

**Patlamaya Dayanıklı Yarı Küresel Tekrarlı Çekirdek  
Malzemesi İhtiva Eden Sandviç Yapıların Geliştirilmesi Ve  
Optimizasyonu**

**Program Kodu: 1001**

**Proje No: 112M141**

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

Araştırmacı(lar):  
Prof. Dr. Mustafa GÜDEN

Bursiyer(ler):  
Ali KARA  
Ali Kıvanç TURAN  
Selim ŞAHİN

KASIM 2014  
İZMİR

## Önsöz

Bu proje kapsamında yarı küresel tekrarlı çekirdek malzeme içeren sandviç yapılar geliştirilmiş ve bu yapıların patlama etkileri karşısındaki davranışlarının incelenmesi amacıyla deneysel ve nümerik metodolojiler ortaya konmuştur. Farklı boyut ve konfigürasyonlarda tek veya çok katlı sandviç yapılar önerilmiş ve bu yapıların ezilme davranışları belirlenmiştir. Önerilen yapıların etkinliklerinin tespit edilmesi amacıyla yapıların enerji emme karakteristikleri ve deformasyon mekanizmaları hem statik ve hem de dinamik deformasyon şartları altında incelenmiştir. Proje TÜBİTAK tarafından desteklenmiş ve İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü bünyesinde yürütülmüştür.

## İÇİNDEKİLER

Önsöz .....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
Tablo Listesi .....	v
Şekil Listesi .....	vi
Özet.....	xiv
Abstract .....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti .....	1
1.2 Amaç ve Kapsam.....	12
2. SANDVIÇ YAPILARIN TASARIMI VE ÜRETİMİ .....	14
2.1 Çekirdek ve Yüzey Malzemelerinin Tasarımı ve Üretimi .....	14
2.2 Yarı Küresel Çekirdek Malzemesi İhtiva Eden Sandviç Yapıların Tasarımı ve Üretimi .....	21
3. SANDVIÇ YAPILARI OLUŞTURAN MALZEMELERİN STATİK VE DİNAMİK MEKANİK KARAKTERİZASYONU.....	25
3.1 Çekirdek Malzemesi Karakterizasyonu.....	25
3.2 Kompozit Yüzey Malzemesi Mekanik Karakterizasyonu .....	28
4. MALZEME MODELİ SEÇİMİ VE SABİTLERİNİN BELİRLENMESİ .....	45
4.1 AISI 304L Paslanmaz Çeliği .....	45
4.2 Kompozit malzeme .....	48
4.3 Poliüretan.....	53
5. MALZEME MODELİ SABİTLERİNİN DOĞRULANMASI .....	55
5.1 Derin Çekme İşlemlerinin Simülasyonu .....	55
5.2 Çekirdek Malzemelerinin Statik ve Orta Hızlarda Ezilme Davranışlarının İncelenmesi .....	60
6. SANDVIÇ YAPININ STATİK VE DİNAMİK EZİLME KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ.....	93
6.1 Deneysel İncelenme .....	93
6.2 Nümerik İnceleme.....	108
6.2.1 Sandviç Yapılarda Deformasyon Hızı ve Atalet Etkilerinin Nümerik İncelenmesi .....	117
6.2.2 Sandviç Yapılarda Katmanlama Etkilerinin Nümerik İncelenmesi.....	119
6.2.2 R125T1, R75T05 ve R75T1 Çekirdek Malzemelerini İçeren Sandviçlerin Simülasyonu.....	123
7. SANDVIÇ YAPILARIN PATLAMA YÜKLERİNE KARŞI DAVRANIŞININ İNCELENMESİ .....	131
7.1 Doğrudan Basınç Dalgası Deneyleri ve Nümerik Modelleri.....	131
7.2 Sandviç Yapıların Patlama Yüklerine Karşı Davranışlarının İncelenmesi .....	152

8. SONUÇLAR .....	183
REFERANSLAR.....	187
EKLER.....	193
EK-1 <i>Crushing and energy absorption characteristics of combined geometry shells at quasi-Static and dynamic strain rates: experimental and numerical study</i> .....	194
EK-2 <i>Dynamic crushing and energy absorption of sandwich structures with combined geometry shell cores</i> .....	207



## Tablo Listesi

Tablo 1. AISI 304L paslanmaz çeliği kimyasal kompozisyonu. ....	14
Tablo 2. Yarı küresel çekirdek geometrilerinin son boyutları.....	16
Tablo 3. Numunelerde tesbit edilen kalıcı gerilme miktarları.....	18
Tablo 4. Statik çekme testi numune boyutları. ....	29
Tablo 5. AISI 304L paslanmaz çeliğin Johnson-Cook gerilme ve hasar model parametreleri. .....	48
Tablo 6. Hasar tarihçesi değişkenleri. ....	52
Tablo 7. Kompozit malzeme MAT162 modeli parametreleri. ....	53
Tablo 8. Poliüretan malzemesinin MAT_SIMPLIFIED_WITH_DAMAGE malzeme modeli parametreleri. ....	54
Tablo 9. Statik testler sonucunda yarı küresel çekirdek malzemeleri tarafından emilen enerji. .....	68
Tablo 10. Düşen ağırlık test şartları. ....	68
Tablo 11. Kuasi-statik ve düşen kütle test ve simülasyon sonuçları. ....	80
Tablo 12. Kuasi-statik test sonuçlarının çekirdek malzemesi ile karşılaştırması.....	100
Tablo 13. Patlayıcı kütlesi ile değişen eşdeğer patlama mesafeleri.....	148
Tablo 14. Tek çeşitli sandviç yapıların kesit, ağırlık ve boyutsal özellikleri.....	154
Tablo 15. Sandviç modellerinin kesit, ağırlık ve boyutsal özellikleri.....	163

## Şekil Listesi

Şekil 1. Patlama etkilerini incelemekte kullanılan deney düzenekleri, (a) gerçek ölçekli patlama deneyi (Dharmasena vd. 2008), (b) balistik sarkaç deneyi (Nurick vd. 2009), (c) şok tüpü deneyi (Tekalur vd. 2008), (d) köpük çarpma deneyi (Rathbun vd. 2006), (e) sualtı patlama deneyi (Wadley vd. 2008).....	3
Şekil 2. Patlama etkilerine karşı kullanılan çekirdek malzemeleri (Rathbun vd. 2006) (a) kare şekilli metalik balpeteği, (b) altıgen şekilli metalik balpeteği, (c) metalik köpük (Banhart 2000), (d) üçgen ve elmas dizilimli oluklu yapılar (Dharmasena vd. 2010), (e) balsa ağacı. ....	4
Şekil 3. Sandviç yapıyı oluşturan elemanlarda ivmenin (a) zamana (b) köpük kalınlığına bağlı değişimi (c) numunedeki hasar ilerlemesi (Taşdemirci vd. 2010). ....	7
Şekil 4. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü bünyesinde kurulu Doğrudan Basınç Dalgası Test Sistemi (DBDD).....	8
Şekil 5. (a) Deforme olmamış ve (b) deforme olmuş yarı küresel yapılar (Updike 1972).....	10
Şekil 6. (a) Küresel kabuk yapının deformasyon şekli ve (b) bu şekilleri kuvvet-deformasyon eğrisindeki ifadeleri (Gupta vd. 2008).....	10
Şekil 7. Tüp – koni kombine geometrinin deneysel ve nümerik ezilme görüntüleri. ....	11
Şekil 8. Derin çekme yöntemi (yeşil : kalıp, mavi : iş parçası tutucusu, kırmızı : zimba, gri : iş parçası). ....	15
Şekil 9. Yarı küresel çekirdek geometrilerinin imalat resimleri; (a) $r = 7,5$ ve $t = 0,5$ , (b) $r = 7,5$ ve $t = 1,0$ , (c) $r = 12,5$ ve $t = 0,5$ , (d) $r = 12,5$ ve $t = 1,0$ .....	16
Şekil 10. Yarı küresel çekirdek geometrileri; (a) R75T05 ve R75T1 geometrilerin alt görünüşleri , (b) R125T05 ve R125T1 geometrilerin alt görünüşleri, (c) R75T05 ve R75T1 geometrilerin üst görünüşleri, (d) R125T05 ve R125T1 geometrilerin üst görünüşleri, (e) R125T1 geometrisinin kesit görüntüsü.....	17
Şekil 11. Yarı küresel yapı üzerinde artık gerilme ölçülen noktalar.....	18
Şekil 12. Geometrik ölçümler sonucu elde edilen kalınlık değişim konturları (deneysel), (a) R125T1, (b) R125T05, (c) R75T1, (d) R75T05 numuneleri. ....	19
Şekil 13. (a) VARTM metodu ile kompozit üretimi, (b) sandviçlerin üretiminde kullanılacak yüzey malzemeleri sırasıyla; 0,5 mm 304L paslanmaz çelik, 2 mm kompozit ve 3 mm kompozit malzemeler. ....	20
Şekil 14. Sandviç yapıların yapıştırma metodu ile üretiminde kullanılan yapıştırma mastarları ile bileziklerinin katı modelleri ve görüntüleri; (a) ve (b) $r = 7,5$ mm yarıçaplı küre içeren sandviçler için mastar, (c) ve (d) $r = 12,5$ yarıçaplı yarı küre içeren sandviçler için mastar. ..	22
Şekil 15. Sandviç yapıların yapıştırma metodu ile üretim aşamaları; (a) yarı küresel çekirdeklerin bilezik monte edilmiş mastara yerleştirilmesi, (b) yapıştırıcı sürülmüş yüzey	

malzemesinin aktivatör sürülmüş yarı kürelerin üzerine merkezlenmesi ve (c) yüzey malzemesi monte edilmiş sistem, (d) elde edilen tek yüzeyli yapı. ....	23
Şekil 16. Sandviç yapılar; (a) $r = 12,5$ , $t=0,5$ $t_f = 0,5$ (304L) , (b) $r = 12,5$ , $t=1$ , $t_f = 0.5$ (304L), (c) $r = 12,5$ , $t=0,5$ , $t_f = 2,0$ (kompozit), (d) $r = 12,5$ , $t=1$ , $t_f = 2,0$ (kompozit), (e) $r = 7,5$ , $t=0,5$ , $t_f = 2,0$ (kompozit), (f) $r = 7,5$ , $t=1$ , $t_f = 2,0$ (kompozit), (g) çeşitli sandviç yapılardan numuneler. ....	24
Şekil 17. Split Hopkinson Basınç Barı. ....	25
Şekil 18. Çekirdek malzemesinin mekanik karakterizasyonunda kullanılan test numuneleri; 26	
Şekil 19. Statik çekme testleri sonucunda elde edilen gerçek gerilme-gerçek plastik şekil değiştirme eğrileri. ....	26
Şekil 20. Split Hopkinson basınç barı voltaj zaman eğrileri. ....	27
Şekil 21. Yüksek hız çekme testleri sonucunda elde edilen gerçek gerilme-gerçek plastik şekil değiştirme eğrileri. ....	28
Şekil 22. Yüzey malzemesi karakterizasyonunda kullanılan statik çekme testi numuneleri. ...	29
Şekil 23. Statik çekme testleri sonuçları, (a) X yönü, (b) Y yönü. ....	30
Şekil 24. Düzlem içi yönler (X ve Y) için basma test sonuçları. ....	32
Şekil 25. Z yönü basma testleri sonuçları. ....	32
Şekil 26. Basma testi ile Poisson oranı belirlenmesi, (Collings 1974)'den Türkçeleştirilmiştir. ....	33
Şekil 27. Poisson oranı 31 ve 32 belirleme testi voltaj – zaman grafiği. ....	34
Şekil 28. Yanal baskılı basma testi, (Collings 1974)'den Türkçeleştirilmiştir. ....	34
Şekil 29. Yanal baskılı basma testleri sonuçları. ....	35
Şekil 30. Kayma testi numunesi teknik resmi. ....	35
Şekil 31. 12 yönü kayma testi sonuçları. ....	36
Şekil 32. Dört nokta eğme testi. ....	36
Şekil 33. Dört nokta eğme testi sonucu. ....	37
Şekil 34. Düzlem içi elastiklik modülü şekil değiştirme hızı hassasiyeti. ....	38
Şekil 35. Z yönü elastiklik modülü şekil değiştirme hızı hassasiyeti. ....	39
Şekil 36. Düzlem içi mukavemet şekil değiştirme hızı hassasiyeti. ....	39
Şekil 37. Z yönü mukavemeti şekil değiştirme hızı hassasiyeti. ....	40
Şekil 38. Poliüretan malzemesine ait test numuneleri. ....	41
Şekil 39. Poliüretan malzemesine ait statik basma testi sonuçları. ....	41
Şekil 40. Poliüretan malzemesinin yüksek deformasyon hızı testlerinde kullanılan SHBB şematığı. ....	42
Şekil 41. Statik ve dinamik test sonuçlarının karşılaştırılması. ....	43
Şekil 42. $1645 \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında Poliüretan malzemesinin ezilme davranışı. ....	43

Şekil 43. 1925 s <sup>-1</sup> deformasyon hızında Poliüretan malzemesinin ezilme davranışı.....	44
Şekil 44. 3450 s <sup>-1</sup> deformasyon hızında Poliüretan malzemesinin ezilme davranışı.....	44
Şekil 45. Gerçek gerilme-gerçek plastik şekil değiştirme eğrisi (referans şekil değiştirme hızı ~0,00047 s <sup>-1</sup> ). .....	46
Şekil 46. Uzama değişimi sertleşmesi parametrelerinin bulunması (lineer eğri uydurma). ....	47
Şekil 47. Uzama değişimi sertleşmesi parametrelerinin bulunması (ikinci derece eğri uydurma). .....	47
Şekil 48. Deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması. ....	48
Şekil 49. Nümerik modelleme iş akışı. ....	56
Şekil 50. R125T05 numunesi derin çekme simülasyonu (konturlar kalınlık değerleridir). ....	57
Şekil 51. R125T1 numunesi derin çekme simülasyonu (konturlar kalınlık değerleridir). ....	58
Şekil 52. Numune kalınlığının apeksten uzaklığa göre değişimi; (a) R125T1 ve (b)R75T1 numuneleri.....	59
Şekil 53. R125T1 numunesinin kuasi-statik ezilme test sonuçları.....	61
Şekil 54. R125T1 numunesi kuasi-statik ezilme tarihçesi. ....	62
Şekil 55. R125T05 numunesinin statik ezilme test sonuçları. ....	63
Şekil 56. R125T05 numunesi statik ezilme tarihçesi. ....	64
Şekil 57. R75T1 numunesinin statik ezilme test sonuçları. ....	65
Şekil 58. R75T1 numunesi statik ezilme tarihçesi. ....	66
Şekil 59. R75T05 numunesinin statik ezilme test sonuçları. ....	66
Şekil 60. R75T05 numunesi statik ezilme tarihçesi. ....	67
Şekil 61. (a) R125T1 numunesinin düşen ağırlık ezilme test sonuçları, (b) statik ve düşen ağırlık test sonuçları. ....	70
Şekil 62. (a) R125T1 numunesi düşen ağırlık ezilme tarihçesi, (b) test sonucu hasar almış numune. ....	71
Şekil 63. (a) R125T05 numunesinin düşen ağırlık ezilme test sonuçları, (b) statik ve düşen ağırlık test sonuçları. ....	72
Şekil 64. R125T05 numunesi düşen ağırlık ezilme tarihçesi. ....	73
Şekil 65. (a) R75T1 numunesinin düşen ağırlık ezilme test sonuçları, (b) statik ve düşen ağırlık test sonuçları. ....	74
Şekil 66. R75T1 numunesi düşen ağırlık ezilme tarihçesi. ....	75
Şekil 67. (a) R75T05 numunesinin düşen ağırlık ezilme test sonuçları, (b) statik ve düşen ağırlık test sonuçları. ....	76
Şekil 68. R75T05 numunesi düşen ağırlık ezilme tarihçesi. ....	77
Şekil 69. (a) R125T1 numunesi kuasi-statik test ve simülasyon sonucu, (b) R125T1 numunesi düşen kütle test ve simülasyon sonucu. ....	78

Şekil 70. Yarı küresel yapıların ezilme davranışları incelenirken kullanılan karakteristik değerler. ....	79
Şekil 71. (a) Statik ve dinamik CFE ve (b) $P_m$ ve SAE değerleri. ....	82
Şekil 72. R125T1 numunesinin (a) kuasi-statik test ve simülasyon ve (b) düşen kütle test ve simülasyon sonucu, R75T1 numunesini (c) kuasi-statik test ve simülasyon ve (d) düşen kütle test ve simülasyon sonucu. ....	84
Şekil 73. (a) R75T1 numunesinin düşen kütle testi ve (b) simülasyon sonucu. ....	85
Şekil 74. (a) R75T1 numunesinin bileşenlerinin kuasi-statik hızdaki enerjileri, (b) R125T1 numunesinin bileşenlerinin kuasi-statik hızlarda enerji yüzdesi ve (c) R125T1 ve R75T1 numunelerinin bileşenlerinin orta hızlardaki enerji yüzdeleri ....	86
Şekil 75. 160 m/s hızda deformasyon hızı ve atalet etkileri. ....	88
Şekil 76. 160 m/s hızda deformasyon hızı ve atalet etkileri. ....	89
Şekil 77. (a) 50 m/s, (b) 100 m/s ve (c) 150 m/s sabit enerji modellerinin kuasi-statik modelle karşılaştırılması. ....	91
Şekil 78. Sabit enerji modellerinin son deformasyon profilleri. ....	92
Şekil 79. R125T05 yarı küresel çekirdekli ve kompozit yüzeyli sandviç yapının statik test sonucu. ....	94
Şekil 80. R125T05 yarı küresel çekirdekli sandviç yapının statik test görüntüleri. ....	94
Şekil 81. R125T05 yarı küresel çekirdekli sandviç yapıya ait düşen ağırlık test sonuçları. ....	95
Şekil 82. R125T05 çekirdekli sandviç yapıya ait düşen ağırlık testlerinde ezilme tarihçesi. ..	95
Şekil 83. R125T05 yarı küresel çekirdekli sandviç yapıya ait testlerin karşılaştırılması. ....	96
Şekil 84. R125T05 yarı küresel çekirdekli ezilmiş sandviç yapının alttan görünüşü. ....	96
Şekil 85. (a) Sandviç yapının kuasi-statik – serbest test sonucu ve (b) deformasyon tarihçesi. ....	98
Şekil 86. (a) Sandviç yapının kuasi-statik – serbest ve sınırlandırılmış test sonuçları karşılaştırması, (b) serbest test sonucu ezilmiş numune ve (c) sınırlandırılmış test sonucu ezilmiş numune. ....	100
Şekil 87. (a) R125T05 sandviç yapının statik ve düşen kütle kuvvet-deformasyon eğrileri ve (b) deformasyon tarihçesi. ....	102
Şekil 88. (a) ve (c) sırasıyla sınırlandırılmış modifiye-DBDD aparatı katı modeli ve üretilen parça, (b) ve (d) sırasıyla serbest modifiye-DBDD aparatı katı modeli ve üretilen parça, (e) modifiye-DBDD test cihazı. ....	104
Şekil 89. (a) R125T05 sandviç yapının serbest ve sınırlandırılmış modifiye - DBDD kuvvet-zaman eğrileri ve (b) serbest deneydeki deformasyon tarihçesi. ....	106
Şekil 90. (a) Aparat üzerine yapılandırılan gerilme ölçer, (b) ve (c) gerilme ölçer aparatının montaj resimleri. ....	107

Şekil 91. Gerilme ölçerden elde edilen gerilme-zaman eğrileri. ....	108
Şekil 92. (a) Sandviç numune modeli, (b) sınırlandırılmış ve (c) serbest modifiye-DBDD nümerik modelleri. ....	109
Şekil 93. R125T05 sandviç yapının test ve simülasyon sonucu karşılaştırmaları (a) kuasi- statik – serbest, (b) kuasi- statik – sınırlandırılmış, (c) düşen kütle test ve simülasyon sonucu. ....	112
Şekil 94. R125T05 numunenin statik – serbest test ve simülasyon deformasyon tarihçeleri. ....	112
Şekil 95. R125T05 sandviç numunenin kuasi- statik – serbest test ve simülasyon sonucu ezilmiş şekli. ....	113
Şekil 96. R125T05 sandviç numunenin kuasi- statik – sınırlandırılmış (a) test ve (b) simülasyon sonucu ezilmiş şekli. ....	113
Şekil 97. R125T05 sandviç numunenin düşen kütle test ve simülasyon sonucu deformasyon tarihçeleri. ....	114
Şekil 98. (a) R125T05 sandviç yapının sınırlandırılmış modifiye-DBDD deney ve simülasyon sonucu, (b) deney ve simülasyon sonucu ezilmiş numune. ....	115
Şekil 99. (a) R125T05 sandviç yapının serbest modifiye-DBDD deney ve simülasyon sonucu, (b) deney ve simülasyon sonucu ezilmiş numune. ....	116
Şekil 100. Sandviç yapıda 200 m/s hızda deformasyon hızı ve atalet etkileri. ....	118
Şekil 101. Ortalama kuvvetteki artış – hız grafiği. ....	119
Şekil 102. (a) Sıralı iki katmanlı, (b) Ters iki katmanlı, (c) Sıralı üç katmanlı sandviç yapılar. ....	120
Şekil 103. Ortalama kuvvet – Yüzde deformasyon. ....	121
Şekil 104. (a) R125T05 sandviç yapının serbest modifiye-DBDD deney ve simülasyon sonucu, (b) deney ve simülasyon sonucu ezilmiş numune. ....	122
Şekil 105. R125T1 sandviç düşen kütle simülasyonu sonucu; (a) kuvvet-deformasyon eğrisi, (b) deforme olmuş numunenin önden görünüşü, (c) deforme olmuş numunenin üstten görünüşü. ....	124
Şekil 106. R75T05 sandviç düşen kütle simülasyonu sonucu; (a) kuvvet-deformasyon eğrisi, (b) deforme olmuş numunenin önden görünüşü, (c) deforme olmuş numunenin üstten görünüşü. ....	126
Şekil 107. R75T1 sandviç düşen kütle simülasyonu sonucu; (a) kuvvet-deformasyon eğrisi, (b) deforme olmuş numunenin önden görünüşü, (c) deforme olmuş numunenin üstten görünüşü. ....	127

