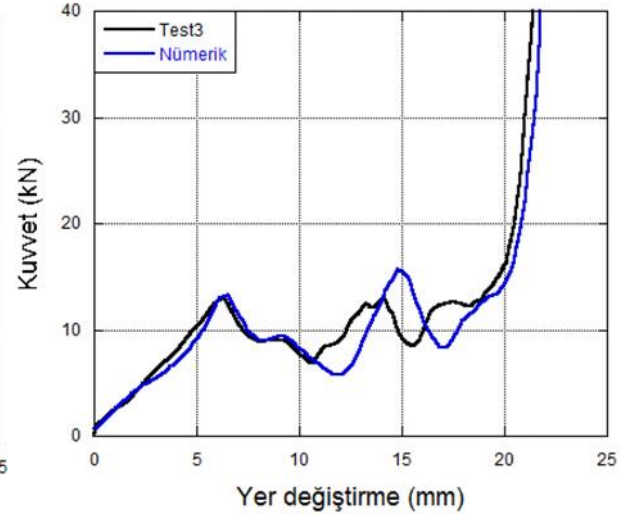
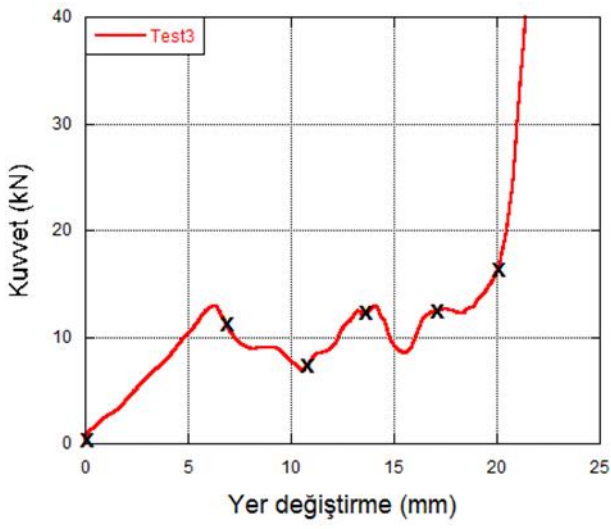


(c)



(d)

Şekil 51. İç çekirdek statik ezilme test sonuçları; (a) 10^{-3} s^{-1} , (b) 10^{-2} s^{-1} , (c) 10^{-1} s^{-1} ve (d) şekil değiştirme hızına bağlı değişim.



0 mm



6.8
mm

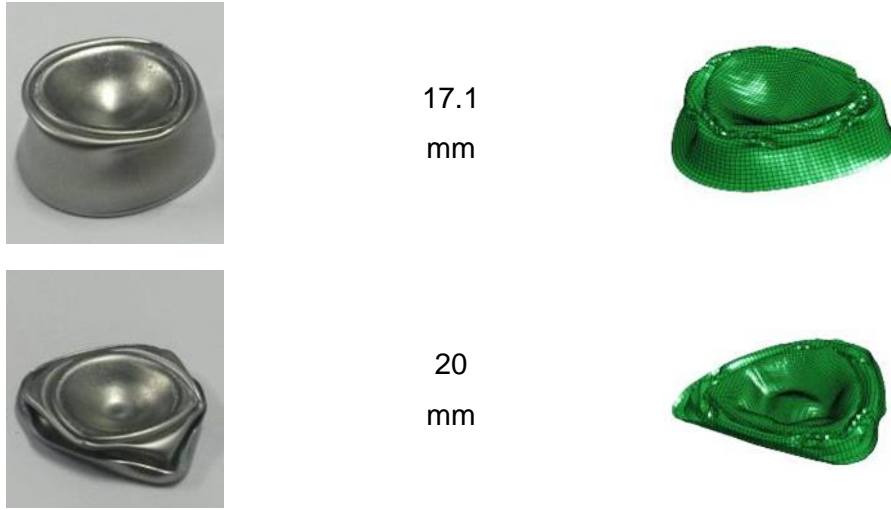


10.8
mm



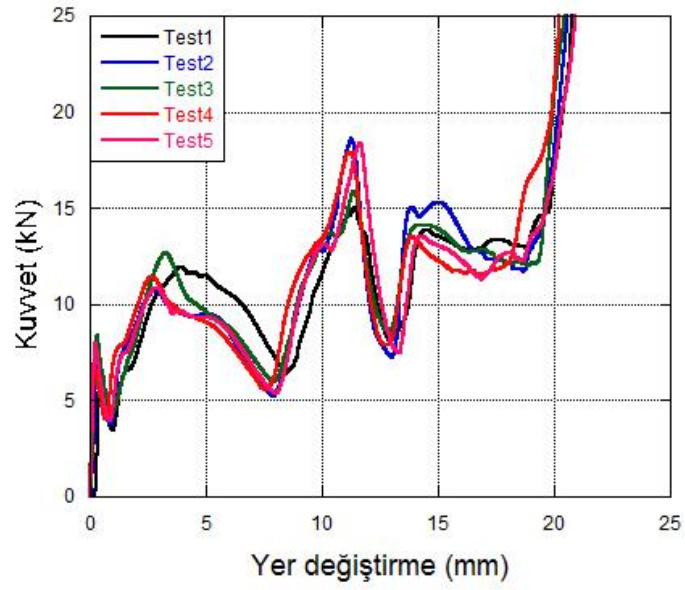
13.6
mm



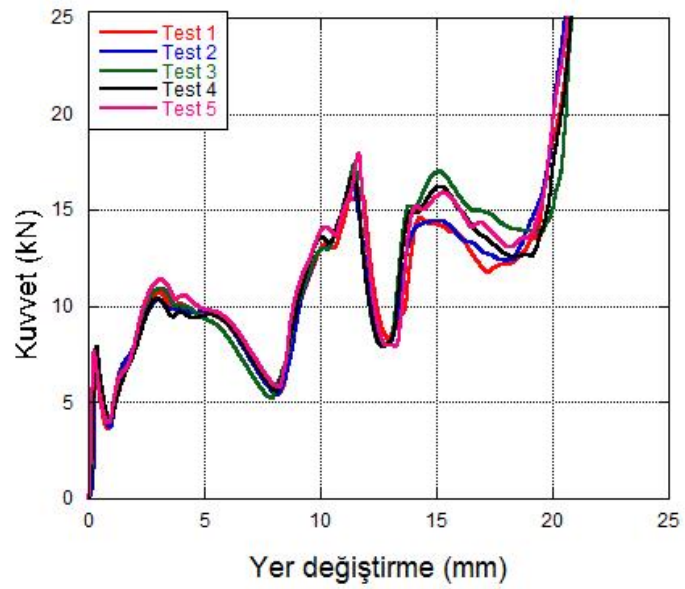


Şekil 52. İç çekirdek deformasyon tarihçesi.

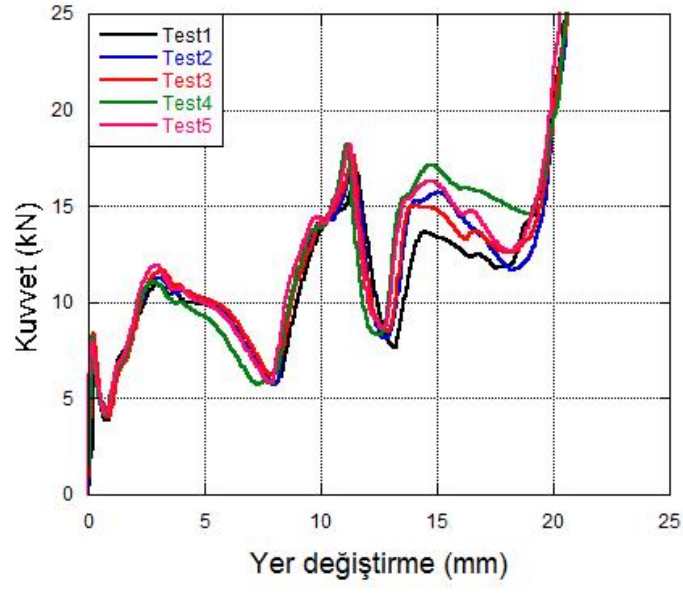
Testlere dış kabuk yapıların (24.90 mm ilk boy) 10^{-3} s^{-1} , 10^{-2} s^{-1} ve 10^{-1} s^{-1} şekil değiştirme hızlarında ezilmeleri ile devam edilmiştir. Her şekil değiştirme hızı için beşer adet numune test edilmiştir. Şekil 53'de dış kabuk yapılar için kuvvet - yer değiştirme eğrileri sunulmuştur. Kuvvet deformasyon eğrileri incelendiğinde dış kabuk yapının üst yüzeyinde içe doğru kıvrılmanın meydana gelmesiyle bir ilk pik oluşumu gözlemlenmektedir. Deformasyonun ilerleyişi ile birlikte ilk katın oluşumu tamamlanmaktadır. İlk katın oluşumundan sonra diğer katların oluşumlarına karşılık gelen lokal maksima ve minima noktaları gözlemlenmiştir. Dış kabuk yapının, ilk katın oluşumundan sonra yaklaşık bir ortalama kuvvet etrafında salınan kararlı bir ezilme karakteristiğine sahip olduğu tespit edilmiştir. Şekil 54'de nümerik model sonuçları deneysel kuvvet deformasyon eğrileri ve deformasyon profilleri ile karşılıklı olarak verilmiştir. Nümerik model deneysel davranışı oldukça başarılı bir şekilde yakalamaktadır. Sonuçlar incelendiğinde dış kabuk yapının da statik deformasyon hızlarında davranışının şekil değiştirme hızına bağlı olarak önemli miktarda değişmediği tespit edilmiştir.



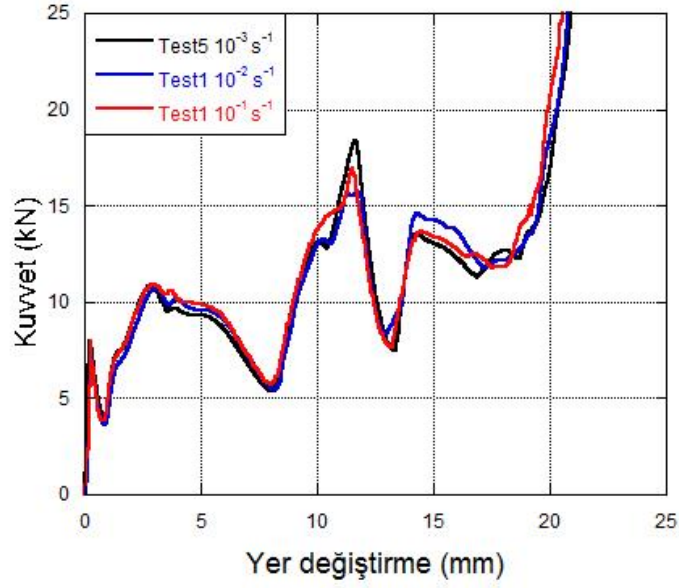
(a)



(b)

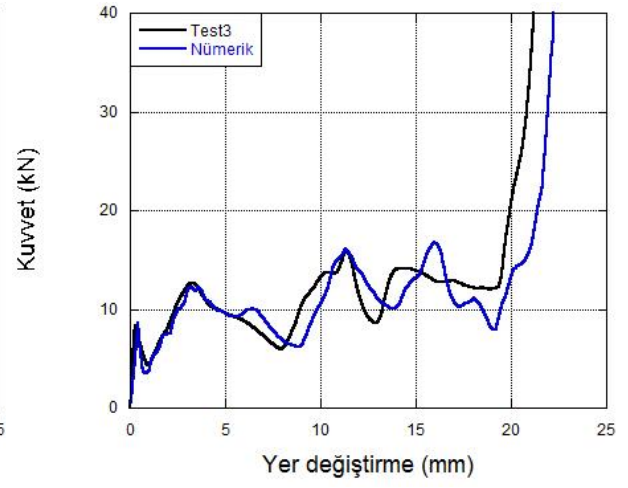
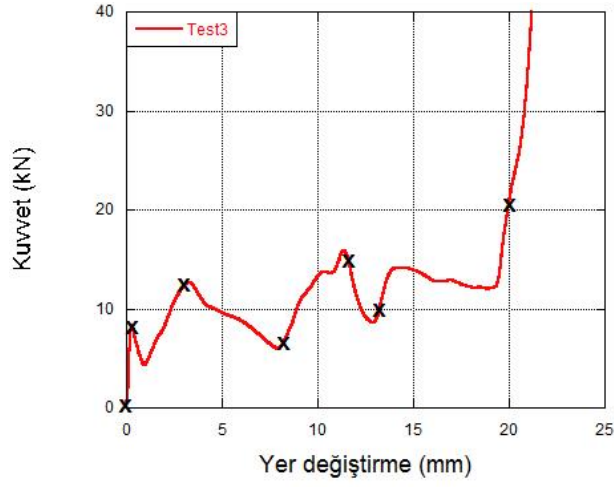


(c)



(d)

şekil 53. Dış kabuk statik ezilme test sonuçları; (a) 10^{-3} s^{-1} , (b) 10^{-2} s^{-1} , (c) 10^{-1} s^{-1} ve (d) şekil değiştirme hızına bağlı değişim.



0 mm



0.3
mm



3 mm

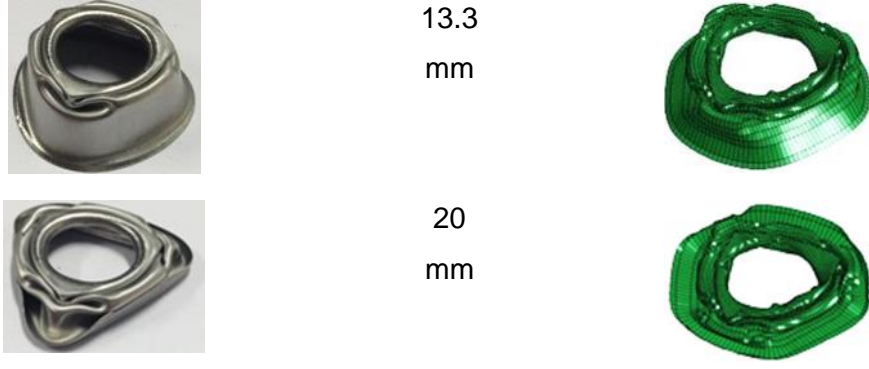


8.2
mm



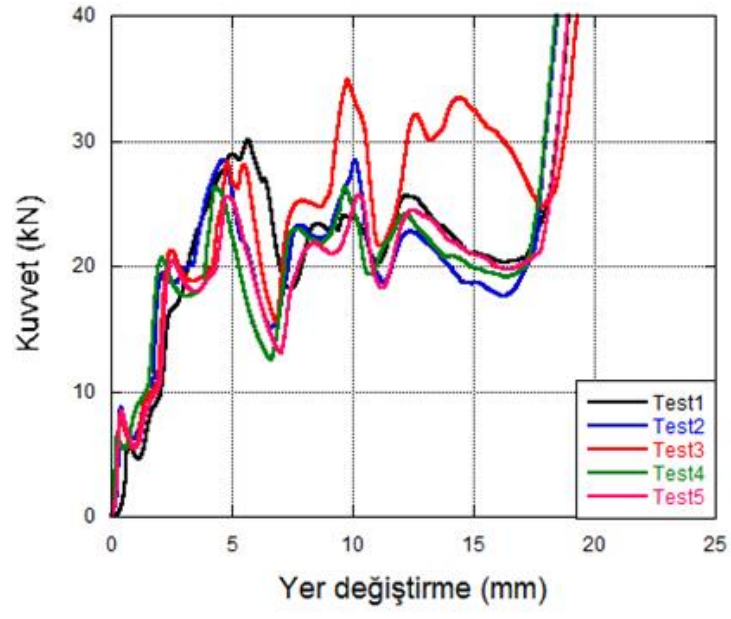
11.6
mm



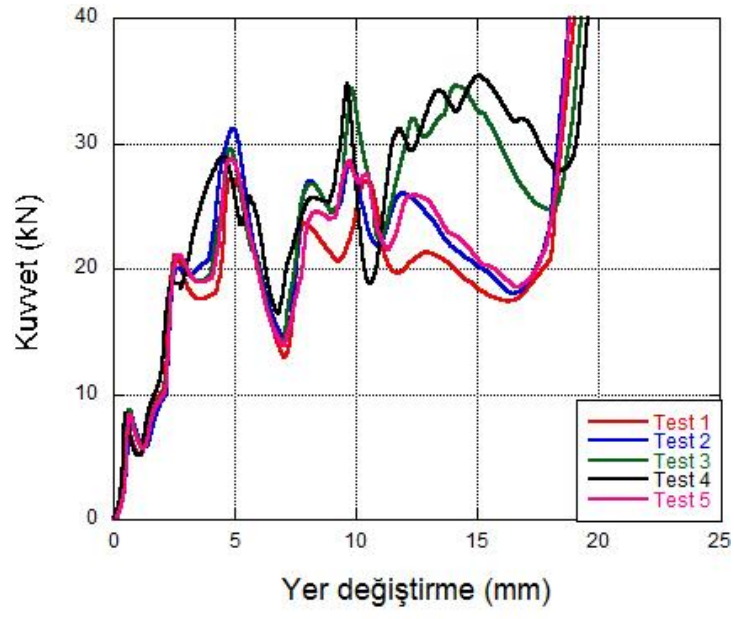


Şekil 54. Dış kabuk deformasyon tarihçesi.

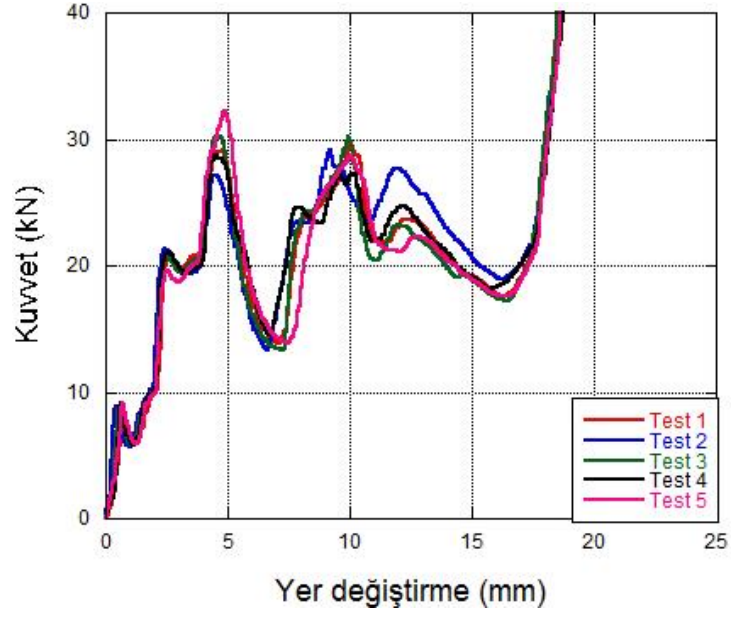
Statik ezilme testleri balan yapının farklı şekil değiştirme hızlarındaki testleriyle tamamlanmıştır (Şekil 55). Kuvvet deformasyon eğrilerinin profilleri incelendiğinde ezilme davranışının başlangıç bölgesinin dış kabuğun tek başına ezilme karakterine benzediği tespit edilmiştir. Deformasyonun ilerleyişi ile birlikte, balan yapısında mevcut dış kabuk ve iç çekirdek birbirleri ile etkileşime girerek deforme olmaktadır. Yapının genel ezilme karakteri ortalama bir kuvvet değeri etrafında meydana gelen lokal maksima ve minimalar şeklinde olmuştur. Deformasyonun sonlarında densifikasyona geçmeden hemen önceki son katın oluşumunda yapıda global eğilme etkisi meydana gelmekte ve bu durum eğrinin son bölgesinde testler arasında az miktarda da olsa bir varyasyon şeklinde kendini göstermektedir. Şekil 56'da deneysel ve nümerik model sonuçları verilmiştir. Sonuçlardan da görülebileceği gibi model yine oldukça başarılı bir şekilde yapının hem kuvvet deformasyon davranışını hem de deformasyon tarihçesini doğrulamaktadır.



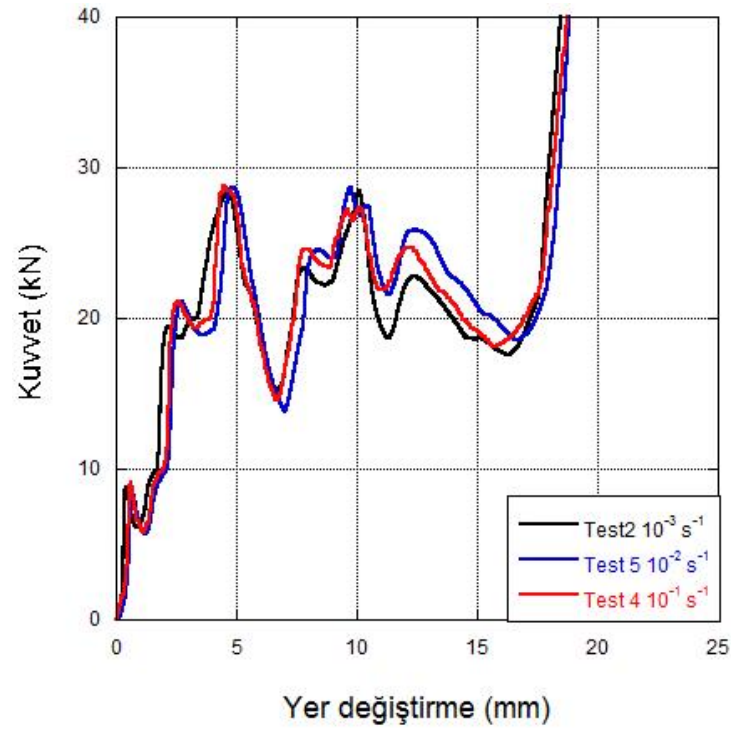
(a)



(b)

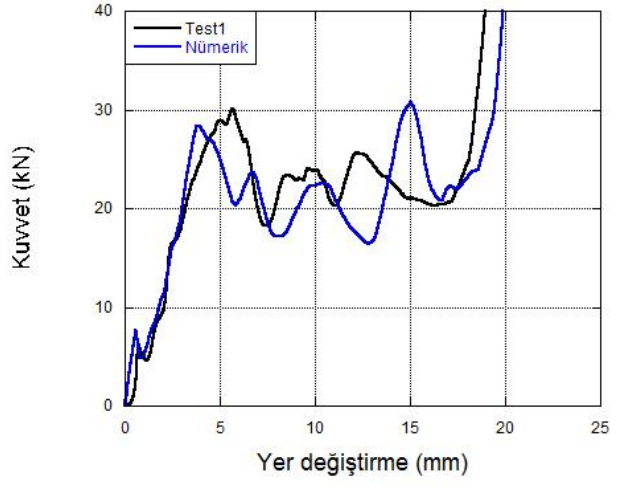
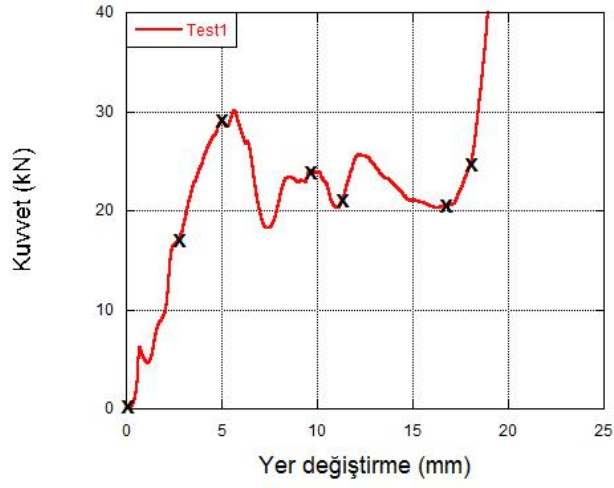


(c)



(d)

Şekil 55. Balan statik ezilme test sonuçları; (a) 10^{-3} s^{-1} , (b) 10^{-2} s^{-1} , (c) 10^{-1} s^{-1} ve (d) şekil değiştirme hızına bağlı değişim.



0 mm



2.7 mm



4.8 mm

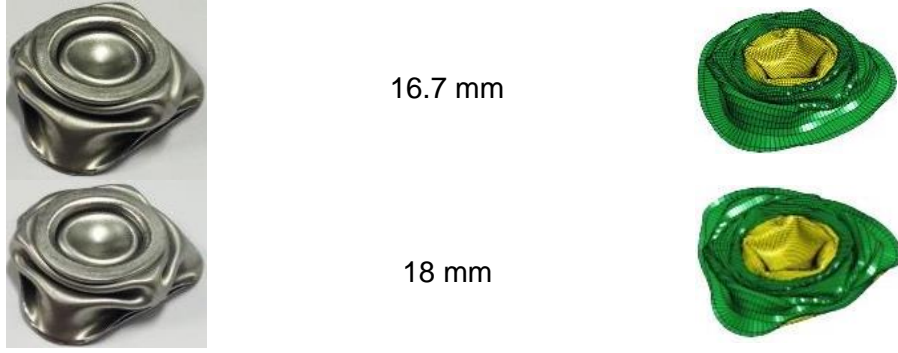


9.7 mm



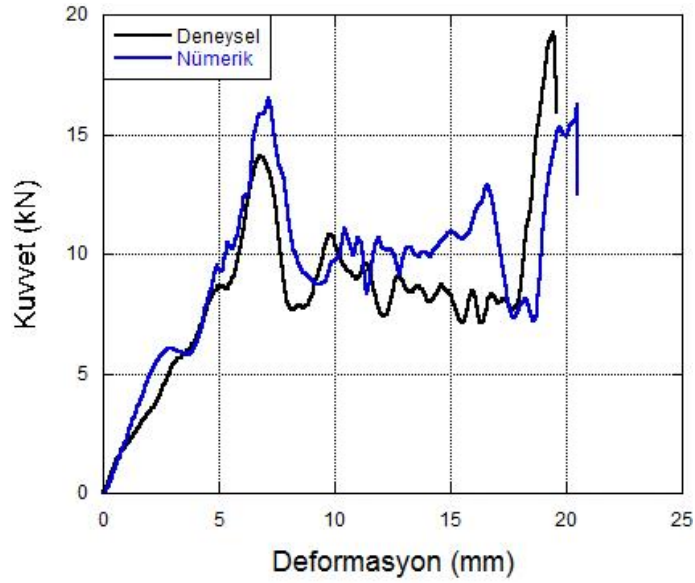
11.3 mm



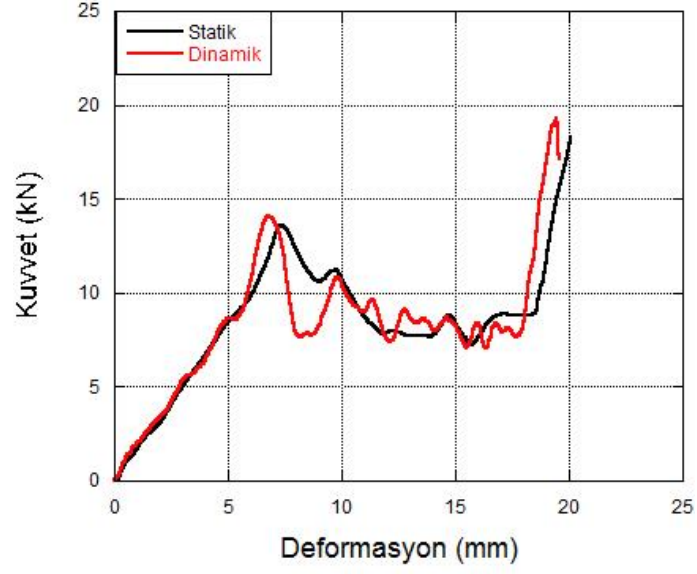


Şekil 56. Balan deformasyon tarihçesi.

Düşen ağırlık testleri iç çekirdek malzeme ile başlamıştır (Şekil 57). Statik test sonuçlarından iç çekirdek malzemenin yaklaşık olarak densifikasyon bölgesine kadar emdiği enerji değeri hesap edilmiştir. Dinamik testlerde 4 m/s çarpma hızı seçilmiş ve statik enerji seviyelerine ulaşabilmek için gerekli düşen kütle değerleri tespit edilmiştir. Tablo 4 ve 5’de hem statik hem düşen ağırlık testleri sırasında elde edilmiş sonuçlar özetlenmiştir.



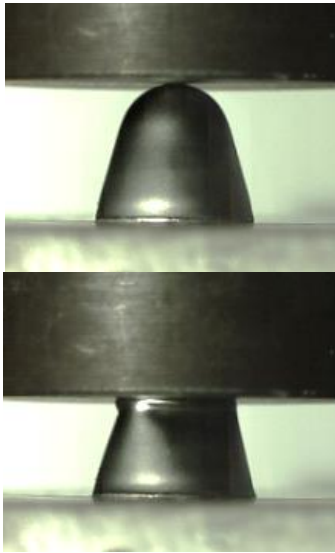
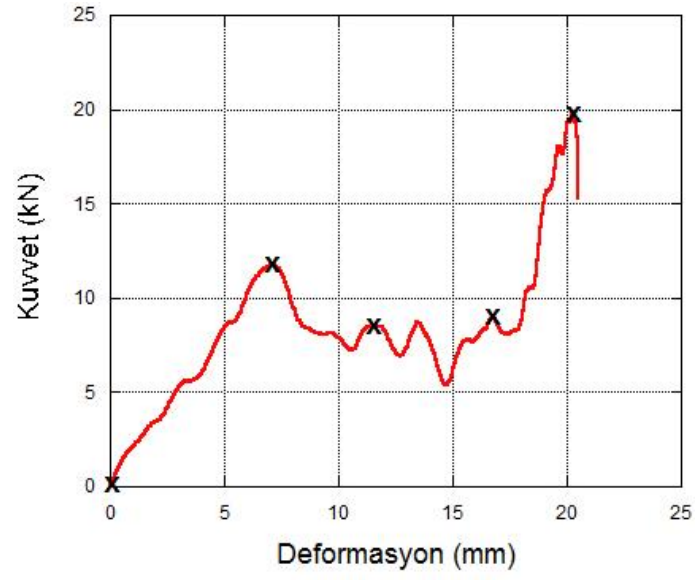
(a)



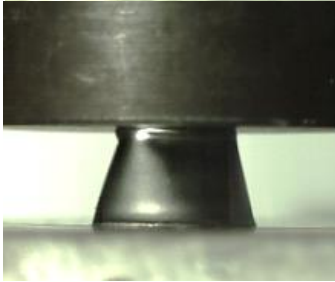
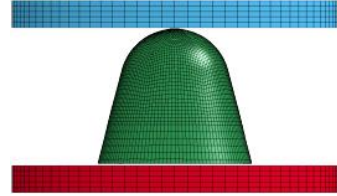
(b)

Şekil 57. (a) İç çekirdek dinamik ezilme davranışı ve (b) şekil değiştirme hızı etkisi.

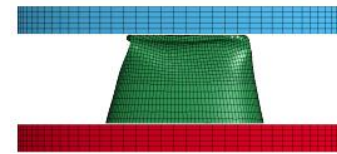
Şekil 57’de deneysel ve nümerik kuvvet deformasyon eğrileri sunulmuştur. Şekil 58’de ise deneysel ve nümerik deforme edilmiş numuneler verilmiştir. Modelin deneysel sonuçları başarıyla yakaladığı görülmektedir.



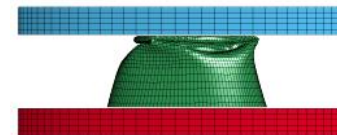
0 mm



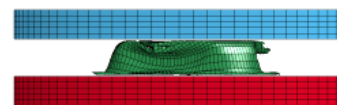
7.1 mm



11.5 mm

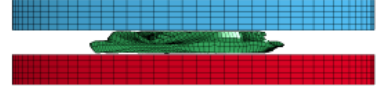


16.8 mm



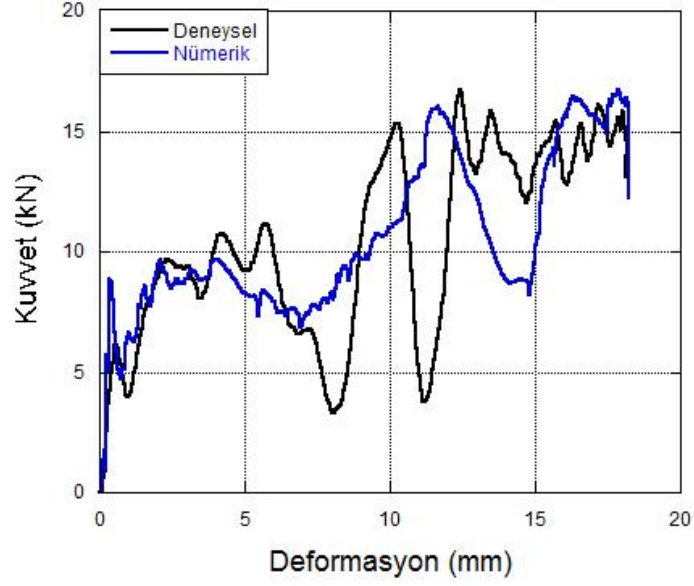


20.5 mm

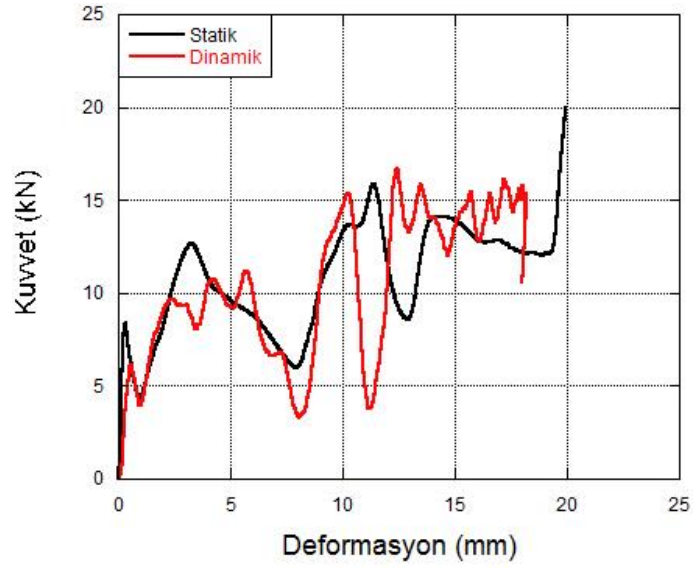


Şekil 58. İç çekirdek dinamik ezilme tarihçesi.

Şekil 59'da ise dış kabuğa ait deneysel ve nümerik kuvvet deformasyon eğrileri sunulmuştur. Şekil 60'da ise deneysel ve nümerik deforme edilmiş numuneler verilmiştir. Modelin deneysel sonuçları başarıyla yakaladığı görülmektedir.

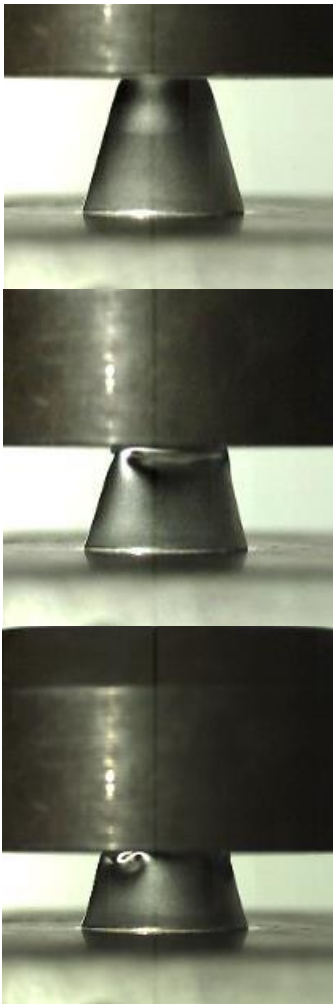
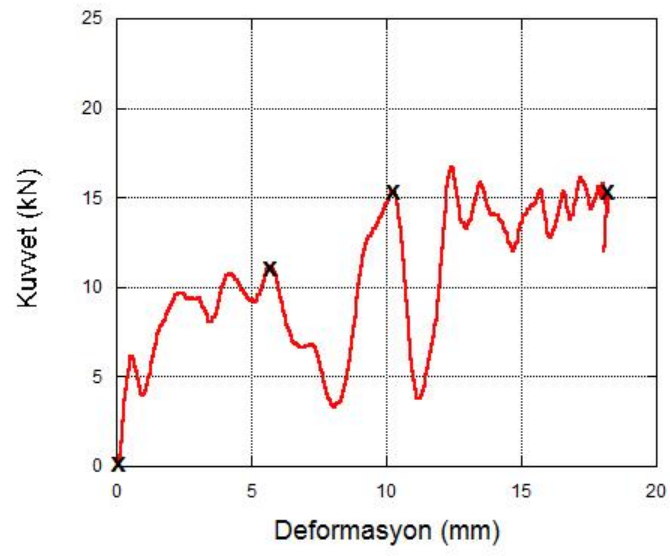


(a)

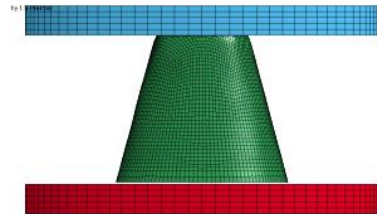


(b)

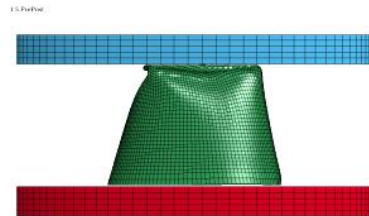
Şekil 59. (a) Dış kabuk dinamik ezilme davranışı ve (b) şekil değiştirme hızı etkisi.