Şekil 108. Sınırlandırılmış modifiye-DBDD simülasyon kuvvet tarihçeleri ve ezilmiş numune görüntüleri; (a) ve (b) R125T1 sandviç, (c) ve (d) R75T05 sandviç ve (e) ve (f) R75T1 sandviç. ....	129
Şekil 109. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü bünyesinde kurulu Doğrudan Basınç Dalgası Test Sistemi (DBDD). ....	132
Şekil 110. Doğrudan Basınç Dalgası testi Voltaj-Zaman eğrisi .....	133
Şekil 111. 304L Yüzey malzemesi Doğrudan Basınç Dalgası test sonuçları. ....	133
Şekil 112. E-Glass/Polyester Yüzey malzemesi Doğrudan Basınç Dalgası test sonuçları. (kalınlık = 2 mm).....	134
Şekil 113. E-Glass/Polyester Yüzey malzemesi Doğrudan Basınç Dalgası test sonuçları. (kalınlık = 3 mm).....	134
Şekil 114. 304L yüzey malzemesinde hasar ilerleyişi. ( $v_{\text{çarpın}}= 40$ m/s) .....	135
Şekil 115. 304L yüzey malzemesinde hasar ilerleyişi. ( $v_{\text{çarpın}}= 45$ m/s) .....	136
Şekil 116. 304L yüzey malzemesinde hasar ilerleyişi. ( $v_{\text{çarpın}}= 50$ m/s) .....	137
Şekil 117. E-Glass/Polyester yüzey malzemesinde hasar ilerleyişi. ( $v_{\text{çarpın}}= 40$ m/s, kalınlık = 2 mm) .....	138
Şekil 118. E-Glass/Polyester yüzey malzemesinde hasar ilerleyişi. ( $v_{\text{çarpın}}= 45$ m/s, kalınlık = 2 mm) .....	139
Şekil 119. E-Glass/Polyester yüzey malzemesinde hasar ilerleyişi. ( $v_{\text{çarpın}}= 50$ m/s, kalınlık = 2 mm) .....	140
Şekil 120. E-Glass/Polyester yüzey malzemesinde hasar ilerleyişi. ( $v_{\text{çarpın}}= 40$ m/s, kalınlık = 3 mm) .....	141
Şekil 121. E-Glass/Polyester yüzey malzemesinde hasar ilerleyişi. ( $v_{\text{çarpın}}= 45$ m/s, kalınlık = 3 mm) .....	142
Şekil 122. E-Glass/Polyester yüzey malzemesinde hasar ilerleyişi. ( $v_{\text{çarpın}}= 50$ m/s, kalınlık = 3 mm) .....	143
Şekil 123. 304L yüzey malzemesinde deformasyon profili karşılaştırması; a) Deformasyonun numune içinde değişimi, b) Yüzey malzemesine ait deformasyon profili karşılaştırması ( $v_{\text{çarpın}} = 50$ m/s, çarpın çubuk boyu= 50 mm, patlayıcı miktarı= 500 g, patlama mesafesi= 36,4 cm), c) DBDD ve Patlama Nümerik simülasyonlarında hız tarihçelerinin karşılaştırması. ....	145
Şekil 124. 304L yüzey malzemesinde deformasyon profili karşılaştırması. ( $v_{\text{çarpın}} = 25$ m/s, patlayıcı miktarı = 500 g, patlama mesafesi = 38 cm).....	146
Şekil 125. 304L yüzey malzemesinde deformasyon profili karşılaştırması. ( $v_{\text{çarpın}} = 30$ m/s, patlayıcı miktarı = 500 g, patlama mesafesi = 34,3 cm).....	146
Şekil 126. 304L yüzey malzemesinde deformasyon profili karşılaştırması. ( $v_{\text{çarpın}} = 35$ m/s, patlayıcı miktarı = 500 g, patlama mesafesi = 31,3 cm).....	147

Şekil 127. 304L yüzey malzemesinde deformasyon profili karşılaştırması. ( $v_{\text{çarpma}} = 40$ m/s, patlayıcı miktarı = 500 g, patlama mesafesi = 29 cm).....	147
Şekil 128. (a) ve (b) R125T05 sandviç yapının DBDD deney ve simülasyon sonucu, (c) ve (d) deney ve simülasyon sonucu ezilmiş numune. ....	150
Şekil 129. DBDD deneyi ile eşdeğer patlama simülasyonu sonucu.....	151
Şekil 130. DBDD ve patlama simülasyonlarının deformasyon şekilleri; (a) Patlama, (b) DBDD. ....	151
Şekil 131. Sandviç yapı temsili patlama modeli .....	153
Şekil 132. (a) R125T05 ve R125T1 çekirdek malzemeli sandviç yapısı simülasyon modeli, (b) R75T05 ve R75T1 çekirdek malzemeli sandviç yapısı simülasyon modeli. ....	154
Şekil 133. Tek çeşit çekirdek malzemeli sandviç yapıların deformasyonları; (a) R125T05, (b) R125T1, (c) R75T05, (d) R75T1 .....	158
Şekil 134. Tek çeşit çekirdek malzemeli sandviç yapıların ön yüzey plakalarının hız tarihçeleri.....	159
Şekil 135. Tek çeşit çekirdek geometrili sandviç yapıların tehdit altında kuvvet tarihçeleri..	160
Şekil 136. Tek çeşit çekirdek malzemeli sandviç yapıların SAE değerleri .....	160
Şekil 137. Tek çeşitli sandviç yapıların normal ve ters modellerde maksimum kuvvet değerleri. ....	161
Şekil 138. Ters durumda ön yüzey plakası maksimum hız değerleri .....	162
Şekil 139. a) Tip 1 sandviç yapısı simülasyon modeli, b) Tip 1 modelinin deformasyonu....	164
Şekil 140. a) Tip 2 sandviç yapısı simülasyon modeli, b) Tip 2 modeli deformasyonu. ....	165
Şekil 141. Tip 3 sandviç modeli simülasyonu.....	166
Şekil 142. R125T05, R75T05 ve Tip 3 çarpma yüzey plakası hız tarihçeleri. ....	167
Şekil 143. Tip3 modelinin deforme olmuş hali.....	168
Şekil 144. Tip 3 sandviç modelinde R125T05 ve R75T05 çekirdek malzemelerinin deformasyonları.....	168
Şekil 145. Tip 4 sandviç simülasyonu modeli.....	169
Şekil 146. (a) R125T05, R75T05, Tip 3 ve Tip 4 sandviç yapılarının kuvvet tarihçeleri, (b) Tip 3 ve Tip 4 sandviç modeli kuvvet tarihçeleri ve deformasyon şekilleri. ....	170
Şekil 147. Tip 4 modelinin deforme olmuş hali.....	171
Şekil 148. Tip 5 sandviç modeli simülasyonu.....	172
Şekil 149. Tip 3 ve Tip 5 modellerinin kuvvet tarihçeleri. ....	173
Şekil 150. Tip 3 ve Tip 5 modellerinin ön yüzey plaka hız tarihçeleri .....	174
Şekil 151. Tip 5 modeli deforme olmuş hali.....	175
Şekil 152. Tip 6 sandviç modeli simülasyonu.....	176
Şekil 153. Tip 3,4,5 ve 6 sandviç yapılarının kuvvet tarihçeleri.....	177



Şekil 154. Tip 6 sandviçte çekirdek malzemelerinin deformasyon şekilleri. ....	178
Şekil 155. Tip 6 modelinin son deforme olmuş hali. ....	179
Şekil 156. Sandviç yapıların maksimum kuvvet değerleri .....	180
Şekil 157. Sandviç yapıların ön yüzey plakası maksimum hız değerleri .....	181
Şekil 158. Sandviç yapılarının SAE değerleri .....	181
Şekil 159. Aynı etkiyi yaratacak patlama modellerinde eş değer TNT ve mesafe değerleri. ....	182

## Özet

Bu proje yarı küresel tekrarlı çekirdek malzemesi içeren sandviç yapıların geliştirilmesi ve bu yapıların patlama etkileri karşısındaki davranışlarının incelenmesini ve iyileştirilmesini amaçlamaktadır. Bu kapsamda deneysel ve nümerik teknikler bir arada kullanılmış ve hem deneysel tekniğin güvenilirliğinden hem de nümerik tekniğin sağladığı ek bilgilerden aynı anda faydalanılmıştır. Literatürde bir benzerine rastlanmamış olan yeni bir çekirdek malzemesinin geliştirilmesi ile üretilen sandviç yapı hem ülkemiz savunma sanayii envanterine önemli bir katkıda bulunmuş ve hem de ulusal ve uluslararası literatüre sunulmuştur.

Bu proje kapsamında sandviç yapıyı oluşturacak malzemelerin statik ve yüksek şekil değiştirme hızlarındaki mekanik özellikleri tespit edilmiş ve bu tespit edilen özellikler daha sonraki adımlarda nümerik modellerde kullanılmıştır. Tasarlanan çekirdek malzemelerinin davranışları üzerine üretim yönteminin (derin çekme) etkisini de hesaba katmak amacıyla, kullanılan üretim yöntemi de modellenerek nümerik numuneler oluşturulmuş ve bunlar ileriki modelleme aşamalarında kullanılmıştır. Deney ve nümerik model sonuçları kullanılarak, sandviç yapıların ve çekirdek malzemelerinin düşük ve yüksek şekil değiştirme hızlarındaki ezilme davranışları ile bu yapıların atalet ve deformasyon hızı etkileri belirlenebilmiştir. Gerçekleştirilen patlama simülasyonları ile farklı konfigürasyon ve katman sayılarındaki sandviç yapıların patlama etkileri altındaki davranışları incelenmiş ve olumlu sonuç veren konfigürasyonlar tayin edilmiştir.

Patlamaya karşı geliştirilen sandviç yapılardan beklenen en önemli özellikler koruma sağlanan yapıya iletilen kuvvetin minimize edilmesi ile birlikte enerji emiliminin maksimize edilmesidir. Bu amaçla tasarlanan konfigürasyonlar arasından en az kuvvet transfer eden ve en çok enerji emen konfigürasyonlar belirlenmiştir.

## **Abstract**

The current project aims to develop repeated hemispherical-core sandwich structures and to investigate and to optimize their behavior against blast effects. In this perspective, experimental and numerical methods were coupled, both reliability of experimental techniques and additional information provided by numerical techniques were used together. The manufacturing of sandwich structure with the development of a novel core contributed to national defense industry inventory and also was presented to literature.

In the scope of the project, mechanical properties of sandwich structures' constituent materials were determined at both static and high strain rates and those were further used in the numerical models at the subsequent steps. In order to incorporate the effects of manufacturing method (deep drawing) on the mechanical behavior of developed core structure, manufacturing method was also modelled and numerical specimens were prepared and used in the further steps of the study. The results of experiments and numerical simulations revealed the crushing characteristics of sandwich structures and core materials and also inertia, and strain rate sensitivities were also determined. The behavior of sandwich structures with various configurations and different number of layers under blast effects were investigated and optimized configurations were determined.

The most important characteristic of blast-resistant sandwich structures is to minimize the transmitted force to the protected structure while maximizing the absorbed energy. Among configurations designed for this purpose, with minimized transmitted force and maximum energy absorbing was determined.

## 1. GİRİŞ

Patlama yüklerine karşı korumaya yönelik çalışmalar kapsamında bugüne kadar çeşitli yapılar geliştirilmiş ve zırh tasarımlarında kullanılmışlardır. Bu amaçla geliştirilen yapıların tasarımındaki en önemli husus patlamaya karşı korunan yapıya minimum ağırlık yükü getirirken maksimum enerji emilimini ve korunan yapıya iletilen kuvvet miktarını minimize ederek korumadır. Bu amaçla en çok kullanılan tasarımlar sandviç yapılardır. Yüksek mukavemet/ağırlık ve yüksek direngenlik/ağırlık oranlarına sahip bu yapılar, kullanıldıkları uygulamalarda yapılara minimum ağırlık yükü gelmesini garanti altına almaktadır. Çekirdek malzemesi olarak kullanılan yapılar ise çeşitli deformasyon modları ile ezilerek mümkün olan maksimum enerjinin emilmesini sağlamaktadırlar. Ayrıca çeşitli özelliklerin belirli şartları sağlayacak şekilde düzenlenmesi (engineered) ve uyarlanması (tailored) ile yapıların istenen amaçları sağlanması da garanti edilebilir (fonksiyonel olarak derecelendirilmiş çekirdek malzemelerinin kullanımı, dizilim ve yönelim değişiklikleri gibi). Sayılan bu özellikleri dolayısıyla sandviç yapılar patlamaya karşı koruma uygulamalarında sıklıkla kullanılmıştır ve sonraki bölümde literatürdeki örneklere yer verilmiştir.

### 1.1 Literatür Özeti

Patlamaya karşı koruma yapılarının etkinliklerinin incelenmesinde günümüze kadar çeşitli deneysel yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemler ana başlıklar halinde; gerçek ölçekli patlama (Guruprasad ve Mukherjee 2000; Dharmasena vd. 2008; Palanivelu vd. 2011), balistik sarkaç (Hanssen vd. 2002; Zhu vd. 2008; Nurick vd. 2009; Zhu vd. 2009; Zhu vd. 2009; Chi vd. 2010), şok tüpü (Tekalur vd. 2008; Wang vd. 2009; Jackson ve Shukla 2011; Wang ve Shukla 2012), metalik köpük çarptırma (Radford vd. 2006; Radford vd. 2006; Rathbun vd. 2006; Tagarielli vd. 2007; McKown vd. 2008; Rubino vd. 2008, 2009), polimerik köpük çarptırma (Chen vd. 2011), su altı patlama (Wadley vd. 2008; Dharmasena vd. 2009; Mori vd. 2009; Dharmasena vd. 2010) ve gaz karışımlarını patlatma deneyleridir (Turkmen ve Mecitoglu 1999). Yapılan bu deneyler genellikle yüksek hızlı kameralar ile kaydedilerek anlık hasar ilerlemesi incelenmiştir (Tagarielli vd. 2007; Rubino vd. 2008; Tekalur vd. 2008; Zhu vd. 2008; Wang vd. 2009; Zhu vd. 2009; Zhu vd. 2009; Jackson ve Shukla 2011; Wang ve Shukla 2012). Bu çalışmaların bazılarında patlama yükü etkisi altındaki yapı nümerik olarak modellenmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Bu çalışmaların bir kısmında ConWep hava patlama fonksiyonu (denklem 1) kullanılarak patlama etkisi modellenmiş (Hanssen vd. 2002; Dharmasena vd. 2008; Jackson ve Shukla 2011), bir kısmında ise patlama modellenmiş (ALE, Arbitrary Lagrangian Eulerian) (Wadley

vd. 2008; Dharmasena vd. 2009; Zhu vd. 2009; Dharmasena vd. 2010), bir kısmında ise yapıya etki eden şok dalgasını temsil eden köpük çarpma deneyleri modellenmiştir (Radford vd. 2006; Rathbun vd. 2006; Rubino vd. 2009). Bazı çalışmalarda ise sadece nümerik analizler yapılmıştır (Lee ve O'Toole 2004; Mullin ve O'Toole 2004; Sriram ve Vaidya 2004; Xue ve Hutchinson 2004; Sriram vd. 2006; Karagiozova vd. 2009; Yang vd. 2011). Araştırmacıların bir kısmı da analitik yöntemlerle probleme yaklaşmışlardır (Guruprasad ve Mukherjee 2000).

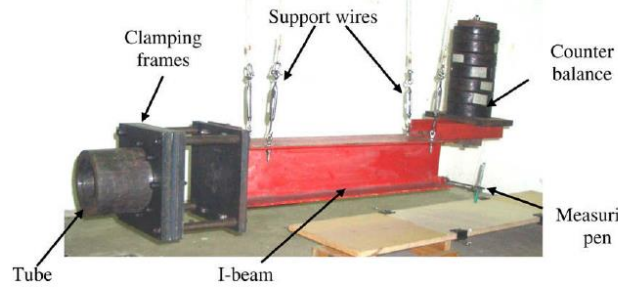
$$P(\tau) = P_r * \cos^2\theta + P_i * (1 + \cos^2\theta - 2 * \cos\theta) \quad \text{Denklem (1)}$$

Yukarıda verilen ConWep hava patlama fonksiyonunda;  $\theta$  gelen dalga ile hedef arasındaki açı,  $P_i$  gelen dalga,  $P_r$  yansıyan dalgadır (Zhu ve Lu 2007). LS-DYNA ve ABAQUS gibi paket programlarda eşdeğer TNT kütlesi ve patlayıcının hedefe olan uzaklığı girdi olarak verilerek bu fonksiyon kullanılabilir.

Patlama etkisinin yapılara uygulandığı deney düzenekleri ile ilgili örnekler Şekil 1 de verilmiştir.



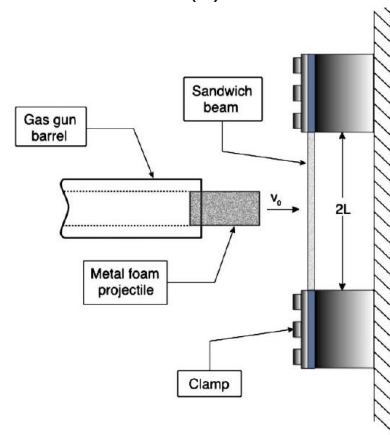
(a)



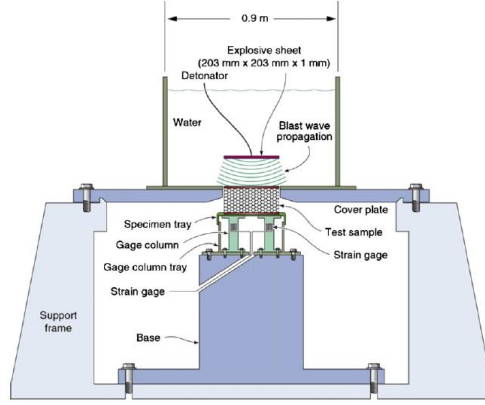
(b)



(c)



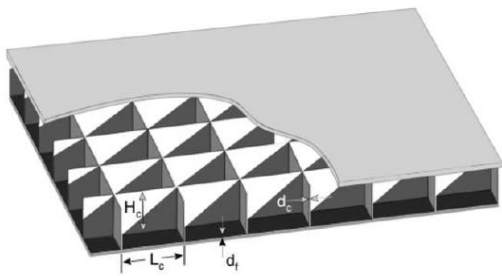
(d)



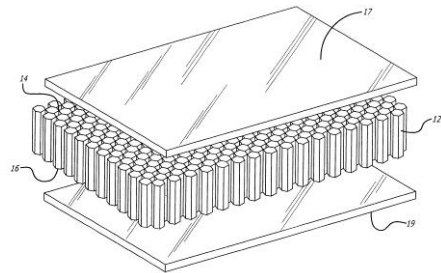
(e)

Şekil 1. Patlama etkilerini incelemekte kullanılan deney düzenekleri, (a) gerçek ölçekli patlama deneyi (Dharmasena vd. 2008), (b) balistik sarkaç deneyi (Nurick vd. 2009), (c) şok tüpü deneyi (Tekalur vd. 2008), (d) köpük çarpma deneyi (Rathbun vd. 2006), (e) sualtı patlama deneyi (Wadley vd. 2008).

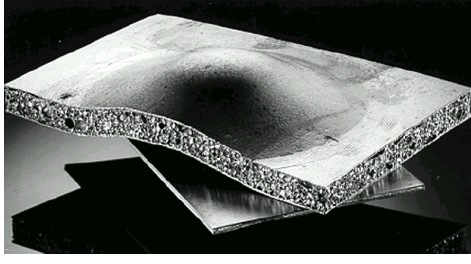
Patlamaya karşı koruma amaçlı geliştirilen sandviç yapılarda çok çeşitli çekirdek malzemeleri denenmiştir. Kare şekilli metalik bal petekler (Lee ve O'Toole 2004; Xue ve Hutchinson 2004, 2004; Rathbun vd. 2006; Dharmasena vd. 2008; Dharmasena vd. 2010), altıgen şekilli metalik bal petekler (Zhu vd. 2008; Zhu vd. 2009; Chi vd. 2010), metalik köpükler (Hanssen vd. 2002; Mullin ve O'Toole 2004; Sriram ve Vaidya 2004; Radford vd. 2006; Radford vd. 2006; Sriram vd. 2006; Zhu vd. 2009; Tasdemirci vd. 2010), polimerik köpükler (Tagarielli vd. 2007; Tekalur vd. 2008; Wadley vd. 2008; Wang vd. 2009; Wang ve Shukla 2012), balsa ağacı (Tagarielli vd. 2007; Chen vd. 2011), metal piramit yapılar (Xue ve Hutchinson 2004, 2004; Wadley vd. 2008; Dharmasena vd. 2010), üçgen ve baklava dilimi şeklinde oluklu yapılar (Xue ve Hutchinson 2004, 2004; Radford vd. 2006; McKown vd. 2008; Rubino vd. 2008; Dharmasena vd. 2009; Rubino vd. 2009; Dharmasena vd. 2010), Y şekilli metal yapılar (Guruprasad ve Mukherjee 2000; Rubino vd. 2008, 2009) ve I şekilli metal yapılar (Mori vd. 2009) çekirdek malzemesi olarak kullanılmıştır. Bazı uygulama örnekleri Şekil 2 de gösterilmiştir.



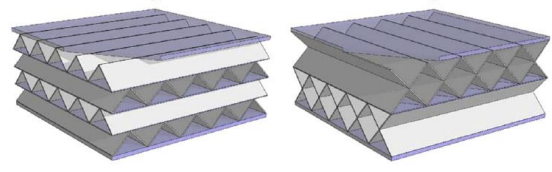
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 2. Patlama etkilerine karşı kullanılan çekirdek malzemeleri (Rathbun vd. 2006) (a) kare şekilli metalik balpeteği, (b) altıgen şekilli metalik balpeteği, (c) metalik köpük (Banhart 2000), (d) üçgen ve elmas dizimli oluklu yapılar (Dharmasena vd. 2010), (e) balsa ağacı.

Patlama etkilerine karşı koruma için geliştirilen sandviç yapıları konu alan çalışmalarda yapıların etkinlikleri, farklı patlayıcı kütleleri ve mesafeleri kullanılarak incelenmiştir. Bazı araştırmacılar, 1-20 g TNT eşdeğeri patlayıcıları 100-500 mm gibi küçük sayılabilecek uzaklıklarda (Zhu vd. 2008; Nurick vd. 2009; Zhu vd. 2009; Chi vd. 2010; Palanivelu vd. 2011), diğer araştırmacılar ise 1-5 kg TNT eşdeğeri patlayıcıları 0.5-2 m mesafeden (Guruprasad ve Mukherjee 2000; Hanssen vd. 2002; Dharmasena vd. 2008) patlatarak deneylerini gerçekleştirmişlerdir.

Denklem 1'den görüleceği üzere patlayıcı kütlesi ile patlayıcının numune yüzeyine uzaklığı numune yüzeyine gelen patlama yükünü belirlemektedir. Yapılan çalışmalar, sandviç yapıda yüzey katmanı kalınlığının ve çekirdek yoğunluğunun artmasıyla birlikte ön yüzeyde meydana gelen lokal deformasyonun arttığını ve tam tersi durumda ise yapının global olarak deforme olduğunu göstermiştir (Zhu vd. 2008).

Başka bir çalışmada balistik sarkaç kullanılarak bal peteği çekirdekli yapı, çekirdek kullanılmayan ve plakalar arasında boşluk bırakılmış (air core) bir yapı ile karşılaştırılmış ve yüksek patlama yüklerinde bal peteği çekirdekli sandviğin arka yüzey deformasyonunun daha az olduğu gözlemlenmiştir (Nurick vd. 2009). Bu durum, patlamaya karşı koruma için geliştirilecek olan sandviç yapılarda çekirdek malzemesinin yapının global deformasyonuna etkisinin çok fazla olduğunu göstermektedir. Bu tarz sandviç yapılar, eşdeğer kütleli yekpare yapılara göre daha az deformasyona uğramaktadır.

Yüzey katmanlarının kalınlığı azaldıkça yani esneklikleri arttıkça, çekirdeğin yapının deformasyonu üzerindeki etkisinin arttığı bilinmektedir. Sandviç yapılarda ön yüzey plakasının şekil değiştirmesi, çekirdek kalınlığının yaklaşık %60-70'ine ulaştığında çekirdekte densifikasyon başlamakta ve arka yüzey plakasına iletilen gerilmeler artmaktadır. Daha önce yapılan çalışmalardan da anlaşılacağı üzere, impulsun artışı çekirdek basma şekil değiştirmesini arttırmaktadır. Ayrıca kullanılan tekrarlı çekirdek malzemelerinin dinamik gerilme değerleri atalet etkisinden dolayı statik değerlerden daha yüksektir (Rathbun vd. 2006).