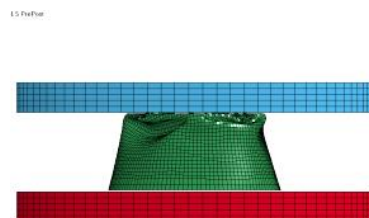
0 mm



5.7 mm

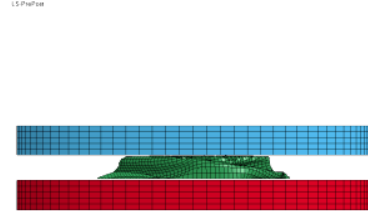


10.2 mm



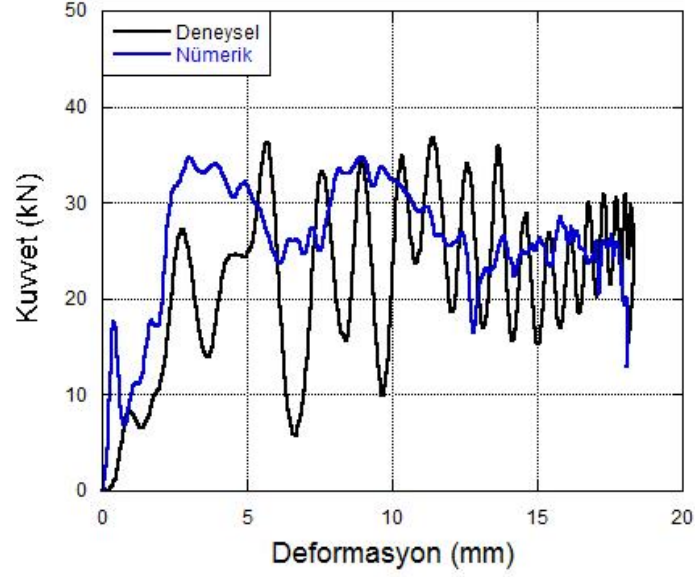


18.2 mm

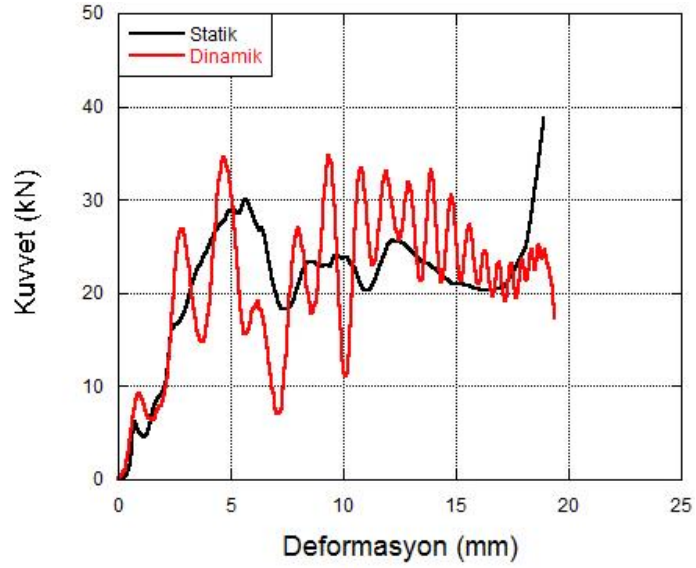


Şekil 60. Dış kabuk dinamik ezilme tarihçesi.

Şekil 61'de ise balan için deneysel ve nümerik kuvvet deformasyon eğrileri sunulmuştur. Şekil 62'de ise deneysel ve nümerik deforme edilmiş numuneler verilmiştir. Modelin deneysel sonuçları başarıyla doğruladığı görülmektedir.

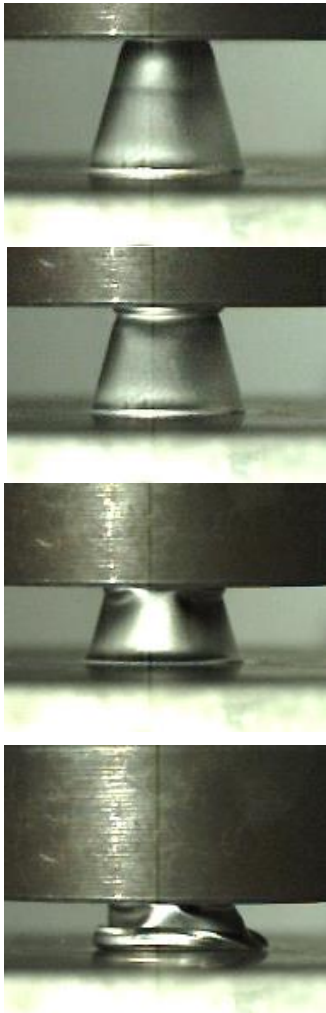
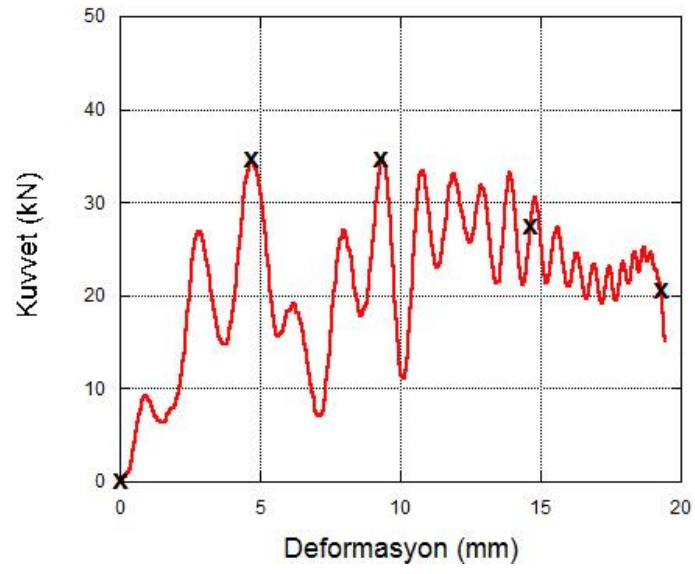


(a)

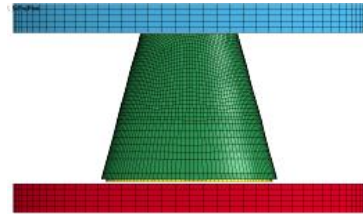


(b)

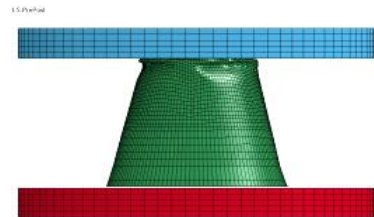
Şekil 61. (a) Balan dinamik ezilme davranışı ve (b) şekil değiştirme hızı etkisi.



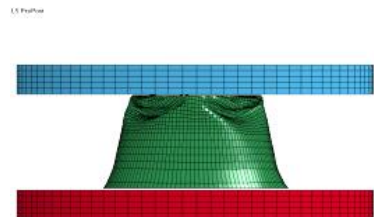
0 mm



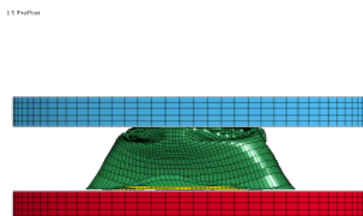
4.7 mm



9.4 mm

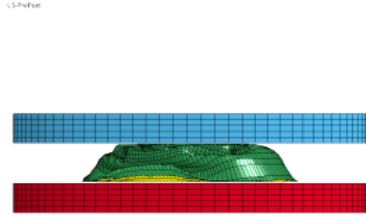


14.6 mm





19.6 mm



Şekil 62. Balan dinamik ezilme tarihçesi.

Aşağıdaki tablolarda deneysel sonuçlar özetlenmiştir.

Tablo 4. Statik testler sonucunda malzemeler tarafından emilen enerji.

Numune	P_i (kN)	P_{mean} (kN)	P_{max} (kN)	Enerji (J)	Ezilme miktarı (mm)	SAE (kJ/kg)	SAE (kJ/kg) @18.2 mm
İç çekirdek	12.96	9.04	12.96	171.30	18.95	26.47	25.03
Dış kabuk	8.35	10.69	15.87	209.36	19.58	30.96	28.45
Balan	6.15	20.76	30.03	382.82	18.44	28.92	28.41

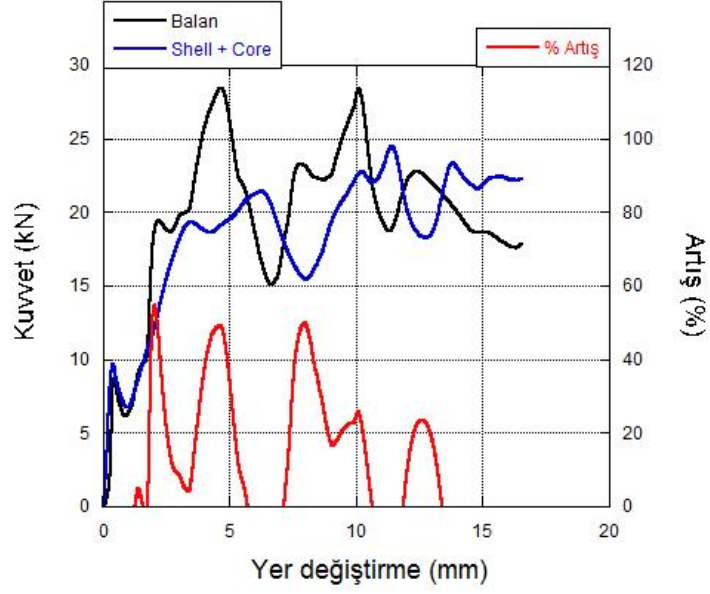
Tablo 5. Düşen ağırlık testleri sonucunda malzemeler tarafından emilen enerji.

Numune	P_i (kN)	P_{mean} (kN)	P_{max} (kN)	Energy (J)	Ezilme miktarı (mm)	SAE (kJ/kg)	SAE (kJ/kg) @18.2 mm	Test şartları
İç çekirdek	11.75	8.14	11.75	165.35	20.32	25.55	20.53	4 m/s, 26.63 kg
Dış kabuk	6.09	10.33	16.71	188.05	18.20	27.81	27.81	4 m/s, 28.38 kg
Balan	9.17	21.21	34.73	401.80	18.94	30.35	29.02	4 m/s, 59.38 kg

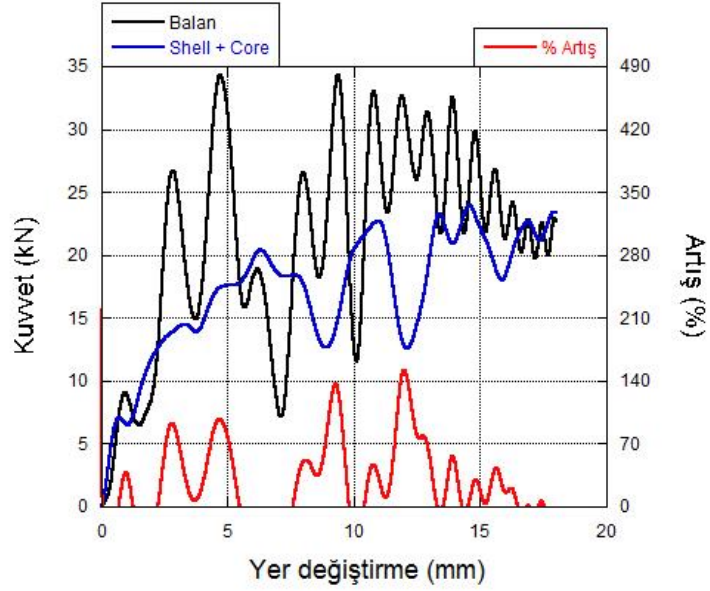
Statik ve dinamik test sonuçları incelendiğinde benzer deformasyon seviyelerinde en az enerjiyi, iç çekirdeğin ve en çok enerjiyi de balan yapısının emdiği tespit edilmiştir. Birim ağırlık başına emilen enerji değerleri dikkate alındığında ise statik deformasyon hızlarında dış kabuk ve balan yapısının enerji emmede, iç çekirdekten daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Dinamik deformasyon hızlarında ise balan yapısı bütün yapıların içerisinde enerji emme açısından en verimli konfigürasyondur. Yine deformasyon hızının artışıyla birlikte balan yapısının enerji emme karakteristiği iyileşirken diğer iki yapının ki azalmaktadır.

Nümerik model sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumluluğunun görülmesinden sonra nümerik modellerle artık bu yapıların farklı kombinasyonlarının farklı yükleme koşulları etkisi altındaki davranışlarını incelemek mümkün olmuştur. Ayrıca deneyler sırasında kaydedilmesi ve ölçülmesi zor veya imkânsız olan bazı değişkenlerin ve yapının enerji emilim karakteristiklerinin de nümerik modeller vasıtasıyla anlaşılabilmesi mümkündür.

Balan yapısının deformasyonu sırasında iç çekirdek ve dış kabuk birlikte deforme olmakta ve iki bileşen arasında etkileşim meydana gelmektedir. Bu etkileşimin incelenmesi amacıyla yürütülecek olan ilk detaylı analiz kapsamında iç çekirdek ve dış kabuk yapıların ayrı ayrı tek başlarına ezildikleri durumlardaki kuvvet deformasyon ve enerji emme değerleri mevcut testlerle tespit edilmiştir. Balan yapısında bu iki bileşen bir arada deforme olmaktadır ve deformasyon sırasında dış kabuk, iç çekirdek malzemeyi sınırlandırmakta ve enerji emilim karakteristiğini iyileştirmektedir. Bu iyileşme miktarı sistemi oluşturan bileşenlerin tek başlarına test sonuçlarının aritmetik toplamalarının (sadece iç çekirdek + sadece dış kabuk) balan yapısının sonuçlarıyla karşılaştırılmasıyla anlaşılabilir. Şekil 63'de hem statik hem de düşen ağırlık testleri sırasında kuvvet taşıma miktarlarındaki artış sunulmuştur.



(a)

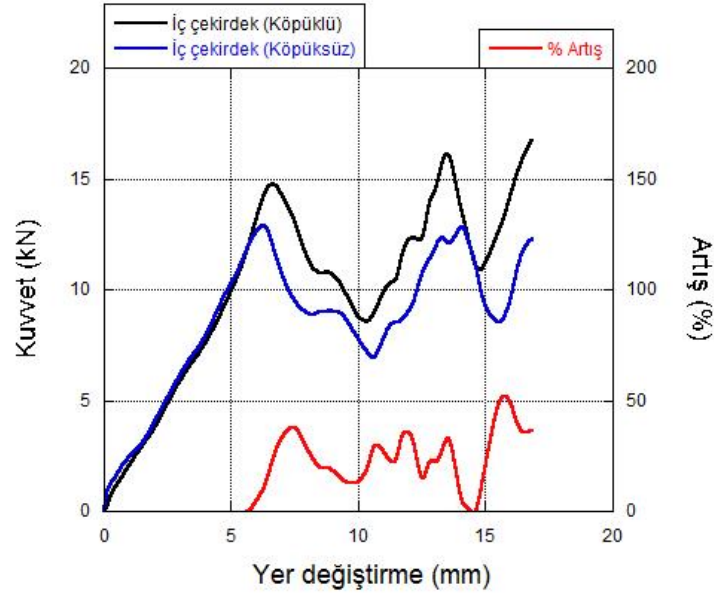


(b)

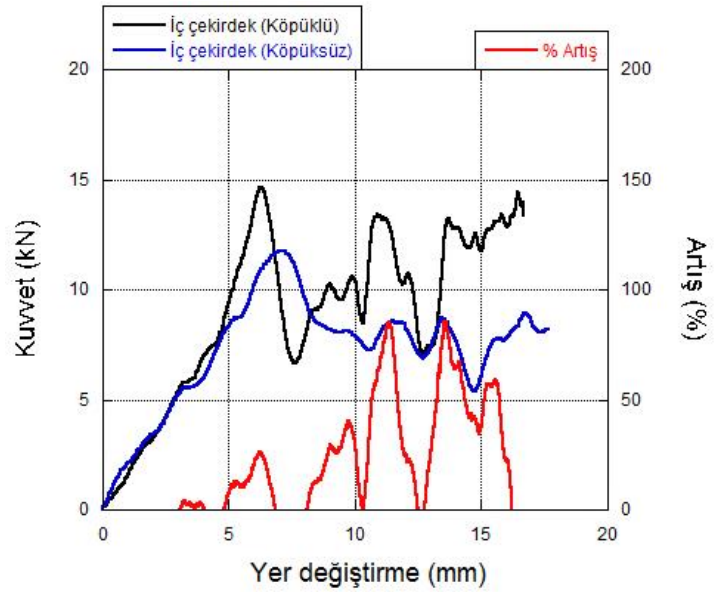
şekil 63. İ ekirdek ve dış kabuk arasındaki etkileşimden kaynaklı kuvvet artışı; (a) statik ve (b) dinamik.

Statik ezilme sırasında i çekirdek ve dış kabuk malzemenin etkileşiminden dolayı yaklaşık % 50'ye varan yük taşıma kapasitesinde artış görülmüştür. Düşen ağırlık testinde ise etkileşimden kaynaklı artış miktarı % 150 değerlerine varmıştır. şekillerden de görülebileceği gibi şekil değiştirme hızı arttıkça etkileşim miktarı artmaktadır.

Sınırlandırma ile etkileşimin bir diğer uygulaması iç çekirdek içerisine köpük doldurulması durumudur. Statik ezilme sırasında iç çekirdek yapıda bulunan köpük malzemenin etkisinden dolayı yaklaşık % 50'ye varan yük taşıma değerlerinde artış görülmüştür. Düşen ağırlık testinde ise köpük malzemeden kaynaklı artış miktarı % 80 değerlerine varmıştır. Şekillerden de görülebileceği gibi şekil değiştirme hızı arttıkça köpük malzemenin katkısı da artmaktadır (Şekil 64).



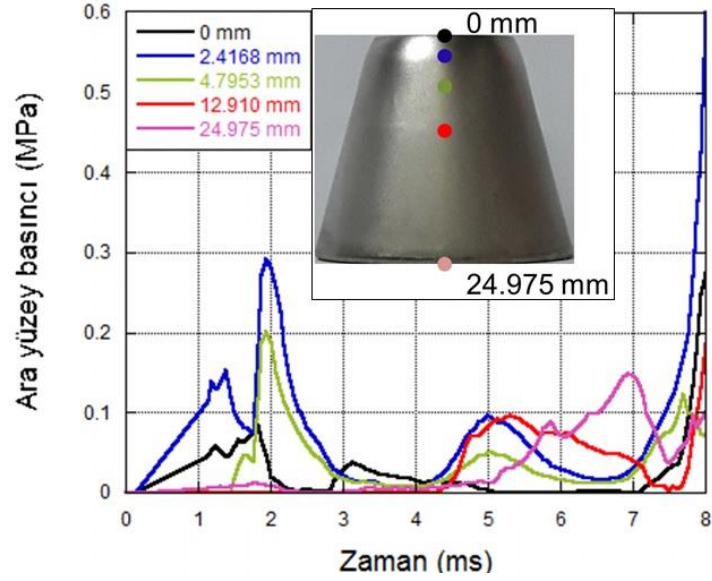
(a)



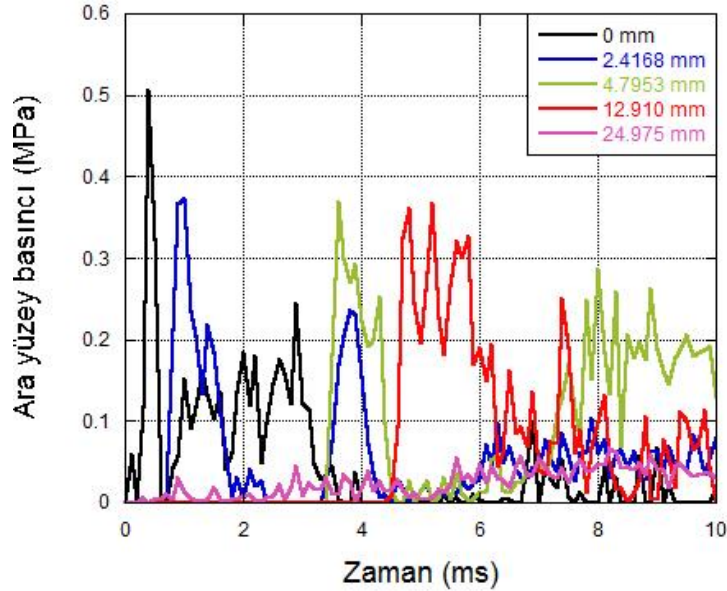
(b)

Şekil 64. Köpük ile çekirdek arasındaki etkileşimden kaynaklı kuvvet artışı; (a) statik ve (b) dinamik.

Etkileşimin daha iyi anlaşılabilmesi için nümerik modellerden daha detaylı bilgiler alabilmek mümkündür. Nümerik modelden iç çekirdek ve dış kabuk ara yüzeyinde meydana gelen ara yüzey basıncı tarihçesini farklı noktalar için okuyabilmek mümkündür. Bu basınç değeri deformasyon esnasında iki bileşen arasındaki etkileşim hakkında doğrudan fikir vermektedir. Şekil 65'de ise hem statik hem de düşen ağırlık testleri (nümerik model) için iç çekirdek-dış kabuk ara yüzeyindeki basıncının farklı noktadaki zamana bağlı değişimi verilmiştir.



(a)

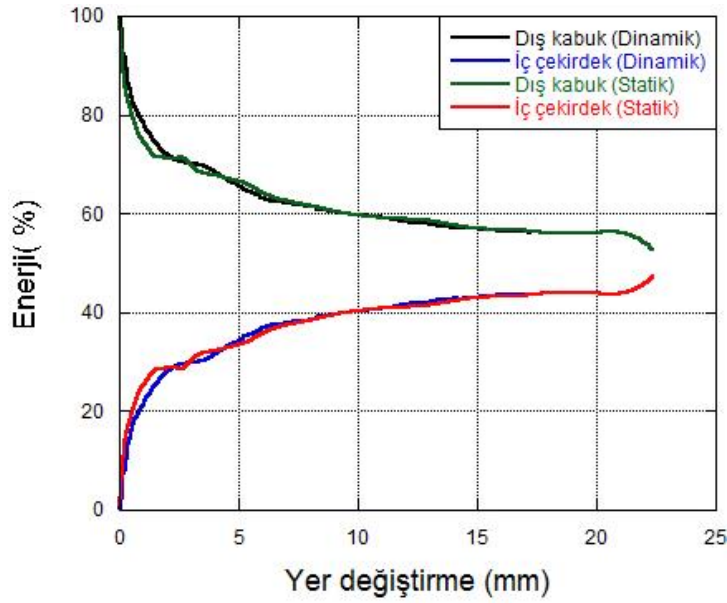


(b)

Şekil 65. Dış kabuk – iç çekirdek ara yüzey basıncı tarihçesi; (a) statik ve (b) dinamik.

Ezilme sırasında dış kabuk ve iç çekirdek özellikle katların oluşumu sırasında birbirine temas etmekte ve bu da deformasyon modunu ve emilen enerji miktarını değiştirmektedir. Yine düşen ağırlık testi ile statik test sonuçları karşılaştırıldığında ara yüzey basıncının dinamik deformasyonla arttığı tespit edilmiştir.

Nümerik model sonuçları kullanılarak balan yapıyı oluşturan bileşenlerin emdikleri enerjilerin, toplam emilen enerjiye oranını da görmek mümkündür (Şekil 66). Bu tarihenin deneysel olarak tespiti mümkün değildir ve ancak nümerik model vasıtasıyla tayin edilebilmektedir.

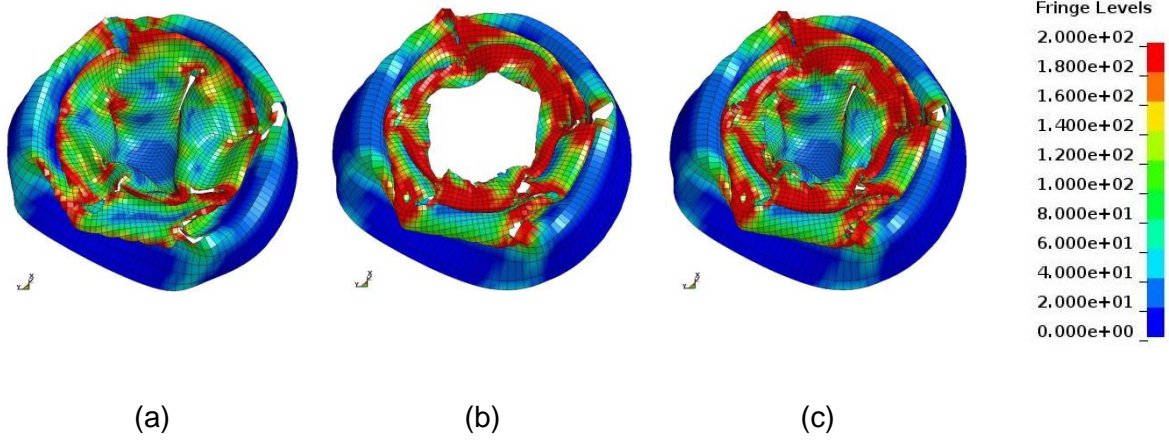


Şekil 66. Dış kabuk ve iç çekirdek yapılarının enerji emme oranları dağılımı.

Şekilden de görülebileceği gibi deformasyonun başlangıcında dış kabuk, iç çekirdekten daha yüksek seviyelerde enerji emmektedir. Yaklaşık olarak 10 mm ezilme değerinde toplam emilen enerjinin bileşenler arasındaki dağılımı % 60 ve % 40'dır. Bütün deformasyon tarihçesi boyunca dış kabuk iç çekirdekten daha fazla miktarda enerji emmiştir. Şekil içerisinde hem statik hem de dinamik ezilme sırasındaki enerji emme paylaşımı verilmiştir ve bu paylaşım oranının iki durum için benzer seviyelerde kaldığı görülmektedir.

Proje kapsamında yürütülen modelleme çalışmalarında sıcaklığın malzemenin mekanik özellikler üzerindeki etkisi dikkate alınmaktadır. Bu durumun daha yüksek deformasyon hızlarındaki özellikle patlama etkilerine karşı davranışların incelenmesinde oldukça önem taşımaktadır ve hali hazırdaki bütün modellerde bu etki hesaba katılmaktadır.

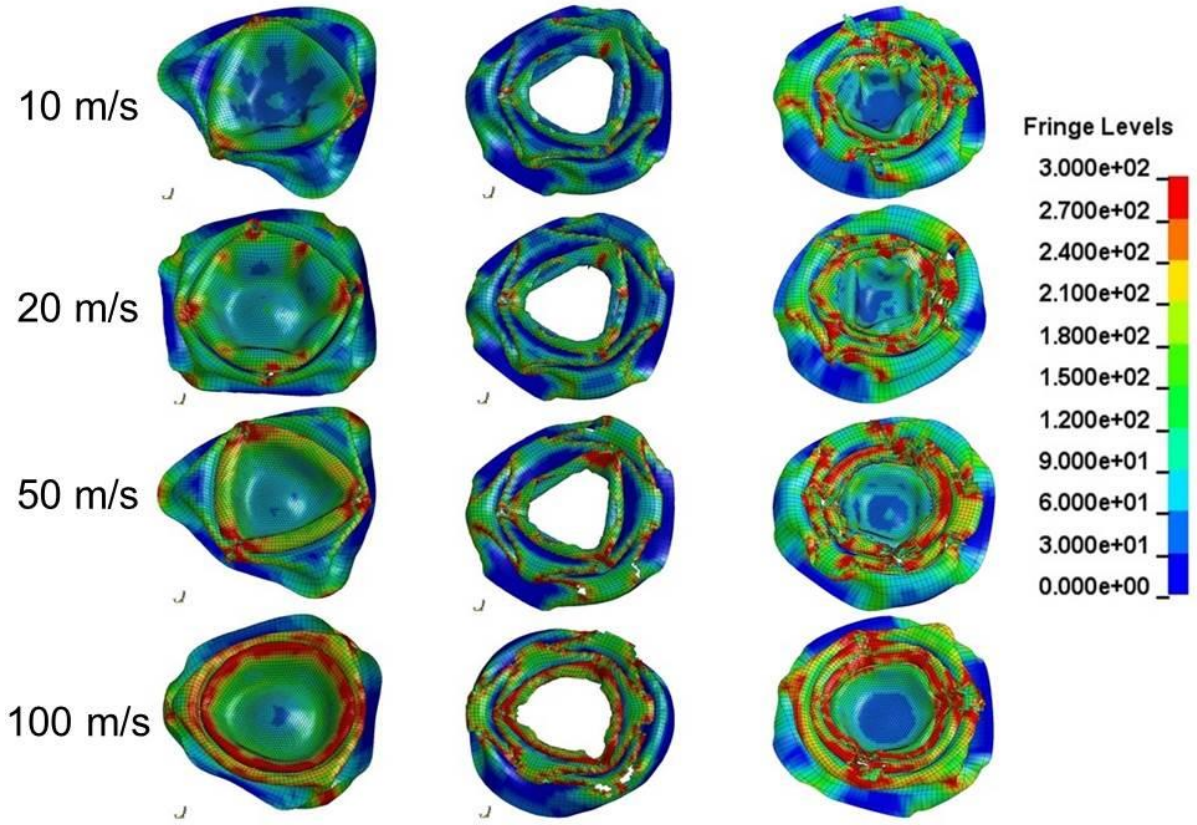
Düşen ağırlık testi nümerik model sonuçları kullanılarak aynı ezilme miktarı için iç çekirdek, dış kabuk ve balan yapıda meydana gelen sıcaklık artışları Şekil 67'de verilmiştir.



Şekil 67. Düşen ağırlık testi sırasında sıcaklıktaki artış; (a) iç çekirdek, (b) dış kabuk ve (c) balan.

Sıcaklık artış seviyelerinin bu şekil değiştirme hızlarında yaklaşık olarak 200°C seviyesinde kaldığı görülmüştür. Sıcaklık artışı özellikle katlanmanın meydana geldiği bölgelerdeki yoğun plastik deformasyondan kaynaklı olarak lokalize olmaktadır.

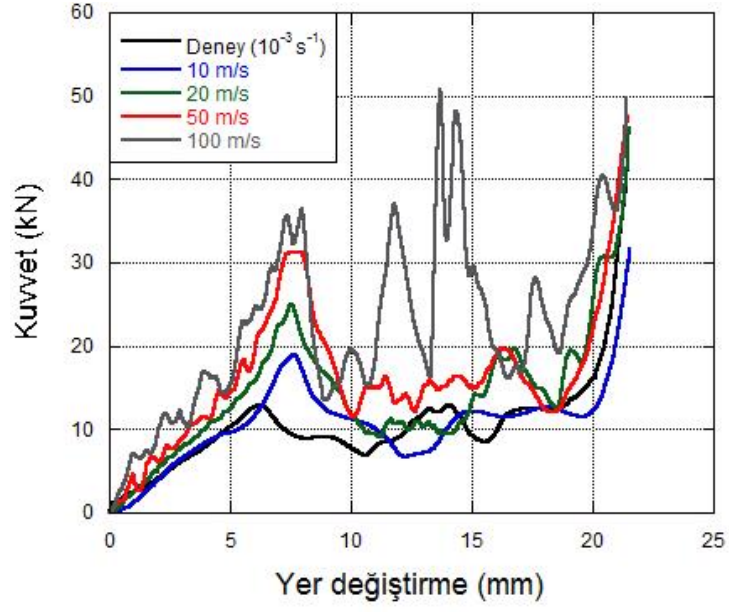
Nümerik modelleme çalışmaları kapsamında daha yüksek şekil değiştirme hızlarında yapıların davranışlarını anlayabilmek amacıyla dış kabuk, iç çekirdek ve balan yapı sabit ezilme hızları kullanılarak nümerik olarak ezilmiştir. Bu amaçla seçilen ezilme hızları 10, 20, 50 ve 100 m/s'dir. Bahsi geçen yapılara ait ezilme geometrileri sıcaklık dağılımları ile birlikte Şekil 68'de sunulmuştur.



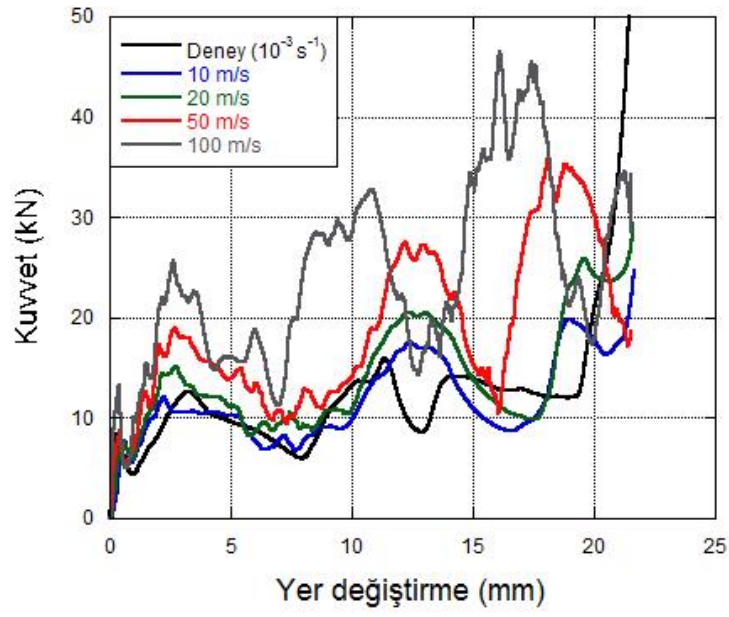
Şekil 68. Farklı çarpma hızları için sıcaklık artışındaki değişim.

Şekil değiştirme hızı arttıkça genel olarak yapıların deformasyon modları değişmektedir. Yine aynı zamanda hızın artışı ile birlikte yapıdaki sıcaklık artışı da artmaktadır.

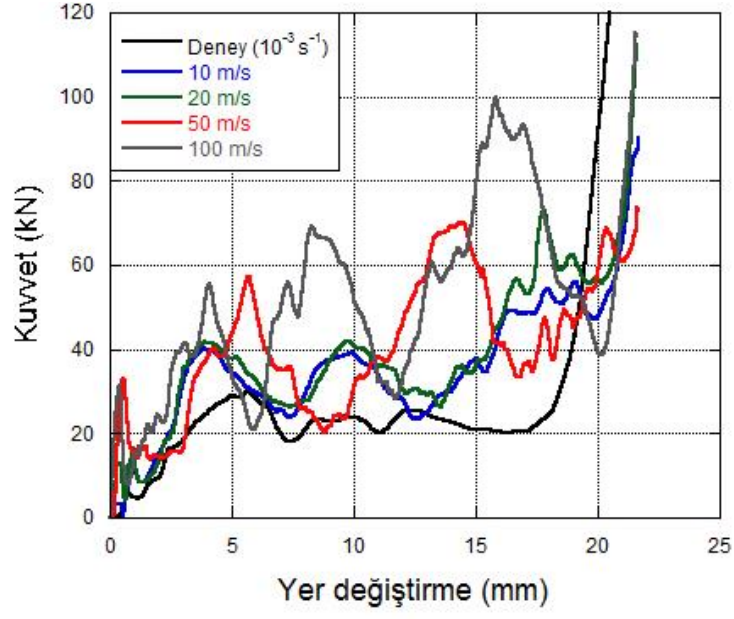
Şekil 69'da ise iç çekirdek, dış kabuk ve balan yapıya ait kuvvet deformasyon eğrileri farklı çarpma hızları için verilmiştir. Karşılaştırma açısından her yapıya ait statik ezilme eğrileri de sunulmuştur. Genel olarak çarpma hızının artışı ile birlikte yapının taşıdığı kuvvet seviyeleri artmaktadır. 304L paslanmaz çeliği yüksek şekil değiştirme hassasiyeti gösteren bir malzemedir. Bu artışın önemli sebeplerinden birisi budur. Yine yapının geometrisi gereği mikro-atalet etkisi de oldukça önemlidir. Bu artışların bireysel olarak etkinliklerin incelenmesi nümerik modellerde şekil değiştirme hassasiyeti değişkenin modelde dikkate alınıp alınmaması ile tespit edilebilir.



(a)



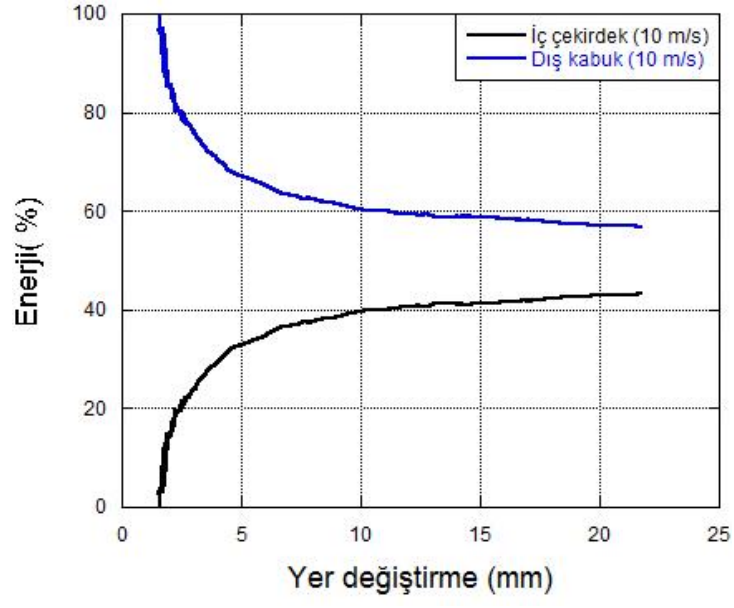
(b)



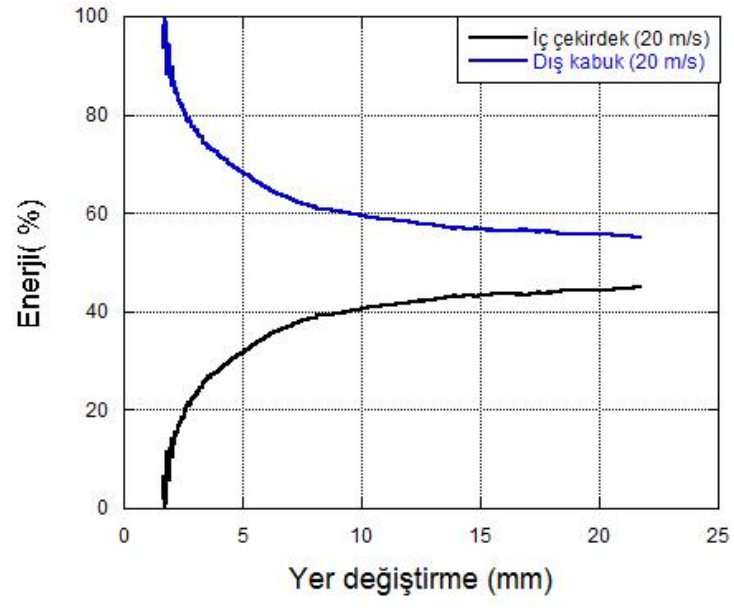
(c)

Şekil 69. Farklı arpma hızlarında kuvvet-deformasyon eğrileri; (a) i çekirdek , (b) dış kabuk ve (c) balan.

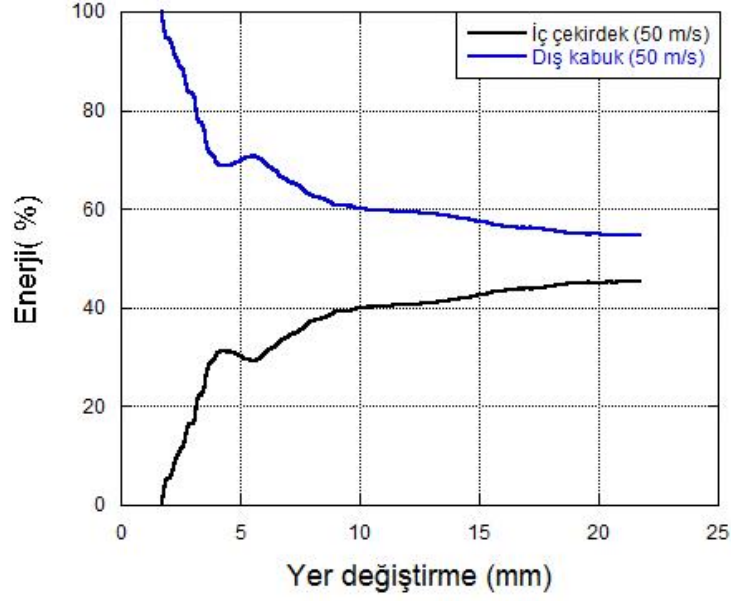
Nümerik modeller kullanılarak balan yapıya ait bileşenlerin enerji emme yüzdelerinin çarpma hızına bağlı değişimini görmek mümkündür (Şekil 70). Çarpma hızı arttıkça deformasyon sonunda bileşenler arasındaki enerji emilim değerleri arasındaki fark azalmaktadır.



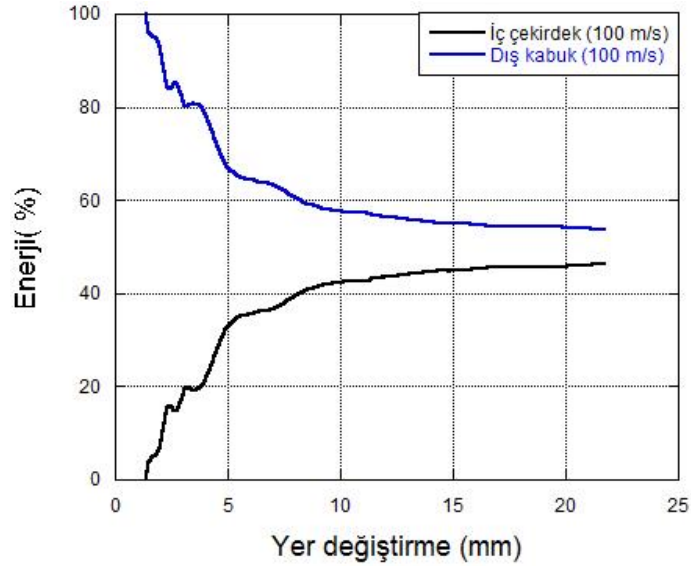
(a)



(b)



(c)

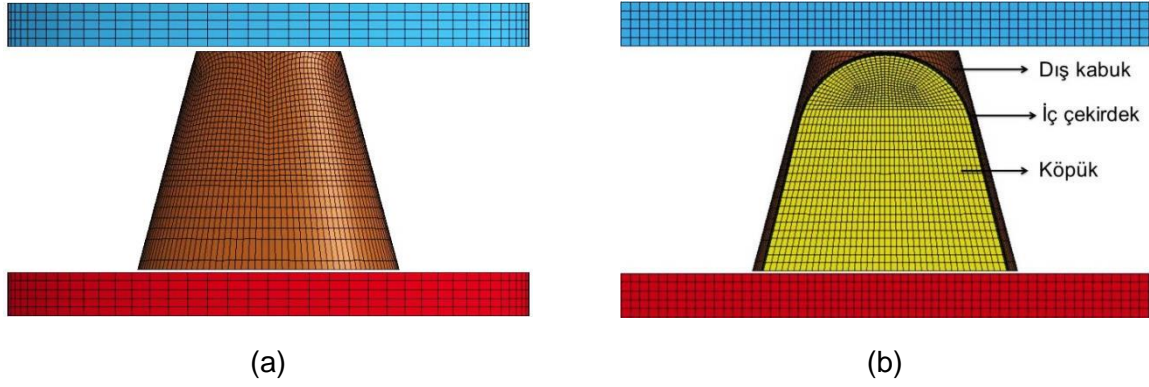


(d)

şekil 70. Farklı arpma hızlarında balandaki dış kabuk ve i çekirdek yapının enerji paylaşma yüzdeleri; (a) 10 m/s, (b) 20 m/s, (c) 50 m/s ve (d) 100 m/s.

Proje kapsamında içi köpük dolgululu i çekirdek malzeme ve bu çekirdeğin kullanıldığı balan yapının statik ve dinamik deformasyon davranışları da incelenmiştir. Testlere i çekirdek ve balan yapıların 10^{-3} s^{-1} Şekil değiştirme hızında ezilmeleri ile başlanmıştır. Ayrıca köpük dolgu ihtiva eden bu yapılara ait nümerik modeller de hazırlanarak deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır. Burada esas amaç hem köpük dolgu malzemesinin enerji emme karakteristikleri üzerindeki etkinliğini incelemek hem de köpüğe ait malzeme

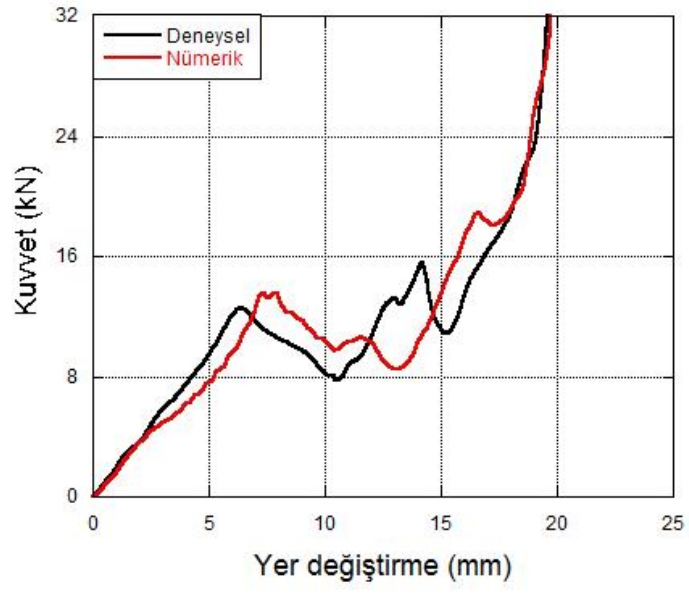
modeli seçimi ve sabitlerinin belirlenmesi metodolojisinin etkinliğini görmektir. Bu sayede köpük dolgu maddesi ihtiva eden nümerik modeller güvenle kullanılabilir. Şekil 71’de köpük ihtiva eden balan yapının nümerik modeli görülmektedir.



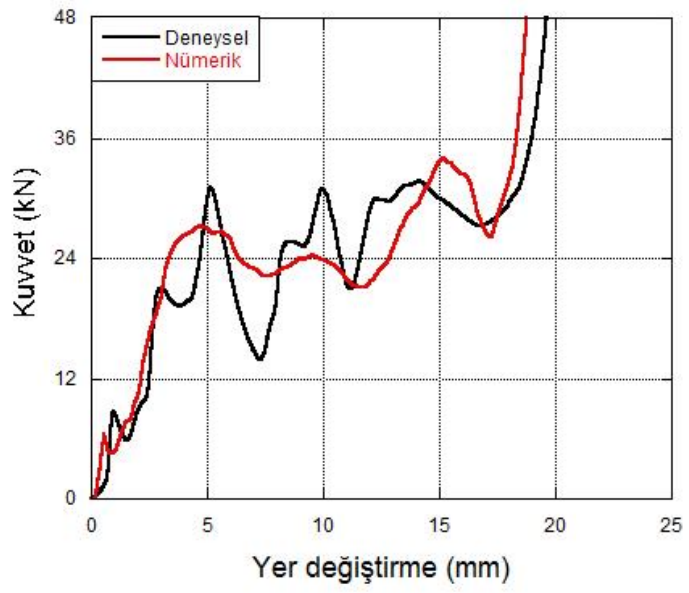
Şekil 71. Köpük ihtiva eden balan nümerik modeli; (a) tam ve (b) kesit.

Şekil 72’de yapılara ait deneysel ve nümerik kuvvet-yer değiştirme eğrileri birlikte sunulmuştur. Eğriler incelendiğinde, iç çekirdek yapının tepesindeki küresel bölgenin ezilmesi sırasında kuvvetin lineer olarak arttığı ve ezilmenin tamamlanmasından sonra kat oluşumunun meydana geldiği görülmektedir. Kat oluşumu, kuvvet-yer değiştirme eğrisinde pik ile kendini göstermektedir. Deformasyonun ilerleyişi ile birlikte yeni katların oluşumları devam etmiştir ve bu durum kendisini kuvvet-yer değiştirme eğrilerinde lokal maksima ve minima noktaları olarak göstermiştir. İlerleyen deformasyon seviyelerinde davranış içi boş yapılara göre farklılık (köpükten kaynaklı sınırlandırma etkisi) sergilemektedir (Şekil 74).

Şekillerden de görülebileceği gibi hem kuvvet-yer değiştirme eğrisi hem de deformasyon modları açısından nümerik model, davranışı oldukça başarılı şekilde yakalamaktadır. Köpük dolgu malzemesinin etkinliği deformasyonun ilerlemesiyle birlikte artmaktadır.

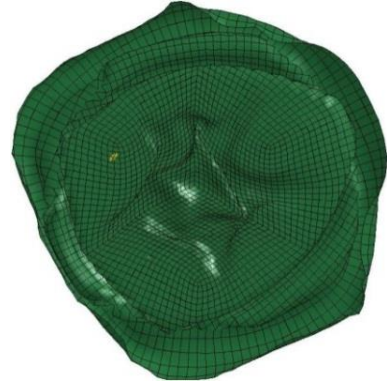


(a)

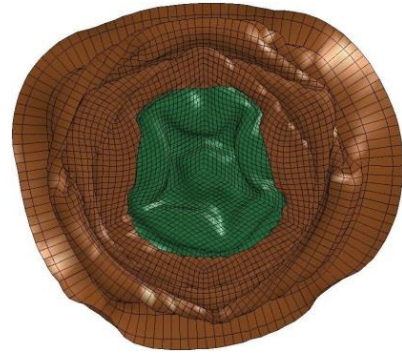


(b)

Şekil 72. Köpük ihtiva eden numunelerin statik ezilme davranışı; (a) iç çekirdek ve (b) balan.

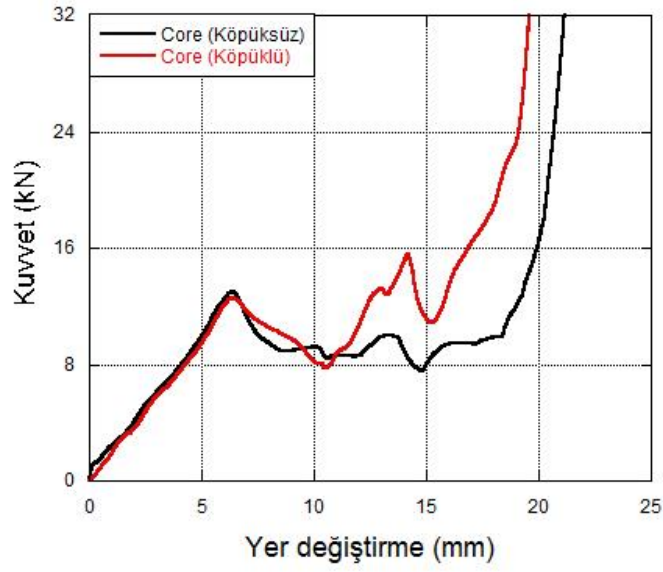


(a)

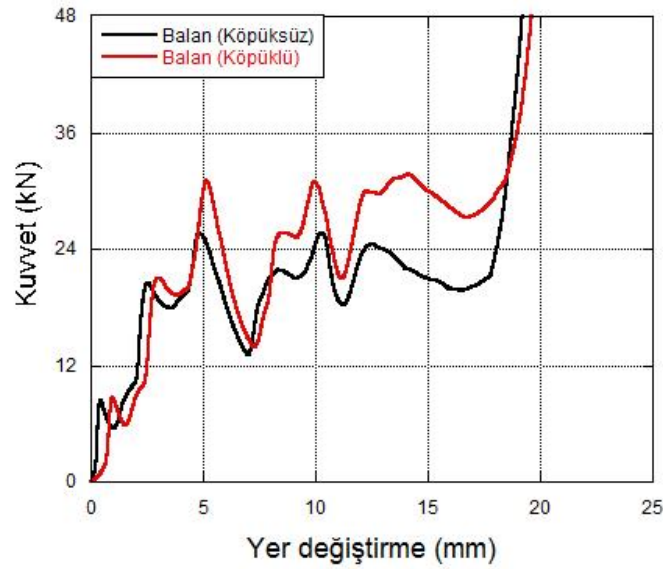


(b)

Şekil 73. Deneysel ve nümerik ezilmiş numuneler (statik); (a) iç çekirdek ve (b) balan.



(a)

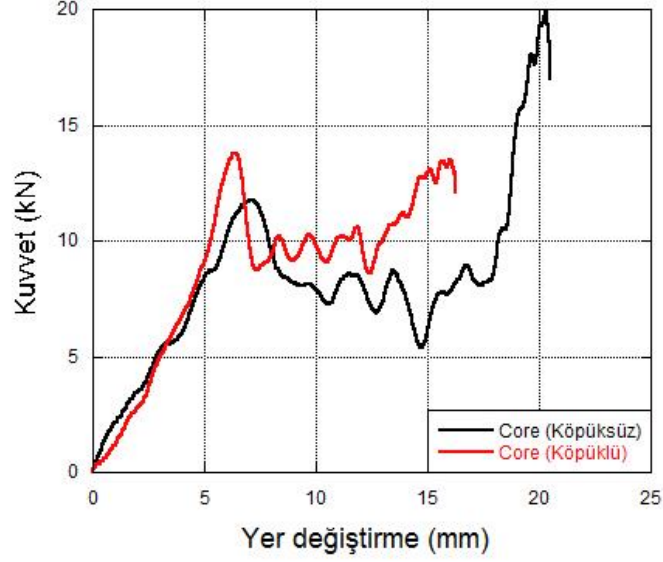


(b)

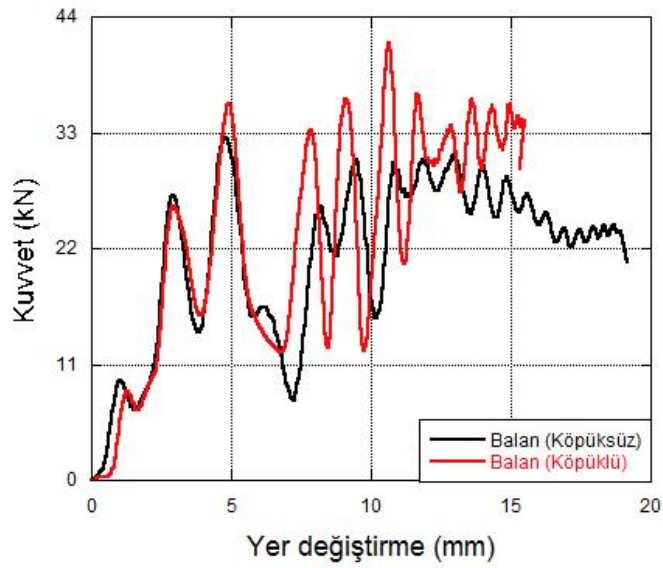
şekil 74. Statik ezilme davranışı; (a) i çekirdek ve (b) balan.

Dinamik deformasyon davranışlarının incelenmesi amacıyla yapılara dışen ağırlık testleri gerçekleştirilmiştir. Dinamik testlerde çarpma hızı olarak 4 m/s seçilmiştir ve deneyler sırasında kullanılacak olan dışen kütle değerleri, yapıların statik enerji (kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin altında kalan alan) değerleri dikkate alınarak ön hesaplama yapılarak tespit edilmiştir. Elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri şekil 75'de verilmiştir. Deneysel sonuçlardan da görülebileceği gibi hem köpük malzemenin sınırlandırma etkisinden hem de

dinamik deformasyondan kaynaklı şekil değiştirme hızı hassasiyeti etkisinden dolayı yapıların özellikle deformasyonun ilerleyişi ile birlikte daha yüksek kuvvet seviyeleri sergiledikleri görülmektedir.



(a)

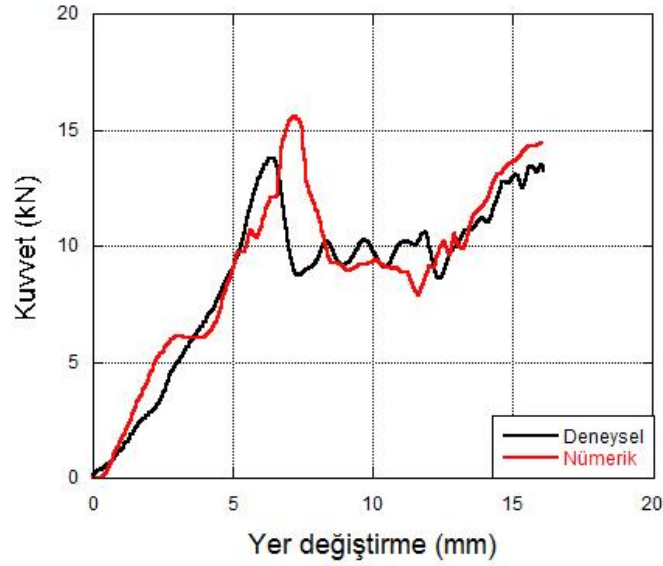


(b)

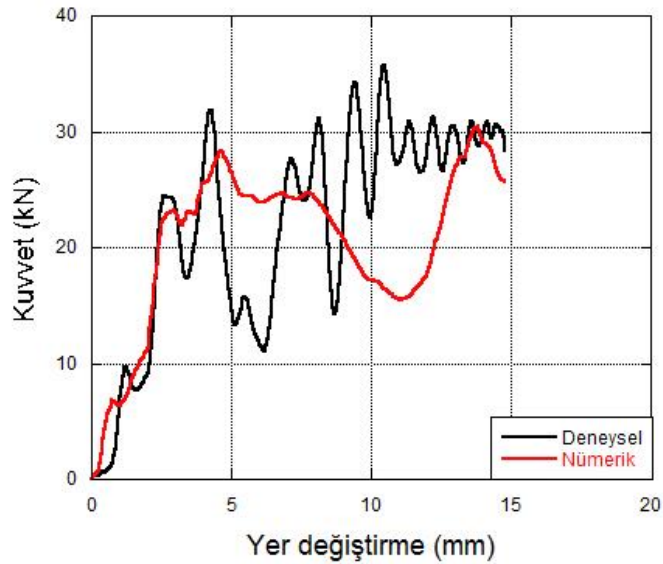
Şekil 75. Dinamik ezilme davranışı; (a) iç çekirdek ve (b) balan.

Şekil 76'da köpük ihtiva eden yapılara ait deneysel ve nümerik kuvvet-yer değiştirme eğrileri sunulmuştur. Şekil 77'de ise deneysel ve nümerik deforme edilmiş numuneler görülmektedir. Modelin deneysel sonuçları başarıyla yakaladığı tespit edilmiştir.

Bahsi geçen yapıların daha yüksek deformasyon hızlarındaki davranışlarının da incelenebilmesi için detayları bu raporun ileriki kısımlarında açıklanacak olan Doğrudan Basınç Dalgası Deneyleri yapılmış ve 40 m/s mertebelerindeki ezilme hızlarına ulaşılabilmesi mümkün olmuştur.

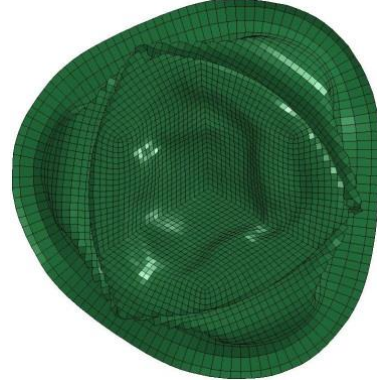


(a)

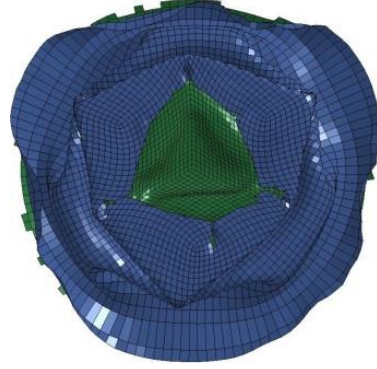


(b)

Şekil 76. Köpük ihtiva eden numunelerin dinamik ezilme davranışı; (a) i çekirdek ve (b) balan.



(a)

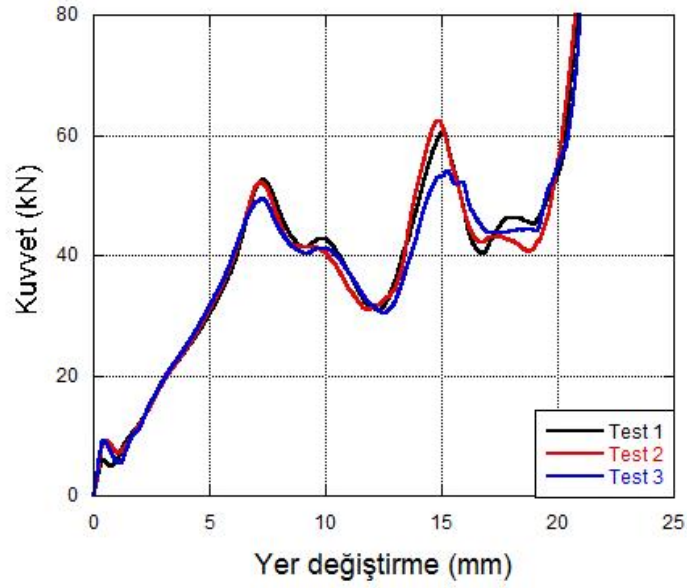


(b)

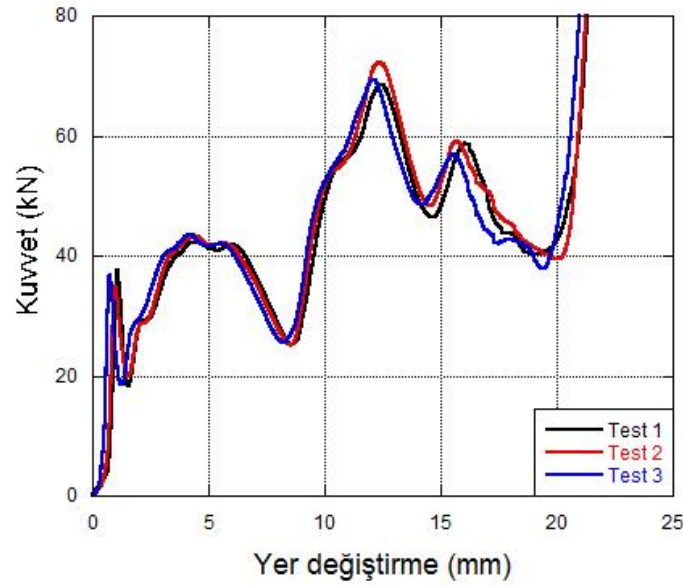
Şekil 77. Deneysel ve nümerik ezilmiş numuneler (dinamik); (a) iç çekirdek ve (b) balan.

4.4 Sandviç Yapıların Statik ve Dinamik Ezilme Karakteristikleri

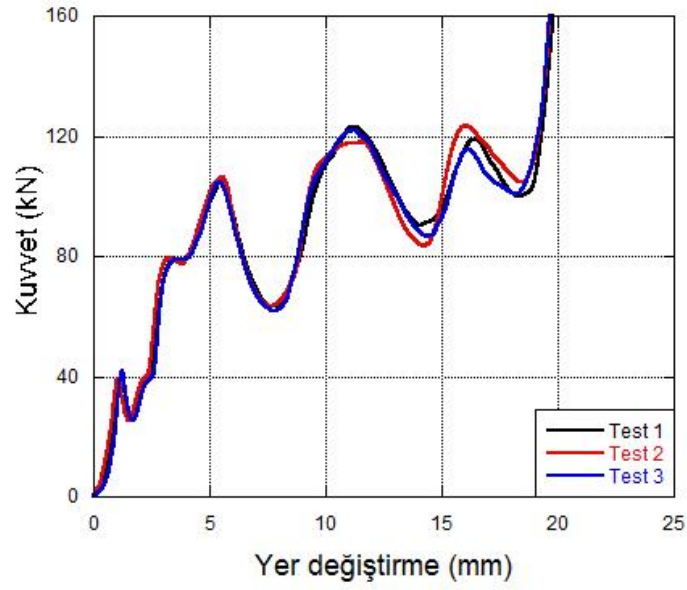
Testlere sandviç yapıların 10^{-3} s^{-1} şekil değıştirme hızındaki statik olarak ezilmeleri ile devam edilmiştir. Her bir sandviç yapı için üçer adet numune test edilmiştir. Şekil 78’de bu sandviç yapılara ait kuvvet-yer değıştirme eğrileri sunulmuştur. Testlerin kendi içlerinde tutarlı olduğu şekillerden de görülmektedir. Eğrilere karşılık gelen deformasyon modları hakkındaki açıklamalar nümerik model sonuçları ile birlikte bu raporun ilerleyen kısımlarında detaylı olarak sunulmuştur.



(a)



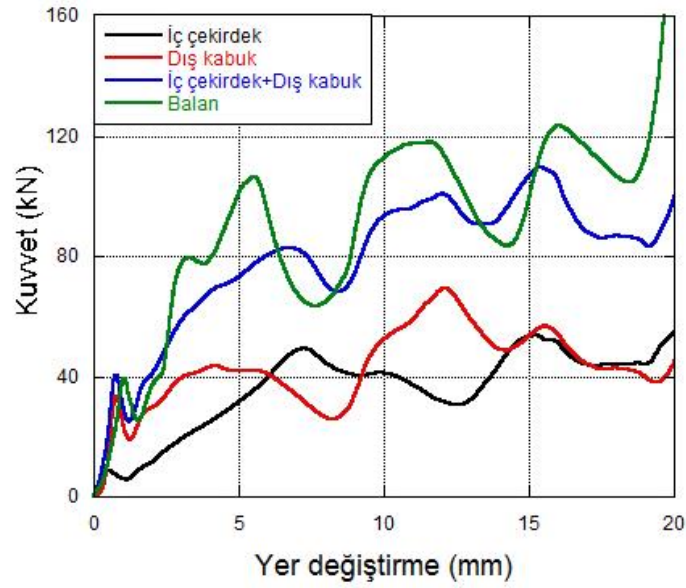
(b)



(c)

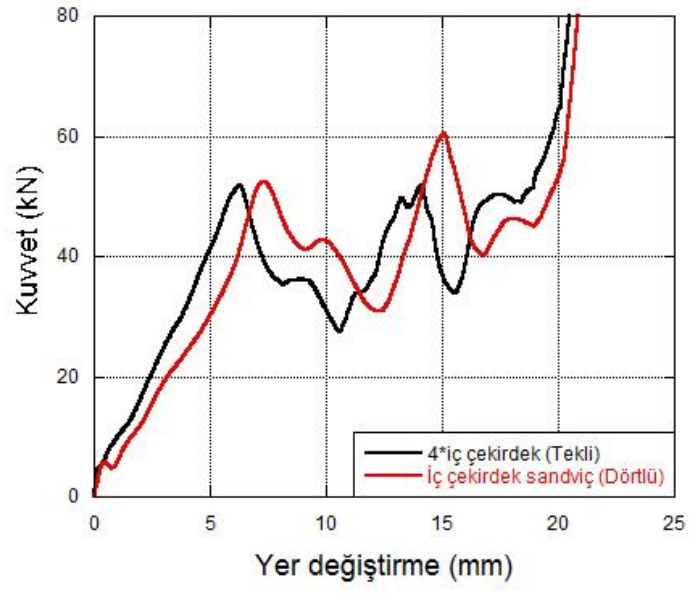
Şekil 78. Sandviç yapıların statik ezilme davranışları; (a) iç çekirdek, (b) dış kabuk ve (c) balan.

Statik kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, tek başına iç çekirdek ve yine tek başına dış kabuk ihtiva eden sandviç yapılara ait kuvvet-yer değiştirme eğrileri aritmetik olarak toplandığında elde edilen sonuç balanın kuvvet-yer değiştirme eğrisinin altında kaldığı tespit edilmiştir (Şekil 79). Bu sonuçtan da anlaşılacağı üzere deformasyonla sırasında iç çekirdek ve dış kabuk birbirleriyle etkileşime girerek daha yüksek enerji seviyelerinin emilebileceği deformasyon modlarının oluşumuna sebep olmaktadır. Bu durum proje kapsamında tasarımı yapılan enerji yutucu yapının bir başka büyük avantajı olarak kendini göstermiştir.

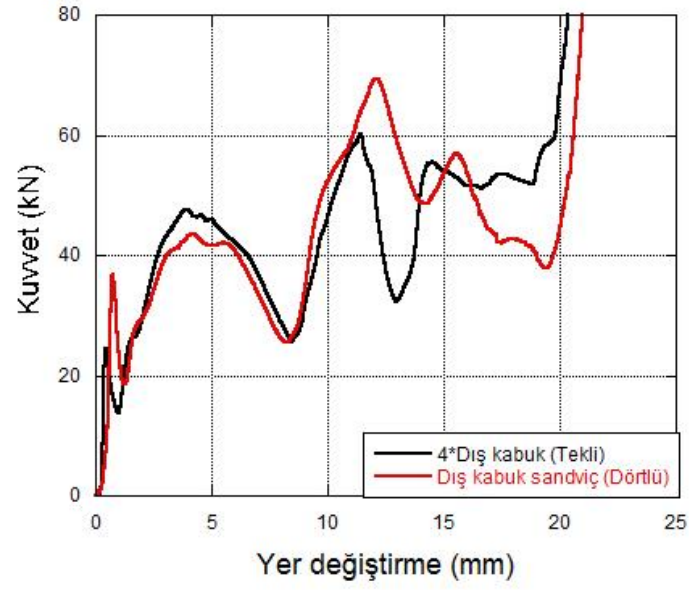


Şekil 79. İç çekirdek ve dış kabuk etkileşimi.

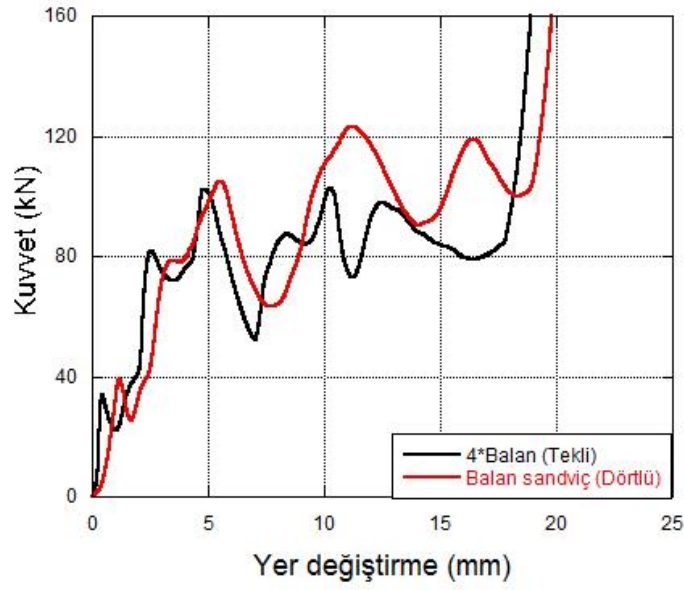
Balan yapısını oluşturan dış kabuk ve iç çekirdek arasındaki etkileşimi ortaya konduktan sonra sandviç yapıyı oluşturan balan yapılarının birbirleriyle etkileşiminin de incelenmesi düşünülmüştür. Bu amaçla balan yapısının tek başına statik ezilmesi durumundaki kuvvet-yer değiştirme eğrisi dört ile çarpılmış ve bu eğri sandviç yapının statik kuvvet-yer değiştirme eğrisiyle karşılaştırılmıştır. Şekil 80 (a)'dan da görülebileceği gibi sandviç yapının kuvvet-yer değiştirme eğrisi aritmetik olarak dört ile çarpılmış balanın eğrisinin üzerinde kalmaktadır. Özellikle deformasyonun ilerleyişi ile birlikte balan yapıları birbirleriyle temas ederek sandviç yapının enerji emme özelliklerini iyileştirmektedir. Yine benzer şekilde sadece iç çekirdek ve sadece dış kabuk ihtiva eden sandviçler de bu bahsi geçen yapıların tek başına ezilmeleri durumundaki değerlerinin aritmetik olarak dört ile çarpılmış haliyle kıyaslandığında avantajlar sergilemiştir. Sonuçlar incelendiğinde her üç (iç çekirdek, dış kabuk ve balan) çekirdek yapısının da deformasyonun ilerleyişi ile birlikte komşularıyla etkileşime girip enerji emme özelliklerinin iyileştiği tespit edilmiştir. Bu durum sandviç yapıların yüksek enerji emme karakteristiklerine sebep olan mekanizmalardan birisidir.



(a)



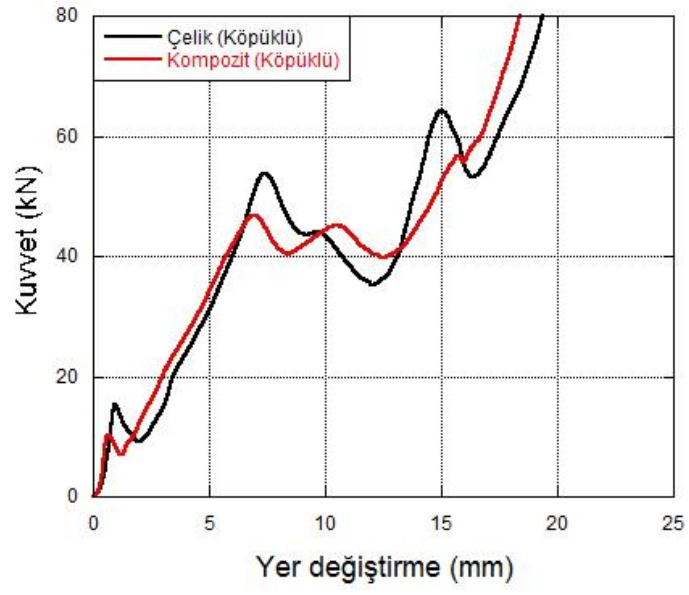
(b)



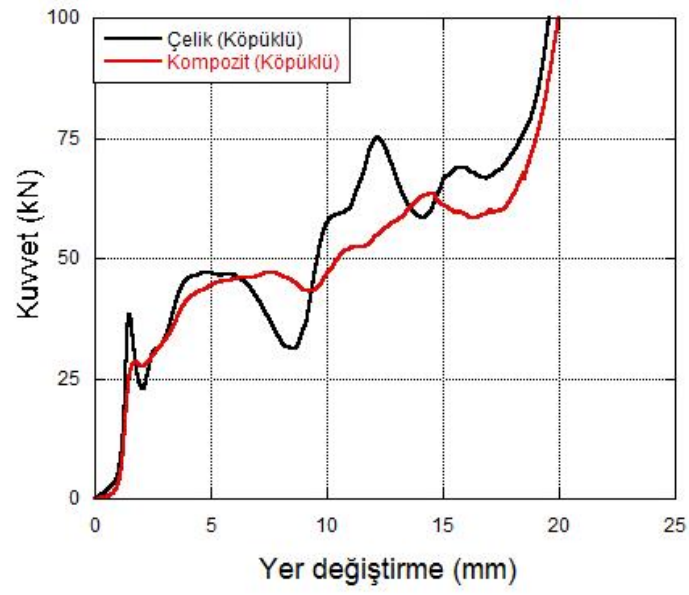
(c)

Şekil 80. Sandviç yapı ve tekli numune ezilme karakteristikleri; (a) iç çekirdek, (b) dış kabuk ve (c) balan.