Bal peteği çekirdek malzemeler gibi Y şekilli çekirdekler de patlamaya karşı koruma için geliştirilen sandviç yapılarda denenmiştir (Rubino vd. 2008, 2009). Metalik köpüklerin sandviç yapılara fırlatılarak patlama yüklerinin etki ettirildiği bir çalışmada (Rubino vd. 2009) sandviç yapının davranışı, eş değer ağırlıktaki üçgen oluklu yapı ve tek katmanlı yapılarla karşılaştırılmıştır. Aynı patlama tehdidi altında arka yüzey deformasyonu en düşük olan üçgen oluklu yapı, patlama etkilerine karşı daha dayanıklı yapı olarak tespit edilmiştir.

Kare ve üçgen bal peteği çekirdek ihtiva eden sandviç yapıların su altı patlamalarına karşı dayanımları da piramit yapılı ve üçgen oluklu yapılara karşı incelenmiştir (Dharmasena vd. 2010). Bu yapılar içerisinde patlamaya karşı en iyi dayanımı üçgen oluklu ve piramit yapılı sandviçlerin verdiği gözlemlenmiştir.

Gerçek patlayıcıların kullanıldığı (1-3 kg kütleli TNT, 10 cm mesafe) ve kare balpeteği yapılar ve eşdeğer kütleli yekpare yapıların koruma performansının incelendiği başka bir çalışmada sandviçler, yekpare yapılara göre çok daha iyi koruma seviyeleri sergilemiştir (Dharmasena vd. 2008). Başka bir çalışmada polimerik köpük ve balsa ağacı çekirdekli sandviç yapıların patlamaya karşı davranışları eş değer kütleli yekpare yapılara karşı incelenmiştir (Tagarielli vd. 2007). Polimerik köpük içeren sandviç yapılar, alternatifler arasında daha düşük patlama yüklerinde hasara uğramıştır. Balsa ağacı çekirdekli sandviç yapılar polimerik olanlara göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

Patlamaya karşı koruma amaçlı geliştirilen sandviç yapılarda farklı yoğunluklara sahip polimerik köpüklerin patlamanın etki ettiği yüzeye göre fonksiyonel olarak farklı dizilimlerde yerleştirildiği uygulamalar da literatürde mevcuttur. Bu tarz bir yapının patlama yükleri etkisi altında davranışı şok tüpü kullanılarak incelenmiş ve dizilimin deformasyon enerjisine etkisi görülmüştür (Wang vd. 2009). Çalışmadan anlaşıldığı üzere deformasyon enerjisi düşük-orta-yüksek yoğunluklu çekirdek dizilimli sandviçte, orta-düşük-yüksek çekirdek dizilimli sandviçe göre daha düşüktür. Bu da dizilimin patlama etkilerini bertaraf etme konusundaki önemini göstermektedir.

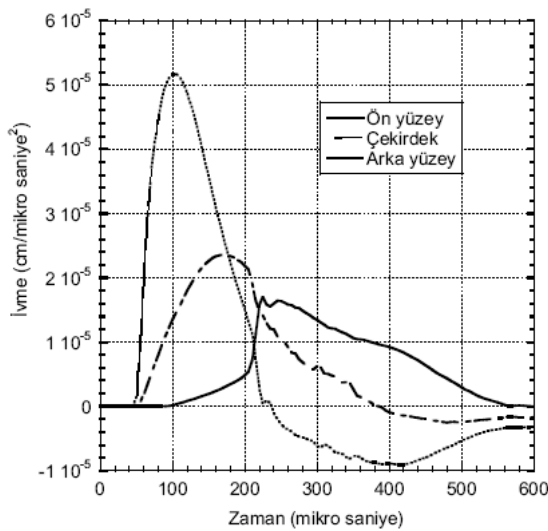
Patlamaya karşı koruma sistemlerinde alışılmadık bir uygulama ince cidarlı içecek kutularını koruma katmanı olarak kullanmaktır. Bu tarz bir yapı gerçek ölçekli patlama



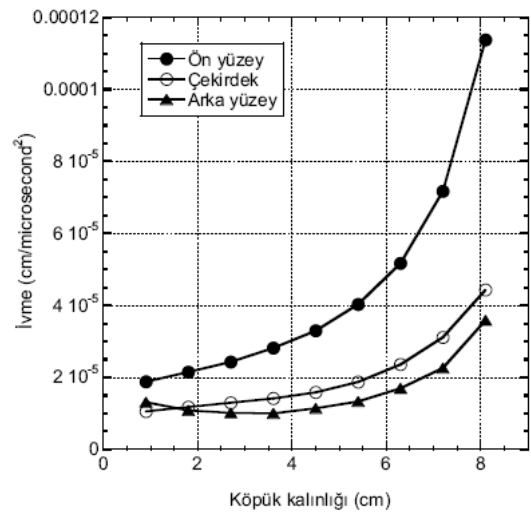
deneylerine maruz bırakılmış ve nümerik analizi yapılarak etkinliği ortaya konulmuştur (Palanivelu vd. 2011).

Patlamaya karşı koruma sistemlerinde kullanılan bir diğer yapı, içi boş metalik kürelerden oluşan sistemlerdir. Proje yürütücüsünün bu tarz yapıların yüksek şekil değiştirme hızı deformasyon davranışlarının incelenmesi üzerine yapmış olduğu çalışması (Tasdemirci vd. 2010) bu uygulamanın bir örneğidir. Bu çalışmada 316L paslanmaz çeliğinden imal edilmiş içi boş metalik kürelerdeki mikro-atalet ve deformasyon hızı etkisi deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir.

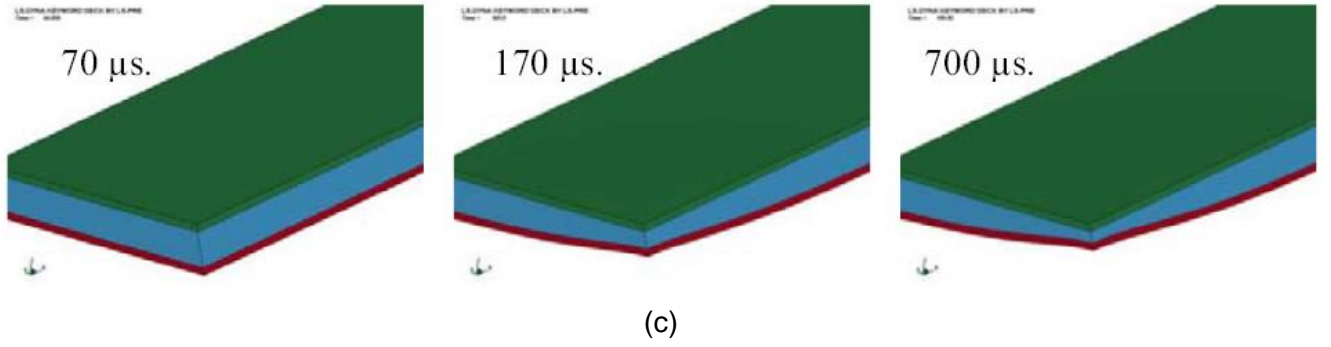
Proje yürütücüsü, patlamaya karşı koruyucu yapılar üzerinde yapmış olduğu başka bir çalışmada alüminyum köpük çekirdeğe sahip sandviç yapıların patlamaya karşı koruma performanslarını nümerik olarak incelemiştir (Taşdemirci vd. 2010). Bu çalışmada ConWep patlama fonksiyonu kullanılarak 10 kg TNT patlayıcının 30 cm mesafeden yapı üzerinde oluşturacağı patlama yüklerinin etkisi incelenmiştir ve ayrıca yüzey malzemesi türünün sandviçin patlama etkilerine karşı gösterdiği davranış üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Çalışmada toplam sandviç kalınlığı sabit tutulmak kaydıyla çekirdek malzemesi kalınlığındaki değişimin enerji emme karakteristiği üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Çekirdek malzemesinin kalınlığı arttıkça emilen enerjinin miktarının arttığı, ancak yüzey katmanlarının kalınlıklarının düşmesi nedeniyle de kalıcı deformasyonun arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 3a ve b'de patlama etkisine maruz sandviç yapıda ivmenin zamana bağlı değişimi verilmektedir. Deformasyon sırasında çekirdek malzemesi patlama enerjisinin önemli kısmını emmiş ve arka yüzey plakasının ivmesinin ön yüzey plakasından daha düşük olmasını sağlamıştır. Şekil 3c'de ise sandviç yapıda meydana gelen deformasyon tarihçesi görülmektedir.



(a)

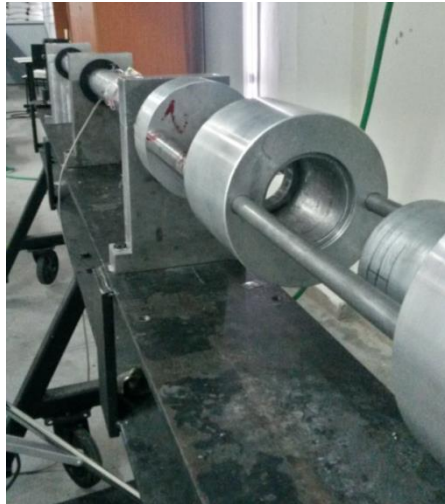


(b)



Şekil 3. Sandviç yapıyı oluşturan elemanlarda ivmenin (a) zamana (b) köpük kalınlığına bağlı değişimi (c) numunedeki hasar ilerlemesi (Taşdemirci vd. 2010).

Son yıllarda patlama yüklerinin yapılara uygulanması amacıyla laboratuvar ortamında yapılabilen emniyetli, kontrollü ve tekrar edilebilir yükler uygulayan deneysel tekniklerin geliştirilmesine önem verilmiştir. Bu amaçla geliştirilen sistemlere en önemli örnek Doğrudan Basınç Dalgası Deney Düzeneğidir. Bu sistemde Şekil 4'den de görülebileceği gibi test numunesi sınırlayıcı bir kalıp içerisinde sabitlenmekte, üzerine bir polimerik yükleme plakası yerleştirilmekte ve bir çarpan çubuk bu malzemelere yüksek hızda çarparak yapıya patlama basınç dalgasına benzer bir dinamik yük uygulamaktadır. Bu sistemle poliüre kaplı DH-36 çelik sandviç yapıların patlama etkilerine karşı davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir (Amini vd. 2010; Amini vd. 2010). Bu tarz bir Doğrudan Basınç Dalgası Deney Düzeneği İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü bünyesinde proje yürütücüsü tarafından 2011 yılında başarı ile kurulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 4. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü bünyesinde kurulu Doğrudan Basınç Dalgası Test Sistemi (DBDD).

Proje yürütücüsü yine başka bir çalışmada, patlamaya karşı koruma yapılarında çekirdek malzemesi olarak kullanılan alüminyum köpüğün dinamik mekanik özelliklerini Hopkinson Basınç Barı kullanarak incelemiştir. Çalışmada numune içerisindeki gerilme dengesi de incelenmiştir (Taşdemirci vd. 2007). Patlama yüklerinin patlamaya karşı koruma yapıları üzerindeki etkisinin anlaşılabilmesi, aslında bu yapılar içerisinde gerilme dalgasının nasıl ilerlediğinin anlaşılmasına bağlıdır. Patlama esnasında meydana gelen patlama gerilme dalgası yapıya ulaştığı anda yapı içerisinde ilerlemekte ve yapı içerisinde bulunan yüzeylerden veya malzeme gruplarından iletilmekte ve yansımaktadır. Aslında bu problem, çok katmanlı zırh sistemlerinde merminin zırha çarpma anında meydana gelen basma gerilme dalgasının ilerleyişine çok benzemektedir. Nitekim çok katmanlı zırh sistemlerini oluşturan seramik ve kompozit ana zırh bileşenlerinin arasına konulan farklı mekanik özelliklere sahip ara yüzey katmanları zırh sisteminin balistik performansını oldukça değiştirmektedir. Proje yürütücüsünün ilgili makalesinde ara yüzey malzemesinin zırhın

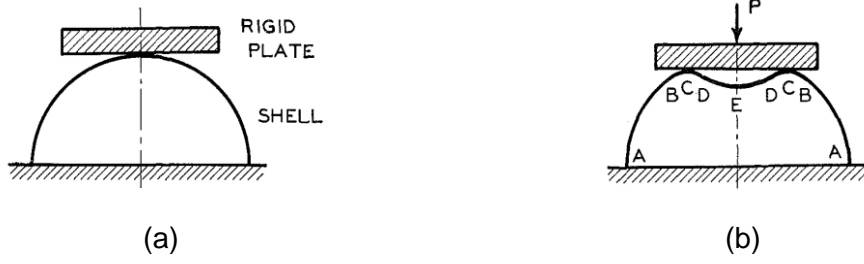
balistik performansına etkisi incelenmiş ve zırh sistemi içerisindeki bileşenlerde meydana gelen hasar mekanizmaları ve enerjilerin dağılımı ortaya konmuştur (Tasdemirci vd. 2012).

Günümüze kadar patlamaya karşı koruma amacıyla geliştirilen geleneksel koruyucu sandviç yapılarda; bal peteği malzemeler, oluklu malzemeler, metalik ve polimerik köpükler vb. çekirdek malzemeleri olarak sıklıkla kullanıldığı önceki paragraflardaki literatür incelemesinden de görülmektedir. Bu projenin konusu olan yarı küresel ve silindirik yapıların bileşiminden oluşan çekirdek yapılarının patlamaya karşı koruma alanında uygulaması ile ilgili çalışmalara ise açık literatürde rastlanmadığı gibi bu yapıların düşük ve yüksek hızlarda ezilme davranışları ile ilgili çalışmalar da literatürde mevcut değildir.

Bu ve benzeri kombine yapıların davranışlarını incelemeye önce, hiyerarşik olarak bileşenlerinin davranışları ile ilgili incelemelerin yapılması uygun olacağından, takip eden paragraflarda hem kombine geometriyi oluşturan yarı küresel ve silindirik ince cidarlı yapılarla ilgili incelemelere yer verilecek hem de diğer kombine geometri örnekleri ile ilgili çalışmalara değinilecektir.

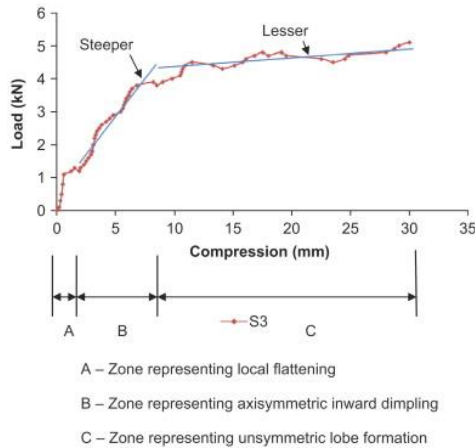
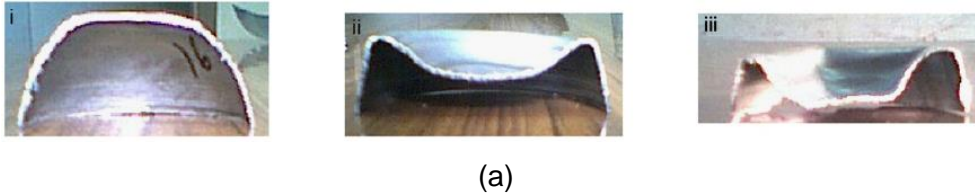
İnce cidarlı silindirik tüpler ile ilgili ilk çalışmalardan biri Alexander (Alexander 1960) tarafından gerçekleştirilmiştir. Alexander bu çalışmada ince cidarlı tüplerin ortalama aksenal simetrik ezilme kuvvetlerinin hesabı için analitik bir model önermiştir. Düşük D/t (çap/cidar kalınlığı) ve rijit-mükemmel-plastik malzemeli tüpler, aksenal simetrik modda (konsertina) deforme olma eğilimi gösterirken (Abramowicz ve Jones 1984), şekil değişimi sertleşmeli malzemeler asimetrik modda deforme olurlar (Singace ve El-Sobky 2001). İnce cidarlı tüplerin ezilme davranışlarına köpük doldurmanın ve sınır şartlarının etkisi de geniş bir şekilde incelenmiştir, örneğin Santosa ve diğerleri (Santosa vd. 2000), Güden ve Kavi (Guden ve Kavi 2006) ve Singace ve El-Sobky (Singace ve El-Sobky 2001) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar. Deneysel ve nümerik çalışmanın entegre edilerek tüplerin kuasi-statik ezilmelerinin incelendiği bir çalışma Taşdemirci (Tasdemirci 2008) tarafından gerçekleştirilmiş ve sınır şartlarının yapının ezilme davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Shahi and Marzbanrad (Shahi ve Marzbanrad 2012) ise çalışmalarında farklı kalınlıktaki dilimlerin birleşmesinden oluşturulmuş bölüntülü ince cidarlı tüplerin ezilme davranışlarını sabit kalınlıklı tüplerin ezilme davranışları ile karşılaştırmalı olarak incelemiştir.

Literatürde yarı küresel ve sığ küresel yapıların ezilme davranışları ile ilgili de çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bunların öncüllerinden olan bir çalışma Updike (Updike 1972) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada rijit-plastik küresel kabuk yapıların basma deformasyonları incelenmiş ve ezilme kuvvetiyle deformasyonu ilişkilendiren bir model önerilmiştir. Bu çalışmada incelenen kabuk yapı ve deforme olmuş geometri Şekil 5'de görülebilir. Buna göre deformasyonun ilerleyişi ile BCD toroit bölgesinin radyal olarak dışa doğru hareket ettiği belirlenmiş ve bu bölgeye içe doğru katlanma bölgesi denilmiştir.



Şekil 5. (a) Deforme olmamış ve (b) deforme olmuş yarı küresel yapılar (Updike 1972).

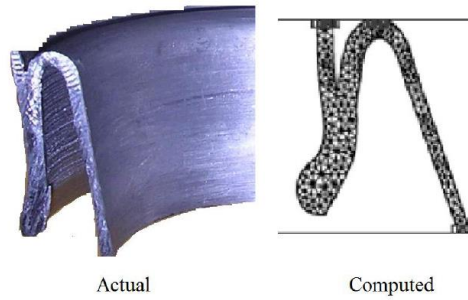
De Oliveira ve Wierzbicki (Deoliveira ve Wierzbicki 1982) konik ve küresel kabuk yapıların noktasal ve konsantre yük etkisindeki deformasyonları için kapalı formda çözümler ortaya koymuşlardır. Gupta ve diğerleri (Gupta vd. 2008) ince cidarlı küresel kabuk yapıların aksenal yükleme altındaki burkulma davranışlarını incelemiştir. İnce cidarlı küresel kabuk yapıların deformasyon tarihçesini, kuvvet-deformasyon eğrisinde azalan eğimlerle gözlemlenen üç moda ayırmışlardır. Çalışmalarında bu deformasyon modları; yerel düzlenme (local flattening), aksenal içe doğru katlanma (axisymmetric inward dimpling) ve asimetrik lob oluşumu (asymmetric lobe formation) olarak tanımlanmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. (a) Küresel kabuk yapının deformasyon şekli ve (b) bu şekilleri kuvvet-deformasyon eğrisindeki ifadeleri (Gupta vd. 2008).

Metal küresel kabuk yapıların kuasi-statik ve dinamik ezilme davranışları Gupta ve Venkatesh (Gupta ve Venkatesh 2004), Gupta ve Gupta (Gupta ve Gupta 2006) ve Gupta ve diğerleri (Gupta vd. 2007) tarafından farklı yükleme hızlarında incelenmiştir. Ruan ve diğerleri (Ruan vd. 2006), Dong ve diğerleri (Dong vd. 2008), ve Bao ve Yu (Bao ve Yu 2013) pingpong toplarının ve bunlardan oluşturulan tek ve iki boyutlu dizilimlerin çökme davranışlarını deneysel ve nümerik yöntemlerle incelemişlerdir.

Her ne kadar önceki paragraflarda küçük bir kısmı ayrıntılı şekilde özetlenen tüpler, küreler ve yarı kürelerle ilgili çok sayıda çalışma olsa da, literatürde bu geometrik yapıları bileşen olarak yapısında bulunduran kombine geometrilerin deneysel ve nümerik olarak statik ve dinamik ezilme davranışlarının incelendiği çalışmaların sayısı oldukça azdır. Ghamarian ve Abadi (Ghamarian ve Abadi 2011), Ghamarian ve diğerleri (Ghamarian vd. 2011) ve Ghamarian ve Zarei (Ghamarian ve Zarei 2012) boş ve polimerik köpük doldurulmuş kapaklı düz ve konik tüplerin enerji emme karakteristiklerini incelemişler ve emilen enerji miktarının artan çarpma hızı ile arttığını göstermişlerdir. Gupta (Gupta 2011) çalışmasında tüp ve konik geometrinin birleşiminden oluşan kombine geometride yapının statik deformasyon davranışını deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Gözlemlenen çökme davranışı bir konsertina katının oluşumu sonrasında bir plastik bölgenin meydana gelmesidir (Şekil 7).



Şekil 7. Tüp – koni kombine geometrinin deneysel ve nümerik ezilme görüntüleri.

Ghamarian ve diğerleri (Ghamarian vd. 2013) çalışmalarında sıg küresel yapıları konik tüplerle kombine olarak kullanmışlardır. Bu çalışmalarında, aşağıda Denklem 2'de tanımlanan *CFE* (ezilme kuvveti etkinliği) parametresinin ve emilen enerjinin artan küresel yapı yarıçapı ile birlikte arttığını belirtmişlerdir.

$$CFE = \frac{P_m}{P_{max}}$$

Denklem (2)

Bu denklemde  $P_m$  ortalama kuvveti ve  $P_{max}$  yapının aktardığı maksimum kuvveti gösterir. Bu  $CFE$  değeri ne kadar büyükse ezilen yapının bağlı olduğu yapıya aktardığı kuvvet emdiği enerjiye göre o kadar düşük olacaktır.

Shojaeefard ve diğerleri (Shojaeefard vd. 2014) uygun bir adaptör kullanarak, geometrik olarak birbirlerine uymayan silindirik ve kare kesitli tüpleri birbirine ekleyerek kombine bir geometri elde etmişlerdir. Oluşturdukları bu kombine geometri aynı boydaki silindirik ve kare kesitli tüplerden bir miktar daha fazla enerji emmiştir.

## 1.2 Amaç ve Kapsam

Bu çalışmanın ana amacı yeni, yerli, özgün ve ülkemiz imkanları ile üretilebilecek patlamaya karşı dayanıklı yapıların tasarımı, üretimi ve optimizasyonudur. Yarı küresel ve silindirik geometrilerin bileşimi ile oluşturulan çekirdek malzemelerinin ve bunların tekrarlı olarak dizilimi ile elde edilen sandviçlerin statik ve dinamik ezilme davranışları ve bu sandviç yapıların patlama etkisi altındaki davranışları çalışma kapsamında incelenmiştir.

Geliştirilen yarı küresel çekirdek malzemelerinin emsalleriyle kıyaslandığında en önemli avantajları; kuvvet iletim hızı gecikmesi, korunan yapıya iletilen kuvvetin azaltılması, düşük ağırlıkları ve yüksek enerji emme kabiliyetidir. Bu malzemeler ülkemiz üretim imkânları kullanılarak kolaylıkla üretilebildiğinden hem dışa bağımlılığı azaltmakta hem de maliyet konusunda önemli avantaj sağlamaktadır. Savunma sanayi alanında son yıllarda hızla artan milli projeler (savaş gemisi ve tank) kapsamına paralel olarak milli zırh sistemlerinin de geliştirilmesi kaçınılmazdır. Zırh alanında yürütülen çalışmalar milli bilgi statüsünde olduğu için ülkemizde bu alandaki çalışmaların sürdürülmesi son derece önem arz etmektedir.