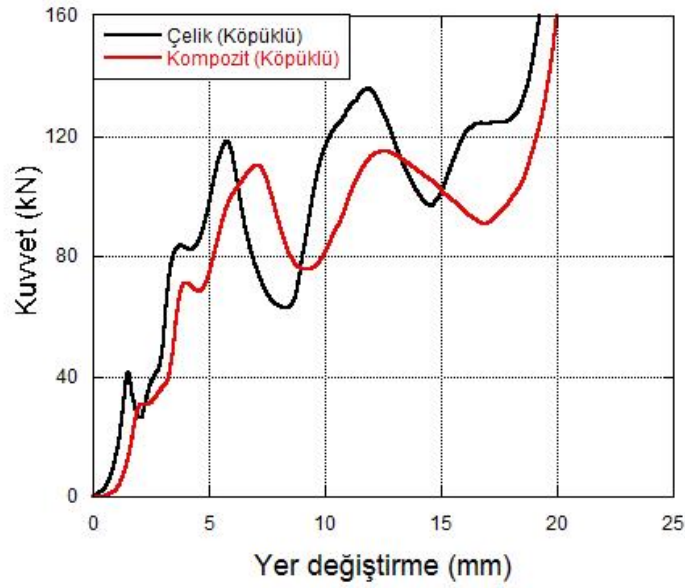
Proje kapsamında sandviç yapıyı oluşturan ana bileşenlerden olan yüzey malzemesi (face) türünün etkisi de incelenmiştir. Bu amaçla hem çelik (3 mm) hem de kompozit (5.5 mm) malzemelerden yüzey malzemelerine sahip sandviç yapılar hazırlanmıştır. Şekil 81'de içi köpük dolu iç çekirdek, dış kabuk ve balan yapı ihtiva eden çelik ve kompozit yüzey malzemesine sahip sandviçlerin statik kuvvet-yer değiştirme eğrileri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



(a)



(b)

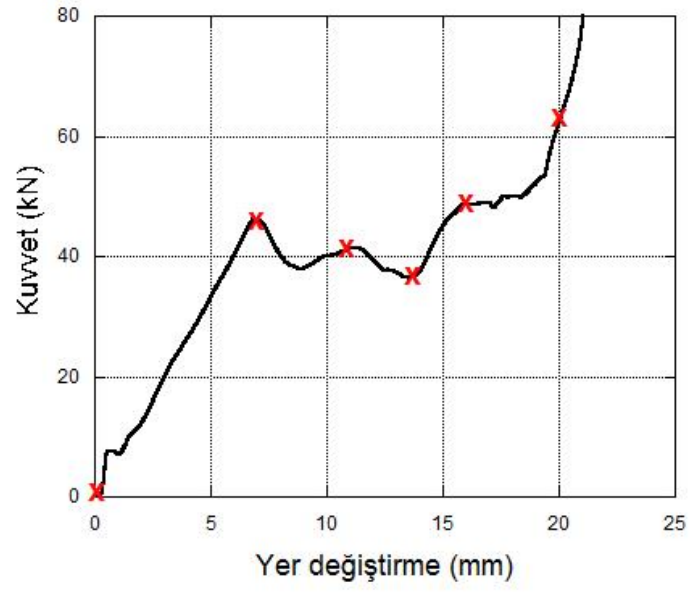


(c)

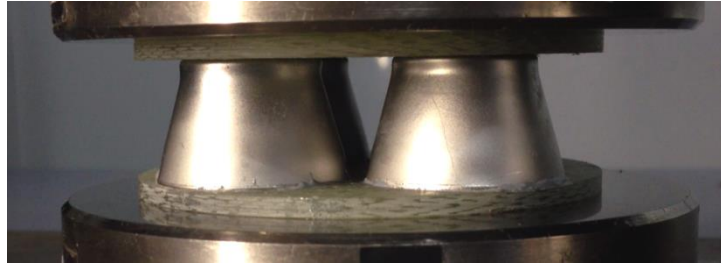
Şekil 81. Yüzey malzemesinin ezilme davranışına etkisi; (a) iç çekirdek, (b) dış kabuk ve (c) balan.

Yüzey malzemesi çapının (75 mm) nispeten küçük olması ve statik ezilme sırasındaki ana deformasyon mekanizmasının basma sonucunda çekirdek malzemelerde kat oluşumu şeklinde gerçekleşmesinden dolayı yüzey malzemesi türünün kuvvet-yer değiştirme eğrileri üzerinde çok fazla etkinlik göstermediği tespit edilmiştir. Sandviç yapıların gerçek kullanım şartlarında çok fazla sayıda çekirdek yapı ihtiva ettiği (artan boyutlarla doğru orantılı olarak) ve karşılaştıkları deformasyon sırasında ön ve arka yüzey malzemelerinin daha farklı (eğilme, çekme-basma) yükleme şartlarına maruz kalabildiği durumlar da mevcuttur. Bu tarz nispeten büyük boyutlu numune geometrilerinde kompozit yüzey malzemelerinin sandviç yapının enerji emme etkinliğini arttırabileceği düşünülmektedir. Nitekim detayları bu proje raporunun ileriki kısımlarında açıklandığı gibi özellikle kompozit yüzey malzemesi ihtiva eden sandviç yapılara penetrasyon testleri gerçekleştirilerek kompozit malzemelerin penetrasyon etkinlikleri de ayrıca incelenmiştir.

DeneySEL çalışmalara iç çekirdek, dış kabuk ve balan ihtiva eden sandviç yapıların statik ezilme testleri ile devam edilmiştir. Şekil 82 - Şekil 84'de deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Kuvvet-yer değiştirme eğrilerinde kırmızı ile işaretlenmiş noktalara karşılık gelen deformasyon tarihçeleri de ayrıca verilmiştir.



0 mm



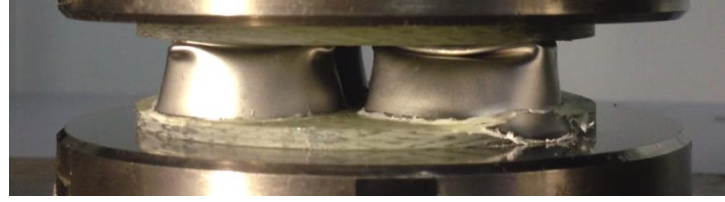
7 mm



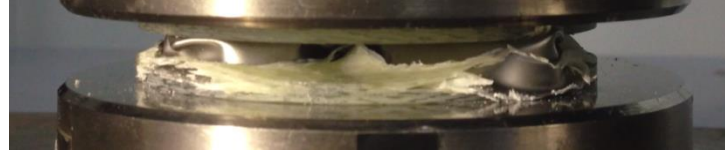
11 mm



14 mm

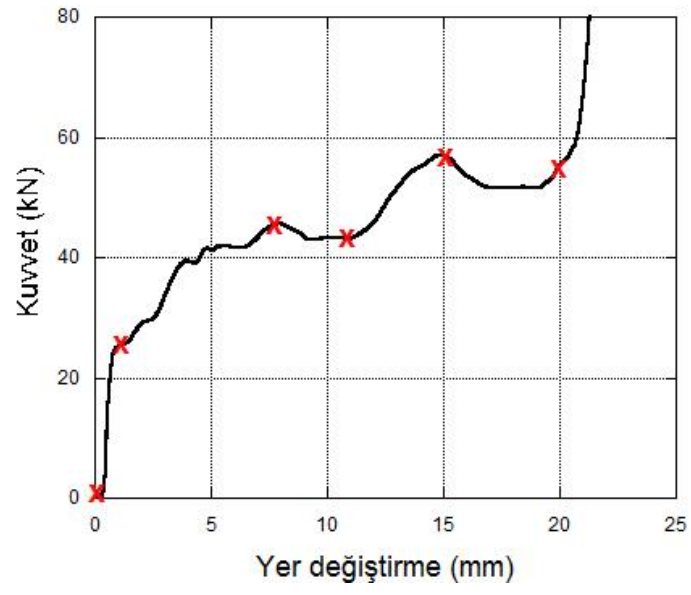


16 mm



20 mm

Şekil 82. Sandviç yapının statik deformasyon tarihçesi (iç çekirdek).



0 mm



1 mm



7.5 mm



11 mm

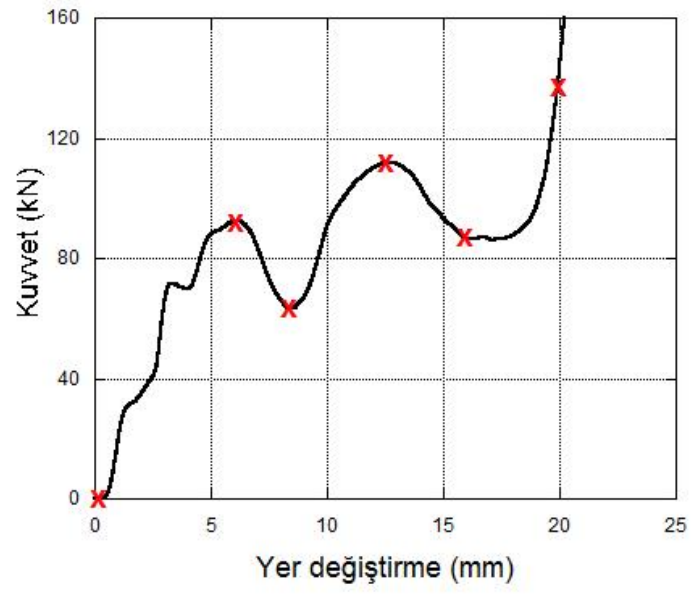


15 mm



20 mm

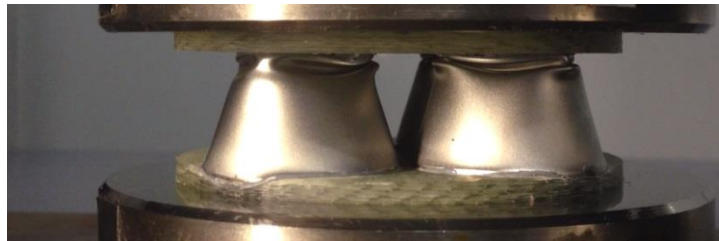
Şekil 83. Sandviç yapının statik deformasyon tarihçesi (dış kabuk).



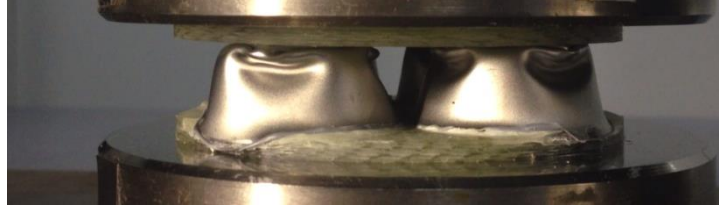
0 mm



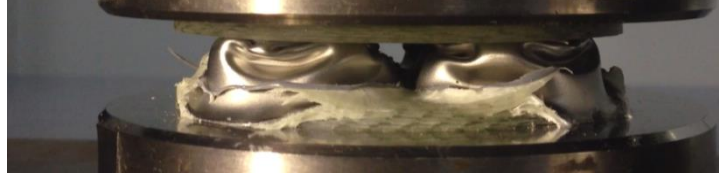
6 mm



8 mm



12.5 mm



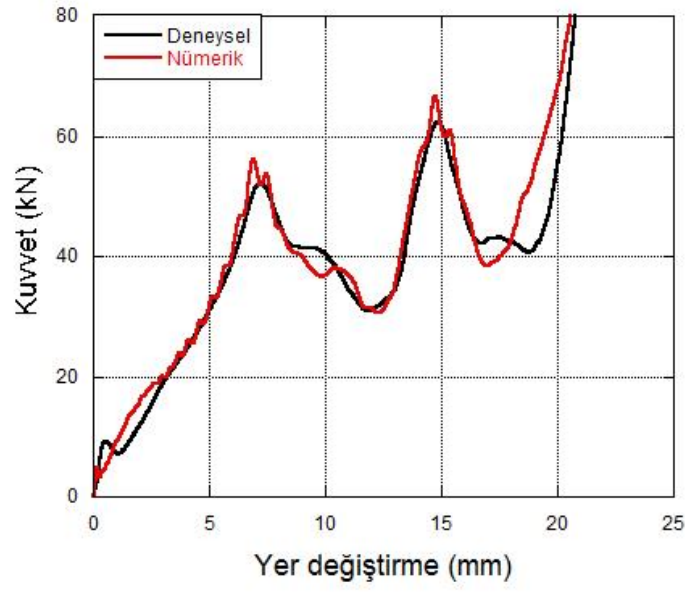
16 mm



20 mm

Şekil 84. Sandviç yapının statik deformasyon tarihçesi (balan).

Sandviç yapıda meydana gelen deformasyon sırasındaki mekanizmaların daha iyi anlaşılabilmesi için statik ezilme deneyleri nümerik olarak modellenmiştir. Şekil 85'de görüldüğü gibi iç çekirdek malzemenin kullanıldığı sandviç yapıda deformasyonun ilerleyişi ile birlikte yapının en üstündeki yarı küresel bölge içeri doğru deforme olmaktadır ve ilk kat başlangıcına kadar bu durum bir pik oluşumu şeklinde kendini göstermektedir. Deformasyonun ilerleyişi ile birlikte yeni katların oluşumu kuvvet-yer değiştirme eğrisinde maksima ve minimaler olarak kendini göstermektedir. Deformasyonun sonlarına doğru ise iç çekirdeğin alt etek bölgelerinde eğilmeler (local bending) gözlemlenmiştir.



0 mm



8 mm



13.1 mm



15.5 mm



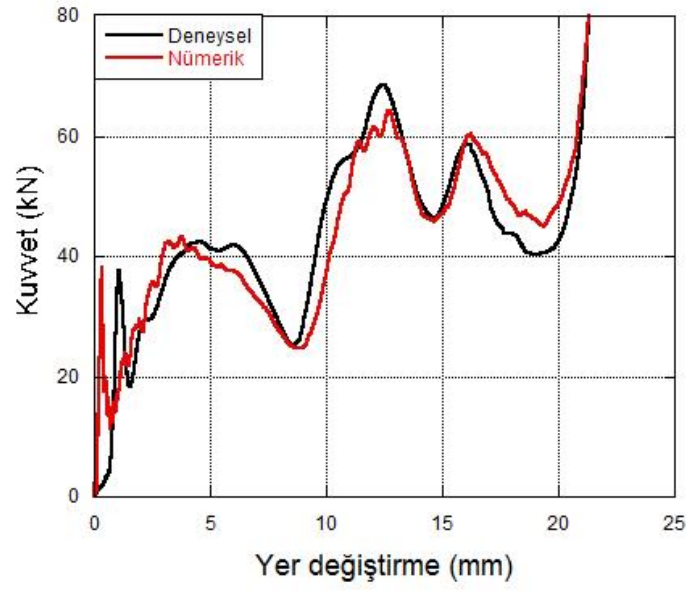
18 mm



20 mm

Şekil 85. Sandviç yapının statik nümerik deformasyon tarihçesi (iç çekirdek).

Kuvvet-yer değiştirme eğrileri ve deforme olmuş geometriler incelendiğinde deneysel ve nümerik sonuçların birbiriyle oldukça uyumlu olduğu tespit edilmiştir.



0 mm



4.3 mm



9 mm



12 mm



16 mm



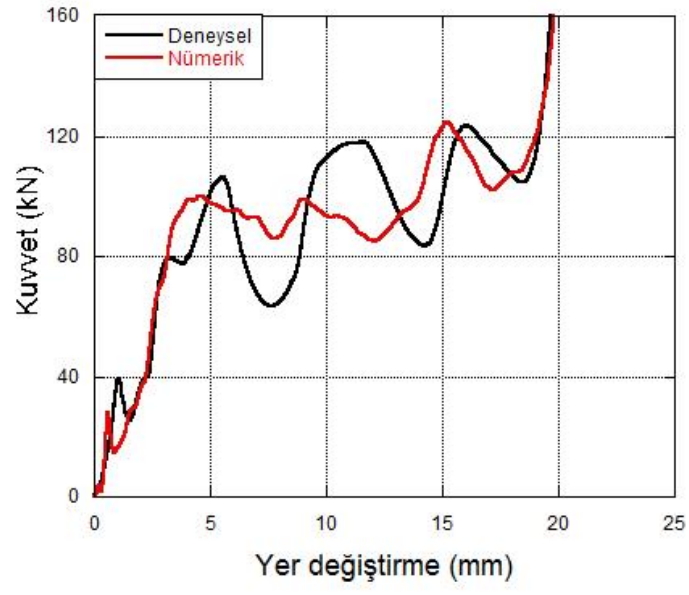
20 mm

Şekil 86. Sandviç yapının statik nümerik deformasyon tarihçesi (dış kabuk).

Dış kabuk malzemenin kullanılmasıyla elde edilen sandviç yapıya ait kuvvet-yer değiştirme eğrileri ve deforme olmuş yapılar Şekil 88'de birlikte verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi yaklaşık olarak 5 mm yer değiştirme seviyesine kadar dış kabuğun üst yüzeyinde deformasyondan kaynaklı ilk kat oluşumu meydana gelmekte ve bu sırada kuvvet artışı gözlemlenmektedir. Yine şekillerden de görülebileceği gibi yeni katların oluşumu kendisini

kuvvet grafiğinde lokal maksima ve minimalar olarak göstermektedir. Özellikle 16 mm seviyelerinde deformasyondan sonra yapı yine alt etek bölgesinden eğilerek deforme olmaktadır. Kuvvet-yer değiştirme eğrileri ve deforme olmuş geometriler incelendiğinde deneysel ve nümerik sonuçların birbiriyle oldukça uyumlu olduğu tespit edilmiştir (Şekil 88).

Şekil 87’de balan yapı ihtiva eden sandviç yapının ezilme tarihçesi ve ezilme eğrisi birlikte verilmiştir. Kuvvet-yer değiştirme eğrisinde yaklaşık 1 mm deformasyonda görülen ilk pik oluşumu iç çekirdeğe göre boyu bir miktar daha uzun olan dış kabuğun üst yüzeyinde meydana gelen ezilme ve buna müteakip sandviç yapıyı oluşturan üst yüzey malzemesinin iç çekirdeğin tepe noktasına değmesinden kaynaklanmaktadır. Daha sonra yapı deformasyona birlikte devam edip yaklaşık 5 mm deformasyon seviyesinde ilk kat oluşumunu birlikte gerçekleştirmektedir. Deformasyonun ilerleyişi ile yeni katların oluşumlarıyla kuvvet-yer değiştirme eğrisinde lokal maksima ve minimaların oluştuğu gözlemlenmektedir. Yine yaklaşık 16 mm deformasyon seviyelerinden sonra yapı alt etek bölgesinden eğilerek deforme olmaktadır.



0 mm



5 mm



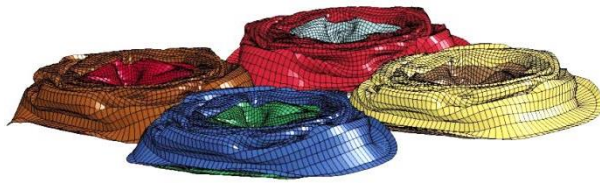
9.5 mm



13 mm

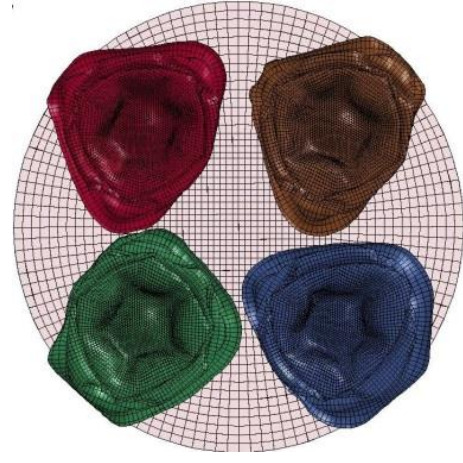


15.5 mm



20 mm

Şekil 87. Sandviç yapının statik nümerik deformasyon tarihçesi (balan).



(a)



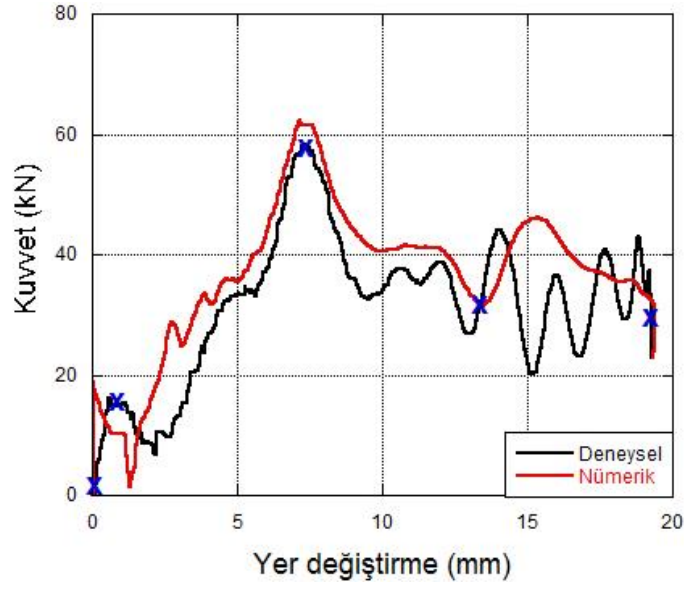
(b)



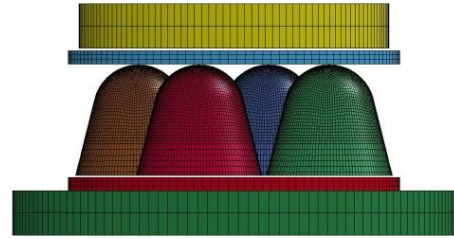
(c)

Şekil 88. Deneysel ve nümerik(statik) ezilmiş sandviç yapılar; (a) iç çekirdek, (b) dış kabuk ve (c) balan.

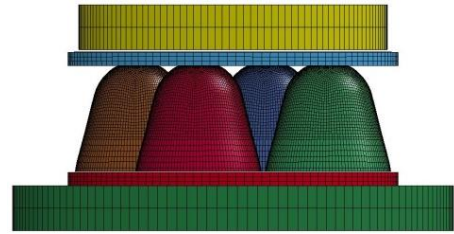
Şekil 89'da iç çekirdek malzemesi ile oluşturulmuş olan sandviç yapıya ait düşen ağırlık deneysel (15.63 kg ve 10 m/s) ve nümerik sonuçları sunulmuştur. İç çekirdek malzemenin kuvvet-yer değiştirme eğrisindeki yaklaşık 18 kN seviyelerinde meydana gelen ilk pik, iç çekirdek malzemesinin tepe noktasının içeriye doğru eğilmesine karşılık gelmektedir. Bu yarı küresel kısmın içeriye doğru deformasyonu ile birlikte kuvvet artmakta ve yaklaşık olarak 60 kN seviyelerinde ilk kat oluşumu meydana gelmektedir. Daha sonra diğer katların oluşumu yine kendini lokal maksima ve minimala şeklinde göstermektedir.

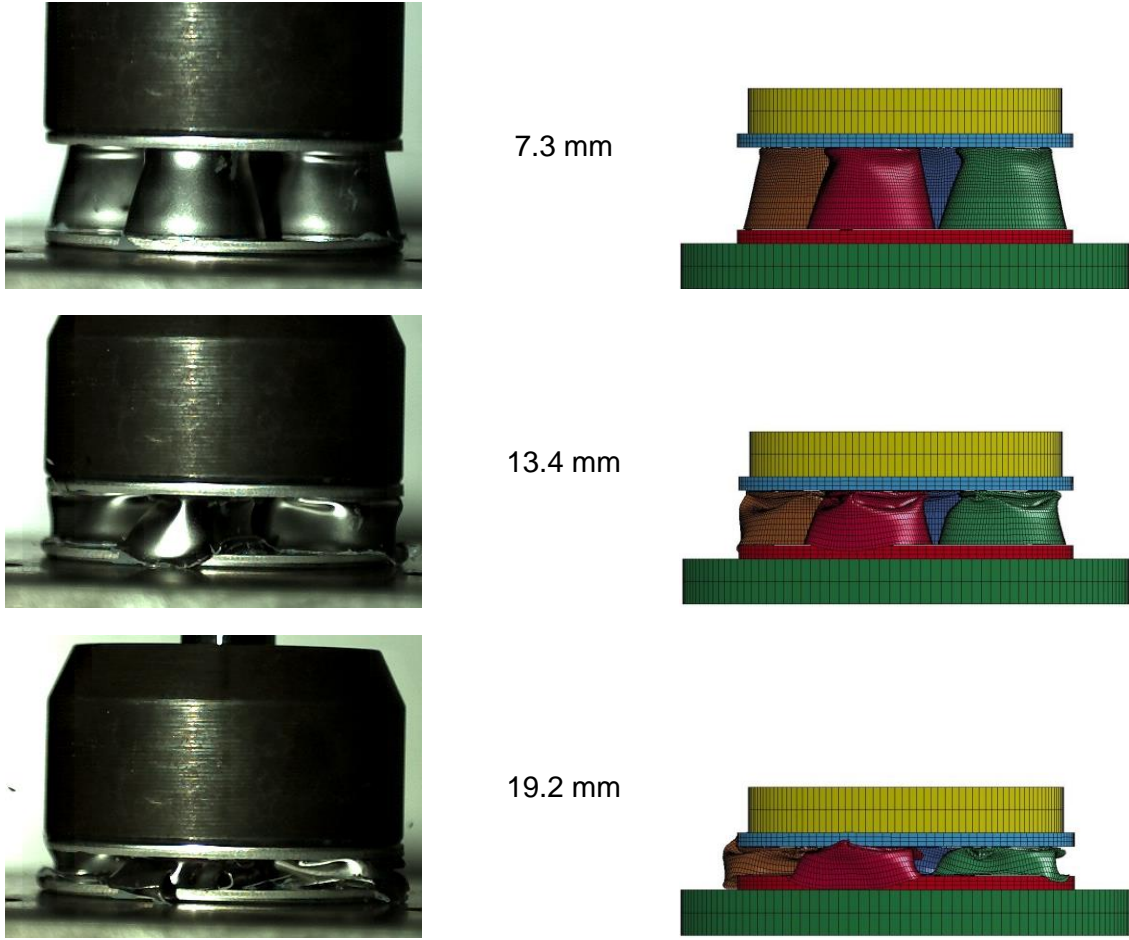


0 mm



1 mm

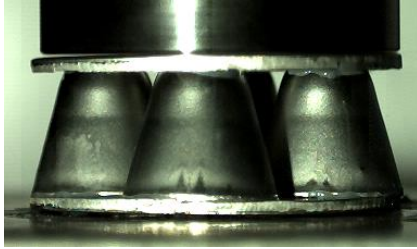
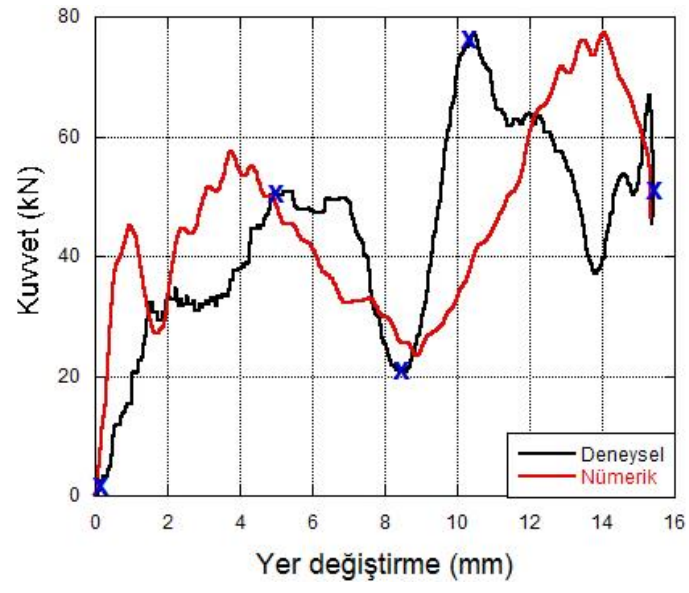




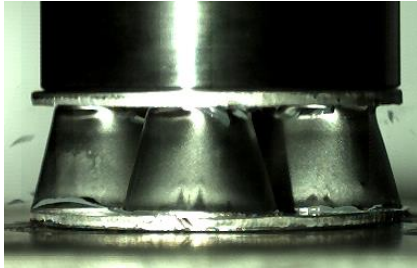
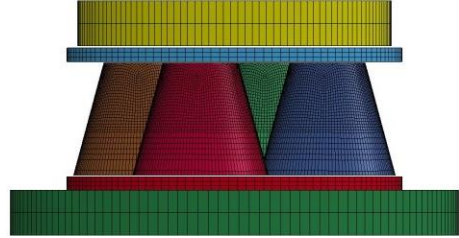
Şekil 89. İç çekirdek sandviç yapının dinamik deformasyon tarihçesi.

Şekil 90'da dış kabuk ihtiva eden sandviç yapının deneysel (10 m/s ve 18.63 kg) ve nümerik kuvvet-yer değıştirme eğrileri sunulmuştur. Yaklaşık 5 mm deformasyon seviyelerinde dış kabuk yapıda ilk kat oluşumu meydana gelmekte ve katlar ilerledikçe özellikle ikinci katın oluşumu sırasında 80 kN gibi yüksek yük taşıma kapasitelerine erişilmektedir. Bu deney sırasında, dış kabuk çekirdek malzemesi yaklaşık olarak 15 mm kadar ezilmiştir. Nümerik sonuçlar hem kuvvetlerin şiddeti hem de katların oluşum noktaları konularında deneysel sonuçları oldukça doğrulamaktadır.

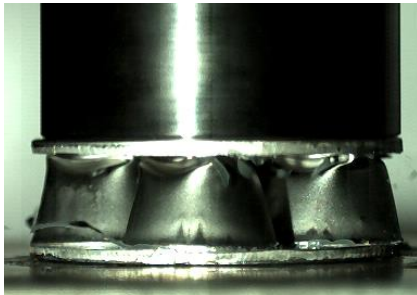
Balan ihtiva eden sandviç yapıya ait düşen ağırlık test (10 m/s ve 18.63 kg) ve model sonuçları Şekil 91'de sunulmuştur. Bu deney sırasında balan ihtiva eden sandviç yapı oldukça yüksek yük taşıma kapasitelerine erişmiş (yaklaşık 120 kN) ve toplamda yaklaşık 9 mm kadar deforme olmuştur. Bu çoklu çekirdek ihtiva eden sandviç yapılarda gözlemlenen kuvvet seviyeleri proje kapsamında alınan düşen ağırlık test ucunun maksimum ölçüm değeri olan 222 kN seviyelerinin altında kaldığı için ölçümler güvenle yapılmıştır.



0 mm

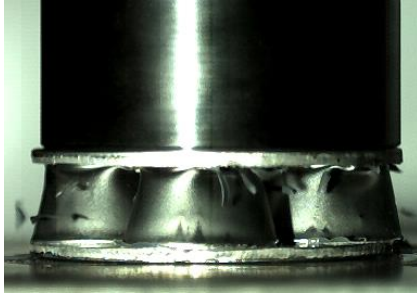


5 mm

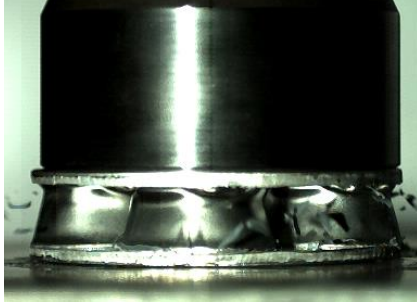


8.5 mm





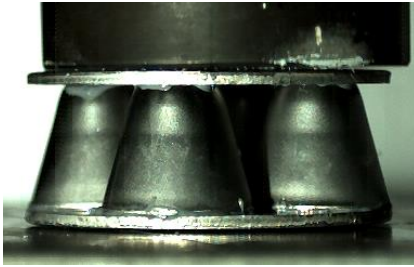
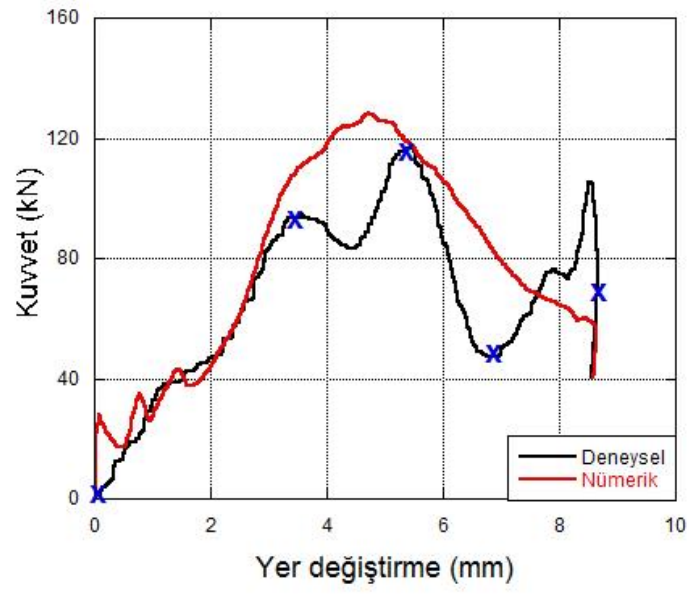
10.5 mm



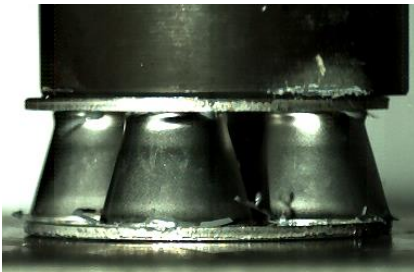
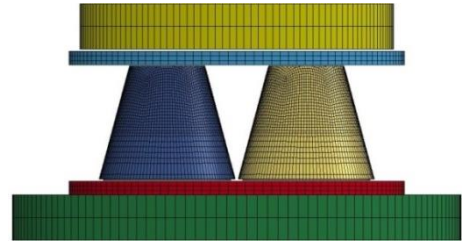
15.3 mm



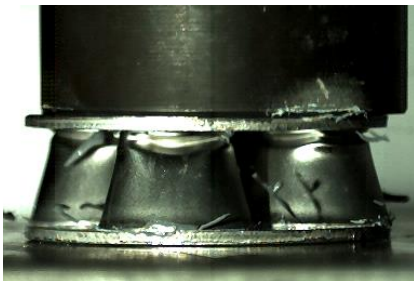
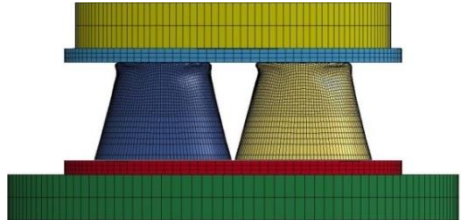
Şekil 90. Dış kabuk sandviç yapınının dinamik deformasyon tarihçesi.



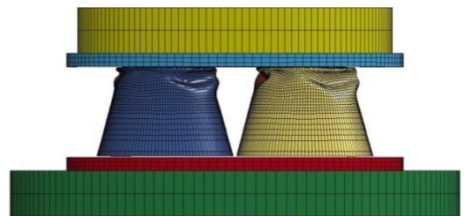
0 mm

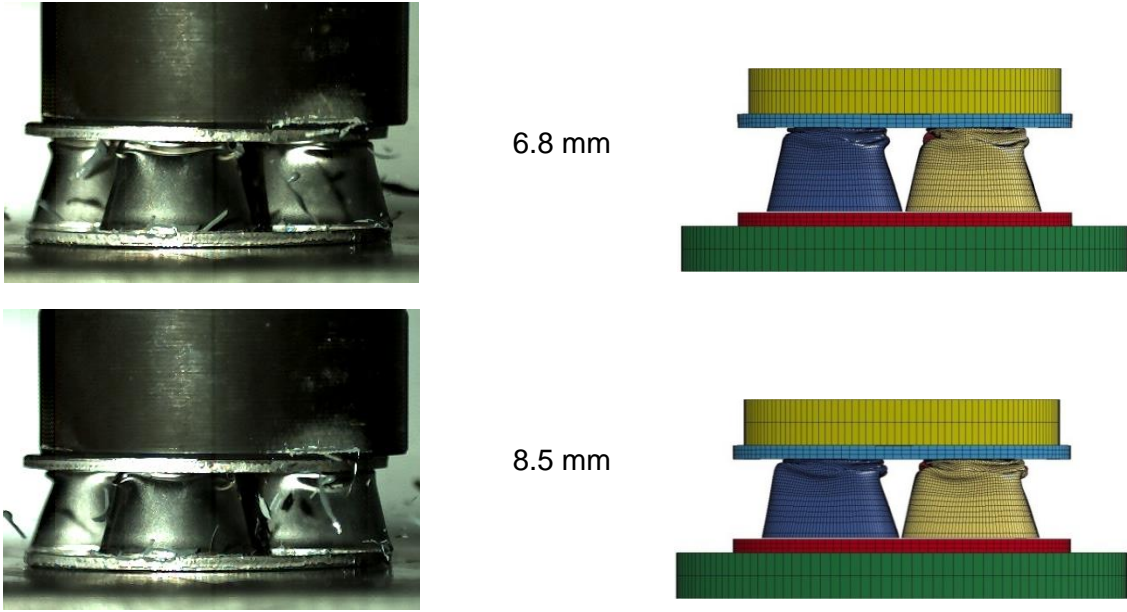


3.5 mm



5.4 mm



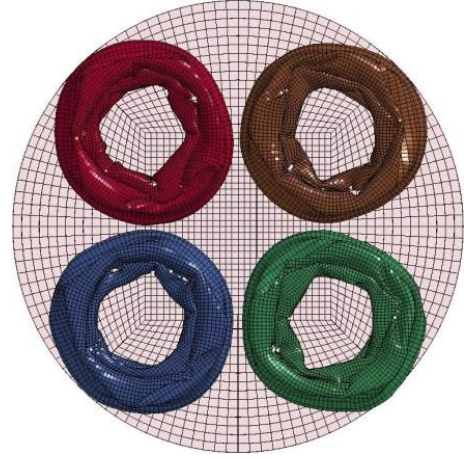


Şekil 91. Balan sandviç yapının dinamik deformasyon tarihçesi.

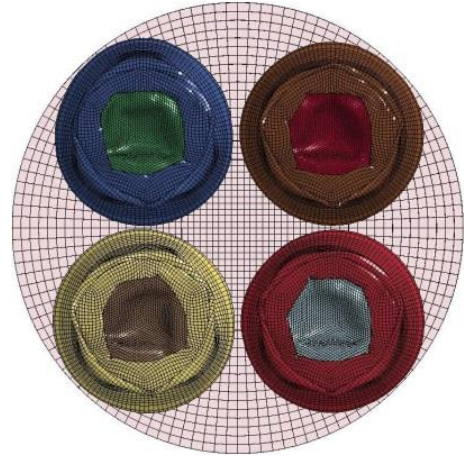
Şekil 92'de sandviç yapılara ait deneysel ve nümerik olarak deformasyona uğramış profiller sunulmuştur. Model sonuçlarının deney sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Bu noktadaki esas amaç sadece bu uyumu görmekten ziyade hazırlanan nümerik modelin (malzeme modeli ve nümerik model) farklı yükleme ve geometrik şartlar altında başarılı sonuçlar verdiğini tespit etmektir. Böylelikle bu noktadan sonra yapılacak olan patlama testleri nümerik model sonuçlarının güvenilirliği artmaktadır.