Bu çalışmada patlamaya dayanıklı sandviç yapıların üretimi için ilk aşama olarak çekirdek malzemeleri geliştirilmiştir. Geliştirilen çekirdek malzemeleri yarı küre ve silindirik kısımların kombinasyonundan oluşan dört farklı tipte ince cidarlı yarı küresel çekirdek geometrileridir. Bu yapıların kavramsal tasarımlarının tamamlanması ile birlikte, üretim aşamasına geçilmiştir. Türkiye’de oldukça yaygın kullanılan derin çekme yöntemi kullanılarak yarı küresel çekirdek geometriler elde edilmiştir.

Proje kapsamında geliştirilen çekirdek malzemeleri; kuasi-statik çekme-basma test cihazı, düşen kütle test cihazı, Split Hopkinson Basınç Barı ve Doğrudan Basınç Dalgası cihazları kullanılarak sırasıyla düşük, orta ve yüksek deformasyon hızlarında test

edilmişlerdir. Bu testler sonucunda, çekirdek malzemelerinin enerji emme karakteristiklerinin deformasyon hızına bağlı olarak değişimi tespit edilmiştir. Bu deneylerin sonucunda elde edilen bilgiler kullanılarak sandviç yapıların patlama etkisi altındaki davranışının incelendiği nümerik modellerde kullanılacak malzeme modellerinin sabitleri doğrulanmıştır. Sandviç yapıyı oluşturacak olan yüzey (face) malzemeleri için de yukarıda bahsi geçen işlem sırasıyla izlenmiş ve mekanik karakterizasyon gerçekleştirilmiştir.

Çekirdek malzemelerinin üretiminde kullanılan derin çekme yöntemi bir plastik şekillendirme yöntemi olduğundan üretilen yapı, farklı plastik deformasyon seviyelerine maruz kalmış ve kalınlık varyasyonu bulunan bölgelerden meydana gelmektedir. Bu sebeple nümerik modelleme çalışmalarına derin çekme yönteminin modellenmesi ile başlanmış ve nümerik simülasyon numuneleri sanal ortamda üretilmiştir. Çalışma bu açıdan da ayrıca özgünlük arz etmektedir.

Malzeme modeli sabitlerinin belirlenmesi ve deneylerle doğrulanması optimizasyon çalışmaları açısından oldukça önemlidir. Bu sebeple çekirdek geometrileri üzerinde statik ve düşük hızlarda ezilme testleri gerçekleştirilmiş ve bu testler modellenerek hem kuvvet-deformasyon eğrileri hem de deformasyon profilleri incelenmiştir. Bu çalışma sayesinde dört tipteki numunelerin sonuçları ile geometrik ve boyutsal farkların yapının ezilme davranışlarına etkisi incelenmiş ve malzeme modeli sabitlerinin doğruluğu kanıtlanmıştır. Ayrıca nümerik simülasyonlar kullanılarak şekil değiştirme hızı ve atalet etkisi hassasiyetinin yapıların deformasyonu üzerindeki etkisi incelenebilmiştir.

Çalışmanın devamında sandviç yapıların statik, orta ve yüksek deformasyon hızlarında ezilme davranışları incelenmiş, nümerik sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca nümerik simülasyonlar kullanılarak şekil değiştirme hızının ve atalet etkisinin sandviç yapıların deformasyonu üzerindeki etkisi de incelenebilmiştir.

Çalışmanın son kısmında, yarı küresel çekirdek geometri içeren sandviç yapılar çeşitli konfigürasyon ve katman sayıları ile oluşturulup belirli patlama yüklerine nümerik olarak maruz bırakılmıştır. Alternatif sandviç konfigürasyonlarının aynı patlama tehditleri altında ezilme ve enerji emme karakteristikleri nümerik olarak incelenmiş ve optimum dizilim ve katman sayıları belirlenmiştir.



## 2. SANDVIÇ YAPILARIN TASARIMI VE ÜRETİMİ

Sandviç yapılar iki ince fakat direngen (çoğunlukla çekirdeğe göre daha yüksek yoğunluklu) yüzey malzemesinin arasına düşük yoğunluklu çekirdek malzemelerinin konulması ile elde edilen yapılardır. Çekirdek malzemeleri çoğunlukla düşük mukavemetli malzemelerden seçilmekle birlikte düşük yoğunlukları dolayısıyla hafif ve görece kalın olduklarından eğilme direngenlikleri eşdeğer monolitik yapılara göre oldukça fazladır. Ayrıca bu çalışmada önerilen çekirdek geometrisi gibi sistemler oldukça yüksek enerji emme kabiliyetine sahiptirler. Dolayısıyla sandviç yapılar tasarlanırken bu iki malzemenin seçimi ve tasarımı oldukça önem arz etmektedir. Bu sebeple izleyen kısımlarda bu yapıların bireysel olarak tasarlanması ve imalatı ile ilgili ayrıntılar verildikten sonra bunların birleşerek oluşturduğu sandviç yapıların tasarım ve üretim ayrıntılarına yer verilecektir.

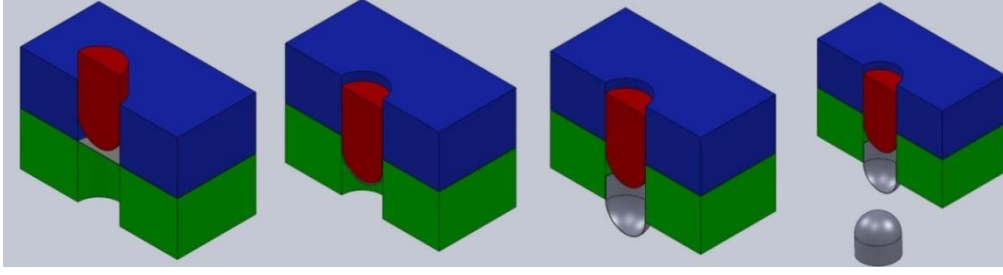
### 2.1 Çekirdek ve Yüzey Malzemelerinin Tasarımı ve Üretimi

Bu çalışma kapsamında önerilen sandviç yapıda kullanılan çekirdek malzemeleri yarı küresel bir geometrinin silindirik bir geometri ile kombine edilmesinden oluşturulmuş bileşik bir geometridir. Geometrilerin üretileceği malzeme olarak AISI 304L paslanmaz çeliği yüksek mukavemet ve yüksek plastik şekillendirilebilme kabiliyeti dolayısıyla seçilmiştir. Bu malzemeye ait kimyasal kompozisyon Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. AISI 304L paslanmaz çeliği kimyasal kompozisyonu.

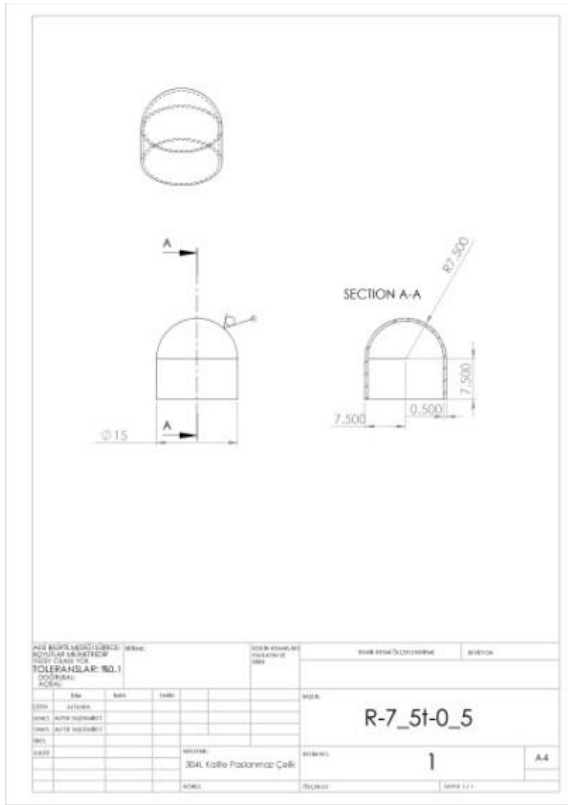
C (%ağırlık)	Cr (%ağırlık)	Ni (%ağırlık)	Mn (%ağırlık)
0.03	17.5-19.5	8.0-10.0	2.0

Bu tarz bir geometriyi, dikişsiz-kaynaksız bir şekilde üretmenin zorunlu olduğu açıktır. Aksi taktirde geometrinin birleşim noktalarında gerilme yığılması oluşacağından darbeli yüklemeler altında çok düşük deformasyon ve kuvvet seviyelerinde kopma-kırılma görüleceği aşikardır. Bu amaçla ülkemizde yaygın bir şekilde kullanılan derin çekme yöntemi yarı küresel geometrilerin üretiminde uygulanmıştır. Derin çekme bir sac şekillendirme yöntemidir. Buna göre sac formundaki iş parçası bir çekme kalıbının içerisinde yarı ürünün veya ürünün istenilen iç geometrisindeki bir zimba tarafından radyal olarak çekilerek şekillendirilir. Bu esnada iş parçası, iş parçası tutucusu tarafından aksenal bir kuvvet ile bastırılarak istenmeyen kırışmalar engellenir. Şekil 8’de işlem adımları görülebilir.

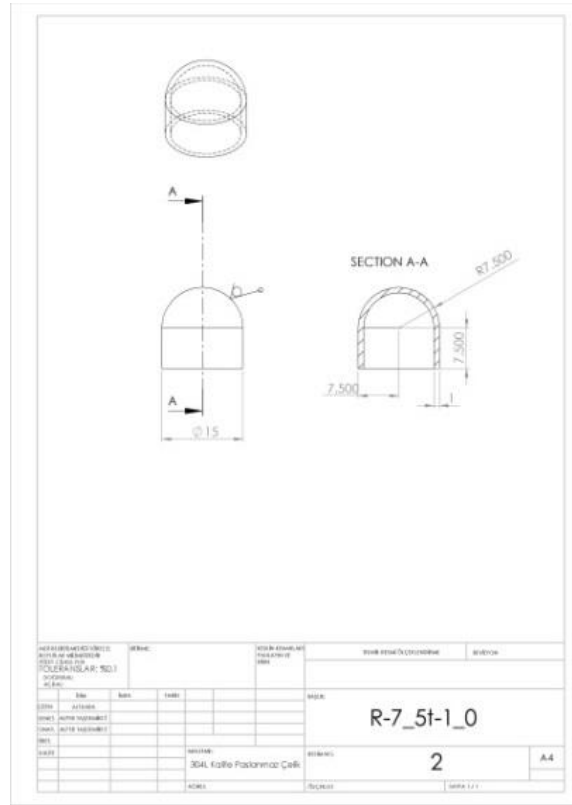


Şekil 8. Derin çekme yöntemi (yeşil : kalıp, mavi : iş parçası tutucusu, kırmızı : zımba, gri : iş parçası).

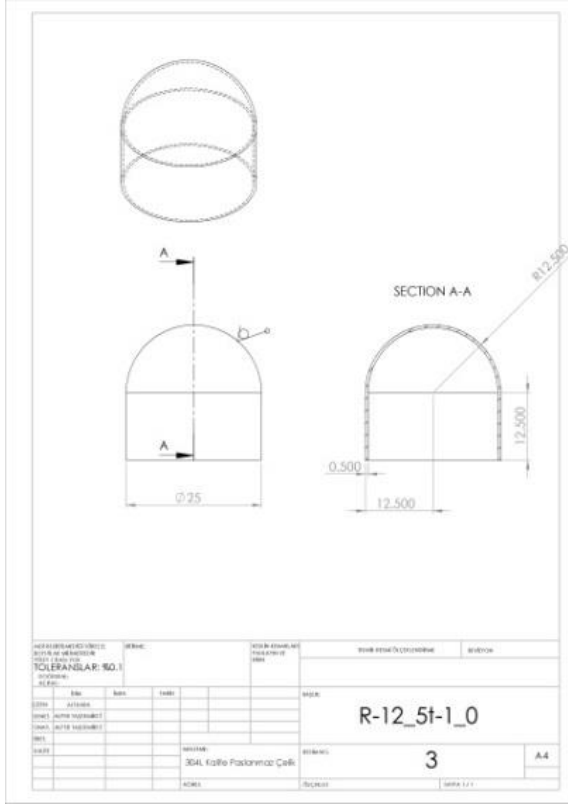
Şekil 9'da tasarlanan yarı küresel çekirdek malzemelerinin son boya getirme öncesi imalat resimleri verilmiştir.



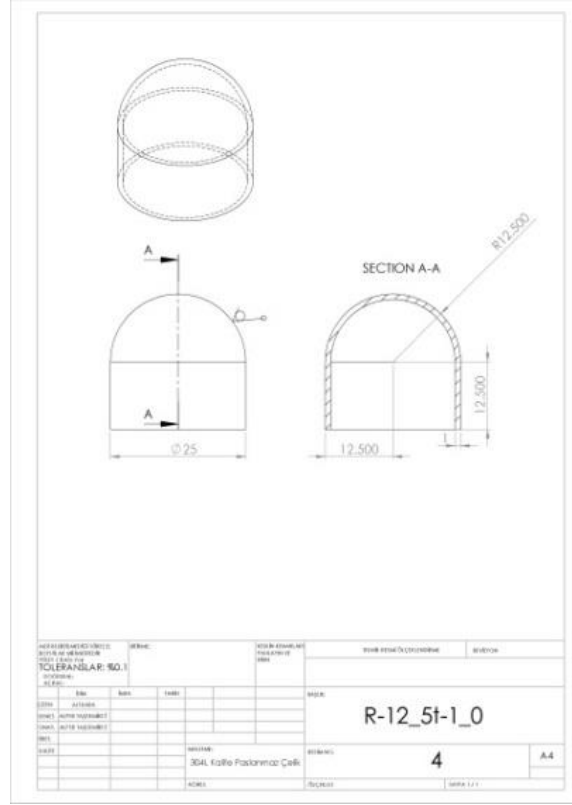
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 9. Yarı küresel çekirdek geometrilerinin imalat resimleri; (a)  $r = 7,5$  ve  $t = 0,5$  , (b)  $r = 7,5$  ve  $t = 1,0$  , (c)  $r = 12,5$  ve  $t = 0,5$  , (d)  $r = 12,5$  ve  $t = 1,0$ .

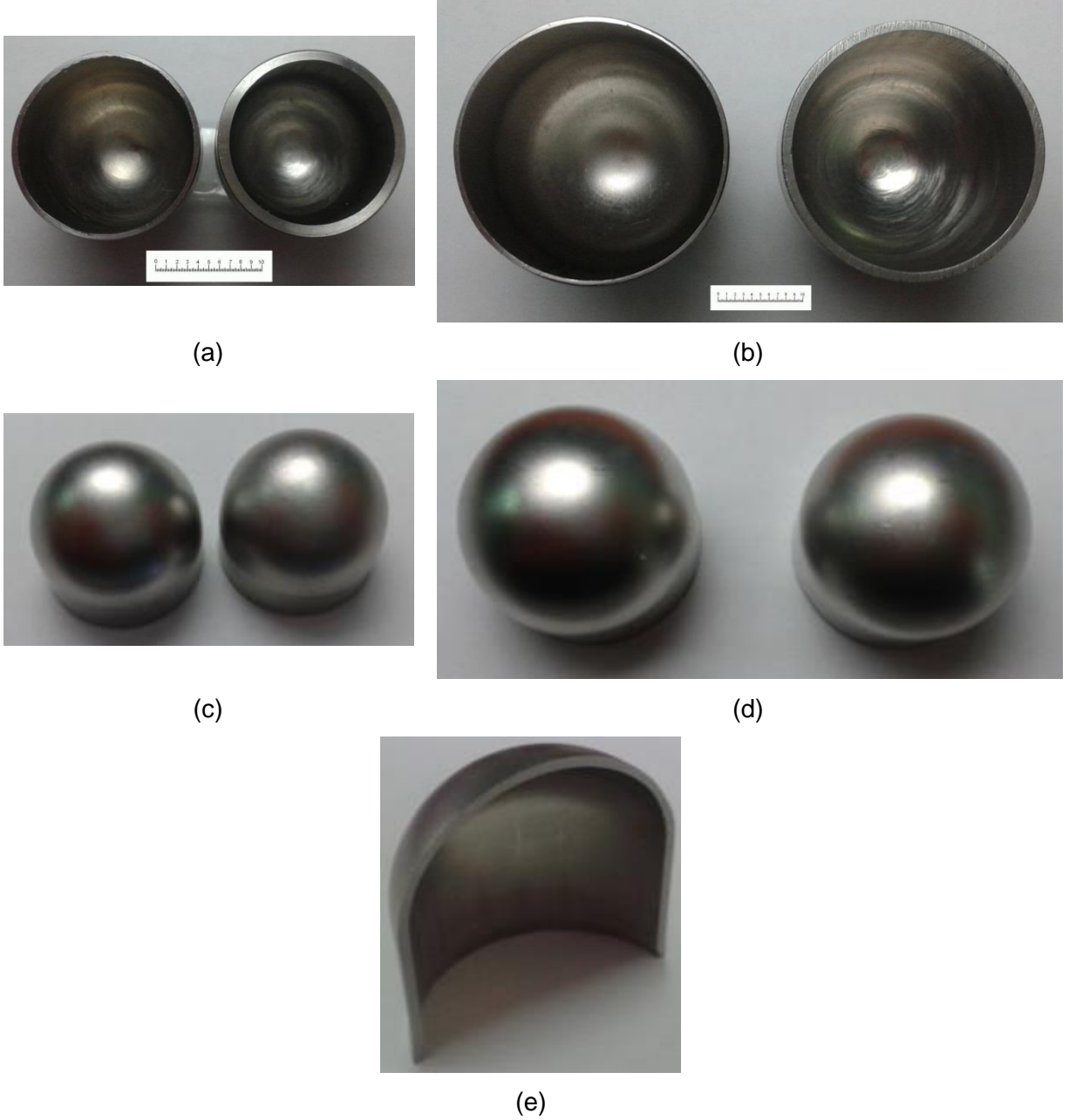
Şekil 9'da derin çekme imalat resimleri verilen yarı küresel çekirdek geometrilerinde, derin çekme işleminin doğası gereği baskı plakalarının temas noktalarında kulaklar oluşmaktadır. Bu kulaklar CNC torna tezgahı kullanılarak yapıdan ayrılmış ve Tablo 2'de verilen son boyutlar elde edilmiştir. Ayrıca bu tabloda, çalışmada kullanılacak numune kodları da görülebilir.

Tablo 2. Yarı küresel çekirdek geometrilerinin son boyutları.

Numune Kodu	Dış yarıçap (mm)	İş parçası kalınlığı (mm)	Toplam boy (mm)
R75T05	7.5	0.5	13
R75T1	7.5	1.0	13
R125T05	12.5	0.5	23
R125T1	12.5	1.0	23

Derin çekme yöntemi ile üretilen dört farklı geometri ile, yarı küresel ve silindirik geometrilerin kombinasyonundan oluşan yapıların statik ve dinamik ezilme karakteristikleri

üzerine geometrinin ve kalınlığın etkisi incelenmiştir. İlerleyen bölümlerde bu konu ile ilgili ayrıntılar verilmiştir.

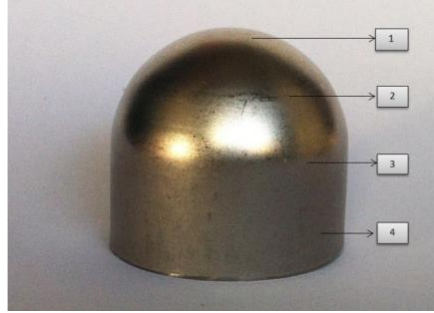


Şekil 10. Yarı küresel çekirdek geometrileri; (a) R75T05 ve R75T1 geometrilerin alt görünüşleri , (b) R125T05 ve R125T1 geometrilerin alt görünüşleri, (c) R75T05 ve R75T1 geometrilerin üst görünüşleri, (d) R125T05 ve R125T1 geometrilerin üst görünüşleri, (e) R125T1 geometrisinin kesit görüntüsü.

Üretimi gerçekleştirilmiş yarı küresel çekirdek yapılar ait görüntüler Şekil 10'da verilmiştir. Derin çekme yönteminin bir plastik şekil verme yöntemi olduğu gözönünde

bulundurulduğunda üretimi gerçekleştirilen yarı küresel geometrideki bu çekirdek malzemelerinin de plastik olarak deforme olmuş yapılar olduğu açıktır. Bu sebeple yapılarda kalıcı gerilme alanları ve farklı deformasyon miktarları sebebiyle oluşan farklı kalınlıkta bölgeler olduğu açıktır. R125T1 numunesi orta kesidi görülecek şekilde ikiye bölünmüştür (Şekil 10 (e)).

Derin çekme yönteminden kaynaklı kalıcı gerilme ve kalıcı şekil değiştirme miktarlarının belirlenebilmesi amacıyla bu yapılarda kalıcı gerilme ve son geometri ölçümleri yapılmış ve bu değerler doğrulama çalışmaları kapsamında kullanılmıştır, doğrulama çalışmalarının sonuçları ilerleyen bölümlerde verilmiştir. Gerçekleştirilen kalıcı gerilme ölçümleri numunenin tepe noktasından başlayarak silindirik kısmın eteğine kadar belirlenen eşit aralıklı noktalardan alınmıştır (Şekil 11). Tesbit edilen kalıcı gerilme miktarları Tablo 3'de verilmiştir.



Şekil 11. Yarı küresel yapı üzerinde artık gerilme ölçülen noktalar.

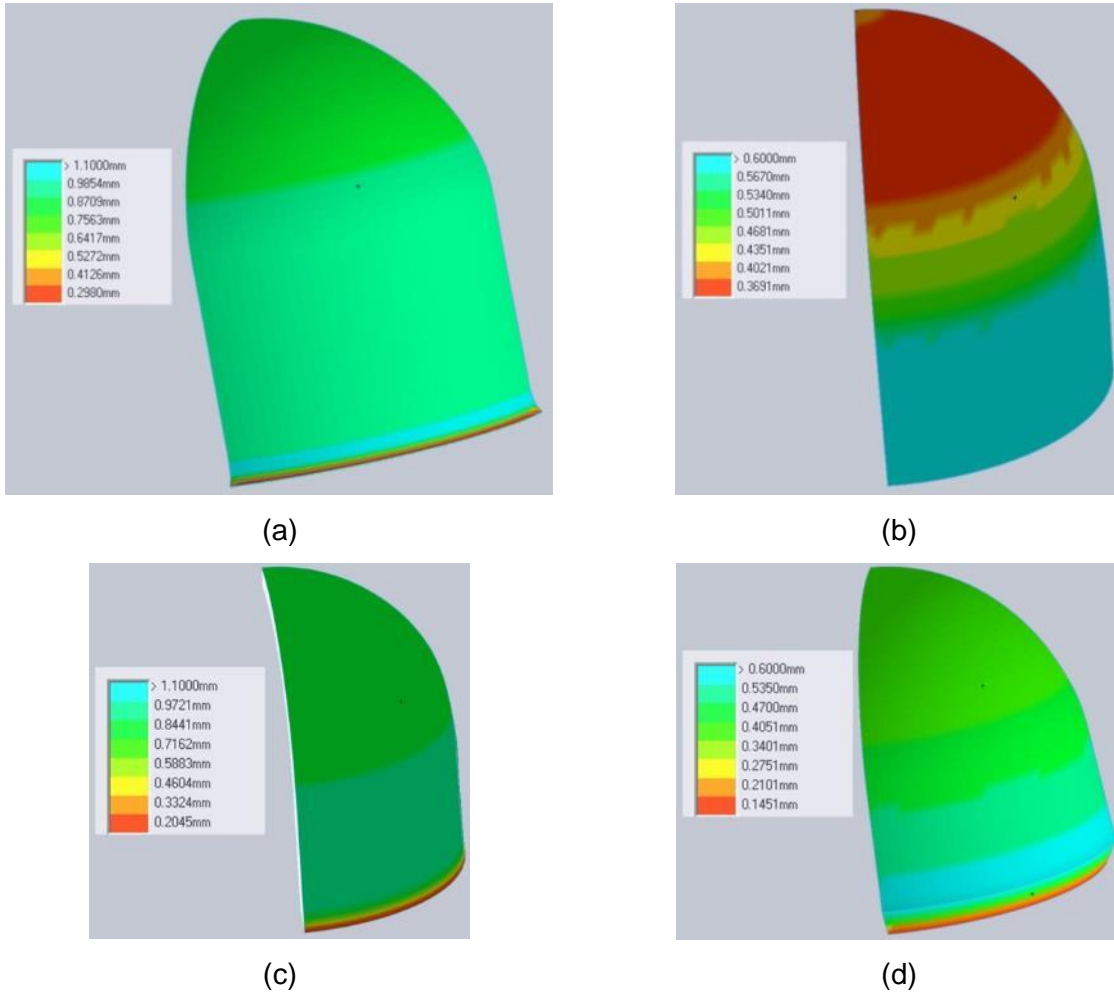
Tablo 3. Numunelerde tesbit edilen kalıcı gerilme miktarları.

Numune	Gerilme1 (MPa)	Gerilme2 (MPa)	Gerilme3 (MPa)	Gerilme4 (MPa)
R125T1	-178,3	-78,8	-10,3	33,1
R125T05	-145,2	274,6	81,5	59
R75T1	-444,4	-95,8	-311,3	-527,6
R75T05	-49,1	-	90,9	140,7

Tablo 3'de verilen değerler incelendiğinde, numunelerin tümünün tepe noktalarında kalıcı basma gerilmesinin varlığı görülmüş ve en yüksek değer R75T1 numunesi için ölçülmüştür. Yine bu numune hariç olmak üzere, diğer numunelerde basmadan çekmeye doğru artan gerilme miktarı ölçülmüştür. Bu durum yarı küresel kısımda basma gerilmesi ve silindirik kısımda çekme gerilmesinin varlığını göstermektedir. İleride sunulacak ezilme testleri sırasında özellikle yarı küresel kısımların ezilmesinde görülen bilineerleşme

durumunu oluşturan kaynaklardan birisi kesit boyunca meydana gelen kalıcı gerilme varyasyonudur.

Üretimi tamamlanan yarı küresel çekirdek geometrilerinde, üretim yönteminden kaynaklı farklı şekil değiştirme bölgelerinin varlığı aşikar olduğundan yapıların tamamı üzerinde geometrik ölçümler gerçekleştirilmiş ve kalınlık değişimleri tesbit edilmiştir. Elde edilen nokta bulutları bir bilgisayar destekli tasarım (CAD) programı kullanılarak üç boyutlu olarak modellenmiştir. Şekil 12'de numune geometrilerindeki kalınlık ölçüm sonuçları kontur şeklinde verilmiştir.

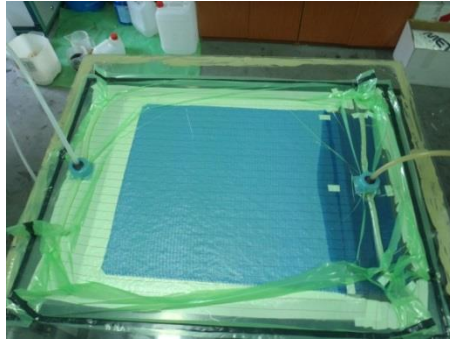


Şekil 12. Geometrik ölçümler sonucu elde edilen kalınlık değişim konturları (deneysel), (a) R125T1, (b) R125T05, (c) R75T1, (d) R75T05 numuneleri.

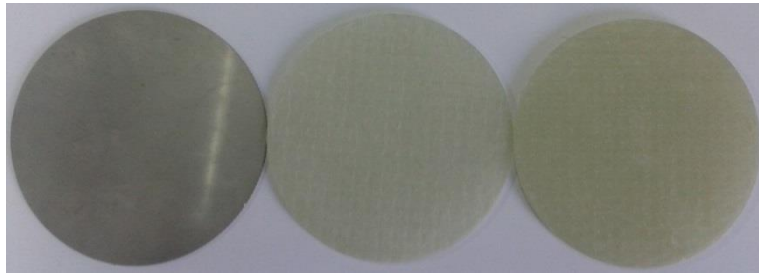
Şekil 12 (a)'da kalınlık konturu verilen R125T1 numunesi incelendiğinde yarı küresel kısımda iki ana kalınlık değişim bölgesi gözlemlenmektedir. Silindirik kısmın en alt bölgesinde ise yine kalınlaşma gözlenmiştir. R125T05 numunesi incelendiğinde ise daha fazla sayıda farklı kalınlıkta bölge oluştuğu görülmüştür. Özellikle silindirik kısımda eteklere

doğru kalınlık artışı fark edilmektedir. R75T1 numunesi yarı küresel kısımda 0,9 - 0,7 mm aralığında bir geçiş göstermekte, silindirik kısımda kalınlık artmaktadır. R75T05 numunesinde yarı küresel bölgede kalınlık değişimi 0,5-0,4 mm aralığında kalmış, silindirik bölgede ise üç bölgele bir yapı oluşmuştur. Numunelerin en altında görülen en düşük kalınlıklı kısımlar numune hazırlama (kesme ve parlatma) işlemleri sırasında oluşmuş geometrik farklar olup ezilme davranışlarını etkilememektedir.

Çekirdek malzeme üretiminin tamamlanmasından sonra sandviç yapıyı oluşturacak olan yüzey malzemelerinin hazırlanmasına geçilmiştir. Bu amaçla kompozit ve paslanmaz çelik malzemelerin kullanılması planlanmıştır. Kompozit yüzey malzemesi 0°/90° oryantasyona sahip E-Camı (0,6 kg/m<sup>2</sup>) / Polyester (Crystic PAX 702) malzemelerden VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer molding) tekniği ile üretilmiştir (Şekil 13 (a)). Bu amaçla 2 ve 3 mm gibi iki farklı kalınlıkta kompozit plaka üretilmiştir. Daha sonra plakaların üst ve alt yüzeyleri son boyutlarına getirilecek şekilde taşlanmış ve 75 mm dış çapında kesilmiştir. Ayrıca AISI 304L paslanmaz çelik malzemedен 0,5 mm kalınlığında ve 75 mm çapında diskler kesilerek hazırlanmıştır. Şekil 13 (b)'de kompozit ve metalik yüzey malzemeleri görölmektedir.



(a)



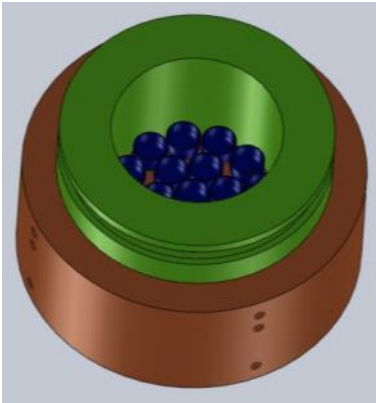
(b)

Şekil 13. (a) VARTM metodu ile kompozit üretimi, (b) sandviçlerin üretiminde kullanılacak yüzey malzemeleri sırasıyla; 0,5 mm 304L paslanmaz çelik, 2 mm kompozit ve 3 mm kompozit malzemeler.

## 2.2 Yarı Küresel Çekirdek Malzemesi İhtiva Eden Sandviç Yapıların Tasarımı ve Üretimi

Çekirdek ve yüzey malzemelerinin üretiminin tamamlanmasının ardından sandviç üretimi için çalışmalara başlanmıştır. Bu amaçla çeşitli birleştirme yöntemleri kullanılmaktadır; örneğin metal-metal sandviçlerde soğuk lehim, sıcak lehim, kaynak gibi yöntemlerle birleştirme yapılabileceği gibi, kimi zaman direkt döküm ile de sandviçler elde edilebilir (örneğin alüminyum köpük çekirdekli sandviç uygulamaları). Metal-metal birleştirmelerinde sıkça kullanılan yöntemlerin arasında yapıştırma yöntemi de gelmektedir. Bu yöntemlerin seçiminde en önemli nokta, yapıya uygulanan yük sebebiyle yüzey ve çekirdek malzemelerinin ayrılması sorunudur. Bu çalışmadaki yüzey malzemeleri basma kuvveti aktarıcı entegrasyon elemanı olarak kullanıldığından, yapıştırma yöntemi diğer yöntemlerden daha uygun bulunmuştur. Malzemele birbirlerine tutunarak yapısal entegrasyonu sağlarken, ilave herhangi bir ısı işlemi gerekmediğinden malzeme mekanik özellikleri doğrudan etkilenmemektedir.

Sandviç üretiminde en önemli hususlardan biri de çekirdek malzemelerinin iki yüzey plakası arasında standardize yerleşiminin sağlanması ve olası eğiklik/çarpılmaların engellenmesidir. Bu amaçla standardizasyonu sağlayacak ve operatör etkisini ortadan kaldıracak şekilde, iki farklı dış çaplı (15 ve 25 mm) yarı küresel geometrilerden oluşan sandviçlerin üretimi için tasarlanan iki farklı master ile kombine kullanılan iki farklı iç bileziğin tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Bu bilezikler ve iç masterlar Şekil 14'de gösterilmiştir. Bu sayede sandviç numuneler standart şekilde üretilmiştir.

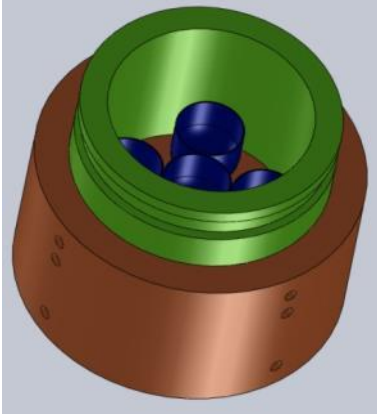


(a)



(b)





(c)



(d)

Şekil 14. Sandviç yapıların yapıştırma metodu ile üretiminde kullanılan yapıştırma mastarları ile bileziklerinin katı modelleri ve görüntüleri; (a) ve (b)  $r = 7,5$  mm yarıçaplı küre içeren sandviçler için mastar, (c) ve (d)  $r = 12,5$  yarıçaplı yarı küre içeren sandviçler için mastar.

Sandviç yapıların üretimi esnasında yapıştırma mastarları kullanılarak yüzey malzemeleri ve çekirdek malzemeleri standart bir şekilde yapıştırıcının kürlenme süresi boyunca sabit pozisyonda tutulmuştur. Yapıştırma yönteminde önemli husus yapıştırıcının kürlenme süresidir. Dolayısıyla bu çalışmada yüksek hızla yapışmanın sağlanabilmesi amacıyla siyanoakrilat esaslı yapıştırıcı kullanılmıştır. Bu hızlı yapıştırıcı oda sıcaklığında 5-10 saniyelik sertleşme süresinde tam tutunma sağlayabilmektedir.

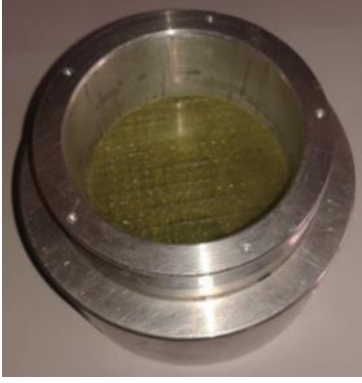
Sandviç malzeme üretimine ait çeşitli aşamalar Şekil 15'de verilmiştir. Bu işlem adımları incelenecek olursa; bilezik mastara monte edilir, çekirdek malzemeler mastardaki boşluklara yerleştirilir, daha sonra yüzey malzemeleri üzerine yapıştırıcı sürülür ve yayılır, çekirdek malzemelerinin üzerine aktivatör sürülür, yüzey malzemesi de bileziğin içine monte edilerek donmanın gerçekleşmesi beklenir. Sandviç yapıya ait diğer yüzey de tasarlanan bileziğin yardımıyla benzer adımlar izlenerek yapıştırılır ve sandviç yapı elde edilmiş olur.



(a)



(b)



(c)



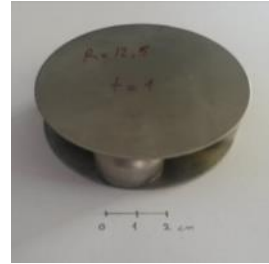
(d)

Şekil 15. Sandviç yapıların yapıştırma metodu ile üretim aşamaları; (a) yarı küresel çekirdeklerin bilezik monte edilmiş mastara yerleştirilmesi, (b) yapıştırıcı sürülmüş yüzey malzemesinin aktivatör sürülmüş yarı kürelerin üzerine merkezlenmesi ve (c) yüzey malzemesi monte edilmiş sistem, (d) elde edilen tek yüzeyli yapı.

Üretimi tamamlanan sandviç yapılar Şekil 16'da görülmektedir.



(a)



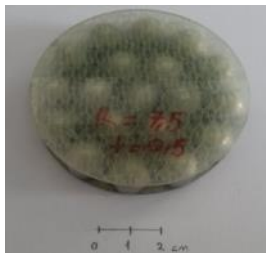
(b)



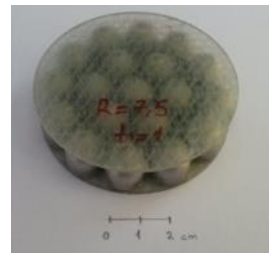
(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

Şekil 16. Sandviç yapılar; (a)  $r = 12,5$  ,  $t=0,5$  ,  $t_f = 0,5$  (304L) , (b)  $r = 12,5$  ,  $t=1$  ,  $t_f = 0,5$  (304L), (c)  $r = 12,5$  ,  $t=0,5$  ,  $t_f = 2,0$  (kompozit), (d)  $r = 12,5$  ,  $t=1$  ,  $t_f = 2,0$  (kompozit), (e)  $r = 7,5$  ,  $t=0,5$  ,  $t_f = 2,0$  (kompozit), (f)  $r = 7,5$  ,  $t=1$  ,  $t_f = 2,0$  (kompozit), (g) çeşitli sandviç yapılardan numuneler.

### 3. SANDVIÇ YAPILARI OLUŞTURAN MALZEMELERİN STATİK VE DİNAMİK MEKANİK KARAKTERİZASYONU

Üretilen sandviç yapı elemanlarının mekanik özelliklerinin tespiti, proje kapsamında yapılacak nümerik çalışmalar ve bu aşamada kullanılacak malzeme hasarı modelleri için temel teşkil etmektedir. Bu amaçla, sandviç yapıyı oluşturan malzeme gruplarının her biri için uygun testlerle mekanik özellikler belirlenmiş ve çalışmalara ait sonuçlar izleyen bölümde sunulmuştur.

#### 3.1 Çekirdek Malzemesi Karakterizasyonu

Sandviç yapı elemanlarının mekanik karakterizasyon çalışmalarına çekirdek malzemesi ile başlanmıştır. Bu amaçla AISI 304L paslanmaz çelik levhalardan quasi-statik çekme (ASTM: E8M–04) ve Split Hopkinson Basınç Barı çekme numuneleri hazırlanarak testler gerçekleştirilmiştir. Şekil 18’de test numuneleri görülmektedir. Proje konusu olan sandviç yapı gerçek çalışma şartlarında dinamik mekanik yüklere (mayın patlama yükleri) maruz kalacağından dinamik mekanik karakterizasyonun yapılması zorunludur. 304L paslanmaz çeliğinin yüksek şekil değiştirme hızı hassasiyeti gösterdiği literatürdeki diğer çalışmalardan da bilinmektedir (Lee ve Lin 2001). Bu amaçla kuasi-statik çekme testleri üç farklı ( $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$  ve  $10^{-1}$  s<sup>-1</sup>) ve Hopkinson basınç barı testleri iki farklı şekil değiştirme hızında (900 ve 1400 s<sup>-1</sup>) gerçekleştirilmiştir. Karakterizasyon sırasında kullanılan Split Hopkinson basınç barı Şekil 17’de görülmektedir.



Şekil 17. Split Hopkinson Basınç Barı.



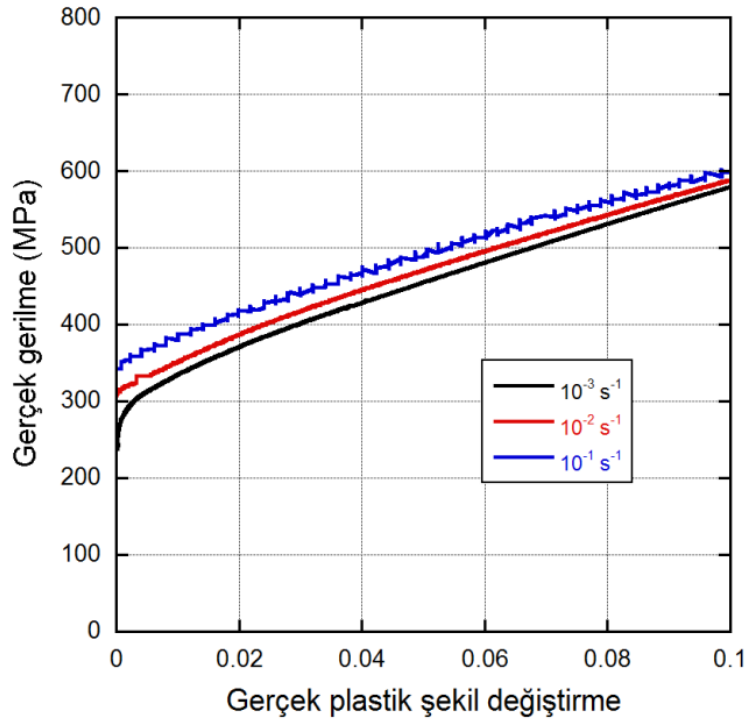
(a)



(b)

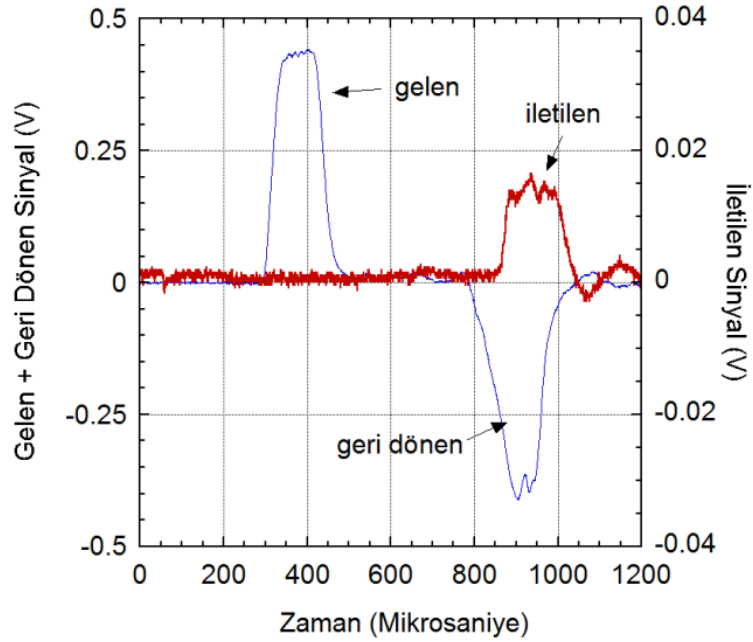
Şekil 18. Çekirdek malzemesinin mekanik karakterizasyonunda kullanılan test numuneleri; (a) Statik çekme numuneleri, (b) Dinamik çekme numuneleri.

Şekil 19'da  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-1}$  s<sup>-1</sup> şekil değiştirme hızlarında yapılmış statik çekme test sonuçlarından elde edilen gerçek plastik şekil değiştirme-gerçek plastik gerilme eğrileri görülmektedir.



Şekil 19. Statik çekme testleri sonucunda elde edilen gerçek gerilme-gerçek plastik şekil değiştirme eğrileri.

Şekil 20’de ise Split Hopkinson basınç barı voltaj-zaman eğrileri görülmektedir.



Şekil 20. Split Hopkinson basınç barı voltaj zaman eğrileri.

Şekil 20’den görüleceği üzere alan çubukta oluşan gerilme dalgası (gelen) test numunesine ulaştığında bir kısmı çubuk-numune arayüzünden geri yansırken (geri dönen) diğer kısmı numuneyi deforme edip iletilen çubuğa geçerek kaydedilir (iletilen). Split Hopkinson basınç barında bulunan şekil değişim ölçerlerden okunan test sonuçları Denklem 3 kullanılarak önce şekil değiştirmeye çevrilir; elde edilen bu değerler Denklem 4 ve 5 kullanılarak test edilen numunenin gerilme-şekil değiştirme eğrisi elde edilir. Dinamik çekme testlerinde kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir:

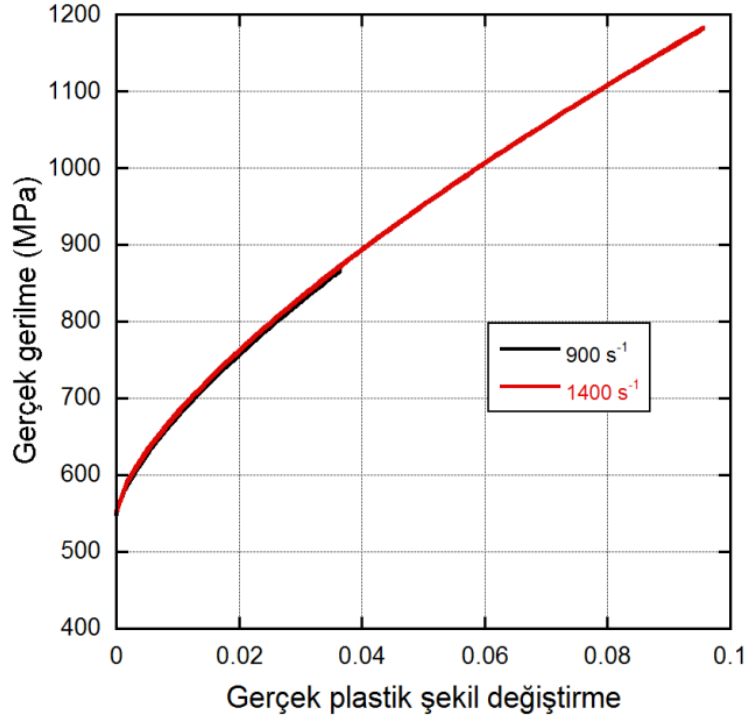
$$\varepsilon(t) = \frac{4 \times \text{Voltaj}(t)}{V_{exc} \times GF \times K_{gain}} \quad \text{Denklem (3)}$$

$$\varepsilon_s(t) = -2 \frac{C_b}{L_s} \int_0^t \varepsilon_r dt \quad \text{Denklem (4)}$$

$$\sigma_s(t) = E_b \frac{A_b}{A_s} \varepsilon_t \quad \text{Denklem (5)}$$

Burada  $V_{exc}$  uyarı sinyal voltajını,  $GF$  gerinim ölçer katsayısını,  $K_{gain}$  sinyal yükseltici katsayısını,  $\varepsilon_s$  numunedeki gerinimi,  $C_b$  bar malzemesindeki gerilme dalgası ilerleme hızını,  $L_s$  numunenin ilk boyunu,  $\varepsilon_r$  geri dönen dalganın gerinim tarihçesini,  $\sigma_s$  numunedeki gerilmeyi,  $E_b$  çubuk malzemesinin elastiklik modülünü,  $\varepsilon_t$  iletilen dalganın gerinim tarihçesini,  $A_b$  ve  $A_s$  sırasıyla çubuk malzemesinin ve numunenin kesit alanını temsil eder.