(a)



(b)



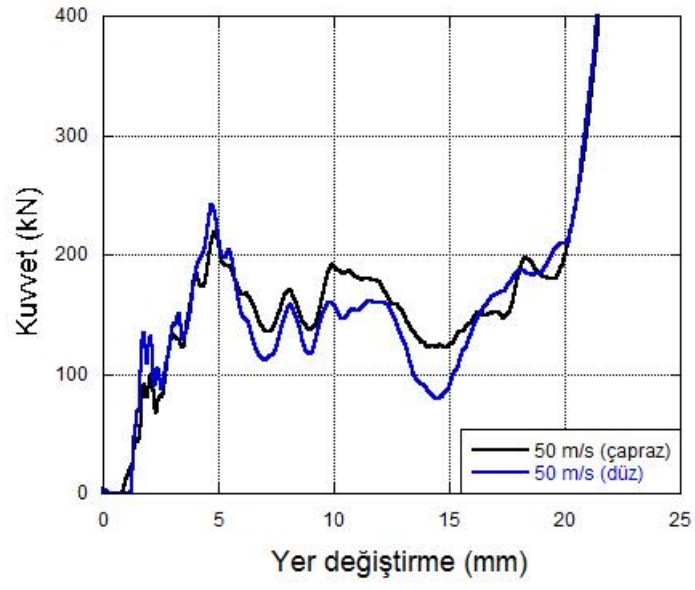
(c)

Şekil 92. Deneysel ve nümerik(dinamik) ezilmiş sandviç yapılar; (a) iç çekirdek, (b) dış kabuk ve (c) balan.

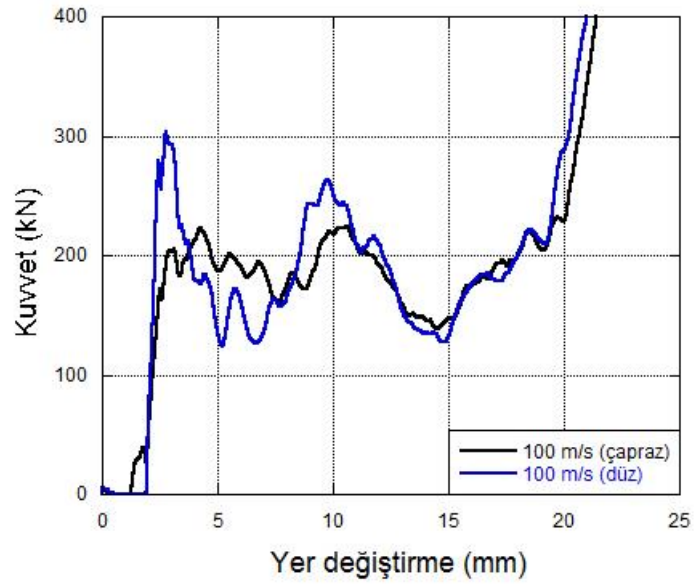
Proje kapsamındaki çalışmalar için seçilen malzeme modelleri ve bu modellere ait sabitlerin belirlenme metodolojileri bu raporun ilgili kısımlarında detaylı olarak anlatılmıştır. Sabitlerin doğru olarak belirlenmesi, nümerik modelleme çalışmalarının hassasiyeti üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Özellikle dinamik yüklemelere maruz kalan bu yapılarda şekil değiştirme hızı hassasiyeti, yapının davranışını etkileyen en önemli parametrelerdendir. Bu sebeple şekil değiştirme hızının yapının enerji emme karakteristiklerine etkisinin incelenmesi son derece önemlidir. Proje kapsamında kullanılan nümerik modellerin doğrulanması çok farklı dinamik yükleme koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Bu noktadan sonra artık güvenle farklı şekil değiştirme hız seviyeleri, farklı dinamik yükleme koşulları ve farklı dizilimlerin etkisinin incelenmesi nümerik modellerin kullanılmasıyla mümkün olacaktır.

Bu amaçla yürütülen nümerik modelleme çalışmalarında dört adet balandan ve 304L paslanmaz çelik yüzey malzemesinden oluşan sandviç yapıların farklı kombinasyonlarının farklı yükleme koşulları etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. Balan ihtiva eden sandviç yapılar, hepsi düz (dört adet düz) ve çapraz ters (iki ters iki düz) olmak üzere iki farklı şekilde modellenmiş ve bu iki farklı sandviç yapı farklı sabit ezilme hızları ile ezilmiştir. Ezilme hızları 50, 100 ve 150 m/s olarak belirlenmiştir.

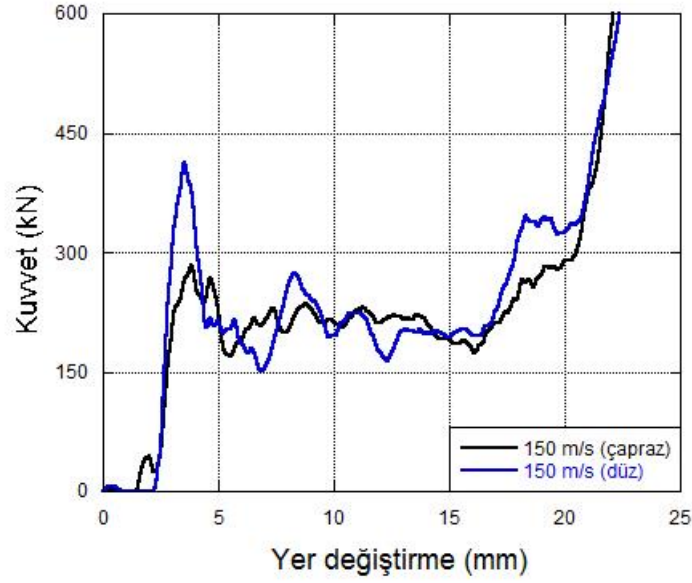
Şekil 93'de bahsi geçen yapılara ait kuvvet-yer değiştirme ve Şekil 95'de yine bu yapılara ait enerji-deformasyon eğrileri verilmiştir. Bu çalışmadaki enerji emme seviyesinin hıza bağlı değişiminin kolayca karşılaştırılabilmesi amacıyla statik enerji-deformasyon eğrisi de grafikte sunulmuştur. Kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde şekil değiştirme hızının artışına bağlı olarak düz ve çapraz dizilimlerin arasındaki davranış farkı artmaktadır. Özellikle hızın artışıyla birlikte kuvvet-yer değiştirme eğrilerinde gözlemlenen ilk pik değerleri arasındaki fark yaklaşık olarak 100-150 kN kadar artmaktadır.



(a)



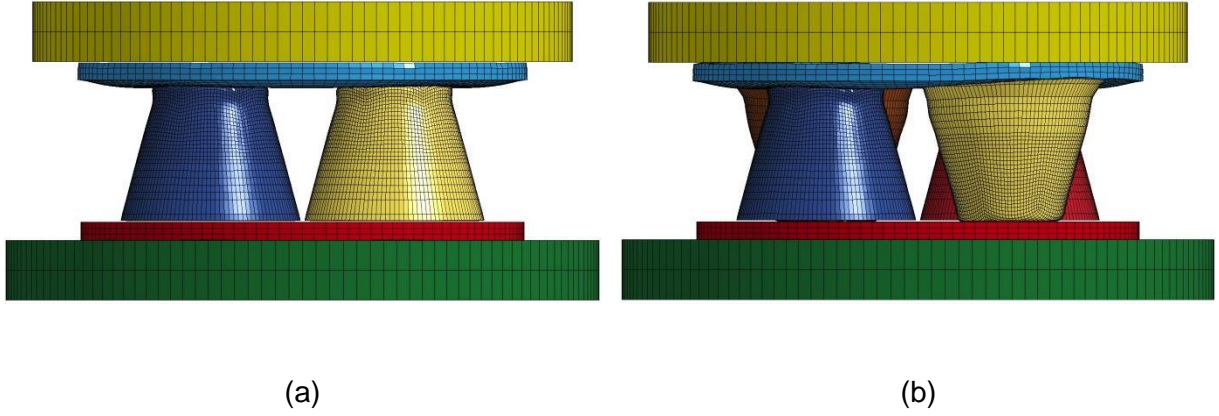
(b)



(c)

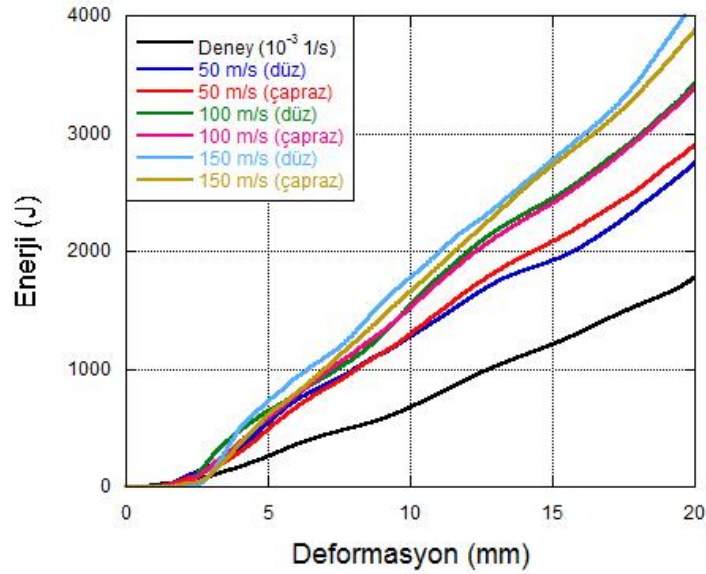
Şekil 93. Balan sandviç yapının farklı sabit hızlardaki ezilme davranışı; (a) 50 m/s, (b) 100 m/s ve (c) 150 m/s.

Çarpma hızının artmasına bağlı olarak sandviçlere ait ön yüzey plakalarında gözlemlenen deformasyon artmaktadır. Deformasyon, çekirdek malzemeleri patlama yönüne göre düz dizilime sahip sandviç yapılarda üst yüzey plakasına komşu yüzeylerden başlayıp aşağıya doğru ilerlemektedir ve kat oluşumları meydana gelmektedir. Çekirdek malzemeleri çapraz dizilime sahip yapılarda ise deformasyon, balan yapıların tepe noktasından başlamaktadır. Yani çekirdek malzemelerinin çapraz ters dizilimiyle elde edilen bir sandviç yapıda bazı balanlar (düz konumlandırılmış) konumları itibariyle üst yüzey plakasından alt yüzey plakasına doğru deforme olurken bazıları (ters konumlandırılmış) ise alt yüzey plakasından üst yüzey plakasına doğru deforme olmaktadır. Çarpma hızının artmasına bağlı olarak ön yüzey plakada meydana gelen deformasyon miktarı da artmaktadır ve bu durum çapraz dizilimli sandviç yapıda ters konumlandırılmış balanların etek bölgesinden de deforme olmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle çapraz dizilime sahip sandviç yapılar hemen hemen sabit kuvvet değerlerinde ezilmektedirler.



Şekil 94. Deforme olmuş balan sandviç yapılar; (a) düz ve (b) çapraz.

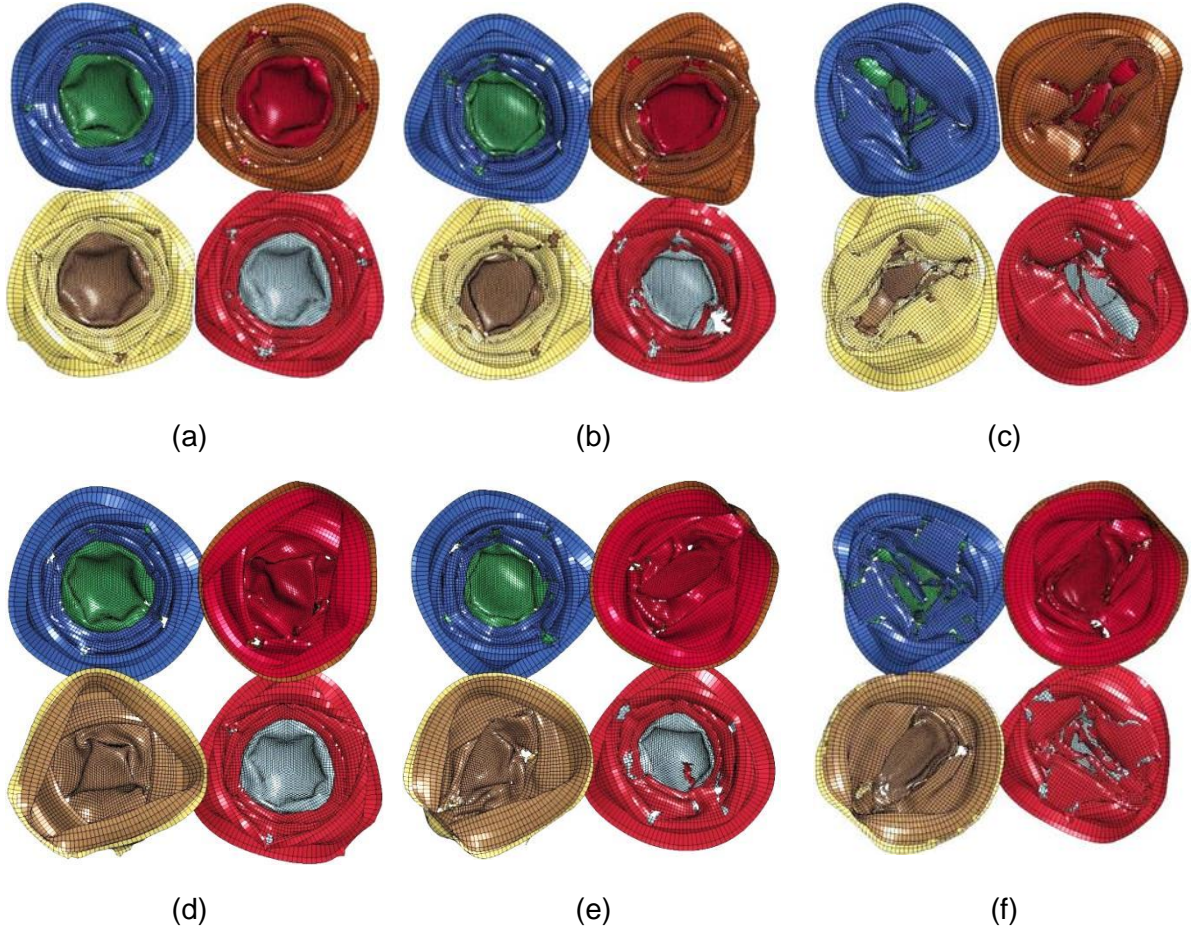
Çarpma hızının artmasıyla birlikte düz dizimli yapıların çapraz ters dizimli yapılara göre enerji emme kabiliyetlerinin arttığı görülmektedir.



Şekil 95. Balan sandviç yapının enerji-deformasyon eğrileri.

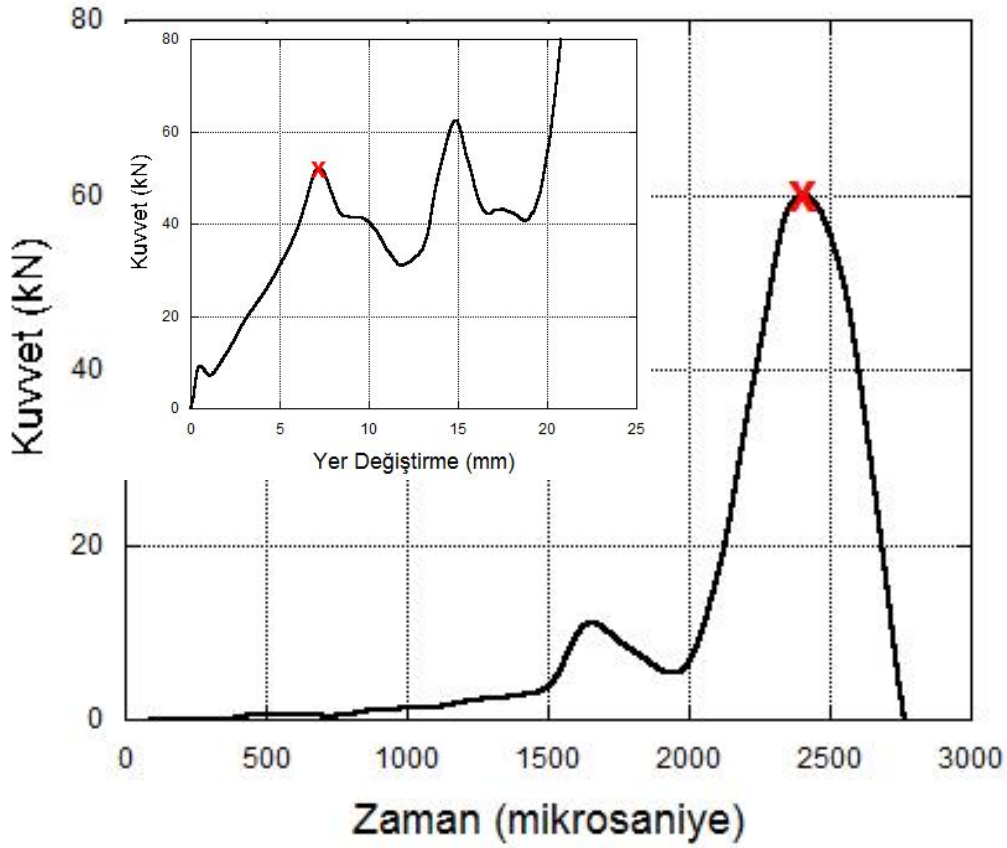
Şekil değiştirme hızına bağlı olarak yapıların deformasyon modları değişmektedir. Şekil 93'deki eğrilerin dikkatli incelenmesi durumunda çarpma hızının artışı ile birlikte sandviç yapının taşıdığı kuvvet miktarı artmaktadır. Kuvvet seviyesindeki bu artış ile birlikte aynı deformasyon seviyesinde elde edilen emilen enerji miktarı da artmaktadır (Şekil 95).

Şekil 96'da ise daha önce eğrileri verilen yapıların ezilme geometrileri sunulmuştur.



Şekil 96. Nümerik deforme olmuş balan sandviç yapılar; düz; (a) 50 m/s, (b) 100 m/s ve (c) 150 m/s; çapraz; (d) 50 m/s, (e) 100 m/s ve (f) 150 m/s.

Biyobenzetim esaslı enerji yutucu yapıların düşen ağırlık testlerinin ve nümerik modellerinin başarıyla gerçekleştirilmesinin ardından proje konusu olan biyobenzetim esaslı yapıların dinamik deformasyona karşı davranışlarının incelendiği testlere geçilmiştir. Bu testler hâlihazırda İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde kurulu bulunan ve ülkemizde de tek örneği olan Doğrudan Basınç Dalgası Deney Düzeneği'nde gerçekleştirilmiştir. Sandviç yapılar için Doğrudan Basınç Dalgası Testleri kapalı kalıp kullanılarak (40 m/s hız, 142 mm çarpan çubuk ve 46 mm piston boyları) gerçekleştirilmiştir. Bu DBD testlerinin sonuçları kuvvet zaman tarihçesi olarak Şekil 97, Şekil 98 ve Şekil 99'da sırasıyla iç çekirdek, dış kabuk ve balan ihtiva eden sandviç yapılara ait statik test sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



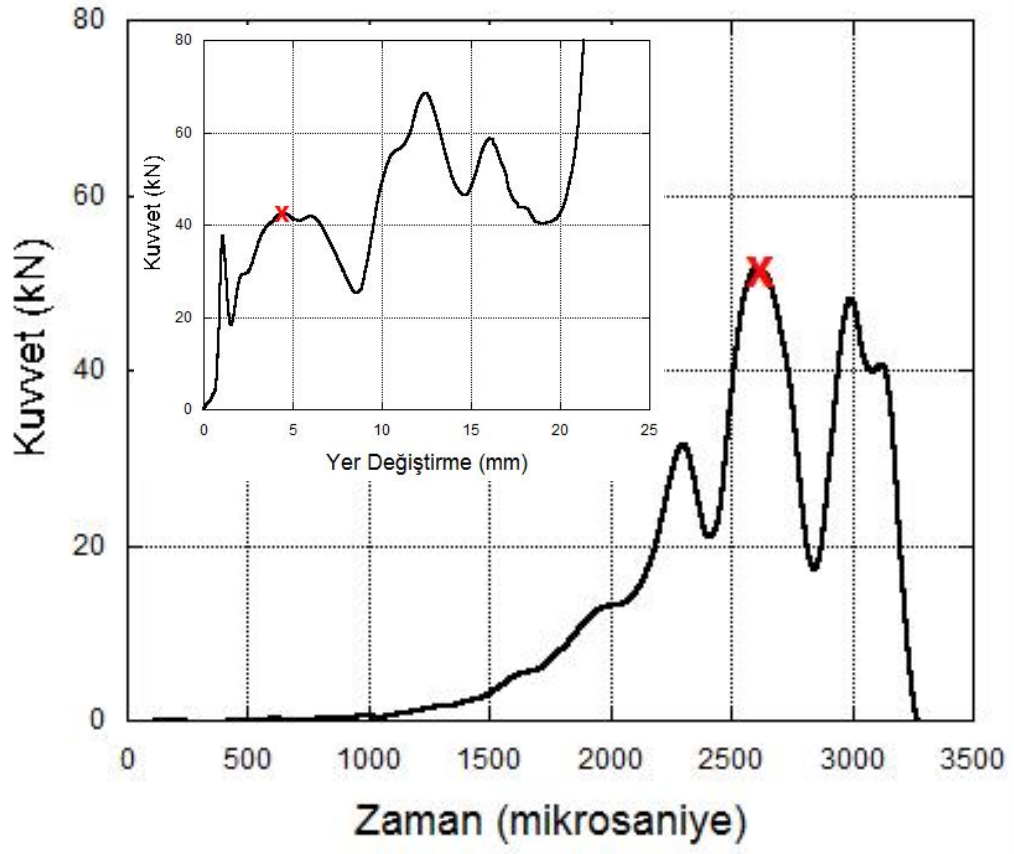
(a)



(b)

Şekil 97. İç çekirdek sandviç yapının; (a) DBDD sonucu ve (b) ezilmiş numune.

Doğrudan Basınç Dalgası Deneyleri sırasında numunelerin ezilme miktarlarına karşılık gelen kuvvet değerleri hem statik hem de dinamik eğriler üzerinde işaret kullanılarak belirtilmiştir. Şekillerden de görülebileceği gibi benzer deformasyon seviyelerinde iç çekirdek sandviç yapıda statik ve dinamik kuvvet değerleri sırasıyla 52 ve 60 kN, dış kabuk sandviç yapıda sırasıyla 42 ve 52 kN ve balan yapı için ise bu değerler 106 ve 112 kN olarak ölçülmüştür. Deformasyon hızının artışı ile birlikte yapı tarafından taşınan kuvvet değerlerin de arttığı görülmüştür. Kuvvet değerlerindeki bu artışa kısmen çekirdek yapıyı oluşturan 304L paslanmaz çelik malzemenin şekil değiştirme hızı hassasiyeti kısmen de mikro atalet etkisi sebep olmaktadır.

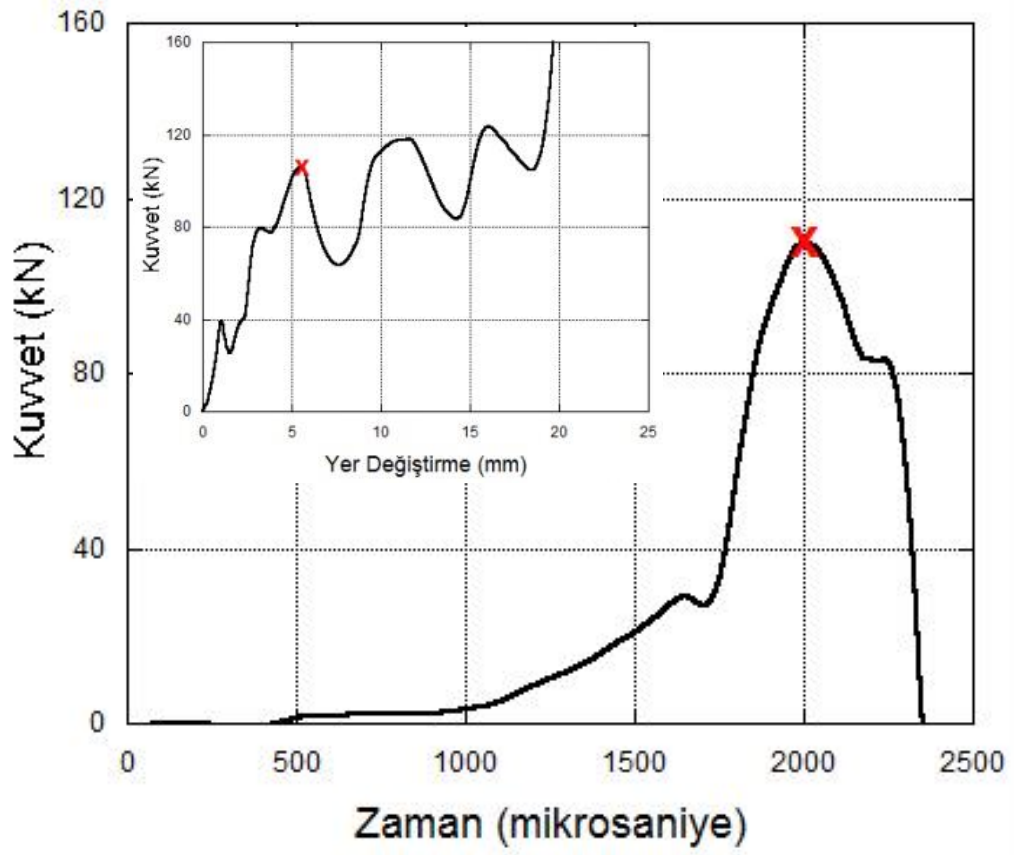


(a)



(b)

Şekil 98. Dış kabuk sandviç yapının; (a) DBDD sonucu ve (b) ezilmiş numune.



(a)



(b)

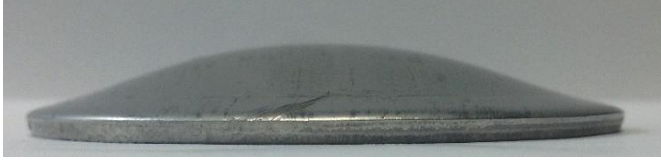
Şekil 99. Balan sandviç yapının; (a) DBDD sonucu ve (b) ezilmiş numune.

Doğrudan Basınç Dalgası Deneyleri sayesinde laboratuvar ortamında yapılar üzerinde patlama etkisi kontrollü ve tekrar edilebilir şekilde uygulanabilmektedir.

Tipik bir Doğrudan Basınç Dalgası Deneyinin gerçek patlama testlerindeki eş değerini bulmak mümkündür. Patlama testlerinde en önemli iki parametre vardır. Bunlar; patlayıcı miktarı ve patlayıcının numuneye olan uzaklığıdır. Eş değer patlama parametrelerini bulmak amacıyla sandviç yapıları oluşturan yüzey malzemeleri kullanılarak bir çalışma yürütülmüştür. Bu amaçla açık kalıp kullanılmıştır ve çelik yüzey plakalarına (3 mm kalınlık) farklı çarpma hızlarında testler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan çelik plakalar ve farklı hızlardaki testler (32.75, 36.37, 39.78 m/s) sonucunda elde edilen deformasyon profilleri Şekil 100'de sunulmuştur. Bu testlerin kuvvet zaman tarihçeleri ise Şekil 101'de görülmektedir.



$V=32.75$ m/s

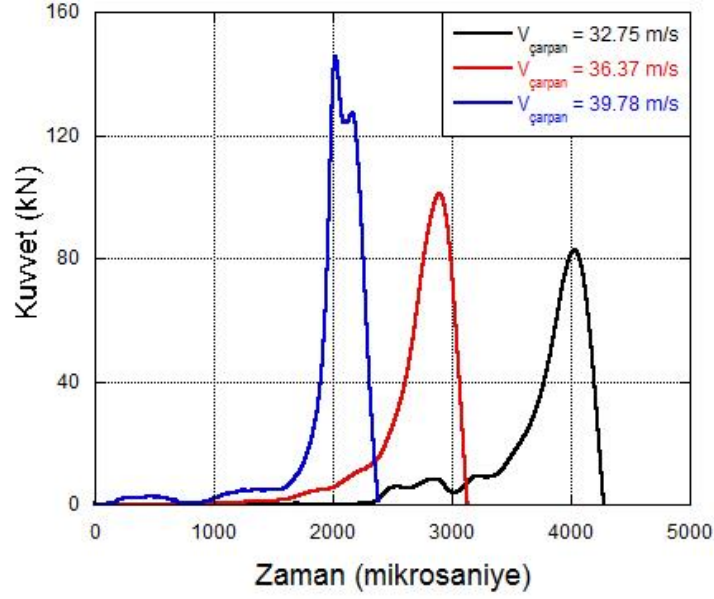


$V=36.37$ m/s



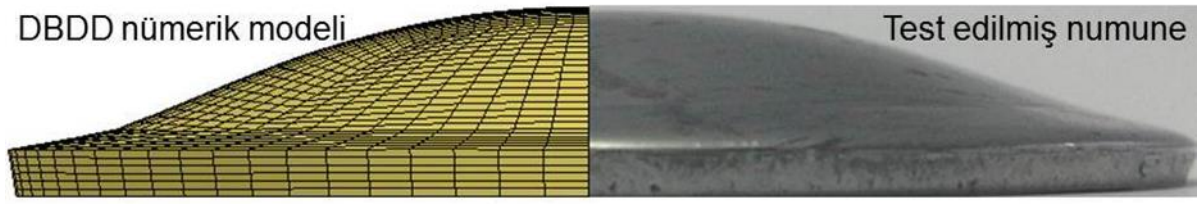
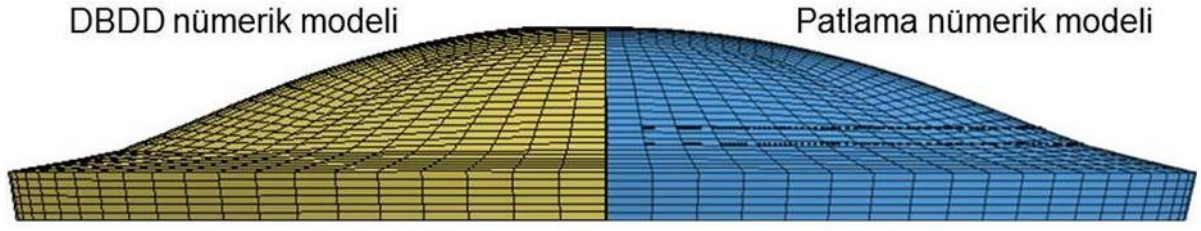
$V=39.78$ m/s

Şekil 100. Farklı çarpma hızlarında deforme olmuş plakalar.



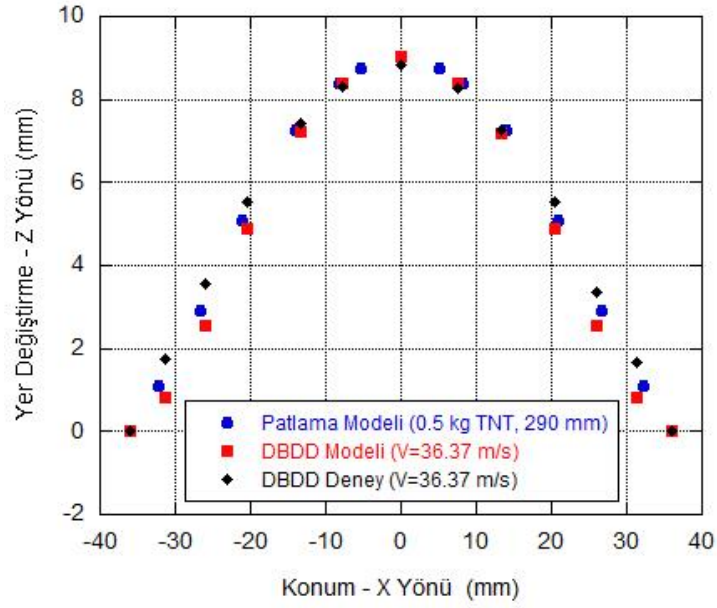
Şekil 101. Farklı çarpma hızları için kuvvet tarihçeleri.

Doğrudan Basınç Dalgası Deneyinin gerçek patlama koşullarındaki eş değerini bulmak amacıyla Doğrudan Basınç Dalgası Deneyinin nümerik modeli ve bir patlama nümerik modeli kurulmuştur. Bu noktada hem Doğrudan Basınç Dalgası Deneyinden sonra numuneden elde edilen deformasyon profili ile gerçek patlama sonrasında yine aynı yapıdaki deformasyon profilinin birbirini eşlemesi ana amaçtır. Böylece patlayıcı kütleleri ve patlama mesafeleri yapıya nümerik olarak uygulanarak Doğrudan Basınç Dalgası Deneyi sonuçlarına yaklaşılmaya çalışılacaktır. Örnek verilmek istenirse 36.37 m/s çarpma hızıyla yapılan bir Doğrudan Basınç Dalgası Deneyi 0.5 kg TNT patlayıcısının 290 mm mesafede patlamasıyla meydana getireceği etkiyi vermektedir (Şekil 102).



Şekil 102. Deforme olmuş plakalar; (a) DBDD-patlama modeli ve (b) DBDD modeli-DBDD deneyi.

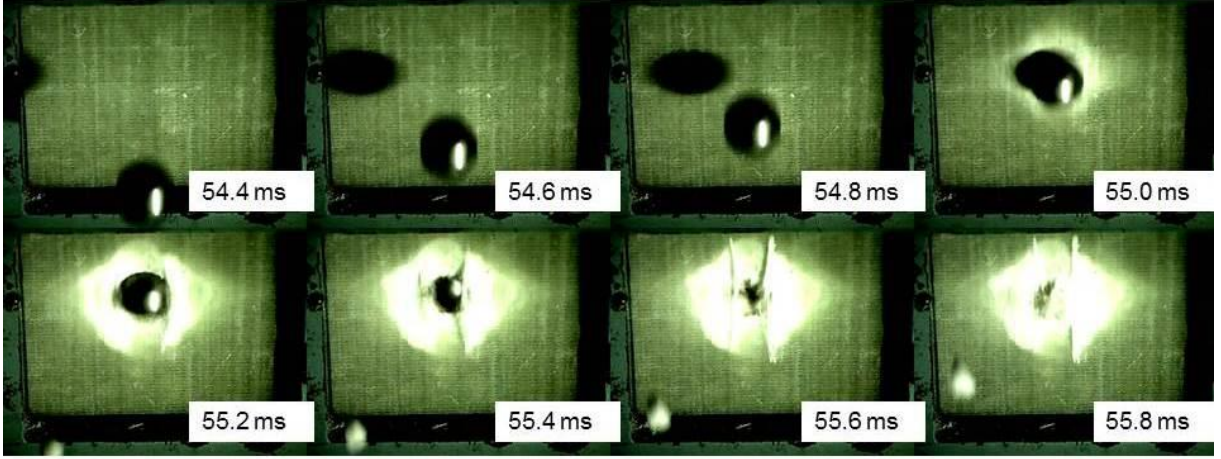
Şekil 103'de plakaların deformasyon profilleri Doğrudan Basınç Dalgası Deneyi, nümerik modeli ve patlama nümerik modeli sonuçlarıyla birlikte karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



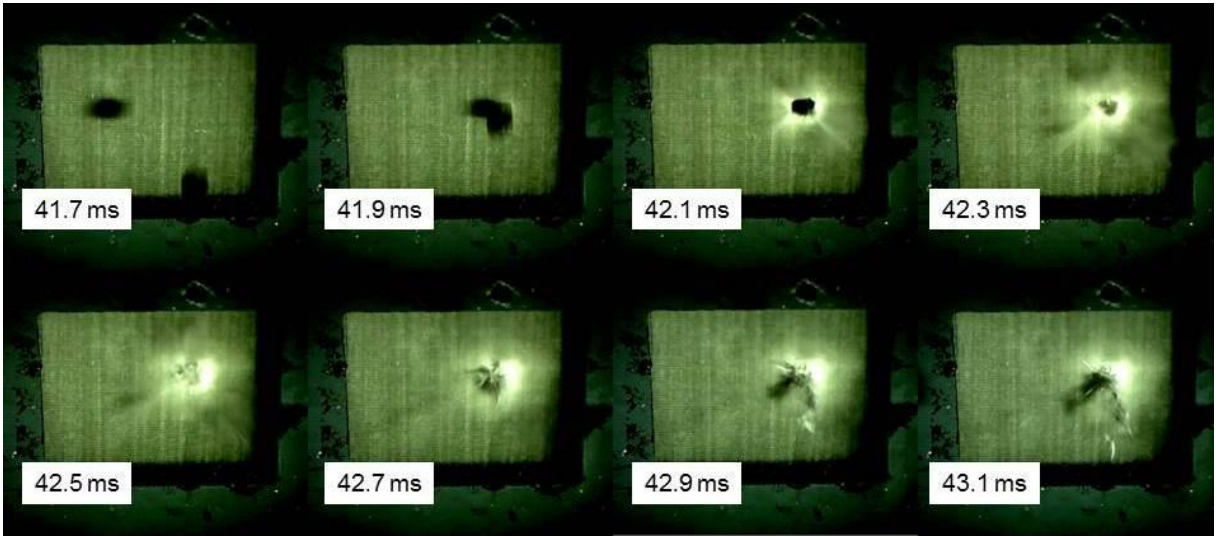
Şekil 103. Deformasyon profilleri.

DBD testlerinin tamamlanmasından sonra sandviç yapıların penetrasyon davranışlarının incelenmesi amacıyla farklı penetratör geometrileri kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir.

Küre penetratör ile sırasıyla 120, 125, 150, 180 m/s ve küp şeklinde penetratör ile 120, 125, 150, 180 ve 235 m/s çarpma hızlarında testler gerçekleştirilmiştir. Bu testler arasında 180 m/s küre penetratör testinde perforasyon gerçekleştirilmiş ve kürenin yapıdan çıkış hızı 68 m/s olarak ölçülmüştür. Küp penetratör ile yapılan testlerde ise penetrasyon gözlemlenmiş fakat perforasyonun meydana gelmediği gözlemlenmiştir. Bahsi geçen testlere ait örnek yüksek hızlı kamera görüntüleri Şekil 104 ve Şekil 105'de görülmektedir.