Yapılan dinamik çekme testleri sonucunda çekirdek malzemesine ait gerçek gerilme-gerçek plastik şekil değiştirme eğrileri elde edilmiş ve sonuçlar Şekil 21’de gösterilmiştir.

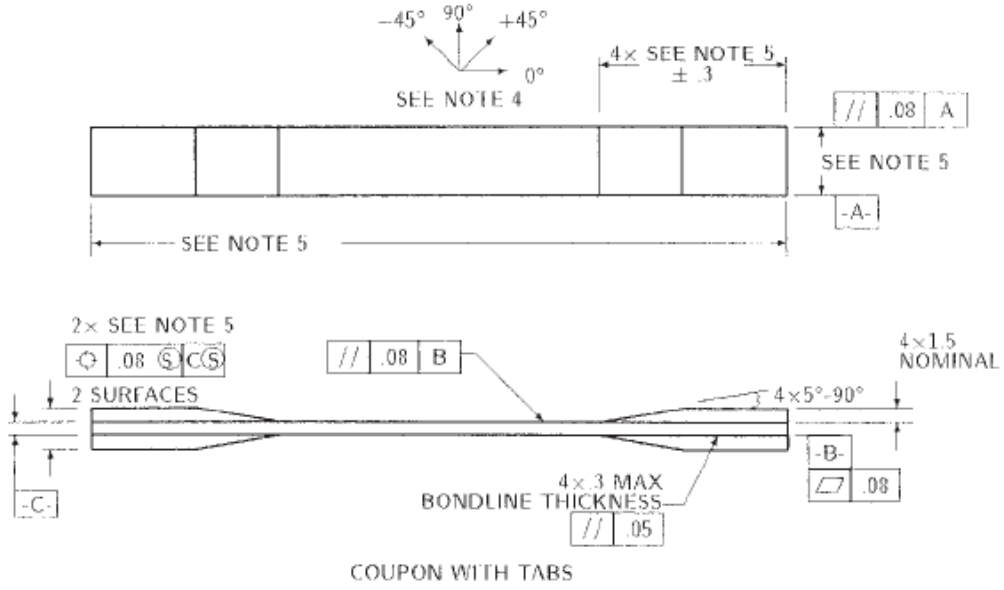


Şekil 21. Yüksek hız çekme testleri sonucunda elde edilen gerçek gerilme-gerçek plastik şekil değiştirme eğrileri.

### 3.2 Kompozit Yüzey Malzemesi Mekanik Karakterizasyonu

Kompozit malzemeler yapıları gereği kuvvetin uygulandığı yöne bağlı olarak (anizotrop) davranış gösterdikleri için X,Y ve Z yönlerinde karakterize edilmek zorundadır. Nümerik çalışmalarda kullanılacak olan MAT162 malzeme modelinin bu davranışı oldukça başarılı olarak temsil ettiği bilindiğinden, kompozit yüzey malzemesinin karakterizasyonunda bu malzeme modelinin parametrelerinin bulunması amaçlanmıştır. MAT162 malzeme modelinin sabitlerini belirlemek amacıyla statik ve dinamik çekme, basma, Poisson oranı belirleme, kayma ve yanal baskılı basma testleri gerçekleştirilmiş olup; test koşulları, ilgili standartlar, numune geometrileri ve test sonuçları aşağıda detaylı şekilde anlatılmaktadır.

Bu kapsamda ilk olarak çekme testleri ASTM D3039’da belirtilen şekilde 2 mm/dak hızda gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin yanı sıra, malzemelerin şekil değiştirme hızı etkilerini belirlemek amacıyla 3 farklı statik ( $10^{-4}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-1}$  s<sup>-1</sup>) hızlarında da çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Testler malzemenin X ve Y yönlerinde gerçekleştirilmiştir. Statik çekme testlerinde kullanılan numuneler Şekil 22’de ve boyutları ise Tablo 4’de verilmiştir.



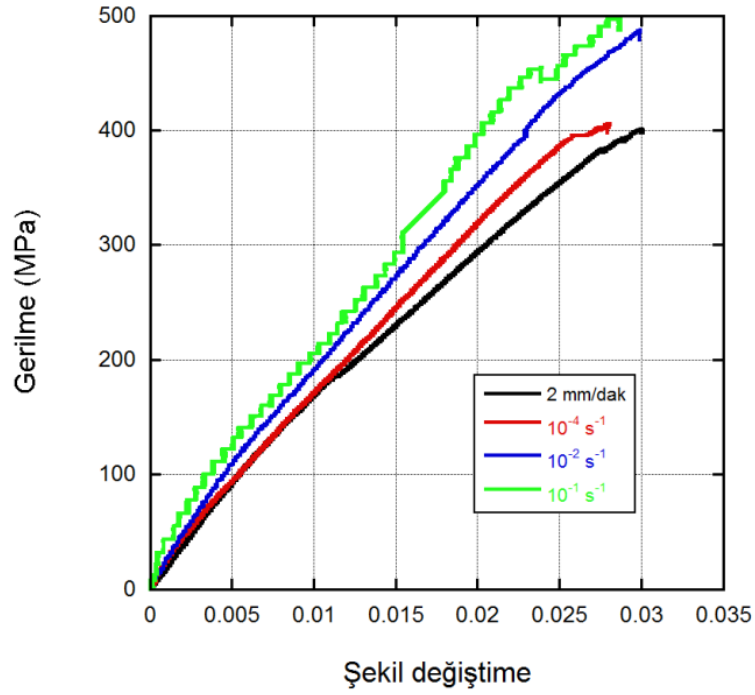
Şekil 22. Yüzey malzemesi karakterizasyonunda kullanılan statik çekme testi numuneleri.

Tablo 4. Statik çekme testi numune boyutları.

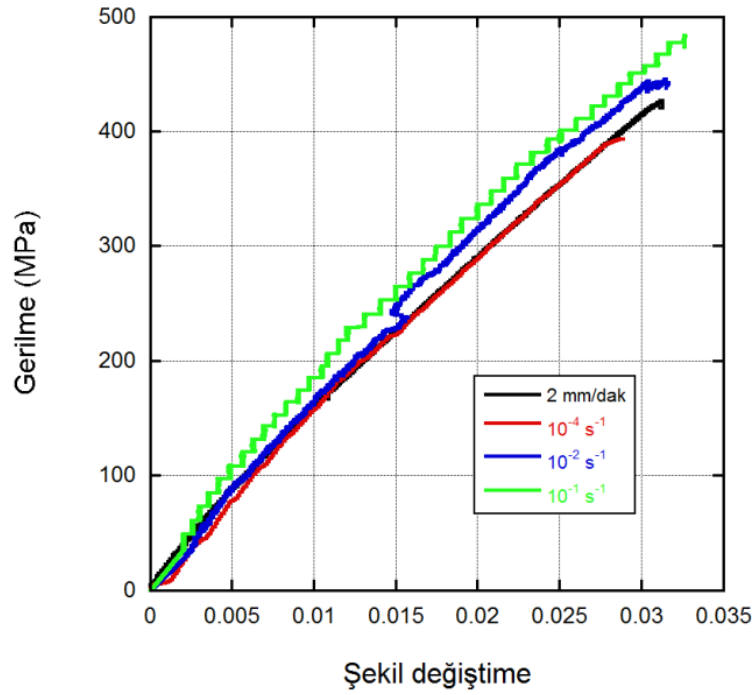
Genişlik (mm)	Toplam Uzunluk (mm)	Kalınlık (mm)	Tab uzunluğu (mm)	Tab kalınlığı (mm)
25	250	2.5	25	2.5

Statik çekme testlerinde numunede meydana gelen deplasman video ekstansiyometre ile ölçülmüştür. X ve Y yönlerinde yapılan statik çekme testlerine ait sonuçlar Şekil 23'de verilmiştir.





(a)



(b)

Şekil 23. Statik çekme testleri sonuçları, (a) X yönü, (b) Y yönü.

Poisson oranlarını belirlemek amacıyla; 2 mm/dak ilerleme hızlarında yapılan testler sırasında numune üzerine boyuna ve enine yönlerde iki adet gerinim ölçer (strain gage)

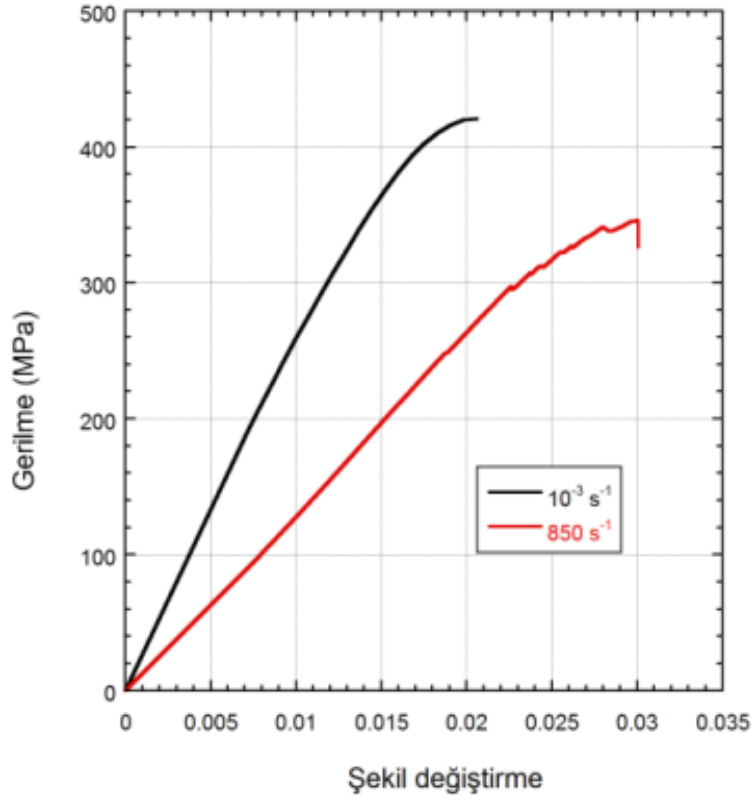
yapıştırılarak bu yönlerdeki şekil değişimleri ölçülmüştür. Bu ölçümler Denklem 6 kullanılarak şekil değişimine dönüştürülmüştür:

$$\varepsilon = \frac{4V}{GF Ex Ga} \quad \text{Denklem (6)}$$

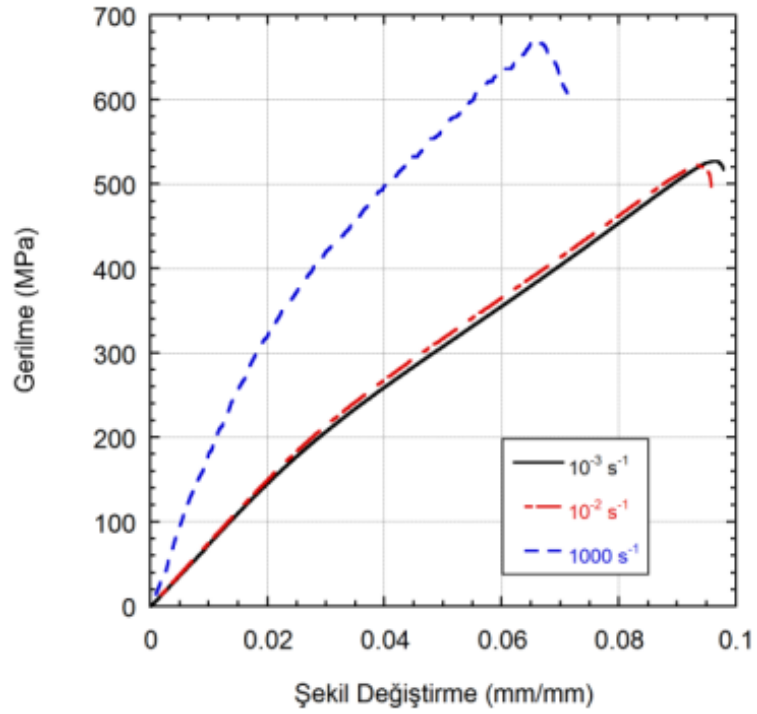
Burada  $\varepsilon$  şekil değiştirme,  $V$  ölçülen voltaj değeri,  $GF$  gerinim ölçer katsayısı,  $Ex$  uygulanan voltaj ve  $Ga$  sistemin kazanç değeridir. Denklem 6 kullanılarak bulunan gerinim değerleri aşağıda verilen Denklem 7'de yerine konularak 12 yönündeki Poisson oranı 0,13 olarak bulunmuştur.

$$PR_{12} = -\varepsilon_{enine}/\varepsilon_{boyuna} \quad \text{Denklem (7)}$$

Şekil değiştirme hassasiyetini belirlemek amacıyla fiber katmanı (X ve Y yönleri) numunelerine statik ( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) ve dinamik ( $850 \text{ s}^{-1}$ ) hızlarda basma testleri uygulanmıştır. Fiber katmanı yönlerine dik (Z yönü) numunesi de yine statik ( $10^{-3}$ ,  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) ve ( $1000 \text{ s}^{-1}$ ) dinamik hızlarda test edilmiştir. Tüm numuneler L/D oranı  $\sim 1$  (numune boyu/ numune çapı) olan silindirik şekilde hazırlanmıştır. Sonuçlar Şekil 24 ve 25'de verilmiştir. Test sonuçlarından da görülebileceği gibi polimer matrisli kompozit olan bu sistemde malzeme çok yüksek seviyelerde şekil değiştirme hızı hassasiyeti göstermektedir. Malzemenin elastiklik modülü, kopma mukavemeti ve kopma şekil değiştirme değerleri de şekil değiştirme hızı ile birlikte oldukça değişmektedir.

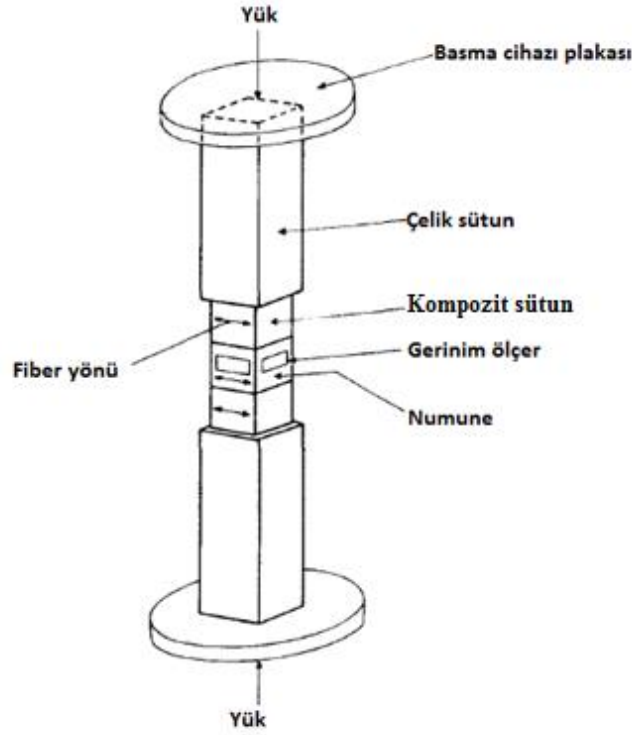


Şekil 24. Düzlem içi yönler (X ve Y) için basma test sonuçları.



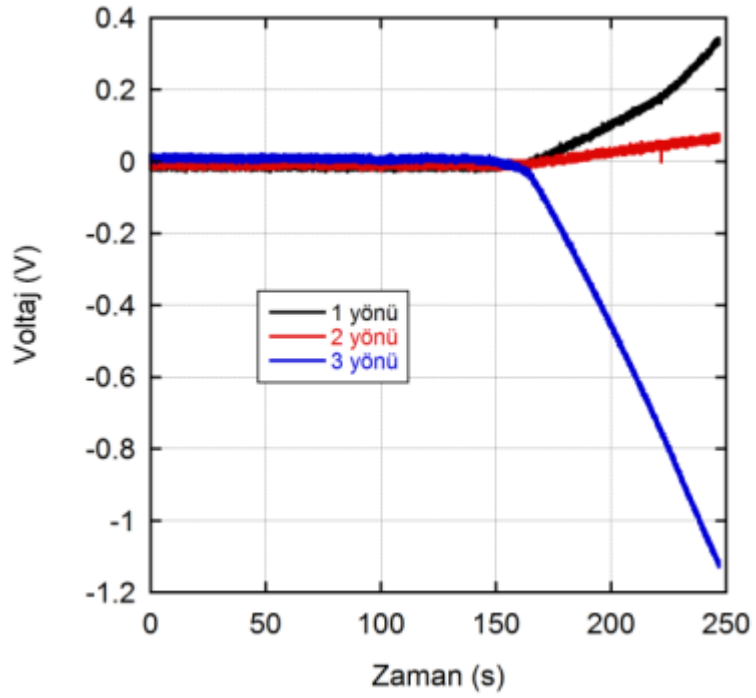
Şekil 25. Z yönü basma testleri sonuçları.

Çekme testi ile belirlenen 12 yönündeki Poisson oranının yanı sıra, 31 ve 32 yönlerindeki Poisson oranlarının da belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, Collings (Collings 1974) tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır. Bu yönteme göre 12.7x12.7x12.7 mm boyutlarında hazırlanan küp numuneler, iki adet yine aynı malzemeden ve aynı boyutlarda küp arasına yerleştirilmiş, bunlar 50x50 mm kesitindeki çelik sütunlar arasında 1.5 mm/dak hız ile ezilmişlerdir. Test yöntemi Şekil 26'da görülebilir. Test esnasında 3 adet gerinim ölçer kullanılmıştır. Bunlardan biri yüklemeye dik yönde (3), diğer ikisi ise yüklemeye dik yönlerde (1 ve 2) ölçüm yapacak şekilde yerleştirilmiştir. Denklem 6 kullanılarak elde edilen gerinim değerleri, Denklem 7'de yerlerine konularak PR31 ve PR32 Poisson oranları hesaplanmıştır.



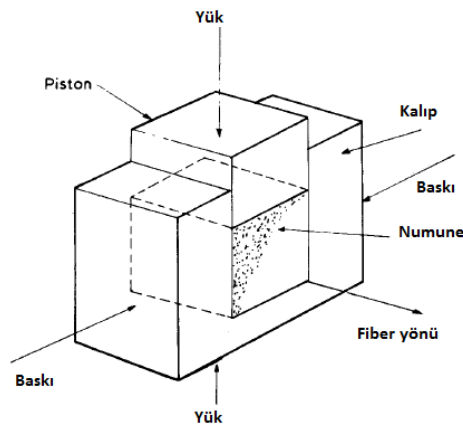
Şekil 26. Basma testi ile Poisson oranı belirlenmesi, (Collings 1974)'den Türkçeleştirilmiştir.

Test programı kapsamında kübik numunelerde gerçekleştirilen basma testlerinde üç yönde yerleştirilmiş gerinim ölçerler kullanılmış, PRCA ve PRCB değerleri sırasıyla 0,243 ve 0,0723 olarak belirlenmiştir. Test sonuçları Şekil 27'de görülebilir.



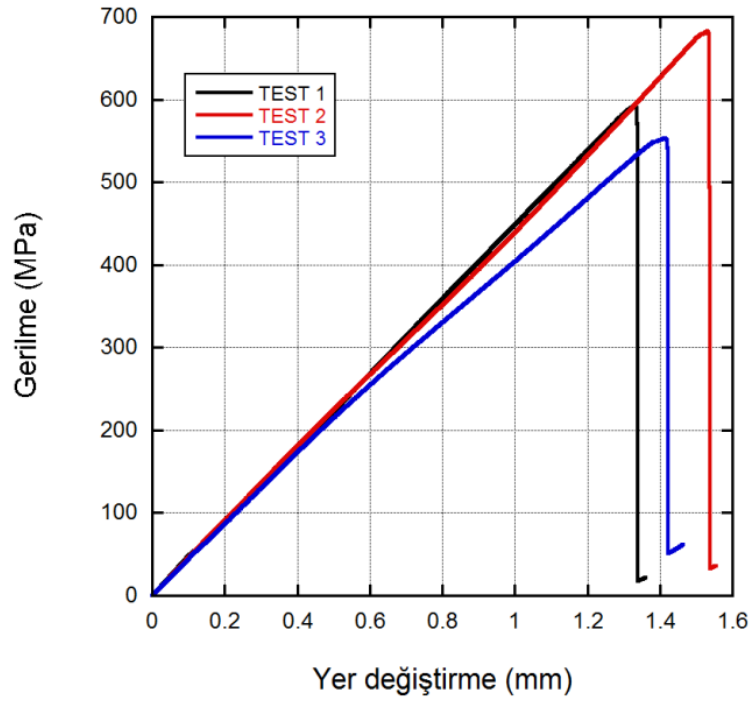
Şekil 27. Poisson oranı 31 ve 32 belirleme testi voltaj – zaman grafiği.

Fiber ezilme mukavemeti ve fiber kayma modu mukavemeti değerlerinin tespiti için Collings (Collings 1974) tarafından önerilen yanal baskılı basma testi uygulanmıştır. Deney düzeneği Şekil 28’de görülebilir. Test hızı 1.5 mm/dak’dır.



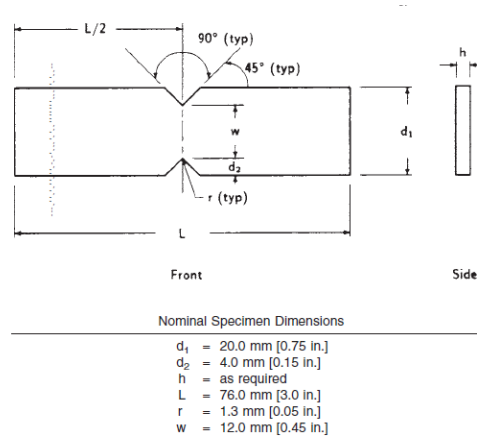
Şekil 28. Yanal baskılı basma testi, (Collings 1974)’den Türkçeleştirilmiştir.

Şekil 29’da yanal baskılı basma testleri sonuçları karşılaştırmalı olarak, gerilmenin şekil değiştirmeye göre değişimi şeklinde verilmiştir. Bu test sonuçlarına göre kırılma düzlemi açısı değeri ortalama  $57.5^\circ$  olarak bulunmuştur.

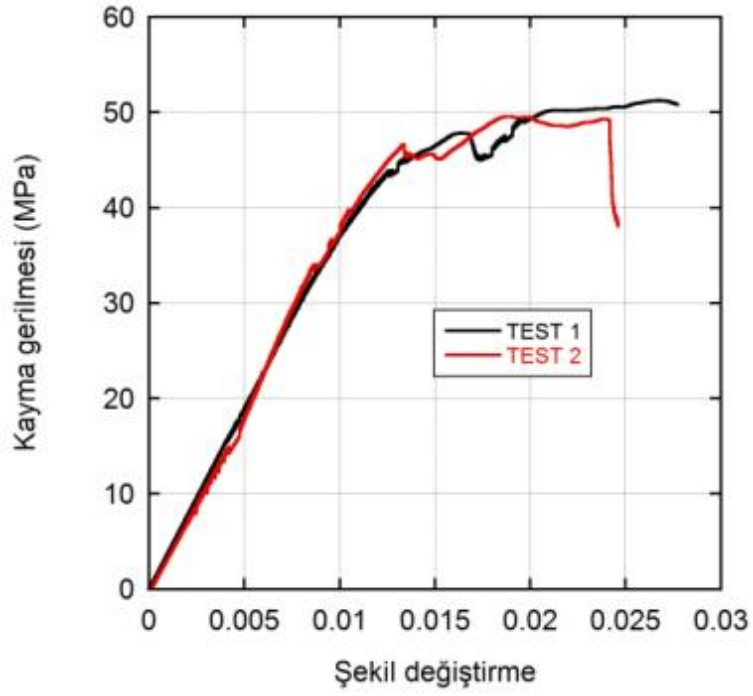


şekil 29. Yanal baskılı basma testleri sonuçları.

Kompozit malzemenin kayma modülü ve mukavemeti değerlerinin belirlenmesi için ASTM D5379 standardına uygun şekilde kayma testleri geręekleřtirilmiřtir. Test numunesi şekil 30'da görülebilir. Testler, 2 mm/dak hızında ve ikişer adet gerinim ölçer kullanılarak yapılmıştır. Test sonuçları şekil 31'de verilmiştir.

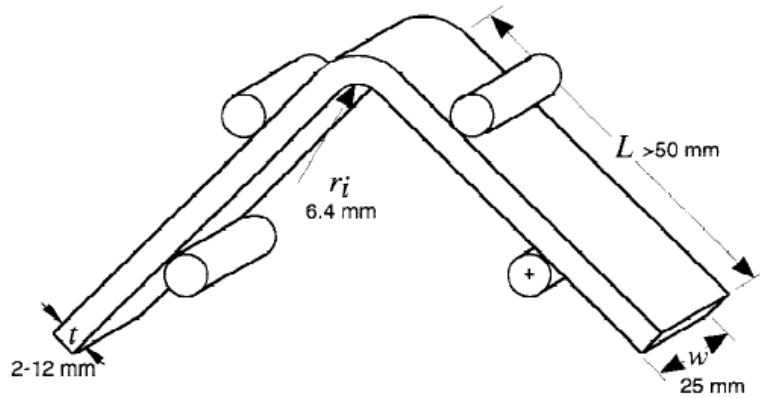


şekil 30. Kayma testi numunesi teknik resmi.

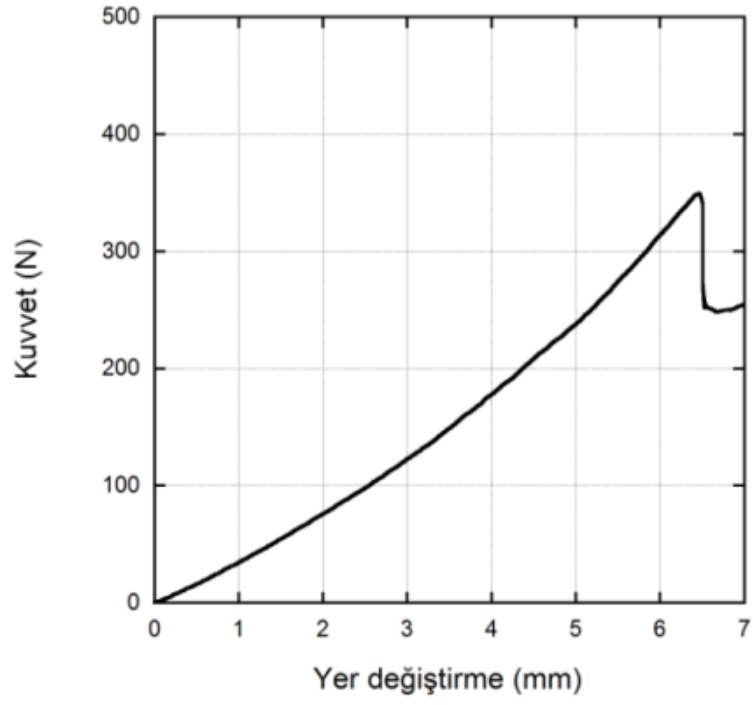


Şekil 31. 12 yönü kayma testi sonuçları.

Test programı kapsamında, ASTM D6415-99 standardında belirtilen şekilde gerçekleştirilen dört nokta eğme testi sonucu kompozitlerin 3 yönündeki çekme mukavemeti 70 MPa olarak elde edilmiştir. Test numunesi Şekil 32’de görülebilir. Test hızı 1.5 mm/dak olarak belirlenmiştir. Şekil 33’de test sonucu verilmiştir.



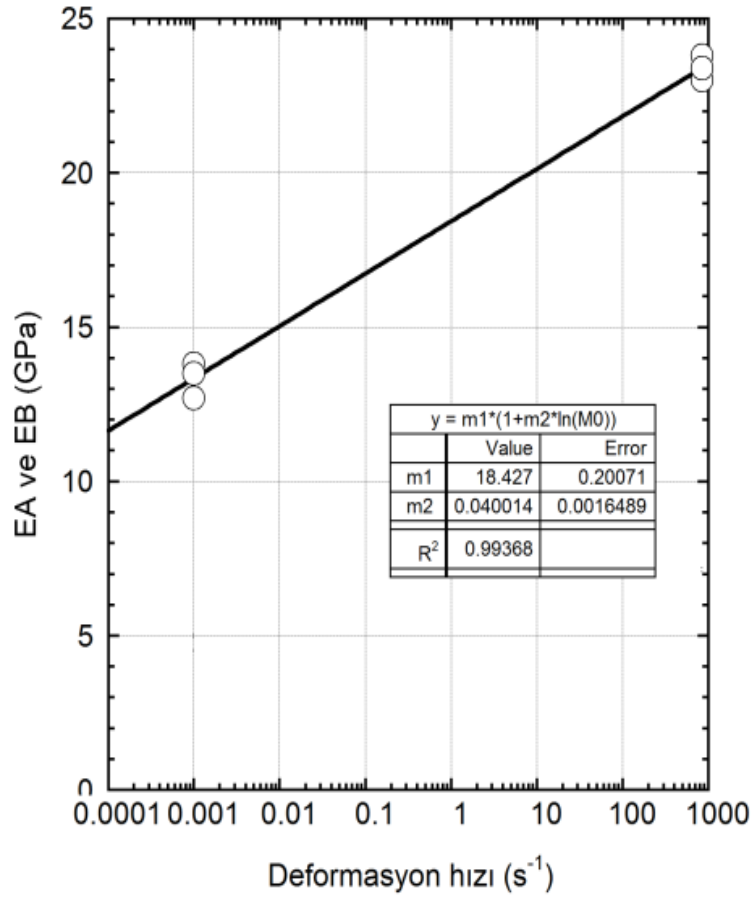
Şekil 32. Dört nokta eğme testi.



şekil 33. Dört nokta eğme testi sonucu.

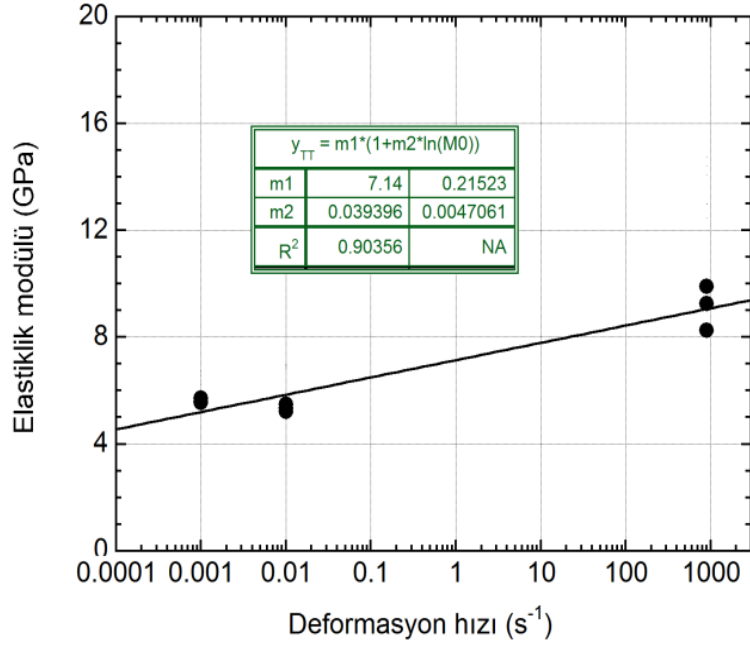
şekil 34'de düzlem için yönler için elastiklik modülünün şekil değiştirme hızı hassasiyeti verilmiştir.





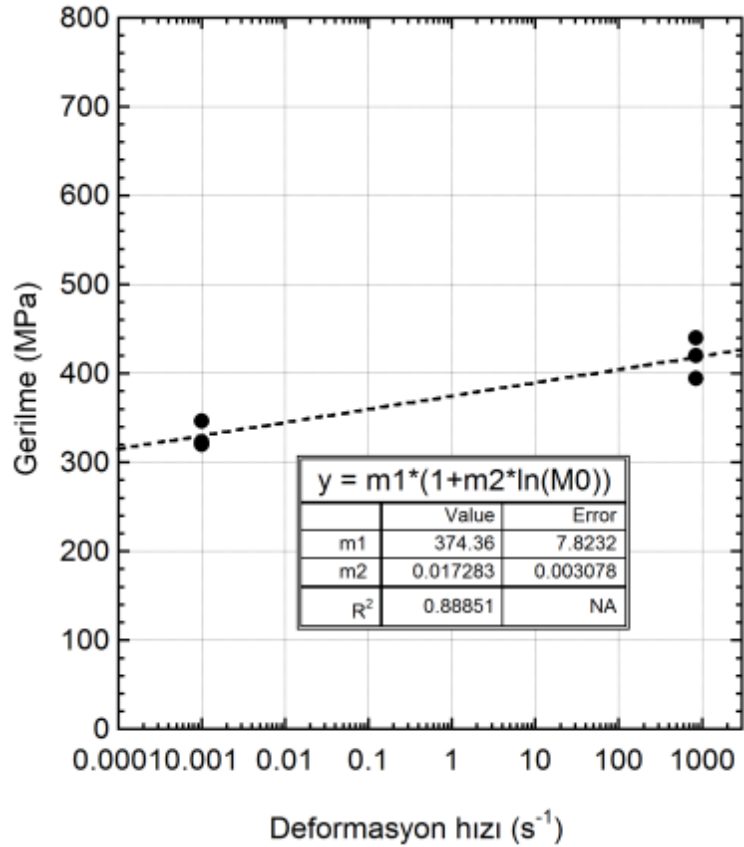
Şekil 34. Düzlem içi elastiklik modülü şekil değiştirme hızı hassasiyeti.

Şekil 35'de Z yönü için elastiklik modülünün şekil değiştirme hızı hassasiyeti verilmiştir.



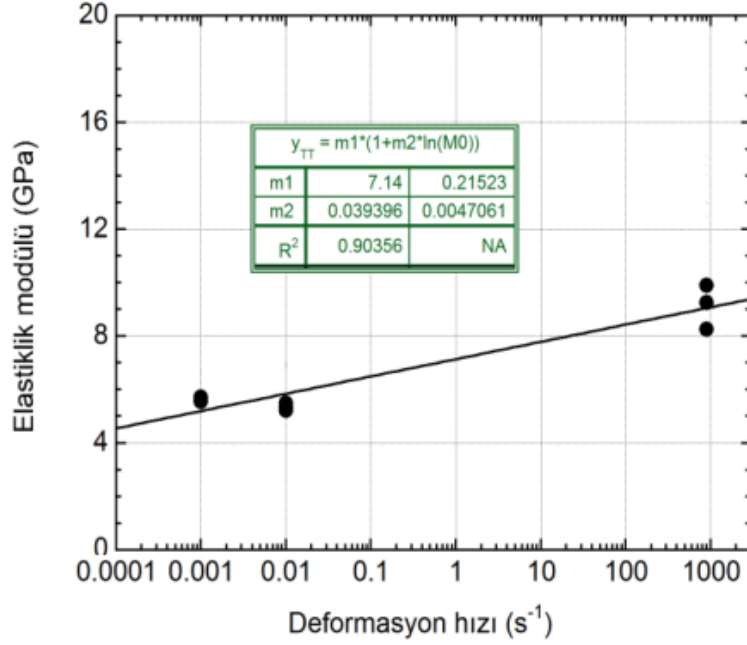
Şekil 35. Z yönü elastiklik modülü şekil değiştirme hızı hassasiyeti.

Şekil 36'da düzlem içi mukavemet parametresi için şekil değiştirme hızı hassasiyeti verilmiştir.



Şekil 36. Düzlem içi mukavemet şekil değiştirme hızı hassasiyeti.

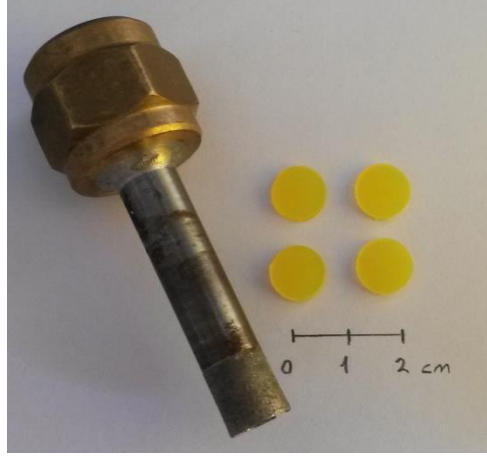
Şekil 37'de Z yönü mukavemet parametresi için şekil değiştirme hızı hassasiyeti verilmiştir.



Şekil 37. Z yönü mukavemeti şekil değiştirme hızı hassasiyeti.

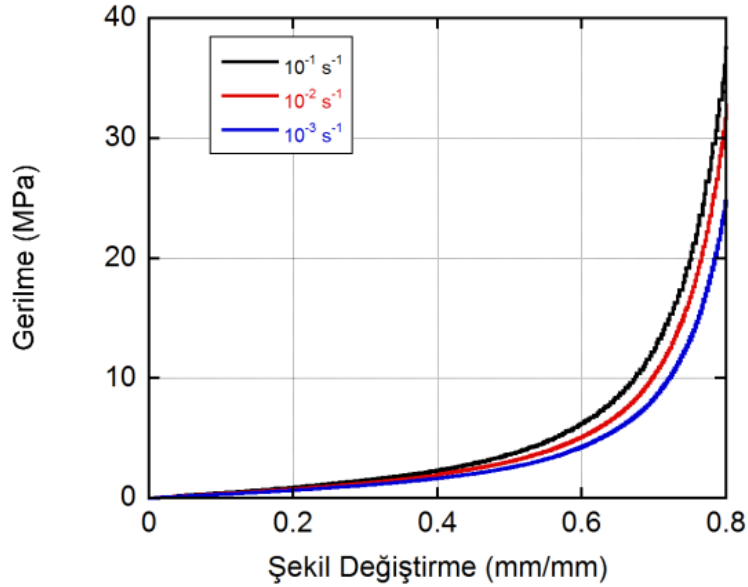
### 3.3 Poliüretan Malzemenin Mekanik Karakterizasyonu

Dinamik mekanik karakterizasyon çalışmalarına Doğrudan Basınç Dalgası testleri ve bu testlerin nümerik modellenmesinde kullanılacak olan Poliüretan malzeme ile devam edilmiştir. Test sırasında poliüretan malzeme sandviç yapı ile doğrudan temas halinde olacağından ve yüksek şekil değiştirme hassasiyeti gösterdiği bilindiğinden dolayı statik ve dinamik karakterizasyon bir arada yürütülmüştür. Bu kapsamda, levhalar halinde üretilmiş olan Poliüretan malzemesi karot matkap yardımıyla kesilerek 10 mm çap ve 2 mm kalınlıkta silindirik numuneler elde edilmiştir. Belirtilen numunelere ait örnek fotoğraf Şekil 38'de görülmektedir.



Şekil 38. Poliüretan malzemesine ait test numuneleri.

Mekanik karakterizasyonun ilk aşaması olan statik basma testleri 300 kN yükleme kapasiteli Shimadzu AG-X mekanik tahrikli konvansiyonel test cihazında sırası ile  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$  ve  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  birim şekil değiştirme hızlarında yapılmıştır. Belirtilen testlerin sonuçları Şekil 39'da görülmektedir.

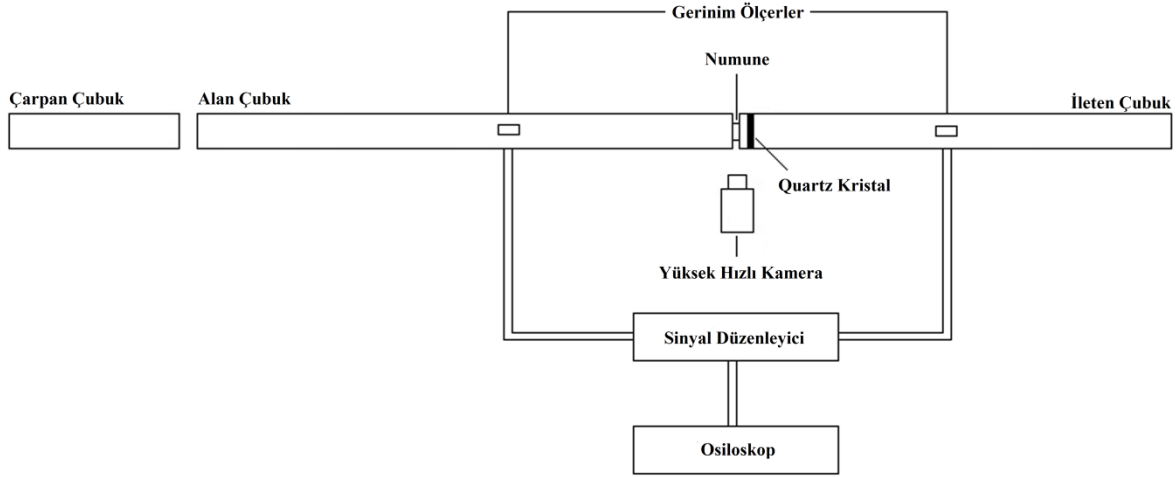


Şekil 39. Poliüretan malzemesine ait statik basma testi sonuçları.

Dinamik mekanik testler ise Split Hopkinson Basınç Barı (SHBB) ile yapılmıştır. Poliüretan gibi hiperelastik davranış gösteren ve düşük akustik empendansa sahip malzemelerin Hopkinson Basınç Barı testleri sırasında numunedan ileten çubuğa iletilen sinyal oldukça düşük seviyelerde kaldığından ve sinyalin gerçek değerinin sinyalin içerisindeki gürültü sinyali mertebelerine düşmesinden dolayı klasik Hopkinson Basınç Barı ile bu malzemelerin testlerini yapmak mümkün değildir. Yine bu tarz malzemelerin testleri sırasında

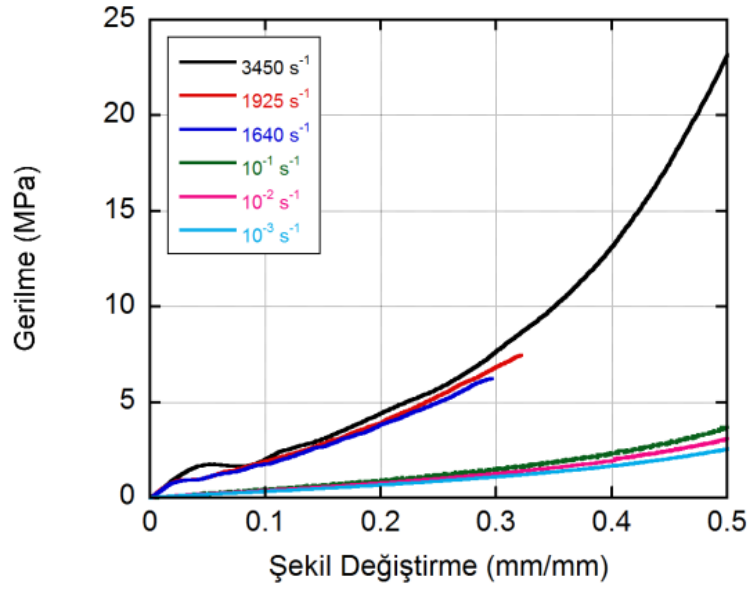
dinamik gerilme dengesi (numune ön ve arka yüzeylerinde meydana gelen kuvvetler farkı) deformasyon başlangıcından ilerleyen deformasyon değerlerine kadar elde edilemeyeceğinden bu tarz malzemelerin testleri sırasında özel teknikler kullanılması gerekmektedir. Bu tekniklerden en önemlisi ileten çubuk numune ara yüzeyine piezo elektrik quartz kristalleri yerleştirmektir. Bu quartz kristalinin akustik empedansı, testlerin yapıldığı Hopkinson Barı test cihazında kullanılan 7075-T6 alüminyum malzemeye oldukça yakındır ve gerilme/kuvvet ölçme hassasiyeti çok yüksektir. Literatürde bu tekniğin daha önce bazı hafif ve düşük mukavemetli malzemelerin testlerinde başarı ile kullanıldığı görülmüştür (Song vd. 2006; Song vd. 2007; Song vd. 2007). Nitekim proje yürütücüsü bu tekniği kullanarak Teflon malzeme karakterizasyonunu başarı ile gerçekleştirmiştir (Tasdemirci vd. 2012). Bu proje kapsamında poliüretan malzeme için de benzer teknik kullanılarak karakterizasyon gerçekleştirilmiştir.

Geliştirilen teknik kapsamında kullanılan modifiye edilmiş Split Hopkinson Basınç Barı'na ait şematik Şekil 40'da gösterilmiştir.



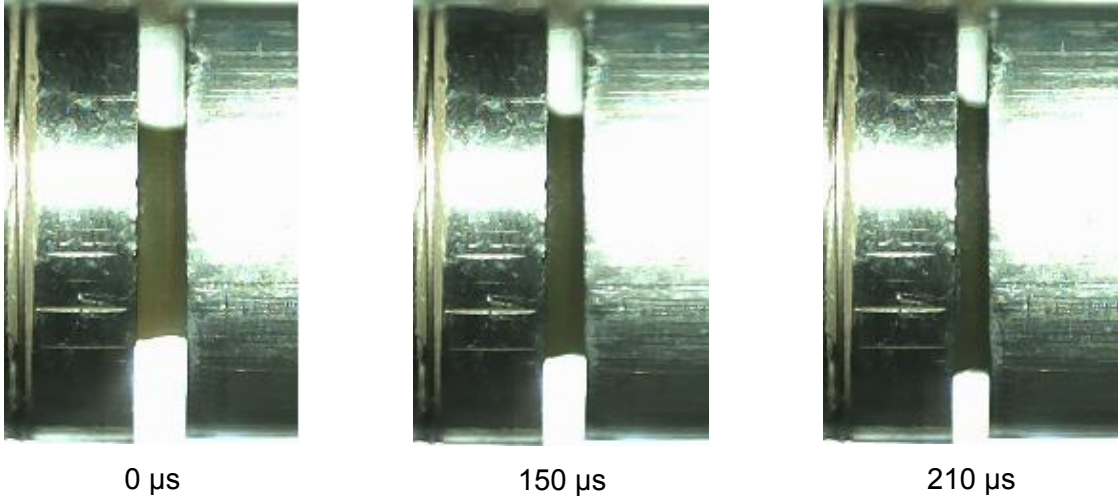
Şekil 40. Poliüretan malzemesinin yüksek deformasyon hızı testlerinde kullanılan SHBB şematiği.