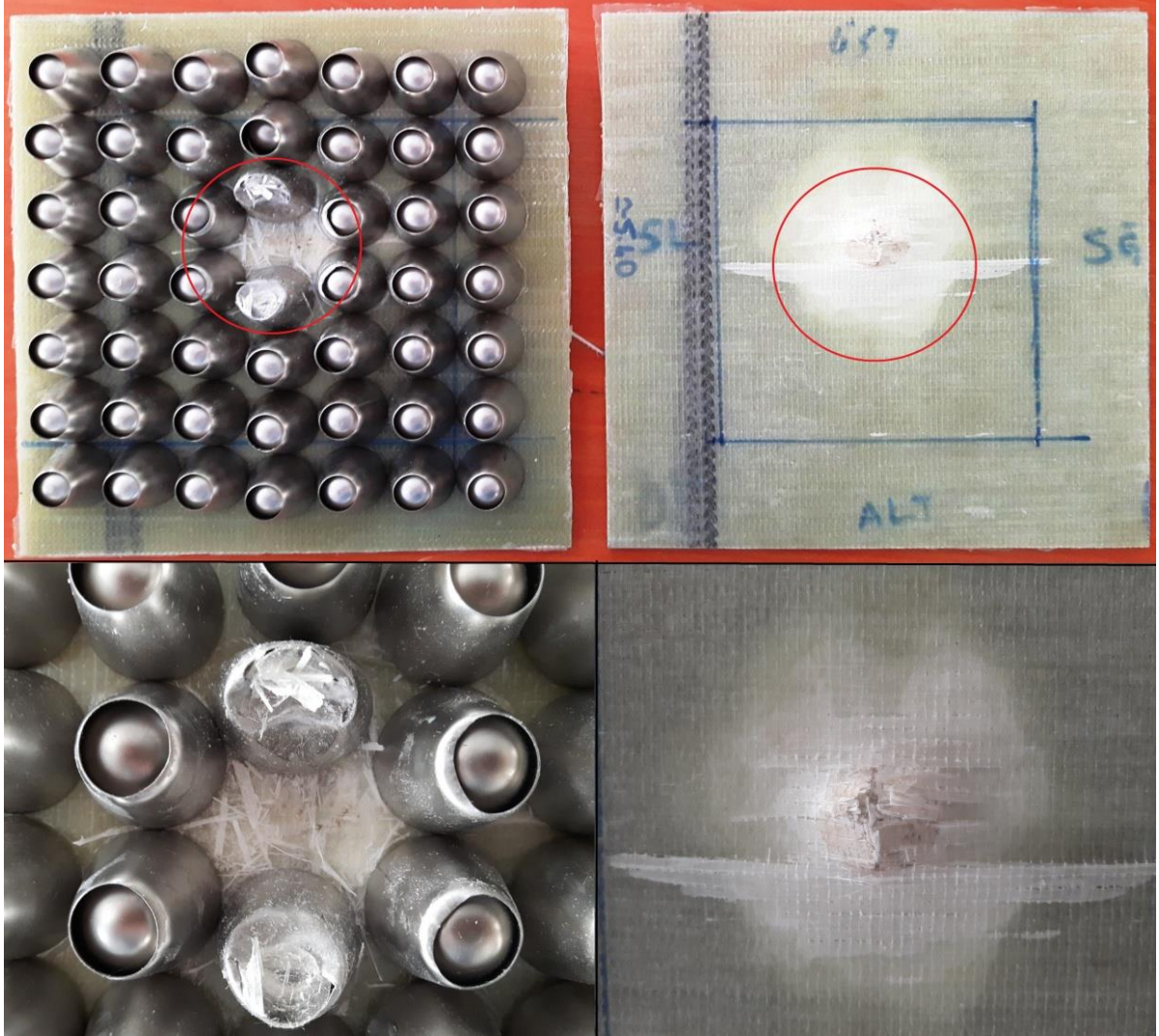


Şekil 104. Penetrasyon testi hızlı kamera görüntüleri (küre penetratör, 180 m/s).



Şekil 105. Penetrasyon testi hızlı kamera görüntüleri (küp penetratör, 235 m/s).

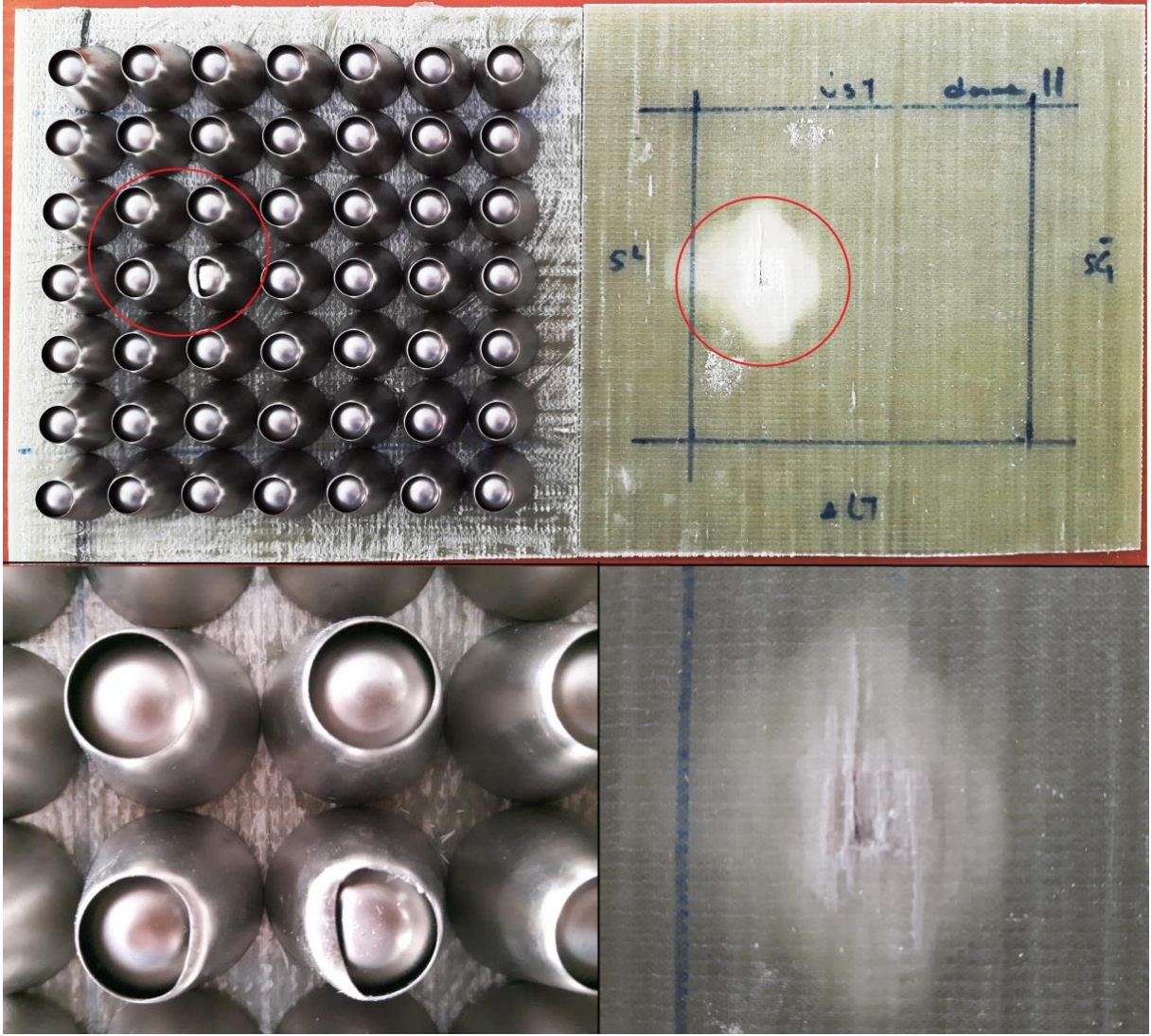
Küresel ve küp şeklindeki penetratörlerin kullanılmasıyla sandviç yapılar üzerinde oluşturulan hasarlar Şekil 106 - Şekil 112 aralığında verilmiştir.



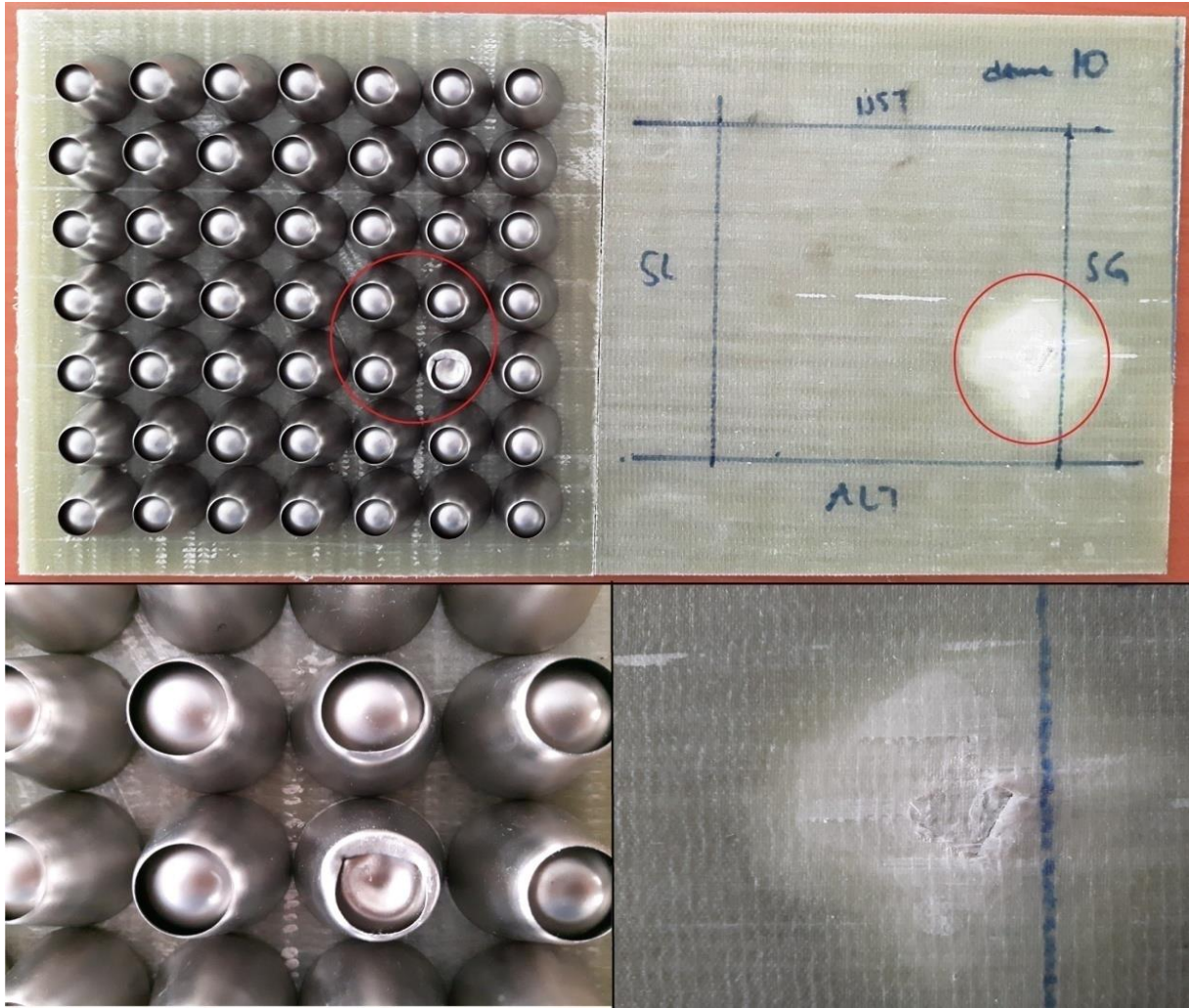
Şekil 106. Penetrasyon test sonucu (küre penetratör, 150 m/s).



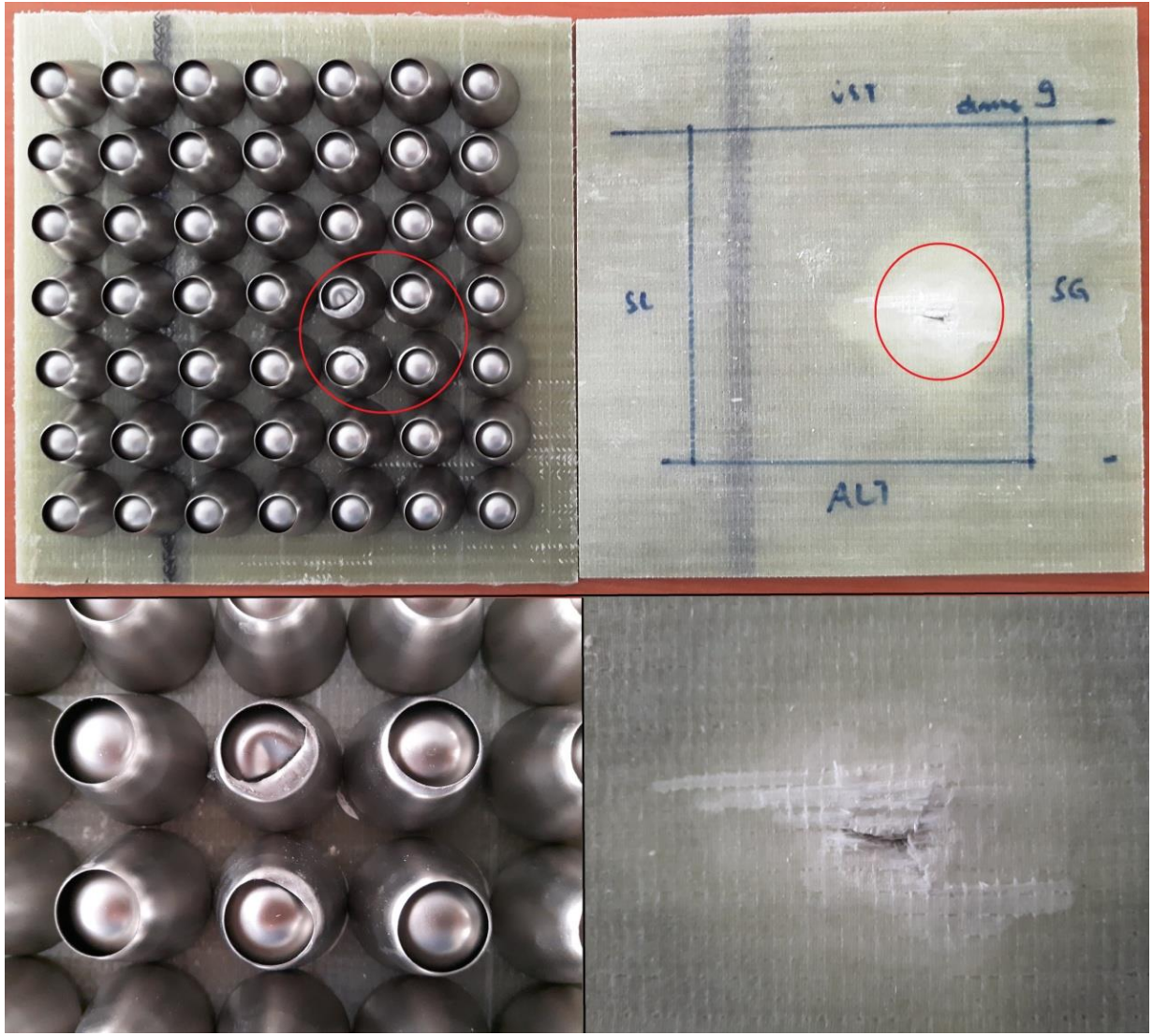
Şekil 107. Penetrasyon test sonucu (küre penetratör, 180 m/s).



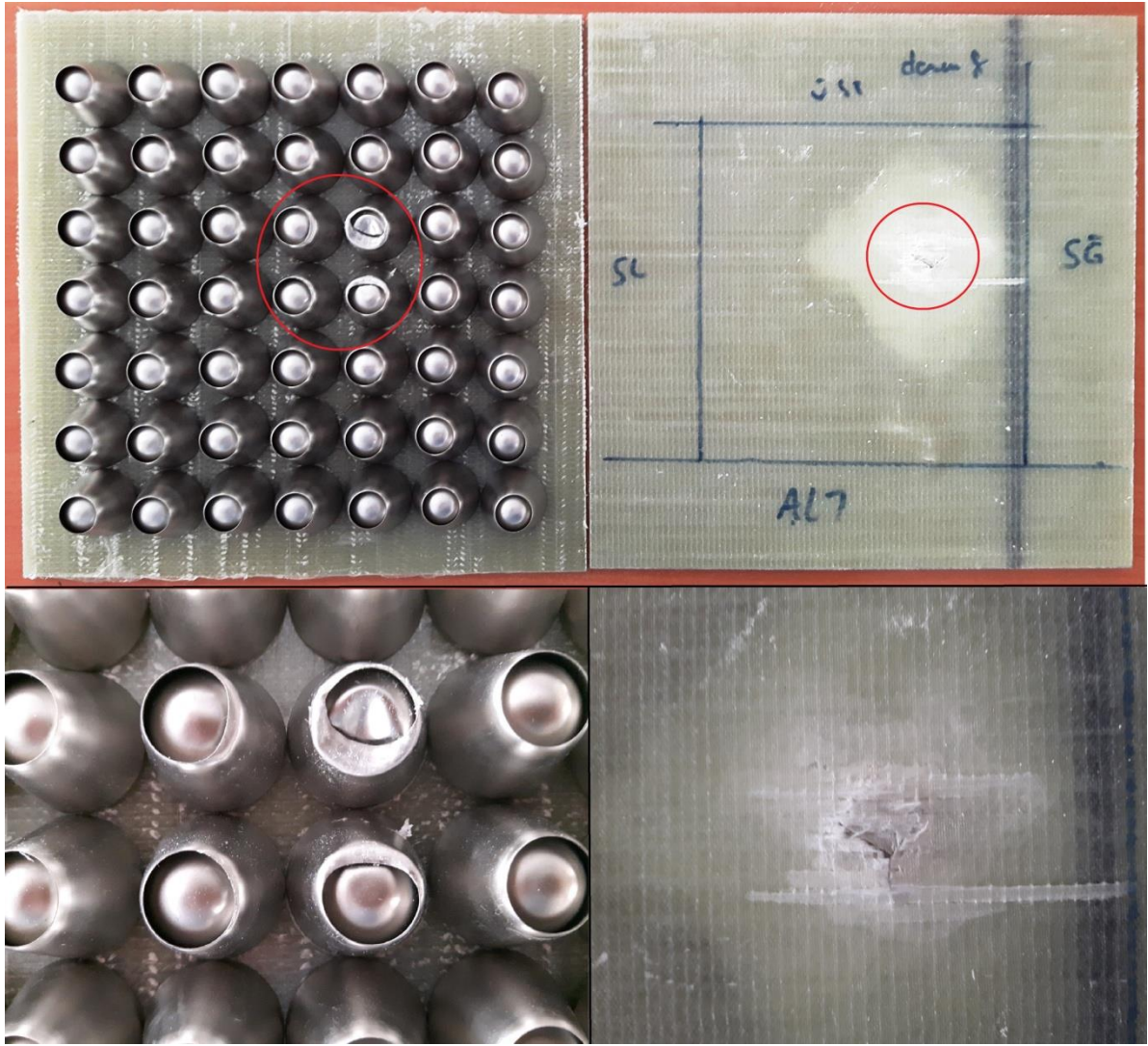
Şekil 108. Penetrasyon test sonucu (küp penetratör, 120 m/s).



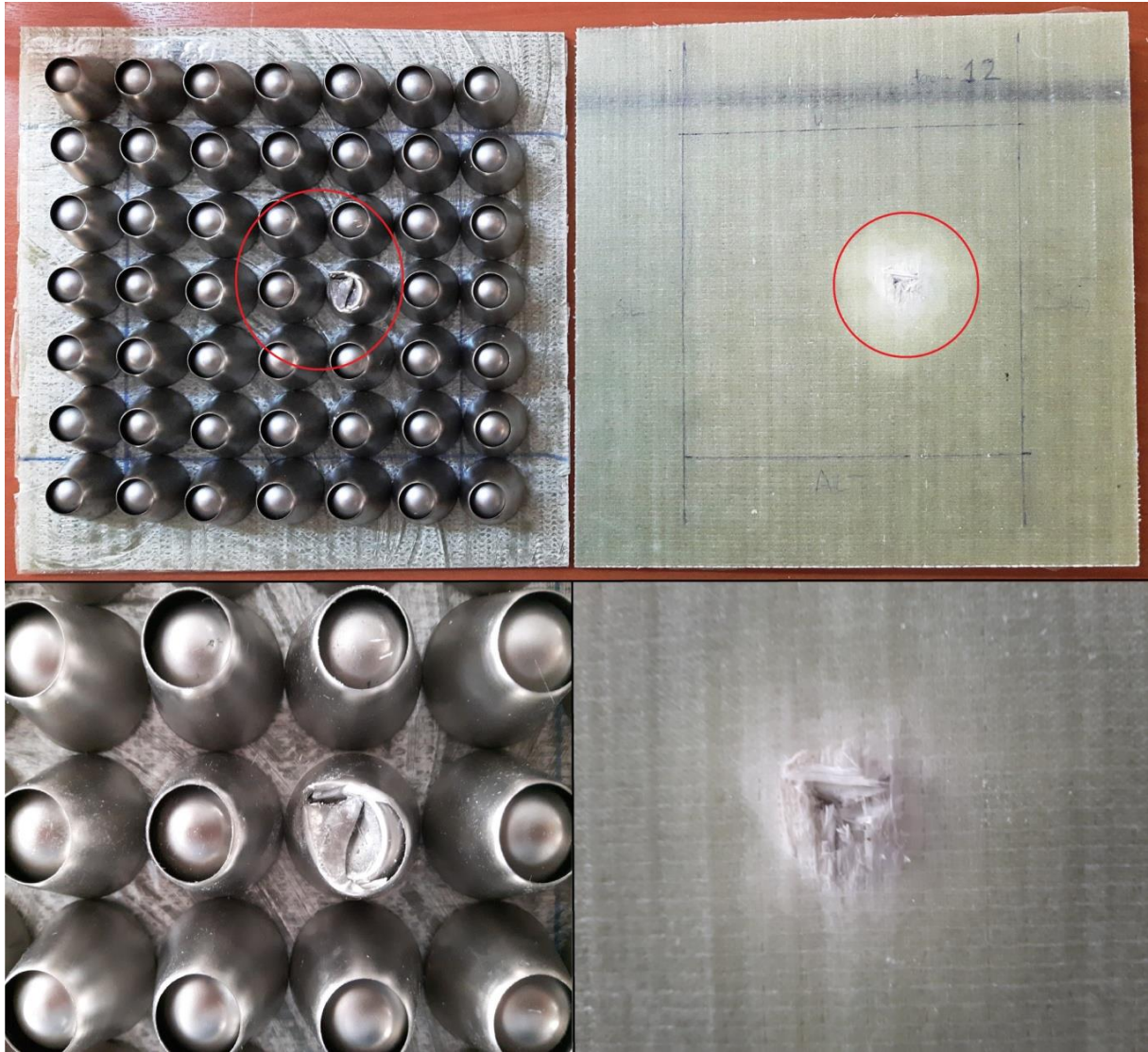
Şekil 109. Penetrasyon test sonucu (küp penetratör, 125 m/s).



Şekil 110. Penetrasyon test sonucu (küp penetratör, 150 m/s).



Şekil 111. Penetrasyon test sonucu (küp penetratör, 180 m/s).

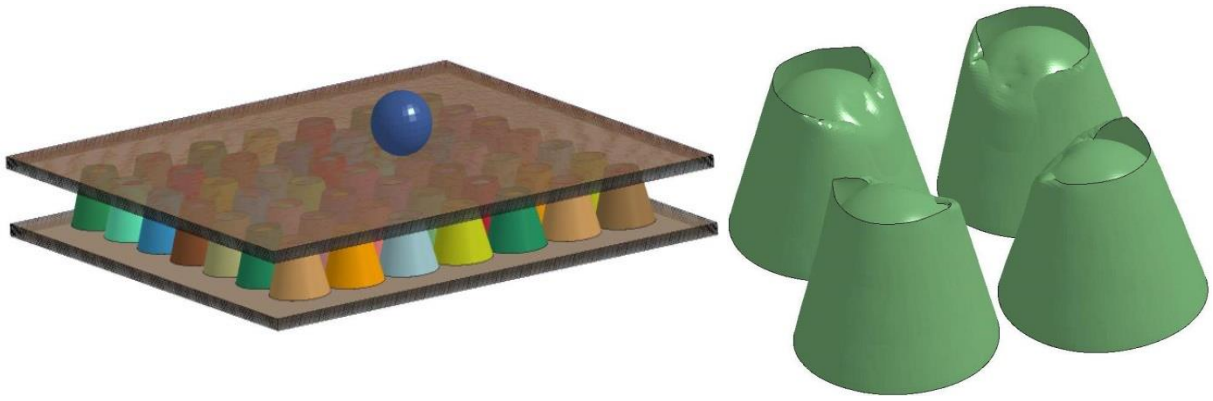


Şekil 112. Penetrasyon test sonucu (küp penetratör, 235 m/s).

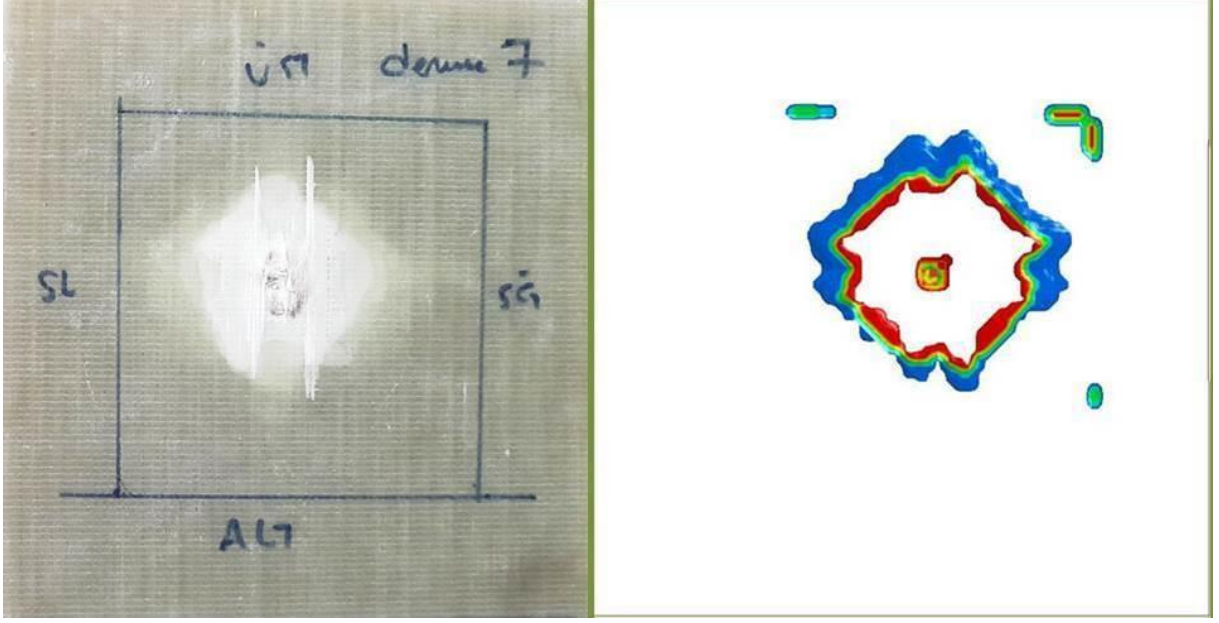
Çarpma hızının artmasına bağlı olarak kompozit yüzey plakasında meydana gelen hasar (delaminasyon, fiber ve matris hasarları) ve balan çekirdek yapısında meydana gelen kalıcı plastik deformasyon miktarı artmaktadır. Küresel penetratör kullanılması durumunda genellikle 4-6 adet balan yapısı penetrasyona karşı dirence iştirak etmektedir. Penetratörle temas eden iç çekirdek ve dış kabuk birlikte deforme olarak enerji emilimine katkıda bulunmaktadır. Küp şeklindeki penetratörün nispeten küçük geometrik boyutları daha az sayıda balan yapısının (genellikle 4 adet) deforme olmasına sebep olmaktadır. Bu durum dikkate alındığında gerçek kullanım şartlarında hasar almış sandviç yapılarda tamirin kolaylıkla gerçekleşebileceği ve bu yapıların çoklu çarpma dayanım kabiliyetlerinin yüksek

olacağını göstermektedir. Keskin kenarlı küp penetratörü kullanıldığı yüksek çarpma hız testlerinde balan yapıda plastik deformasyonun yanı sıra yırtılmalar da meydana gelmiştir.

Penetrasyon testleri sırasında yapıda meydana gelen ezilme davranışının daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla örnek bir test nümerik ortamda modellenmiştir. Çekirdek yapıda meydana gelen deformasyonun deney sonrası elde edilen deformasyona oldukça benzer olduğu görülmüştür. Kompozit yüzey plakalarında meydana gelen hasarlar deneysel sonuçlarla oldukça uyumludur ve malzeme modelinin farklı hasar modlarını gösterebilmesindeki yüksek başarısı burada da sergilenmiştir (Şekil 113 ve Şekil 114).



Şekil 113. Penetrasyon testi nümerik modeli.



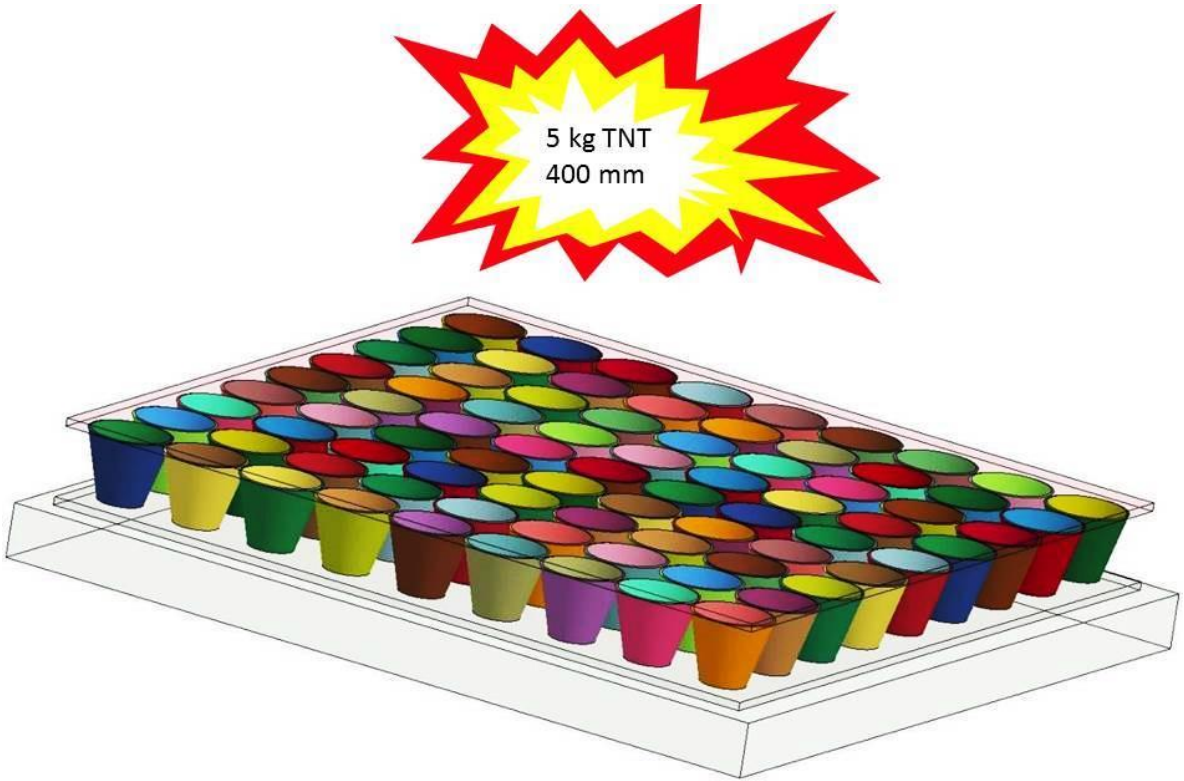
Şekil 114. Ön yüzey plakasında meydana gelen delaminasyon hasarı (küre penetratör,180 m/s).

4.5. Sandviç Yapıların Patlama Yükleri Altındaki Davranışları

Farklı ezilme şartları için yapıların enerji emme karakteristiklerinin incelenmesinin ardından farklı dizilimlerin, farklı çarpma hızlarının ve farklı dinamik yükleme koşullarının yapının deformasyonuna etkisini incelenmiştir. Yine proje kapsamında ezilerek enerji yutan koruyucu yapıların patlama yükleri karşısındaki davranışları detayları gereç ve yöntem kısmında anlatıldığı gibi nümerik olarak incelenmiştir. Çalışmalara balan yapının düz ve ters konfigürasyonlarının patlama nümerik modelleri hazırlanarak başlanmıştır, Şekil 115.



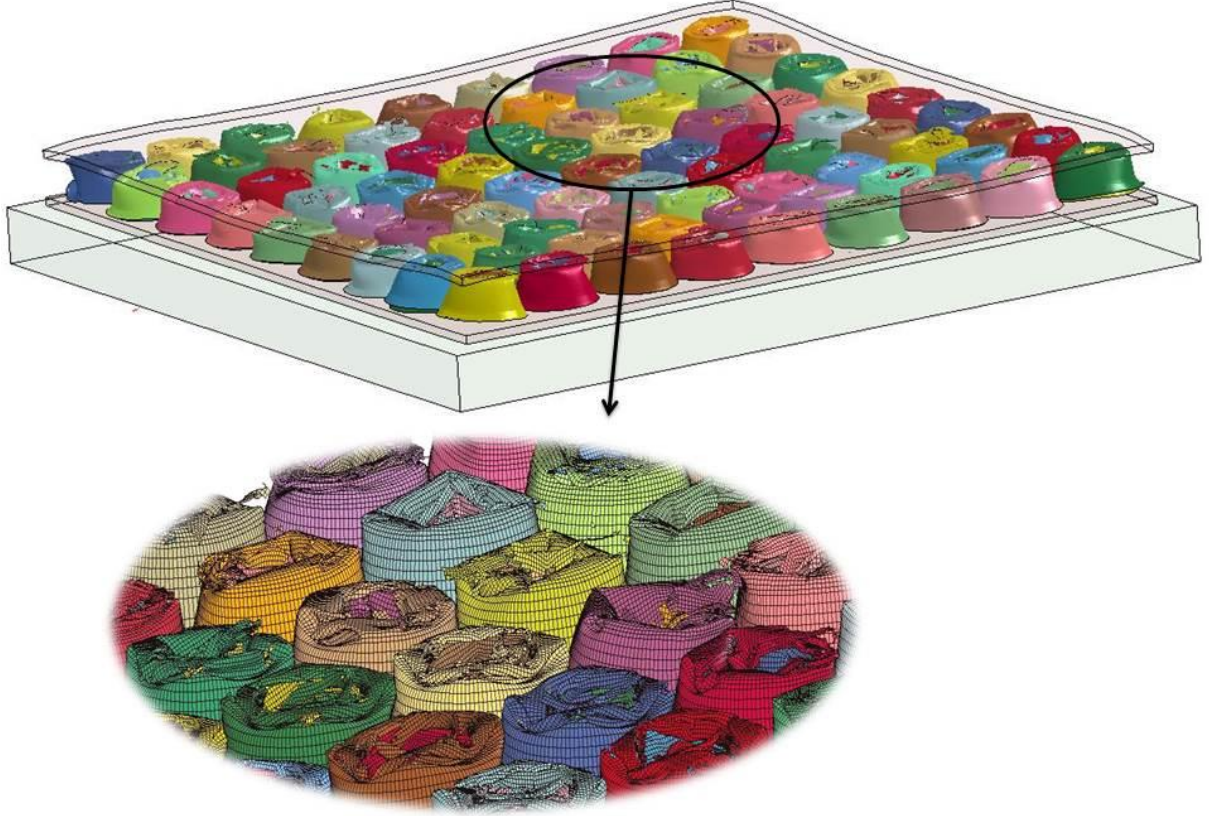
(a)



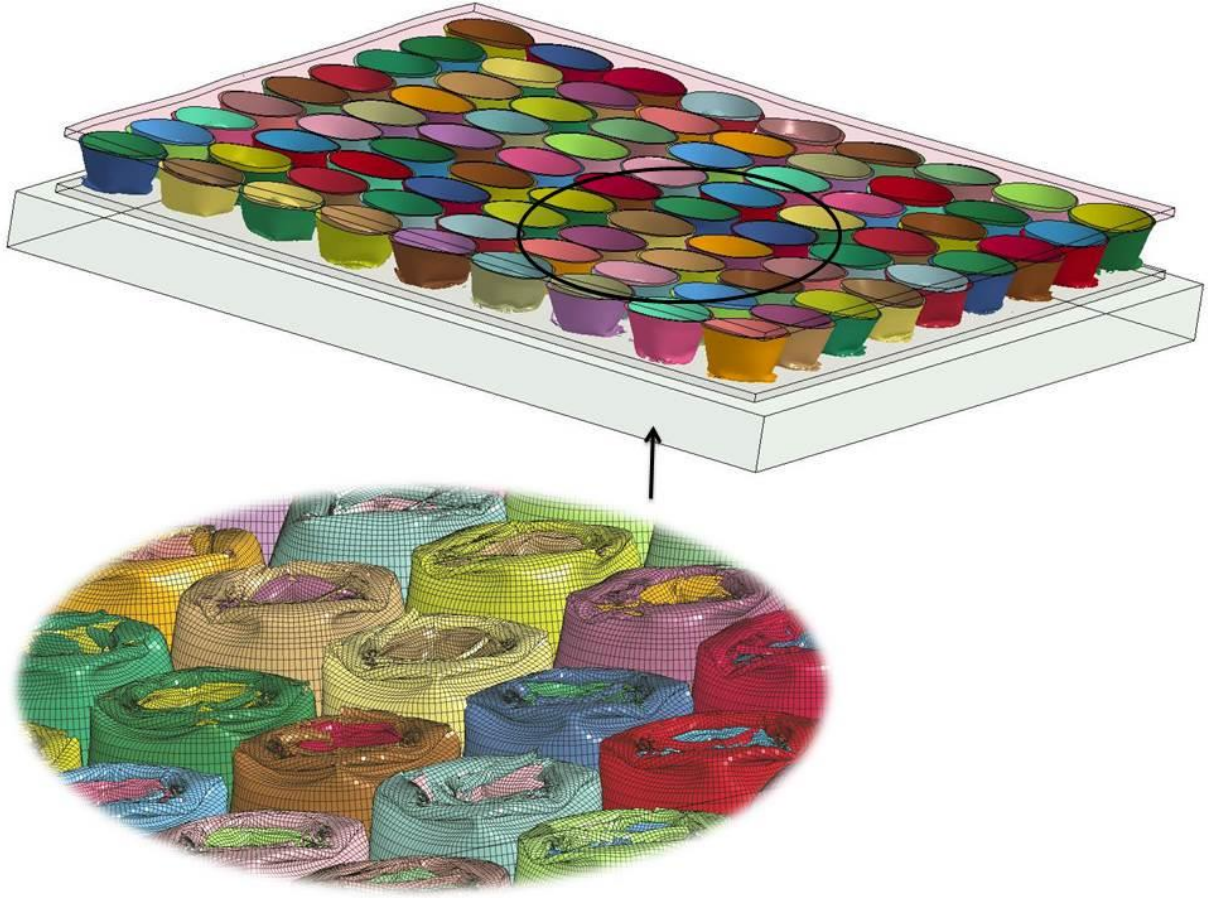
(b)

Şekil 115. Patlama nümerik modelleri; (a) düz ve (b) ters.

Modelde sandviç yapıyı oluşturan çekirdeklerin birbirleri ve yüzey plakaları ile aralarında temas tanımlanmıştır. Patlama sonrasında sandviç yapılarda meydana gelen deformasyonlar Şekil 116 a ve b'de verilmiştir.



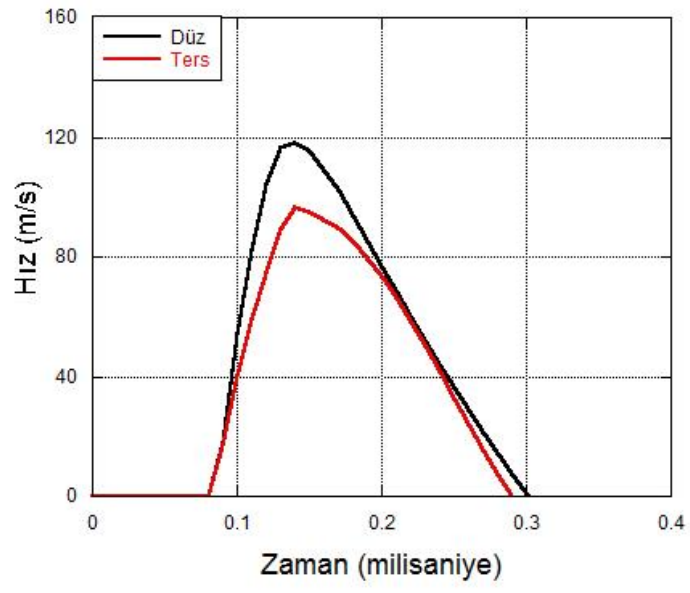
(a)



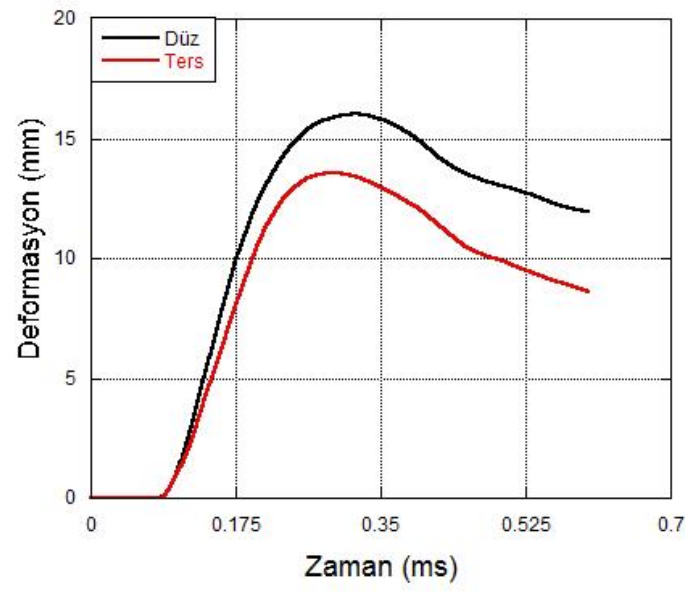
(b)

Şekil 116. Deforme olmuş sandviç yapılar; (a) düz ve (b) ters.

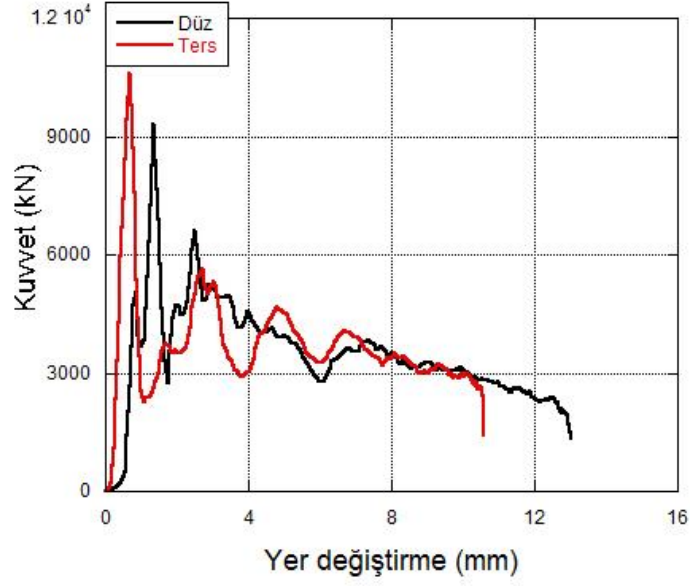
Düz ve ters olarak konumlandırılmış iki farklı sandviç yapının aynı patlama yükleri altındaki davranışları incelendiğinde balan yapıların ters olarak konumlandırılmasının ön yüzey plakasının ilerleme hızını yavaşlattığı ve daha az toplam deformasyona sebep olduğu tespit edilmiştir (Şekil 117 a ve b). Düz konumlandırmada ise sandviç yapı daha fazla deforme olmuştur ve korunan yapıya iletilen kuvvet miktarı ters yapıya göre daha düşük seviyelerde kalmıştır (Şekil 117 c). Düz konumlandırılmış sandviç yapılarda meydana gelen gerilme dalgasının iletim zamanındaki gecikme, yapıların korunması açısından istenilen bir durumdur. Kuvvet-yer değiştirme eğrilerindeki ilk pik değerleri göz önünde bulundurulduğunda ters yapıya iletilen kuvvet düz yapıya göre yaklaşık olarak %13.85 kadar daha fazladır. Her iki konfigürasyonun absorbe ettiği enerjiler Şekil 118'de görülmektedir.



(a)

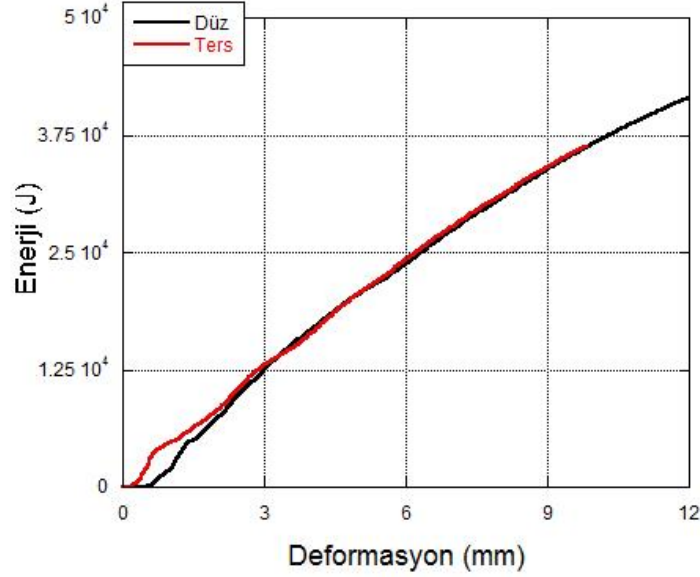


(b)



(c)

Şekil 117. Sandviç yapıların; (a) hız-zaman, (b) deformasyon-zaman ve (c) kuvvet-yer değiştirme eğrileri.

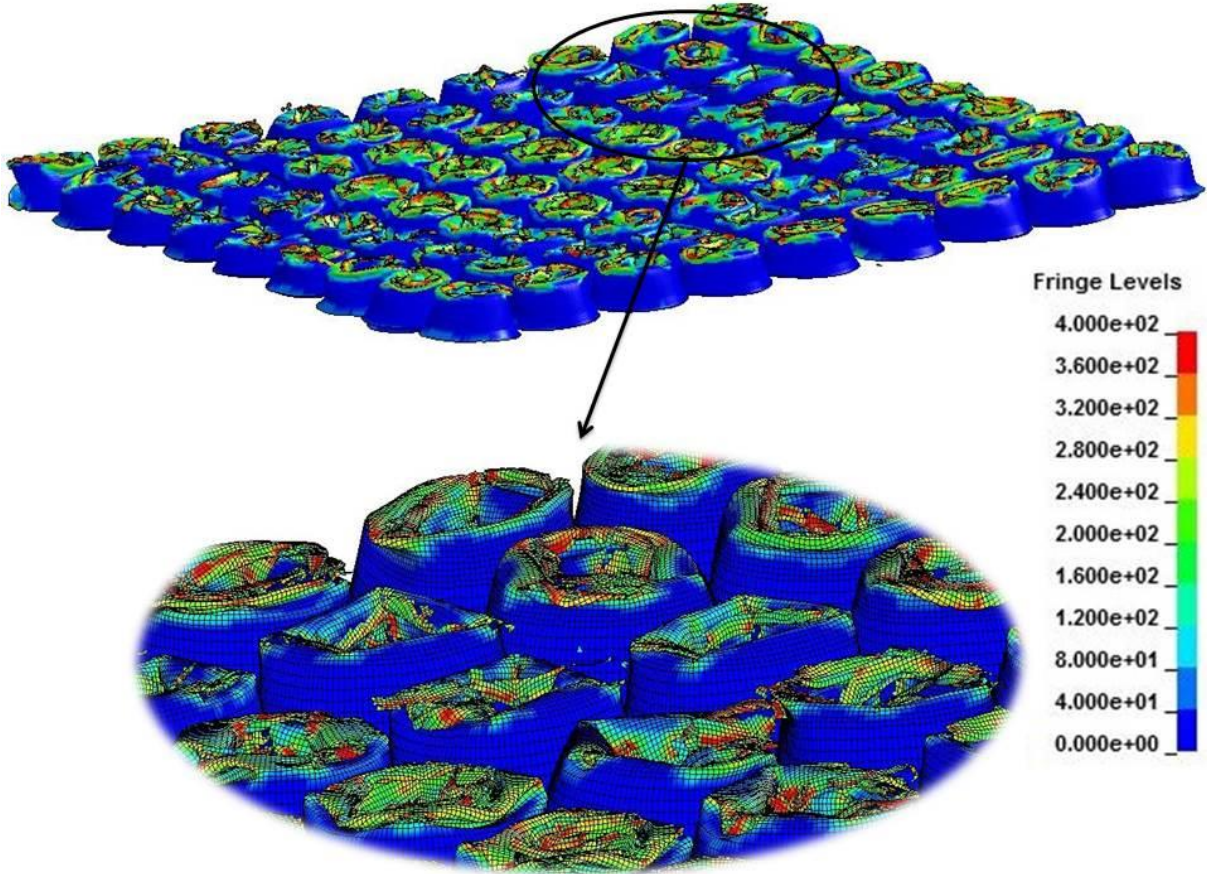


Şekil 118. Enerji-deformasyon eğrileri.

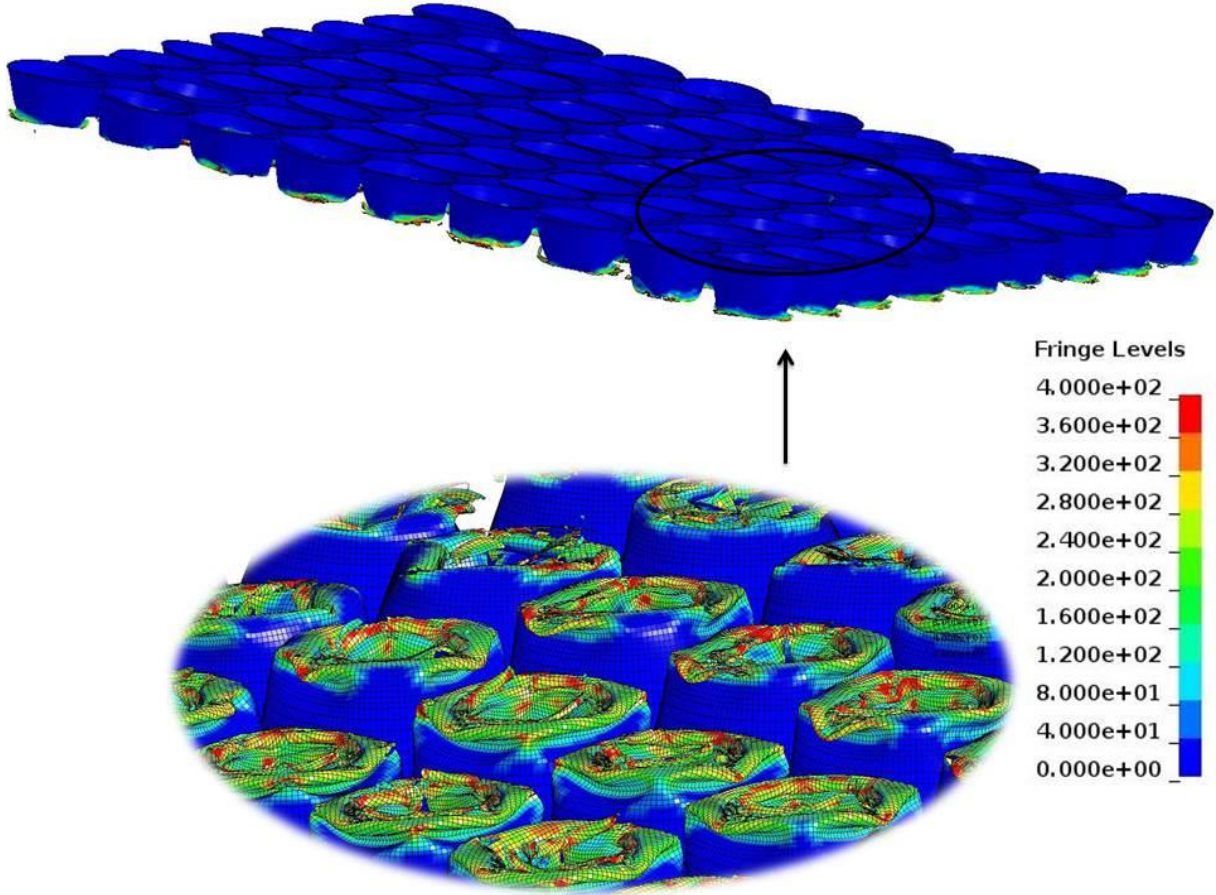
Yapıların enerji-deformasyon eğrileri incelendiğinde düz yapının daha fazla deforme olduğu ve yaklaşık olarak %14.28 kadar daha fazla enerji emdiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlardan da görülebileceği gibi çekirdek yapıların dizilimlerindeki farklılığın enerji emme karakteristikleri

üzerinde önemli etkileri mevcuttur. Proje kapsamında geliştirilen yapıların 5 kg TNT - 400 mm patlama mesafe koşullarına dayandığının tespiti, yapının oldukça başarılı çalıştığını ve gerçek kullanım şartlarında (tipik bir kara mayını ve araç altı patlama mesafesi) kendine uygulama alanı bulabilme potansiyelinin çok yüksek olduğunu göstermektedir.

Proje kapsamında yapılan bütün nümerik modelleme çalışmalarında yüksek deformasyon hızlarında meydana gelen sıcaklık artışının mekanik özelliklere etkisi hesaba katılmıştır. Şekil 119'da hem düz hem de ters olarak dizilen çekirdek yapılarında meydana gelen sıcaklık artışı verilmektedir. Patlama modellerinde anlık sıcaklık artışının yaklaşık olarak 400 derece seviyelerine ulaşabildiği yapılan analizler sonucunda tespit edilmiştir.



(a)

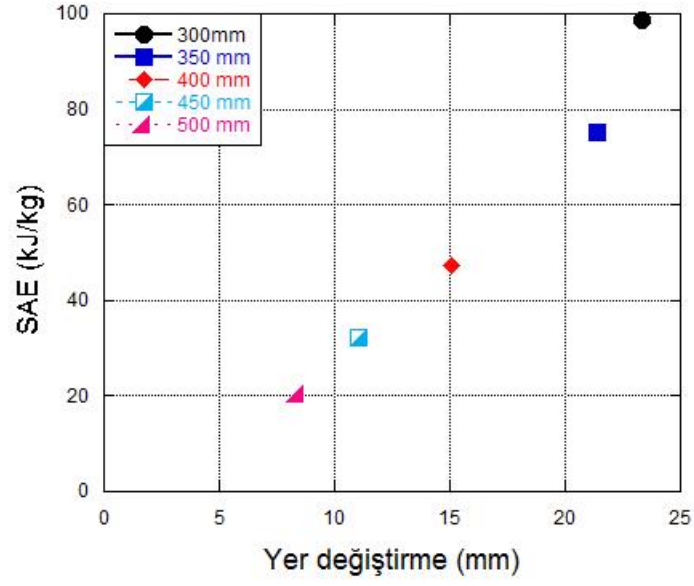


(b)

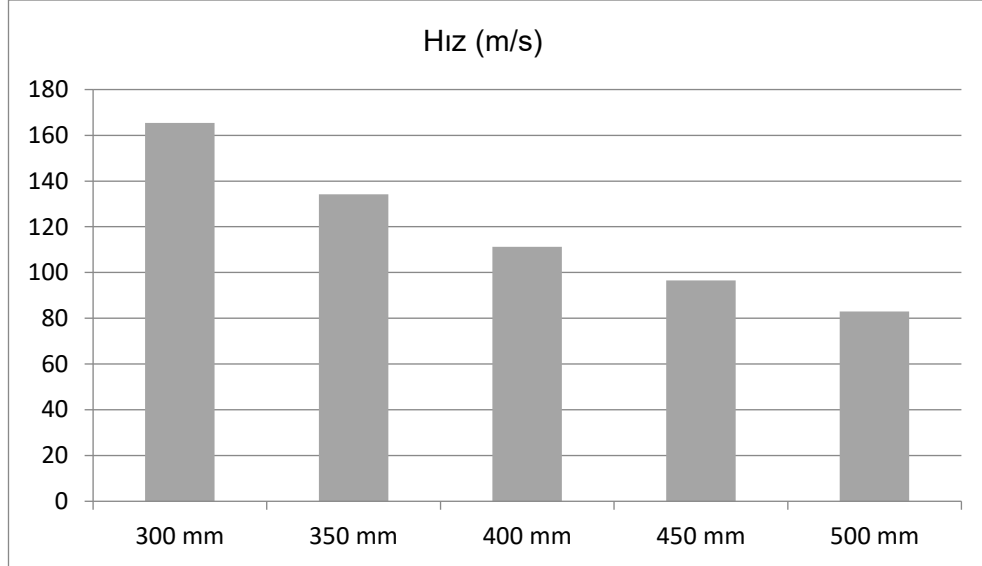
Şekil 119. Deforme olmuş sandviç yapılarda meydana gelen sıcaklık artışı; (a) düz ve (b) ters.

Düz konumlandırılmış çekirdeklere sahip balan sandviç yapıların 5 kg TNT'ye karşı farklı mesafeler için emdiği özgül enerjilerin değişimi Şekil 120'de verilmiştir. 400 mm mesafe değeri için yaklaşık %60 sıkışma değeri elde edilmiştir. Buradan çıkarılabilecek en önemli sonuç bu proje kapsamında geliştirilen sandviç yapıların çekirdek malzemelerinin seçiminde tehditin de aslında son derece önemli olduğudur. Örneğin düşük tehdit seviyelerinde (düşük TNT kütleleri veya yüksek patlama mesafeleri) sadece iç çekirdek veya sadece dış kabuk ihtiva eden sandviç yapıların da kullanılabilme potansiyelinin olduğudur. Patlama mesafesi azaldıkça aynı tehdit seviyesi için deformasyon miktarı artmakta ve özgül enerji emme kapasitesi artmaktadır. Mesela 350 mm patlama mesafesinde deformasyon miktarı yaklaşık %85 değerine ulaşmaktadır. Deformasyon miktarı arttıkça emilen özgül enerji değerleri de

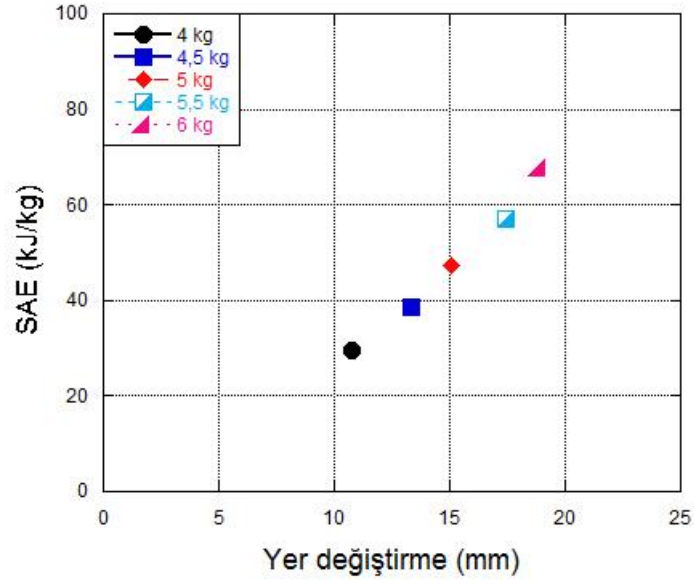
artmaktadır. Patlama mesafesinin değişimi ile birlikte ön yüzey plakasının hızında gözlemlenen değişiklikler Şekil 121’de sunulmuştur.



Şekil 120. Farklı mesafelerden 5 kg patlayıcıya maruz bırakılan sandviç yapılar.

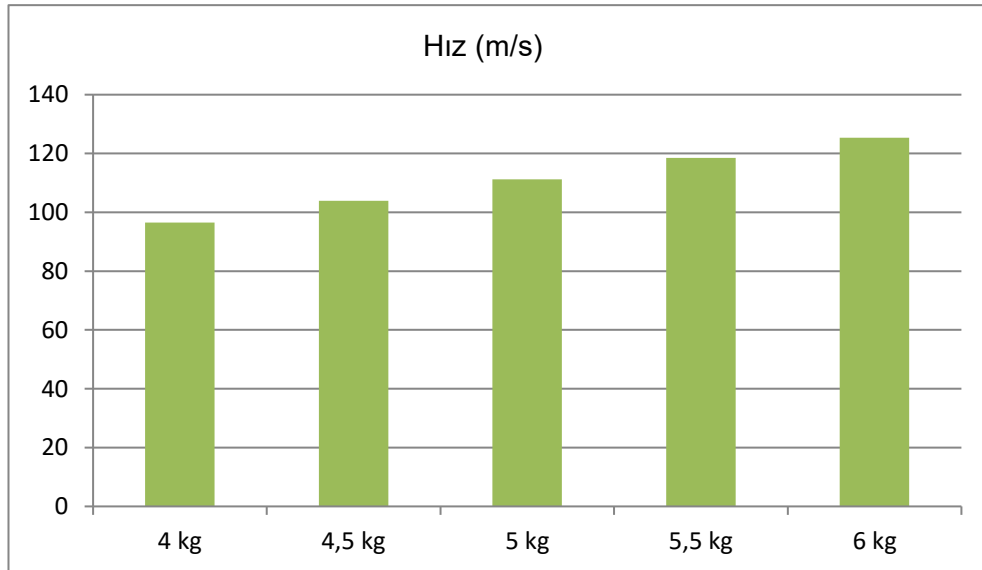


Şekil 121. Sandviç yapıların ön yüzey plakası maksimum hız değerleri.



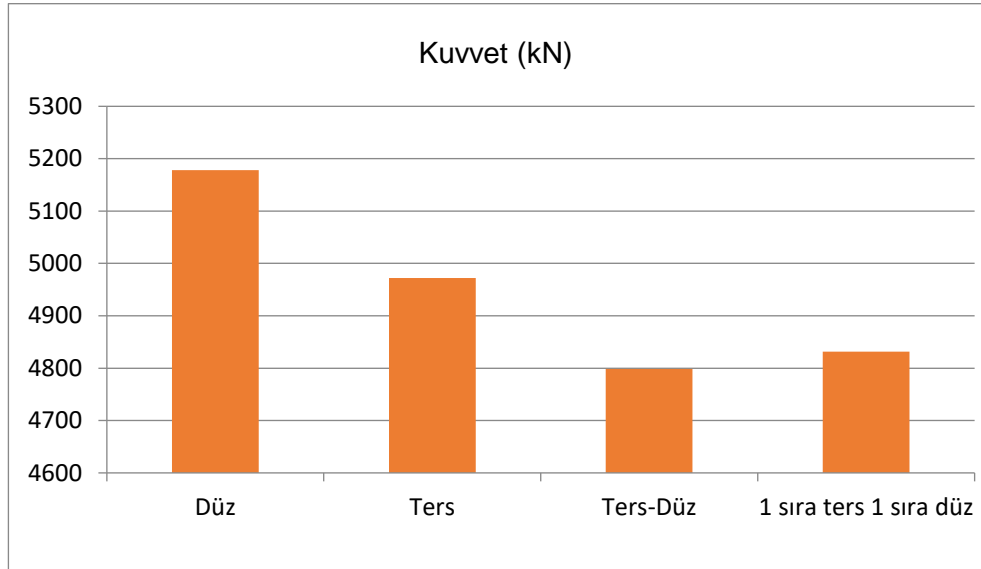
şekil 122. 400 mm mesafeden farklı miktarlarda patlayıcıya maruz bırakılan sandviç yapılar.

şekil 122'de çekirdek malzemeleri patlama yönüne göre düz konumlandırılmış balan sandviç yapıların sabit bir patlama mesafesi için (400 mm) farklı kütlelerde patlayıcılara karşı özgül enerji emme kapasitelerinin değişimi verilmiştir. 5 kg patlayıcı ile yapıda yaklaşık %60 deformasyon seviyesi elde edilmiştir. Patlayıcı miktarının ön yüzey plaka hızına etkisi ise şekil 123'de verilmiştir.

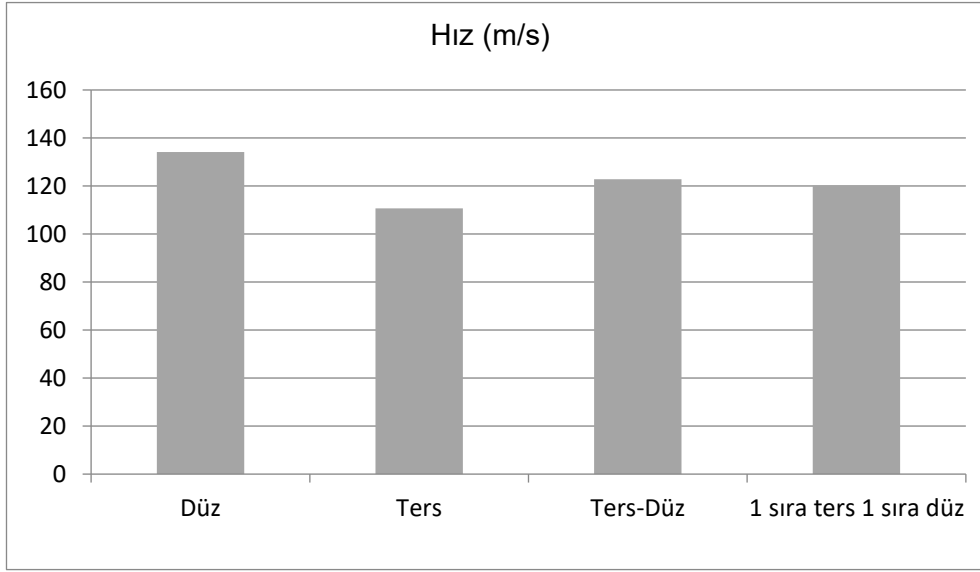


şekil 123. Sandviç yapıların ön yüzey plakası maksimum hız değerleri.

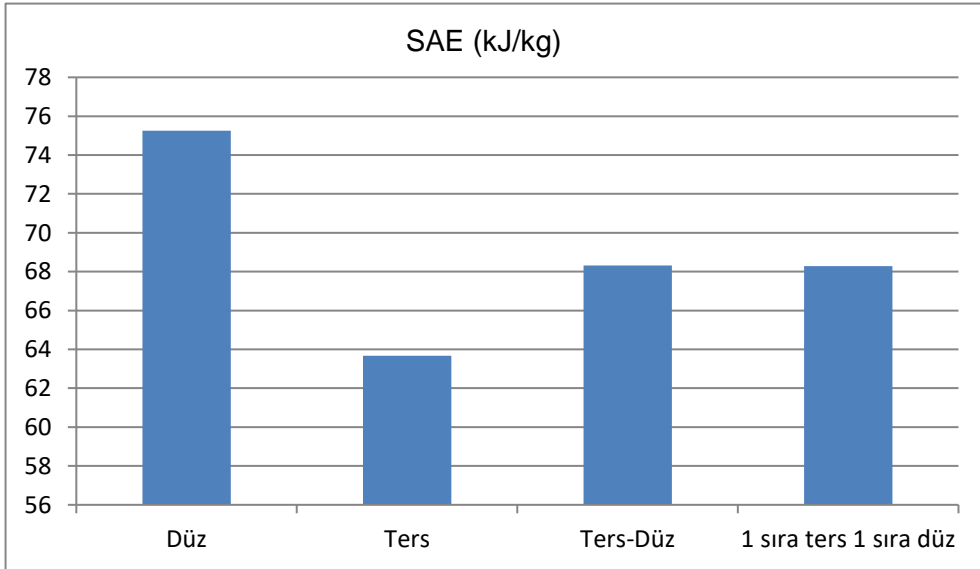
Nümerik modelleme çalışmasına çekirdek malzemelerin (balan) geometrik dizilimlerinin yapının davranışına etkisinin detaylı incelenmesi ile devam edilmiştir. Bu noktada denenen dizilimler sırasıyla tamamı düz, tamamı ters, bir ters bir düz değişimli ve son olarak bir sıra ters bir sıra düz şeklindedir. Tüm dizilimler aynı tehditlere (5 kg TNT ve 350 mm mesafe) maruz bırakılmıştır. Şekil 124'de korunan yapıya iletilen kuvvet değerlerinin tepe noktalarının konfigürasyona bağlı değişimi verilmiştir. En yüksek tepe kuvveti düz ve en düşük tepe kuvveti ise tüm balan yapıların sırasıyla bir adet ters bir adet düz dizildiği durumlarda elde edilmiştir. Şekil 125'de ise sandviç yapıların ön yüzey plaka hızları verilmiştir. Düz dizilimde ön yüzey plaka hızı da en yüksek olarak ölçülmüştür. En düşük ön yüzey plaka hızı ise ters dizilimde elde edilmiştir.



Şekil 124. Sandviç yapıların maksimum kuvvet değerleri.



Şekil 125. Sandviç yapıların ön yüzey plakası maksimum hız değerleri.

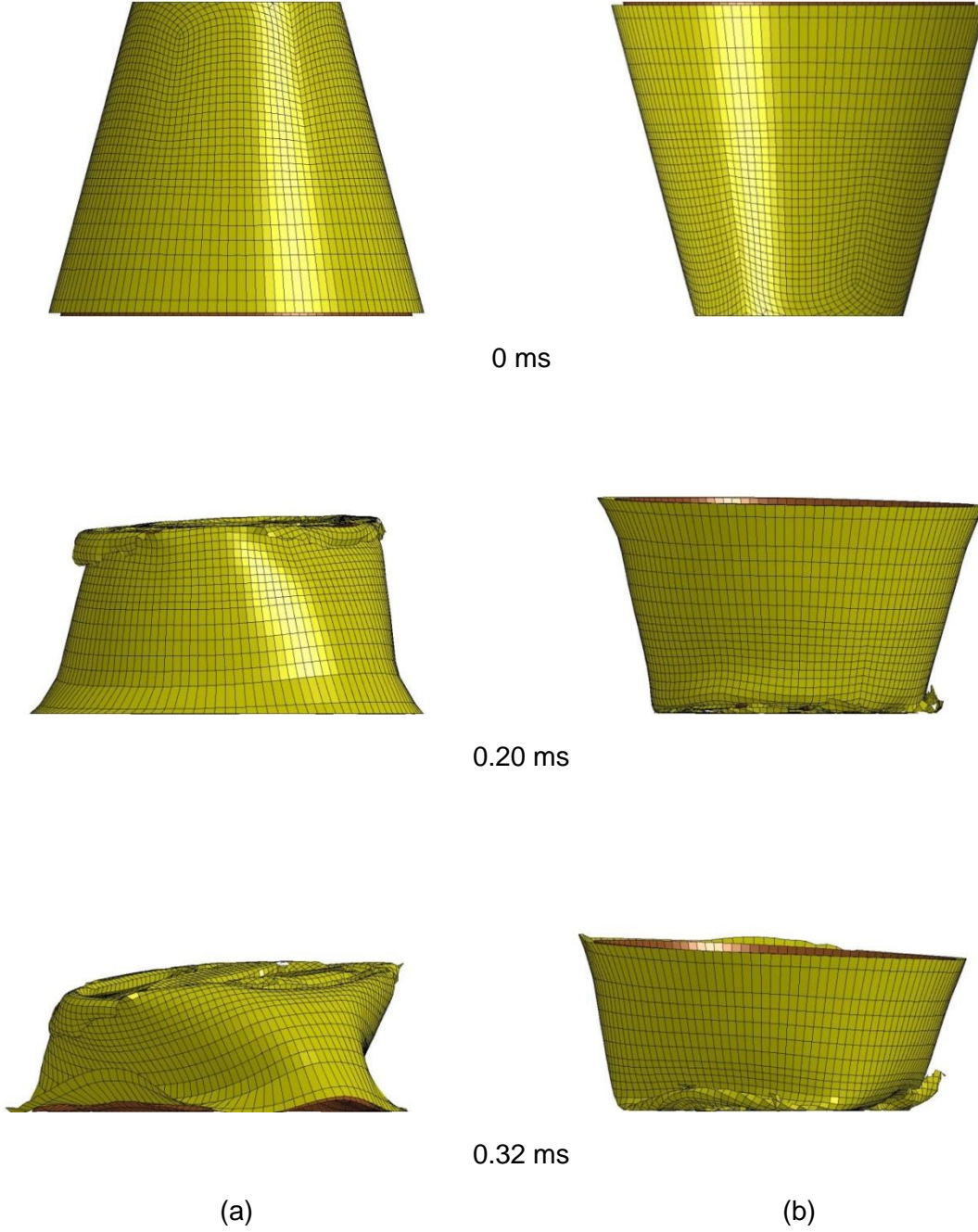


Şekil 126. Sandviç yapının SAE değerleri.

Özgül enerji emme kapasiteleri dikkate alındığında ise en iyi enerji emen yapının tüm çekirdek malzemelerinin patlama yönüne düz olarak dizildiği sandviç, en düşük olanınsa tüm çekirdek malzemeleri patlama yönüne ters olarak dizilmiş sandviç olduğu görülmüştür (Şekil 126). Çekirdek malzemeleri bir adet düz ve bir adet ters olarak dizilen sandviç ile çekirdek malzemelerinin bir sırası düz bir sırası ters dizilmiş olan sandviç neredeyse aynı özgül enerji emme kapasitesine sahiptir. Bu değer tüm çekirdekleri patlama yönüne göre düz dizilmiş

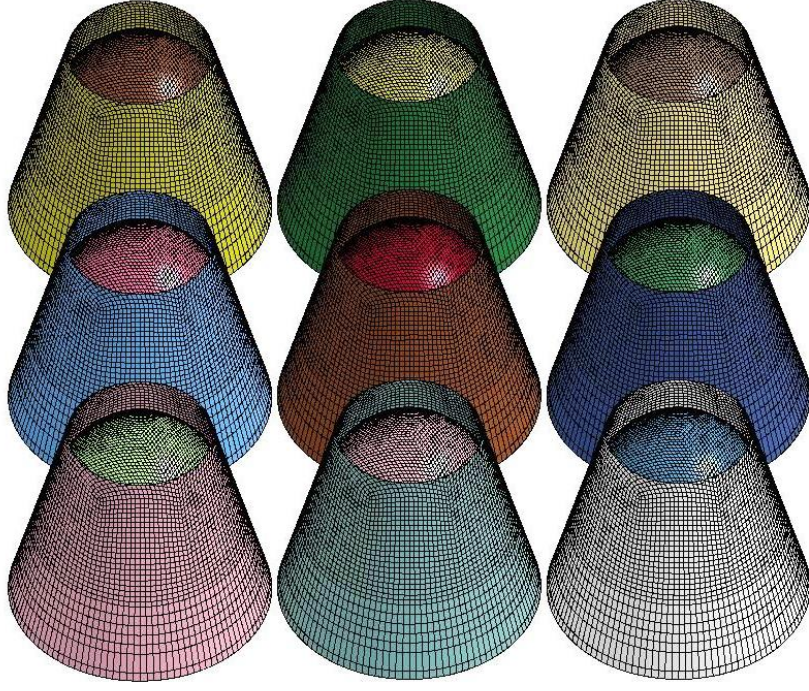
olan sandviç yapıdan düşük iken tüm çekirdekleri patlama yönüne göre ters dizilmiş olan sandviç yapıdan daha yüksektir.

Ters ve düz olarak dizilmiş ve 350 mm mesafeden 5 kg patlayıcıya maruz kalmış balan sandviç yapının köşesinden alınan bir balanın belirli zamanlardaki deformasyon görüntüleri Şekil 127'de verilmiştir.



Şekil 127. Balan yapının deformasyon görüntüleri; (a) düz ve (b) ters.

Şekil 128'de farklı dizilimlere sahip sandviç yapıların nümerik deforme olmamış görüntüleri sunulmuştur.



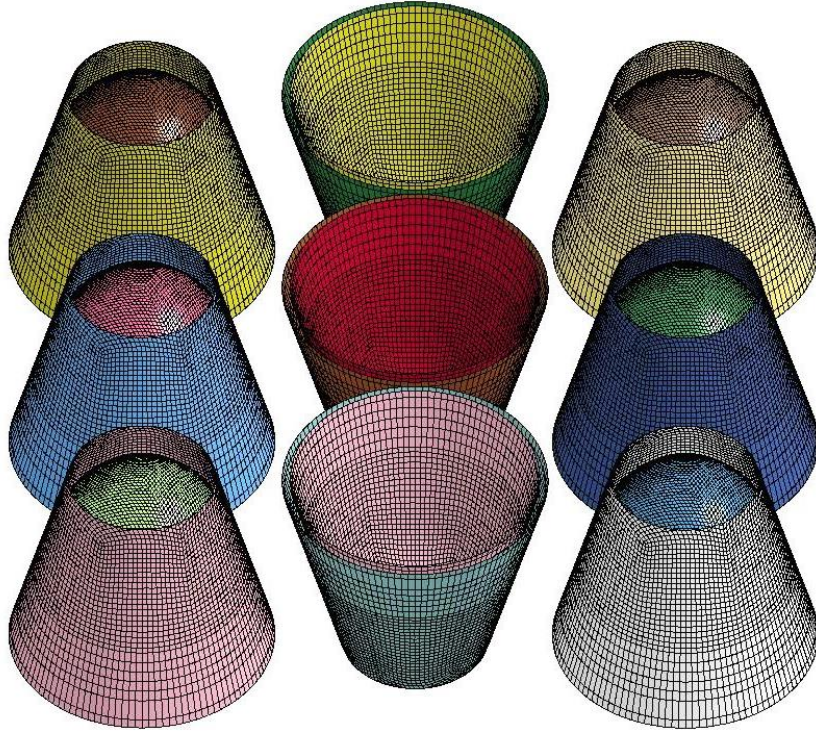
(a)



(b)



(c)



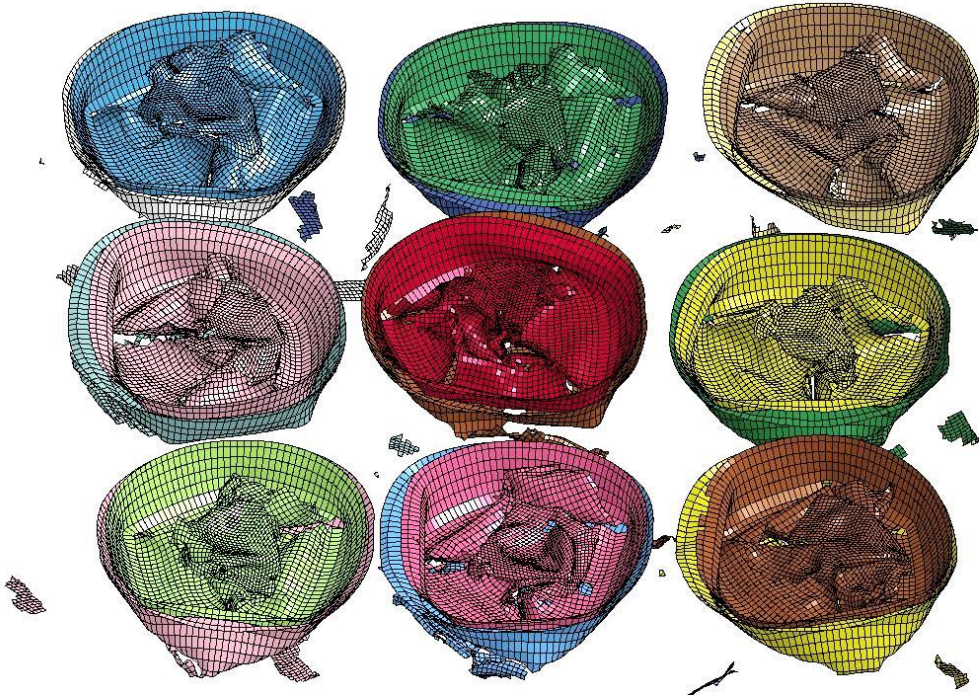
(d)

Şekil 128. Sandviçlerin deforme olmamış halleri ; (a) Düz, (b) ters, (c) ters-düz ve (d) bir sıra ters bir sıra düz.

Şekil 129'da ise Şekil 128'de verilen farklı dizimlere sahip sandviç yapıların nümerik deforme olmuş görüntüleri sunulmuştur.



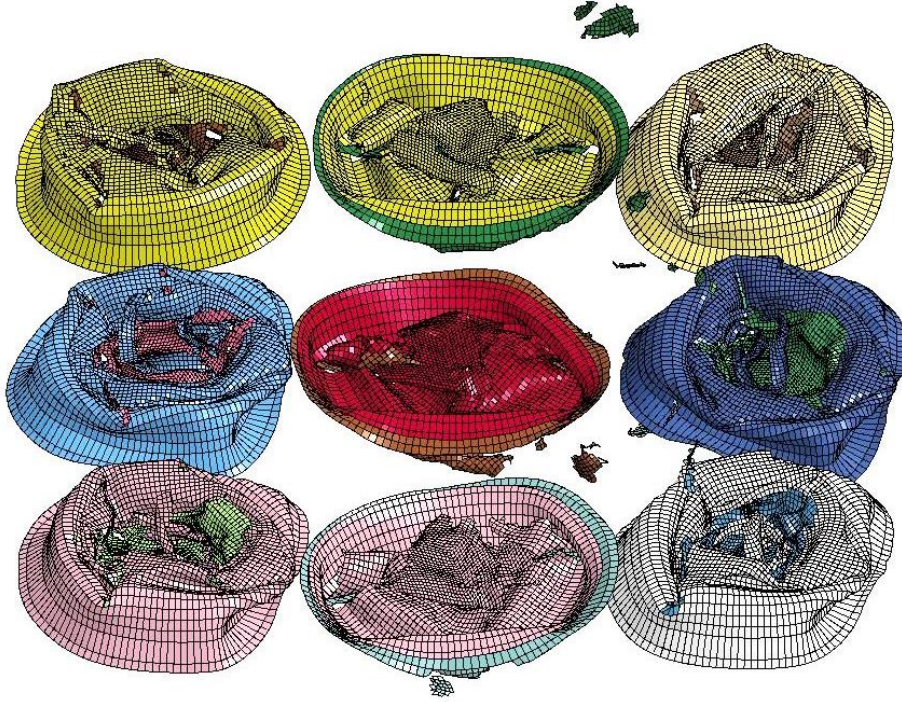
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 129. Sandviçlerin son deforme olmuş halleri ; (a) Düz, (b) ters, (c) ters-düz ve (d) bir sıra ters bir sıra düz.

5. SONUÇLAR

Proje kapsamında bir deniz canlısı olan balandan ilham alınarak tasarlanan iç çekirdek ile dış kabuktan oluşan geometrinin sandviç yapıda çekirdek malzeme olarak kullanılması durumundaki enerji emme karakteristikleri incelenmiştir.

Öncelikli olarak çekirdek yapının malzemesi temin edilmiştir. Daha sonra dış kabuk ve iç çekirdekten oluşan bu yapı, paslanmaz çelik sac malzemedan derin çekme yöntemiyle üretilmiştir. Üretim üç kademedan oluşmaktadır. Bunlar; birinci kademe derin çekme, ikinci kademe derin çekme ve üçüncü kademe son boyuna getirmedir. Üretim sırasında yapı plastik olarak deforme olduğundan etek bölgesinde homojen olmayan uzama meydana gelmektedir. Her iki geometrinin alt kısımları ve dış kabuk geometrisinin üst bölgesi için kalıpta kesim işlemleri uygulanmıştır. Bir sonraki aşama yapısal tasarımda kullanılan malzemelerin statik ve dinamik mekanik karakterizasyonu olmuştur. Derin çekme işlemi nümerik olarak modellenmiş ve plastik olarak deforme olmuş (kalınlık ve kalıcı gerilme tarihçesini içeren) nümerik numuneler elde edilmiştir. Bu nümerik numunelerin kalınlık tarihçesi deneysel sonuçlarla oldukça uyumludur.

İlerleyen adımlarda, malzeme modeli sabitlerinin doğrulanması ve balan yapının statik/orta hızlarda ezilme-enerji emme karakteristiklerinin incelenmesi amacıyla deneysel ve nümerik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların sonucunda balan geometrisinin ve yapıyı oluşturan diğer bileşenlerin şekil değiştirme hızı hassasiyeti ile enerji emme kapasiteleri karşılaştırmalı incelenmiştir. Bu çalışmaların devamında da nümerik sonuçların deneysel sonuçlarla birlikte detaylı bir şekilde incelenmesinin ardından sonuçların uyumu ve başarısı sunulmuştur.

Balan yapı ile ilgili çalışmaların tamamlanmasının ardından, hem sandviç yapının enerji emme karakteristiklerinin incelenmesi hem de sandviç yapı içindeki çekirdek yapılarının birbirleri ile etkileşimlerinin ortaya konması açısından sandviç yapılar deneysel ve nümerik olarak statik, orta ve dinamik hızlarda ezilmişlerdir. Sandviç yapıların incelenmesi esnasında paslanmaz çelik ve kompozit yüzey malzemeli yapılar da incelenmiş ve yüzey malzemesinin bu tarz yükleme şartları altında sandviç yapının davranışını çok fazla değiştirmedığı deneyler sonucunda görülmüştür. Bu nedenle çalışmalara metalik yüzey malzemeleri ile devam edilmiş ve sandviç yapıların maruz kaldığı deformasyon hızı hassasiyeti etkileri ortaya konmuştur.

Metalik yüzey malzemelerine uygulanan Doğrudan Basınç Dalgası Deneyleri ve modelleri kullanılarak yapının patlama etkisi ile deformasyon özellikleri arasında bir ilişki ortaya

konulmuştur. Statik test sonuçlarıyla kıyaslandığında deformasyon hızının artışı ile birlikte yapı tarafından taşınan kuvvet değerlerinin de arttığı tespit edilmiştir. Kuvvet değerlerindeki bu artışa kısmen çekirdek yapıyı oluşturan 304L paslanmaz çelik malzemenin şekil değiştirme hızı hassasiyeti kısmen de mikro atalet etkisinin sebep olduğu bilinmektedir.

Proje kapsamındaki çalışmalara balan ihtiva eden sandviç yapıların penetrasyon ve perforasyon davranışlarının incelenmesi amacıyla gaz tabancası deneyleriyle devam edilmiştir. İki farklı geometrideki penetratörün kullanılmasıyla gerçekleştirilen deneylerde numune çarpma haznesine içerisinde bulunan tutucu ile sabitlenmiştir. Deneyler sırasında penetratörler farklı çarpma hızlarıyla balan ihtiva eden sandviç yapılara fırlatılmışlardır. Sisteme entegre hız ölçer hem penetratörün çarpma hızını hem de delinme olması durumunda penetratörün çıkış hızını ölçmek için kullanılmıştır. Çarpma hızının artmasına bağlı olarak kompozit yüzey plakasında meydana gelen hasar ve balan çekirdek yapısında meydana gelen kalıcı plastik deformasyon miktarının arttığı tespit edilmiştir. Penetratörün geometrisine de bağlı olarak penetrasyona karşı direnç gösteren (deformasyona doğrudan iştirak eden) çekirdek sayısı da değişmektedir. Bu durum, gerçek kullanım şartlarında hasar almış sandviç yapılarda tamirin kolaylıkla gerçekleştirilebileceğini ve bu yapıların çoklu çarpma dayanım kabiliyetlerinin de yüksek olacağını vurgulamaktadır.

Projenin son kısmında ise ConWep hava patlama fonksiyonunun kullanılarak patlama nümerik modelleri oluşturulmuş ve farklı dizilimlere sahip sandviç yapıların farklı patlayıcı kütlesi ve patlama mesafelerine karşı davranışları incelenmiştir.

Yukarıda kısaca özetlenmiş bu incelemeler ile ilgili yapılan çıkarımlar aşağıda liste halinde verilmiştir:

- Derin çekme işlemiyle imal edilen çekirdek malzemelerin kalınlık ölçümlerinden de görülebileceği gibi kalınlığın numunelerin tepe noktasından konik bölgenin alt kısımlarına doğru gidildikçe arttığı gözlemlenmiştir. Bu kalınlık dağılımı nümerik olarak modellenen numunelerde de başarı ile yakalanmış ve malzeme model sabitlerinin doğruluğu ispatlanmıştır.
- Plastik deformasyon sonucunda meydana gelen pekleşmeden kaynaklı malzeme dayanım değerlerinde artış meydana gelmektedir. Bu durum ince cidarlı ve yüksek mukavemetli numunenin yüksek enerji emme kapasitesine sahip olarak yüksek performans göstermesine sebep olmuştur.
- İç çekirdek, dış kabuk ve balan malzemeleri üzerinde gerçekleştirilen deneyler modellenerek malzeme model sabitlerinin doğrulanması farklı hızlarda gerçekleştirilmiştir.

- Bu tarz kalıcı plastik gerilme/gerinim ihtiva eden ve kalınlıkları numune boyunca değişim gösteren yapıların sadece nominal boyutları kullanılarak nümerik modellenemeyeceği açıkça ortaya konmuştur.
- Statik şekil değiştirme hızlarında iç çekirdek malzemenin deformasyon modu ilk katın oluşumunda concertina iken ilerleyen kat oluşumlarında yaklaşık üçgen kesite geçerek kendini göstermiştir.
- Balan yapının statik deformasyonu sırasında deformasyonun sonlarına doğru densifikasyona geçmeden hemen önceki son katın oluşumunda yapıda global eğilme etkisi meydana gelmiş ve bu durum eğrinin son bölgesinde testler arasında az miktarda da olsa bir varyasyon şeklinde kendini göstermiştir.
- Statik şekil değiştirme hız aralığında ($10^{-4} - 10^{-1} \text{ s}^{-1}$) iç çekirdek, dış kabuk ve balan yapıların deformasyon karakteristiğinin şekil değiştirme hızına bağlı olarak önemli miktarda değişmediği tespit edilmiştir.
- Birim ağırlık başına emilen enerji değerleri dikkate alındığında (SAE) statik deformasyon hızlarında dış kabuk ve balan yapının enerji emme kapasitesinin, iç çekirdekten daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Dinamik deformasyon hızlarında ise balan yapısı bütün yapıların içerisinde enerji emme açısından en verimli konfigürasyon olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Düşen ağırlık testlerinde deformasyon hızının artışına bağlı olarak balan yapının enerji emme özellikleri iyileşirken diğer iki yapının ki azalmaktadır.
- Balan yapıyı oluşturan iç çekirdek ve dış kabuk bileşenleri bir arada deforme olmaktadır ve deformasyon sırasında dış kabuk, iç çekirdek malzemeyi sınırlandırarak enerji emilim karakteristiğini iyileştirmektedir. Bu iyileşme miktarı, sistemi oluşturan bileşenlerin tek başlarına olan kuvvet deformasyon eğrilerinin aritmetik toplamlarının (sadece iç çekirdek + sadece dış kabuk) balan yapının tek başına olan kuvvet deformasyon eğrisinin altında kalışından tespit edilmiştir. Statik ezilme sırasında iç çekirdek ve dış kabuk malzemenin etkileşiminden dolayı yaklaşık % 50'ye varan yük taşıma kapasitesinde artış görülürken düşen ağırlık testinde ise bu artış % 150 değerlerine varmıştır.
- İç çekirdek yapıya köpük ihtiva edilmesiyle statik ezilme sırasında yaklaşık % 50'ye varan yük taşıma değerlerinde artış görülmüştür. Düşen ağırlık testinde ise köpük malzemeden kaynaklı bu artış miktarı % 80 değerlerine varmıştır. Köpük malzemenin katkısı şekil değiştirme hızının artmasıyla artış göstermiştir. Köpük özellikle deformasyonun ilerleyen aşmalarında devreye girerek etkinliğini ortaya koymuştur.
- Nümerik modeller deney sonuçları ile doğrulandığı için ölçülmesi gerçekte zor olan bazı değişkenlerin nümerik modellerle tespiti mümkün olmuştur. Sandviç yapının katmanlar arası

ara yüzey basıncının dinamik deformasyonla arttığı nümerik modellerin kullanılmasıyla tespit edilmiştir.

- Nümerik modellerden alınan sonuçlara göre bütün deformasyon tarihçesi boyunca dış kabuk iç çekirdekten daha fazla miktarda enerji emmektedir. Ancak deformasyon hızı arttıkça balan yapıyı oluşturan bu bileşenler arasındaki enerji emme farkı azalmaktadır.

- Sandviçler üzerine farklı sabit hızlarda gerçekleştirilen dinamik nümerik modellere göre çarpma hızının artmasına bağlı olarak ön yüzey plakada meydana gelen deformasyon miktarı artmaktadır. Ayrıca çapraz dizilime sahip sandviç yapılar hemen hemen sabit kuvvet değerlerinde ezilmektedirler.

- DBDD sandviç testlerinden elde edilen kuvvet değerleri, deformasyon hızıyla birlikte artan atalet etkilerinden ve çekirdek yapıyı oluşturan 304L paslanmaz çelik malzemenin yüksek şekil değiştirme hızı hassasiyetinden dolayı statik değerlerden yüksektir.

- Patlama etkisi altında sandviç yapıyı oluşturan balan yapıların ters olarak konumlandırılmasının ön yüzey plakasının ilerleme hızını yavaşlattığı ve yapıda daha az deformasyona sebep olduğu tespit edilmiştir. Düz konumlandırmada ise yapı daha fazla deforme olarak korunan yapıya iletilen kuvvet miktarının ters yapıya göre daha düşük seviyelerde kalmasına neden olmuştur.

- Ters ve düz konumlandırma arasındaki bir diğer önemli fark ise gerilme dalgası iletiminde en önemli parametrelerden biri olan akustik empedans değeri farklarıdır. Her iki konfigürasyon arasında deformasyonun başladığı nokta ve ilerleyişi ile birlikte anlık olarak temas eden yüzey alanları arasında farklılıklar mevcuttur.

- Patlama etkileri altında düz olarak dizilmiş sandviç yapı kuvvet iletiminde alternatif konfigürasyonlar arasında en yüksek tepe noktası kuvvetine sahiptir. En düşük tepe noktası ise tüm balan yapıların sırasıyla bir adet ters bir adet düz dizildiği konfigürasyondadır. Düz konfigürasyonda ise ön yüzey plaka hızı en yüksek olarak ölçülmüştür. En düşük ön yüzey plaka hızı ise ters konfigürasyonda elde edilmiştir.

- SAE değeri, tüm çekirdek malzemeleri patlama yönüne düz olarak dizilmiş sandviçte en yüksek ve tüm çekirdek malzemeleri patlama yönüne ters olarak dizilmiş sandviçte en düşüktür.

- Patlama nümerik modellerinde anlık sıcaklık artışının yaklaşık olarak 400 derece seviyelerine ulaştığı tespit edilmiştir.

Proje kapsamında elde edilen sonuçlar dikkate alındığında geliştirilen yapının üstün enerji emme özelliklerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte bu tarz yapıların en önemli

kullanım alanı olan farklı savunma sanayi uygulamalarında yer bulabilmeleri açısından farklı cidar kalınlıkları, farklı malzeme türleri, farklı geometrik boyutlar, farklı dizilimler ve ısı işlem durumları gibi bazı parametreler etkili olacaktır. İlerleyen zamanlarda bu gibi konuların incelenmesi ülkemiz açısından son derece önemli olan bu tarz uygulamaların kıymetini arttıracaktır.

KAYNAKLAR

- Ahmad, Z., ve Thambiratnam, D. P. 2009. "Dynamic computer simulation and energy absorption of foam-filled conical tubes under axial impact loading", *Computers & Structures*, 87 (3-4), 186-197.
- Anderson, D. T. 1994. *Barnacles: Structure, Function, Development and Evolution* (1. Basım). Londra: Chapman & Hall.
- Atas, C., ve Sevim, C. 2010. "On the impact response of sandwich composites with cores of balsa wood and PVC foam", *Composite Structures*, 93 (1), 40-48.
- Bambach, M. R., Jama, H. H., ve Elchalakani, M. 2009. "Static and dynamic axial crushing of spot-welded thin-walled composite steel-CFRP square tubes", *International Journal of Impact Engineering*, 36 (9), 1083-1094.
- Bar-Cohen, Y. 2006. "Biomimetics-using nature to inspire human innovation", *Bioinspiration & Biomimetics*, 1 (1), 1-12.
- Barnes, A. T., Ravi-Chandar, K., Kyriakides, S., ve Gaitanaros, S. 2014. "Dynamic crushing of aluminum foams: Part I – Experiments", *International Journal of Solids and Structures*, 51 (9), 1631-1645.
- Barnes, H., ve Barnes, M. 1954. "The General Biology of *Balanus balanus* (L.) Da Costa", *Oikos*, 5 (1), 63-76.
- "Birds, Bees and Creative Solutions". Plexus Institute.
<http://www.plexusinstitute.org/blogpost/656763/136480/Birds-Bees-and-Creative-Solutions>,
Son erişim tarihi: 10 Nisan 2017
- Brusca, R. C., ve Brusca, G. J. 2003. *Invertebrates*. Massachusetts: Sinauer Associates, Inc. Sunderland.
- Chen, P.-Y., McKittrick, J., ve Meyers, M. A. 2012. "Biological materials: Functional adaptations and bioinspired designs", *Progress in Materials Science*, 57 (8), 1492-1704.
- Cote, F., Deshpande, V. S., Fleck, N. A., ve Evans, A. G. 2006. "The compressive and shear responses of corrugated and diamond lattice materials", *International Journal of Solids and Structures*, 43 (20), 6220-6242.
- "Crostacei". Giovanni Pinto.
<http://ww.giovanpinto.it/kros.htm>,
Son erişim tarihi: 10 Nisan 2017.

Crupi, V., Epasto, G., ve Guglielmino, E. 2012. "Collapse modes in aluminium honeycomb sandwich panels under bending and impact loading", *International Journal of Impact Engineering*, 43, 6-15.

Cui, L., Kiernan, S., ve Gilchrist, M. D. 2009. "Designing the energy absorption capacity of functionally graded foam materials", *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 507 (1-2), 215-225.

Dharmasena, K. P., Wadley, H. N. G., Williams, K., Xue, Z. Y., ve Hutchinson, J. W. 2011. "Response of metallic pyramidal lattice core sandwich panels to high intensity impulsive loading in air", *International Journal of Impact Engineering*, 38 (5), 275-289.

"Eiffel Tower". University of Strathclyde.

http://www.personal.strath.ac.uk/j.wood/Biomimetics/inspirational%20designs/Eiffel%20Tower_files/Eiffel%20Tower.htm,

Son erişim tarihi: 10 Nisan 2017.

Forbes, P. 2005. *The Gecko's Foot: Bio-inspiration : Engineering New Materials from Nature*. W. W. Norton & Company.

French, J. R. J., ve Ahmed, B. M. 2010. "The challenge of biomimetic design for carbon-neutral buildings using termite engineering", *Insect Science*, 17 (2), 154-162.

Ghamarian, A., ve Abadi, M. T. 2011. "Axial crushing analysis of end-capped circular tubes", *Thin-Walled Structures*, 49 (6), 743-752.

Guden, M., Yuksel, S., Tasdemirci, A., ve Tanoglu, M. 2007. "Effect of aluminum closed-cell foam filling on the quasi-static axial crush performance of glass fiber reinforced polyester composite and aluminum/composite hybrid tubes", *Composite Structures*, 81 (4), 480-490.

Gupta, N. K., ve Venkatesh. 2004. "Experimental and numerical studies of dynamic axial compression of thin walled spherical shells", *International Journal of Impact Engineering*, 30 (8-9), 1225-1240.

Güvenir, Ş. 2006. "Damağın Seste Rezonans Oluşturma Etkisi ve Ses Eğitimi Kullandırılması". *Ulusal Müzik Eğitimi Sempozyumu Pamukkale Üniv. Eğt. Fak. Denizli*.

Hamada, H., Nakatani, T., Nakai, A., ve Kameo, K. 1999. "The crushing performance of a braided I-beam", *Composites Science and Technology*, 59 (12), 1881-1890.

Hashin, Z. 1981. "Fatigue Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites", *Journal of Applied Mechanics-Transactions of the Asme*, 48 (4), 846-852.

Hong, W., Fan, H. L., Xia, Z. C., Jin, F. N., Zhou, Q., ve Fang, D. N. 2014. "Axial crushing behaviors of multi-cell tubes with triangular lattices", *International Journal of Impact Engineering*, 63, 106-117.

Hou, B., Zhao, H., Pattofatto, S., Liu, J. G., ve Li, Y. L. 2012. "Inertia effects on the progressive crushing of aluminium honeycombs under impact loading", *International Journal of Solids and Structures*, 49 (19-20), 2754-2762.

Hu, L. L., ve Yu, T. X. 2010. "Dynamic crushing strength of hexagonal honeycombs", *International Journal of Impact Engineering*, 37 (5), 467-474.

Hu, L. L., ve Yu, T. X. 2013. "Mechanical behavior of hexagonal honeycombs under low-velocity impact - theory and simulations", *International Journal of Solids and Structures*, 50 (20-21), 3152-3165.

" Biomimetic Architecture: Green Building in Zimbabwe Modeled After Termite Mounds". *Inhabitat*.

<http://www.inhabitat.com/building-modelled-on-termites-eastgate-centre-in-zimbabwe/eastgate-centre-biomimetic-architecture-biomimicry-biomimetic-design-biomimicry-of-termite-mounds-green-building-with-termites-eco-building-sustainable-design-harare-zimbabwe-africa-sustain/>,

Son erişim tarihi: 10 Nisan 2017.

Jung, A., Lach, E., ve Diebels, S. 2014. "New hybrid foam materials for impact protection", *International Journal of Impact Engineering*, 64, 30-38.

"Learn about acorn barnacles". *A Snail's Odyssey*.

<http://www.asnailsodyssey.com/LEARNABOUT/BARNACLE/barnRepr.php>,

Son erişim tarihi: 10 Nisan 2017.

Lee, S., Barthelat, F., Hutchinson, J. W., ve Espinosa, H. D. 2006. "Dynamic failure of metallic pyramidal truss core materials - Experiments and modeling", *International Journal of Plasticity*, 22 (11), 2118-2145.

Lee, W. S., ve Lin, C. F. 2001. "Impact properties and microstructure evolution of 304L stainless steel", *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 308 (1-2), 124-135.

Lepora, N. F., Verschure, P., ve Prescott, T. J. 2013. "The state of the art in biomimetics", *Bioinspiration & Biomimetics*, 8 (1).

Li, K., Gao, X. L., ve Wang, J. 2007. "Dynamic crushing behavior of honeycomb structures with irregular cell shapes and non-uniform cell wall thickness", *International Journal of Solids and Structures*, 44 (14-15), 5003-5026.

Liu, J. G., Pattofatto, S., Fang, D. N., Lu, F. Y., ve Zhao, H. 2015. "Impact strength enhancement of aluminum tetrahedral lattice truss core structures", *International Journal of Impact Engineering*, 79, 3-13.

LSTC. 2007. *LS-DYNA : Keyword User 's Manual*. LSTC.

Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Ioannidis, M. B., Chronopoulos, D. G., ve Kostazos, P. 2009. "On the crashworthiness of composite rectangular thin-walled tubes internally reinforced with aluminium or polymeric foams: Experimental and numerical simulation", *Composite Structures*, 89 (3), 416-423.

Mantena, P. R., ve Mann, R. 2003. "Impact and dynamic response of high-density structural foams used as filler inside circular steel tube", *Composite Structures*, 61 (4), 291-302.

Matzenmiller, A., Lubliner, J., ve Taylor, R. L. 1995. "A Constitutive Model for Anisotropic Damage in Fiber-Composites", *Mechanics of Materials*, 20 (2), 125-152.

Meguid, S. A., Attia, M. S., ve Monfort, A. 2004. "On the crush behaviour of ultralight foam-filled structures", *Materials & Design*, 25 (3), 183-189.

Meyers, M. A., Chen, P.-Y., Lin, A. Y.-M., ve Seki, Y. 2008. "Biological materials: Structure and mechanical properties", *Progress in Materials Science*, 53 (1), 1-206.

Meyers, M. A., Chen, P. Y., Lopez, M. I., Seki, Y., ve Lin, A. Y. 2011. "Biological materials: a materials science approach", *J Mech Behav Biomed Mater*, 4 (5), 626-657.

Nia, A. A., ve Parsapour, M. 2013. "An investigation on the energy absorption characteristics of multi-cell square tubes", *Thin-Walled Structures*, 68, 26-34.

Nia, A. A., ve Parsapour, M. 2014. "Comparative analysis of energy absorption capacity of simple and multi-cell thin-walled tubes with triangular, square, hexagonal and octagonal sections", *Thin-Walled Structures*, 74, 155-165.

Othman, A., Abdullah, S., Ariffin, A. K., ve Mohamed, N. A. N. 2014. "Investigating the quasi-static axial crushing behavior of polymeric foam-filled composite pultrusion square tubes", *Materials & Design*, 63, 446-459.

Palanivelu, S., Van Paepegem, W., Degrieck, J., Vantomme, J., Kakogiannis, D., Van Ackeren, J., vd. 2010. "Comparison of the crushing performance of hollow and foam-filled small-scale composite tubes with different geometrical shapes for use in sacrificial cladding structures", *Composites Part B-Engineering*, 41 (6), 434-445.

- Pope, E. C. 1945. "A simplified key to the sessile barnacles found on the rocks, boats, wharf piles and other installations in Port Jackson and adjacent waters", *Records of the Australian Museum*, 21 (6), 351-372.
- Radford, D. D., Fleck, N. A., ve Deshpande, V. S. 2006. "The response of clamped sandwich beams subjected to shock loading", *International Journal of Impact Engineering*, 32 (6), 968-987.
- Raman, S., ve Kumar, R. 2011. "Construction and nanomechanical properties of the exoskeleton of the barnacle, *Amphibalanus reticulatus*", *Journal of Structural Biology*, 176 (3), 360-369.
- Rejab, M. R. M., ve Cantwell, W. J. 2013. "The mechanical behaviour of corrugated-core sandwich panels", *Composites Part B-Engineering*, 47, 267-277.
- Rhodes, J., ve Nash, D. 1998. "An investigation of web crushing behaviour in thin-walled beams", *Thin-Walled Structures*, 32 (1-3), 207-230.
- Rubino, V., Deshpande, V. S., ve Fleck, N. A. 2008. "The dynamic response of end-clamped sandwich beams with a Y-frame or corrugated core", *International Journal of Impact Engineering*, 35 (8), 829-844.
- Rubino, V., Deshpande, V. S., ve Fleck, N. A. 2009. "The dynamic response of clamped rectangular Y-frame and corrugated core sandwich plates", *European Journal of Mechanics a-Solids*, 28 (1), 14-24.
- Smith, P. D., ve Hetherington, J. G. 1994. *Blast and ballistic loading of structures*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- St-Pierre, L., Deshpande, V. S., ve Fleck, N. A. 2015. "The low velocity impact response of sandwich beams with a corrugated core or a Y-frame core", *International Journal of Mechanical Sciences*, 91, 71-80.
- Szyniszewski, S., Smith, B. H., Hajjar, J. F., Arwade, S. R., ve Schafer, B. W. 2012. "Local buckling strength of steel foam Sandwich panels", *Thin-Walled Structures*, 59, 11-19.
- Tasdemirci, A. 2011. *Patlama ve Balistik Tehditlere Karşı Koruyucu Çok Katmanlı Malzeme Sistemlerinin Yüksek Deformasyon Hızlarında Mekanik ve Nümerik Test Metotlarının Geliştirilmesi ve Optimizasyonu*. Türkiye Bilimsel Araştırmalar Kurumu. 106M353.
- Tasdemirci, A. 2014. *Patlamaya Dayanıklı Yarı Küresel Tekrarlı Çekirdek Malzemesi İhtiva Eden Sandviç Yapıların Geliştirilmesi Ve Optimizasyonu*. Türkiye Bilimsel Araştırmalar Kurumu. 112M141.

" The Biomimicry Manual: What can the honeybee teach a designer?". Inhabitat. <http://www.inhabitat.com/the-biomimicry-manual-what-can-the-honeybee-teach-designers-about-insulation-elasticity-and-flight/>,

Son erişim tarihi: 10 Nisan 2017.

Tilbrook, M. T., Radford, D. D., Deshpande, V. S., ve Fleck, N. A. 2007. "Dynamic crushing of sandwich panels with prismatic lattice cores", *International Journal of Solids and Structures*, 44 (18-19), 6101-6123.

Toson, B., Viot, P., ve Pesque, J. J. 2014. "Finite element modeling of Balsa wood structures under severe loadings", *Engineering Structures*, 70, 36-52.

Tran, T., Hou, S. J., Han, X., Tan, W., ve Nguyen, N. 2014. "Theoretical prediction and crashworthiness optimization of multi-cell triangular tubes", *Thin-Walled Structures*, 82, 183-195.

Tsang, L. M., Wu, T. H., Shih, H. T., Williams, G. A., Chu, K. H., ve Chan, B. K. K. 2012. "Genetic and Morphological Differentiation of the Indo-West Pacific Intertidal Barnacle *Chthamalus malayensis*", *Integrative and Comparative Biology*, 52 (3), 388-409.

Wadley, H., Dharmasena, K., Chen, Y. C., Dudt, P., Knight, D., Charette, R., vd. 2008. "Compressive response of multilayered pyramidal lattices during underwater shock loading", *International Journal of Impact Engineering*, 35 (9), 1102-1114.

Wilbert, A., Jang, W. Y., Kyriakides, S., ve Floccari, J. F. 2011. "Buckling and progressive crushing of laterally loaded honeycomb", *International Journal of Solids and Structures*, 48 (5), 803-816.

Xue, Q., Nesterenko, V. F., ve Meyers, M. A. 2003. "Evaluation of the collapsing thick-walled cylinder technique for shear-band spacing", *International Journal of Impact Engineering*, 28 (3), 257-280.

Xue, Z. Y., ve Hutchinson, J. W. 2004. "A comparative study of impulse-resistant metal sandwich plates", *International Journal of Impact Engineering*, 30 (10), 1283-1305.

Yan, L. L., Yu, B., Han, B., Chen, C. Q., Zhang, Q. C., ve Lu, T. J. 2013. "Compressive strength and energy absorption of sandwich panels with aluminum foam-filled corrugated cores", *Composites Science and Technology*, 86, 142-148.

Zarei, H., ve Kroger, M. 2008. "Optimum honeycomb filled crash absorber design", *Materials & Design*, 29 (1), 193-204.

Zarei, H. R., ve Kroger, M. 2008. "Optimization of the foam-filled aluminum tubes for crush box application", *Thin-Walled Structures*, 46 (2), 214-221.

- Zhang, C. J., Feng, Y., ve Zhang, X. B. 2010. "Mechanical properties and energy absorption properties of aluminum foam-filled square tubes", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 20 (8), 1380-1386.
- Zhang, G. Q., Wang, B., Ma, L., Wu, L. Z., Pan, S. D., ve Yang, J. S. 2014. "Energy absorption and low velocity impact response of polyurethane foam filled pyramidal lattice core sandwich panels", Composite Structures, 108, 304-310.
- Zhang, X., ve Cheng, G. D. 2007. "A comparative study of energy absorption characteristics of foam-filled and multi-cell square columns", International Journal of Impact Engineering, 34 (11), 1739-1752.
- Zhang, X., ve Huh, H. 2010. "Crushing analysis of polygonal columns and angle elements", International Journal of Impact Engineering, 37 (4), 441-451.
- Zhang, X., Zhang, H., ve Wen, Z. Z. 2014. "Experimental and numerical studies on the crush resistance of aluminum honeycombs with various cell configurations", International Journal of Impact Engineering, 66, 48-59.
- Zhu, F., ve Lu, G. 2007. "A Review of Blast and Impact of Metallic and Sandwich Structures", EJSE Special Issue: Loading on Structures, 93-101.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. ALPER TAŞDEMİRCİ
Proje No:	214M339
Proje Başlığı:	Biyobenzetim Tabanlı Enerji Yutucu Zırh Sisteminin Tasarımı Ve Optimizasyonu
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	MUSTAFA GÜDEN
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	İZMİR YÜKSEK TEKNOLOJİ ENS. MÜHENDİSLİK F. MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/05/2015 - 01/05/2017
Onaylanan Bütçe:	562716.0
Harcanan Bütçe:	414662.61
Öz:	<p>Proje kapsamında bir deniz kabuklusu olan balandan ilham alınarak geliştirilmiş bir yapının enerji emme karakteristikleri incelenmiştir. Bu amaçla öncelikli olarak biyobenzetim sisteminin tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen yapının konvansiyonel enerji yutucu geometrilere göre aynı ağırlık seviyelerinde çok daha üstün enerji emme kabiliyetine sahip olduğu tespit edilmiştir. Yapıların üretimi için derin çekme metodu tercih edilmiştir. Bu metod hem seri üretime oldukça uygundur hem de üretilen malzemelerin artık gerilme ve şekil değiştirme ihtiyacı etmelerinden dolayı mekanik özellikleri daha yüksek seviyelerde elde edilmektedir. Balan yapısı iki bileşenden oluşmaktadır, bunlar iç çekirdek ve dış kabuktur. Deformasyon sırasında bu iki bileşen arasında etkileşim meydana gelmekte ve yapının toplam enerji emme ve yük taşıma kapasitesi artmaktadır. Statik hızlarda bu artış % 50 seviyelerinde iken dinamik hızlarda bu artış % 150 seviyelerine ulaşmaktadır. Geliştirilen sandviç yapının statik ve dinamik ezilme karakteristikleri de incelenmiştir. Ayrıca bu yapıları nümerik olarak patlama yükleri etkilerine maruz bırakılmışlardır. Bu çalışma sırasında balan yapılarının diziliminin davranışa olan etkisi de incelenmiştir. Seçilmiş alternatif konfigürasyonlar (tamamı düz, tamamı ters, bir ters bir düz ve bir sıra ters bir sıra düz) arasından düz olarak dizilmiş sandviç yapının en yüksek tepe kuvvetine sahip olduğu en düşük tepe noktası kuvvetinin ise bir ters bir düz yapıda elde edildiği gösterilmiştir. Geliştirilen sandviç yapı 5 kg TNT patlayıcı yüküne 350 mm mesafeden koruma sağlamayı başarmıştır.</p>
Anahtar Kelimeler:	biyo benzetim, zırh sistemi, enerji yutucu yapı, sandviç, ls-dyna, patlama
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- The Investigation of the Dynamic Deformation Behaviour of a 304L Steel Plate with Direct-Pressure Pulse Experiments (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),