Testlerde  $1640 \text{ s}^{-1}$ ,  $1925 \text{ s}^{-1}$  ve  $3450 \text{ s}^{-1}$  şekil değiştirme hızlarına erişilmiş olup, SHBB testleri ile statik test sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 41'de verilmiştir.



Şekil 41. Statik ve dinamik test sonuçlarının karşılaştırılması.

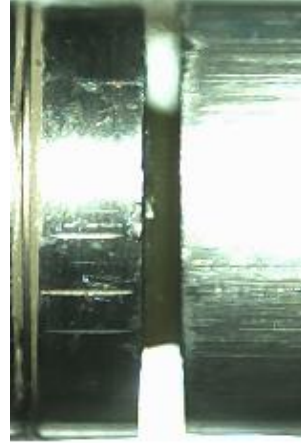
Split Hopkinson Basınç Barı testleri sırasında numunenin deformasyonu yüksek hızlı kamera ile kaydedilmiş ve her şekil değişirme hızına ait görüntüler sırasıyla Şekil 42, 43 ve 44'de verilmiştir.



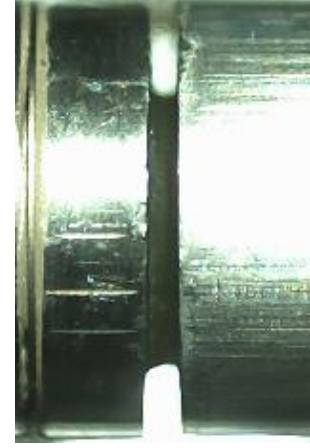
Şekil 42. 1645 s<sup>-1</sup> deformasyon hızında Poliüretan malzemesinin ezilme davranışı.



0  $\mu$ s

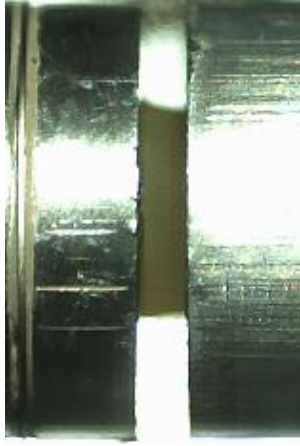


150  $\mu$ s



210  $\mu$ s

Şekil 43.  $1925 \text{ s}^{-1}$  deformasyon hızında Poliüretan malzemesinin ezilme davranışı.



0  $\mu$ s



150  $\mu$ s



210  $\mu$ s

Şekil 44.  $3450 \text{ s}^{-1}$  deformasyon hızında Poliüretan malzemesinin ezilme davranışı.

#### 4. MALZEME MODELİ SEÇİMİ VE SABİTLERİNİN BELİRLENMESİ

Sandviç yapıyı oluşturan elemanların mekanik karakterizasyonunun tamamlanmasının ardından nümerik çalışmalarda kullanılacak malzeme modelleri seçilmiş ve ilgili malzeme modeli sabitleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

##### 4.1 AISI 304L Paslanmaz Çeliği

Sandviç yapıyı oluşturan elemanlardan mekanik karakterizasyonu tamamlanan ilk malzeme AISI 304L paslanmaz çeliğidir. Üçüncü bölümde verilen mekanik karakterizasyon sonuçlarından (Şekil 19 ve 21) görüleceği üzere bu malzeme yüksek şekil değiştirme hızı hassasiyeti göstermektedir ve seçilecek malzeme modelinin bu hususu hesaplamalara katması gerekmektedir. Johnson-Cook gerilme ve hasar modeli metallerin davranışlarını şekil değiştirme hassasiyetlerini hesaba katarak başarıyla temsil ettiğinden bu malzemenin modellenmesinde seçilmiştir. Johnson-Cook (JC) gerilme ve hasar denklemleri aşağıdaki gibidir:

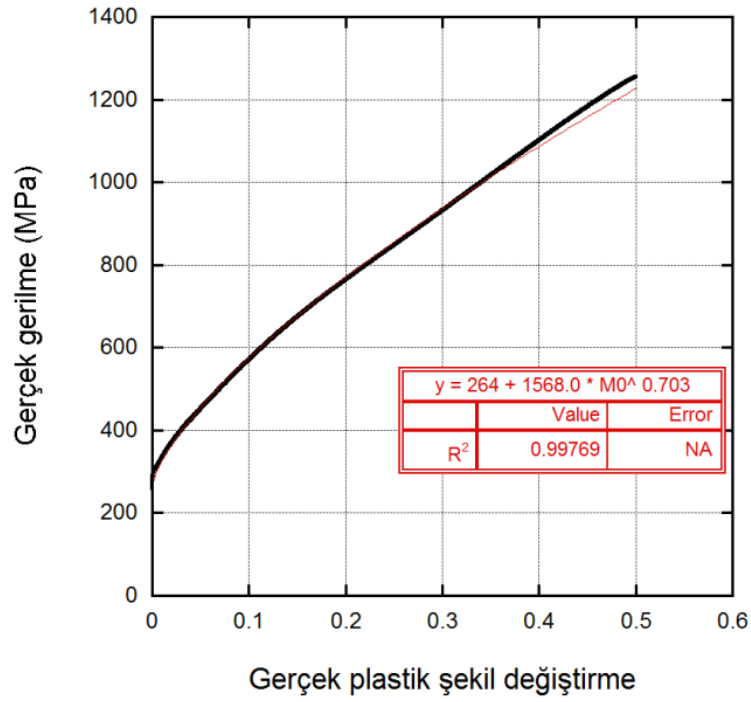
$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right) + C_2 \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad \text{Denklem (8)}$$

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}] \left[ 1 + D_4 \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right) \right] \quad \text{Denklem (9)}$$

Gerilme denkleminde ilk parantez uzama sertleşmesini ikinci parantez ise şekil değiştirme hızı hassasiyetini vermektedir.  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $n$  ve  $C_2$  statik ve dinamik testlerden elde edilen verilerin işlenmesi sonucu bulunacak olan malzeme sabitleridir.  $\dot{\varepsilon}$  ve  $\varepsilon_0$  sırası ile şekil değiştirme hızı ve referans şekil değiştirme hızıdır. Referans şekil değiştirme hızı istenilen bir değer (genellikle  $1 \text{ s}^{-1}$ ) alınabilir. Hasar modeli denkleminde  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  ve  $D_4$  hasar parametreleri,  $\sigma^* = \sigma_m / \sigma_e$  ise hidrostatik (ortalama) gerilmenin efektif gerilmeye oranıdır (üç eksenli gerilme katsayısı) (stress triaxiality). Çalışma kapsamındaki yüklemeler esnasında gerilme durumu çok fazla değişmediğinden üç eksenli gerilme katsayısı hesaba katılmamıştır.

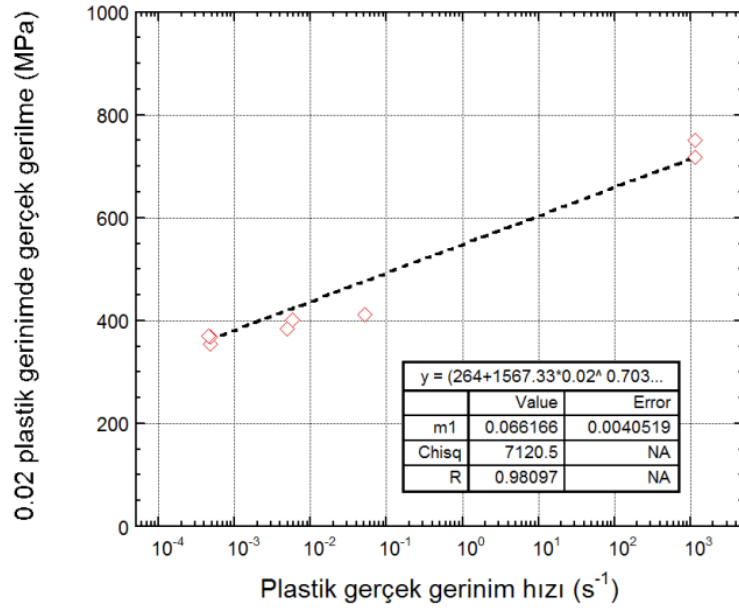
Statik test sonuçları kullanılarak 8 numaralı denklemdeki malzeme parametrelerinden uzama sertleşmesi ile ilgili olan  $A$ ,  $B$  ve  $n$  değerleri bulunmuştur. Şekil 45'de bu değerleri içeren eğri görülebilir.



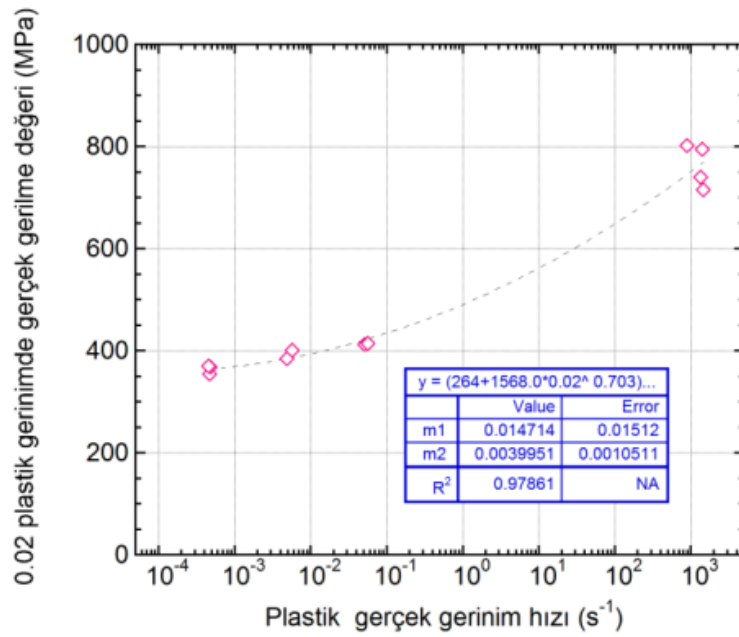


Şekil 45. Gerçek gerilme-gerçek plastik şekil değiştirme eğrisi (referans şekil değiştirme hızı  $\sim 0,00047 \text{ s}^{-1}$ ).

Şekil değiştirme hızı hassasiyetinin belirlenmesi için statik ve Hopkinson basınç barında yapılmış çekme test sonuçları kullanılmıştır. Bu amaçla 0.02 plastik gerçek şekil değiştirme değerine karşılık gelen gerçek gerilme değerleri farklı şekil değiştirme hızları için belirlenmiştir (Şekil 46). Şekil değiştirme hızı hassasiyeti nonlineer davranışı tespit edilmiş olup bu davranışa ait sabitler hesap edilmiştir. Şekil 46 ve 47’de sırasıyla lineer ve ikinci derece eğri uydurma grafikleri verilmiştir.

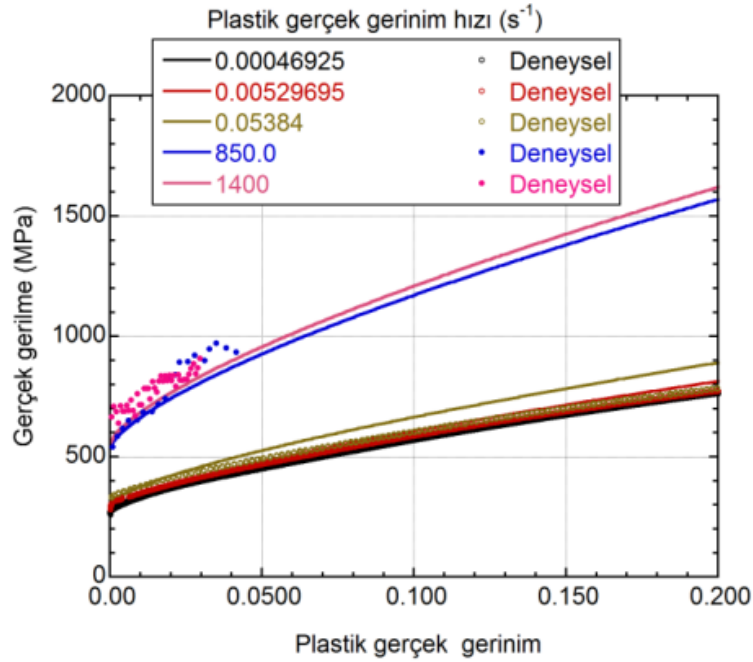


Şekil 46. Uzama değişimi sertleşmesi parametrelerinin bulunması (lineer eğri uydurma).



Şekil 47. Uzama değişimi sertleşmesi parametrelerinin bulunması (ikinci derece eğri uydurma).

Şekil 45, 46 ve 47'den görüleceği gibi model oldukça yüksek başarı ile malzemenin mekanik davranışını temsil edebilmektedir. Şekil 48'de model ve deneysel sonuçlar bir arada verilmiştir. AISI 304L paslanmaz çeliği Johnson-Cook gerilme ve hasar model parametreleri Tablo 5'te verilmiştir.



Şekil 48. Deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması.

Tablo 5. AISI 304L paslanmaz çeliğin Johnson-Cook gerilme ve hasar model parametreleri.

$E$ (GPa)	$A$ (MPa)	$B$ (MPa)	$n$	$C$	$C_2$	$\dot{\epsilon}_0$ (s <sup>-1</sup> )
200	264	1568	0,703	0,0148	0,004	0,00047
$D_1$	$D_4$					
0,53467	-0,01913					

## 4.2 Kompozit malzeme

Bu çalışmanın üçüncü bölümünde de belirtildiği gibi kompozit malzemeler anizotropik davranış gösterdiğinden üç farklı malzeme yönünde karakterize edilmeleri gerekmektedir. Yapılacak nümerik çalışmalarda yöne göre değişen mekanik özellikleri temsil edecek bir malzeme modeli gerekmektedir. Kompozit yüzey malzemesinin nümerik çalışmalarında kullanılmak üzere MAT162 malzeme modeli seçilmiştir.

Bu malzeme modeli, tek yönlü ve örgülü lif katmanlarının progresif hasar analizlerinde kullanılmaktadır. Progresif katman hasar kriterleri, Hashin (Hashin 1980) tarafından geliştirilen ve yüksek baskı basıncının kompozit hasarı üzerindeki etkilerini de içermek üzere geliştirilen bir metodoloji üzerine kurulmuştur. Bu hasar modelleri, fiber hasarını, matris hasarını ve delaminasyon hasarını (açılma, kapanma, hasar yüzeylerinin birbirleri üzerinde kayması) tanımlayabilmektedir (LSTC 2007).

Katman gerilme modeli kriterleri ve ilgili mukavemet indirgeme modelleri bu kısımda açıklanmaktadır. Bütün gerilme modeli kriterleri, katmanlar üzerindeki gerilmeler ( $\sigma_a, \sigma_b, \sigma_c, \tau_{ab}, \tau_{bc}, \tau_{ca}$ ) 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 çözümlü yönünü (in-plane warp) ve eksene dik yönleri göstermektedir (LSTC 2007).

Hashin'in fiber gerilme modeli kriterleri dokuma örgülerindeki fiber hasarını gerilme bileşenleri cinsinden karakterize edecek şekilde genelleştirilmiştir. Atkı ve çözümlü yönlerindeki fiber çekme/kayma hasarları, ilgili aksenal ve kayma gerilmeleri arasındaki ikinci mertebeden ilişki ile verilmiştir.

$$H_1 = \left(\frac{\langle\sigma_a\rangle}{S_{aT}}\right)^2 + \frac{(\tau_{ab}^2 + \tau_{ca}^2)}{S_{aFS}^2} - 1 = 0 \quad \text{Denklem (10)}$$

$$H_2 = \left(\frac{\langle\sigma_b\rangle}{S_{bT}}\right)^2 + \frac{(\tau_{ab}^2 + \tau_{bc}^2)}{S_{bFS}^2} - 1 = 0 \quad \text{Denklem (11)}$$

Burada  $S_{aT}$  ve  $S_{bT}$  atkı ve çözümlü yönlerindeki aksenal çekme mukavemetleridir.  $S_{aFS}$  ve  $S_{bFS}$  ise atkı ve çözümlü yönlerindeki fiber kayma hasarına karşılık olan katman kayma mukavemetleridir. Bu gerilme model kriterleri sadece ilgili  $\sigma_a$  veya  $\sigma_b$  değerleri pozitif olduğunda uygulanabilir.  $S_{aFS} = SFS$  olduğu varsayılırken  $S_{bFS}$  ile ilgili ise aşağıdaki ifade kullanılmaktadır:

$$S_{bFS} = SFS * S_{bT} / S_{aT} \quad \text{Denklem (12)}$$

$\sigma_a$  veya  $\sigma_b$  negatif iken, atkı ve çözümlü yönlerinin ikisinde de eksen içi basma hasarı aşağıdaki maksimum gerilme kriteri ile verilmektedir:

$$H_3 = \left(\frac{\langle\sigma_a\rangle}{S_{aC}}\right)^2 - 1 = 0, \quad \sigma'_a = -\sigma_a + \langle-\sigma_c\rangle \quad \text{Denklem (13)}$$

$$H_4 = \left(\frac{\langle\sigma_b\rangle}{S_{bC}}\right)^2 - 1 = 0, \quad \sigma'_b = -\sigma_b + \langle-\sigma_c\rangle \quad \text{Denklem (14)}$$

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

$$H_5 = \left(\frac{\langle p \rangle}{S_{FC}}\right)^2 - 1 = 0, \quad p = -\frac{\sigma_a + \sigma_b + \sigma_c}{3} \quad \text{Denklem (15)}$$

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

$$H_6 = \left( \frac{\tau_{ab}}{S_{ab}} \right)^2 - 1 = 0 \quad \text{Denklem (16)}$$

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:

$$H_7 = S^2 \left\{ \left( \frac{\sigma_c}{S_{cT}} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{bc}}{S_{bc}} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{ca}}{S_{ca}} \right)^2 \right\} - 1 = 0 \quad \text{Denklem (17)}$$

Burada  $S_{cT}$  kalınlık boyunca olan çekme mukavemeti,  $S_{bc}$  ve  $S_{ca}$  ise normal basma gerilmesi  $\sigma_c$  ye bağlı kayma gerilmeleridir ve aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{Bmatrix} S_{ca} \\ S_{bc} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S_{ca}^{(0)} \\ S_{bc}^{(0)} \end{Bmatrix} + \tan(\varphi) \langle -\sigma_c \rangle \quad \text{Denklem (18)}$$

Bu mod ile belirlenen bir hasar katman ara yüzeyinin komşuluğundaki elemanlarda gerçekleşir, hasar düzleminin katman düzlemlerine paralel olması beklenir ve bu sebeple bu mod delaminasyon modu olarak kabul edilebilir. Bu hasar modunda bir S faktörü delaminasyon alanının deneylerle uyumlu olmasını sağlamak için eklenmiştir. S faktörü analitik hesaplamaların deneylerden elde edilen delaminasyon alanı ölçümlerine eğri uydurma yöntemi ile bulunabilir. Ayrıca gerçekleştirilen kalibrasyon testlerinin simülasyonları da kullanılabilir.

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

Eksen içi matris kayma hasarı  $H_6$  ile belirlendiğinde, hasar almış bir elemandaki eksenel kuvvet taşıma kapasitesinin değişmediği, eksen içi kayma gerilmesinin ise sıfıra

düştüğü kabul edilmektedir.  $H_6$  ile verilen kalınlık boyu matris hasarı (delaminasyon) için bir elemandaki eksen içi yük taşıma kapasitesi elastik kabul edilirken, çekme modundaki mukavemet değerleri ise  $S_{ca}^{(0)}$  ve  $S_{bc}^{(0)}$  sifıra eşitlenir. Çekme modu için,  $\sigma_c > 0$ , kalınlık boyunca olan gerilme bileşenleri sifıra düşürülür. Bası modu için,  $\sigma_c < 0$ ,  $\sigma_c$  'nin elastik olduğu kabul edilir,  $\tau_{bc}$  ve  $\tau_{ca}$  'nın ise kırılma mukavemeti yüzeyi üzerinde ideal plastik malzemelerde olduğu gibi "kaydığı" ve geri yüklemenin sifır gerilme ve gerinim 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:

$$\{S_{RT}\} = \{S_0\} \left( 1 + C_{rate1} \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \quad \text{Denklem (19)}$$

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

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

MAT162 hasar modeli, Matzenmiller vd. (Matzenmiller vd. 1995) tarafından önerilen ve hasar başlangıcından sonraki mekanik özelliklerdeki azalma davranışının karakterizasyonu için kullanılan bir hasar mekaniği yaklaşımıdır. Katman seviyesindeki nominal gerinimler cinsinden ifade edilen hasar fonksiyonları, yukarıda anlatılan fiber ve matris hasar modlarından Poisson etkilerinin çıkarılması şeklinde dönüştürülmüştür. Elastik modüllerdeki azalmalar ilgili hasar parametreleri  $\omega_i$  cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\begin{aligned} \dot{E}_i &= (1 - \omega_i)E_i & \text{Denklem (20)} \\ \omega_i &= 1 - \exp(-r_i^{m_i}/m_i) & r_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, 6 \end{aligned}$$

Burada  $E_i$  başlangıç elastik modülü,  $\dot{E}_i$  azaltılmış elastik modülü,  $r_i$  ilgili fiber matris ve delaminasyon hasar fonksiyonlarından hesap edilen hasar eşiği ve  $m_i$  malzeme hasar parametreleridir ve şekil değiştirme hızından bağımsız kabul edilmektedir. Hasar fonksiyonu başlangıçtaki "sertleşme" ve maksimum mukavemetten sonraki azalma davranışını da içererek katmanın lineer olmayan elastik davranışını da hesaba katacak şekilde formüle edilmiştir

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

$$\{E_{RT}\} = \{E_0\} \left(1 + \{C_{rate}\} \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \quad \text{Denklem (21)}$$

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

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

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

- Eğer eksen içi yönlerde hasar gerçekleştiyse ve gerinim  $E\_LIMT$  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 kullanılarak çizdirilebilir.

Bu ekstra hasar tarihçe değişkenleri Tablo 6'da listelenmiştir.

Tablo 6. Hasar tarihçesi değişkenleri.

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	$\geq 1$ -failed	10
Paralel matris/delaminasyon modu		11
Delaminasyon modu		12

Gerçekleştirilen testler sonucunda elde edilen MAT162 model parametreleri Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Kompozit malzeme MAT162 modeli parametreleri.

Elastik modülleri $E_a, E_b, E_c$ (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, $S_{AB}, S_{BC}, S_{CA}$ (MPa)	46,5
Kayma modülleri, $G_{AB}, G_{BC}, G_{CA}$ (GPa)	3,9, 3,9, 3,9	<b>SFFC</b>	0,3
Çekme mukavemetleri, $S_{AT}, S_{BT}, S_{CT}$ (MPa)	480, 480, 70	Kayma açısı, <b>PHIC</b>	10
Basma mukavemetleri, $S_{AC}, S_{BC}$ (MPa)	374,4, 374,4	Delaminasyon katsayısı, <b>S_DELM</b>	1,2
Hasar parametreleri, <b>AM1, AM2, AM3, AM4</b>	2,0, 2,0, 0,5, 0,35	Fiber kayma mukavemeti, $S_{FS}$ (MPa)	265,6
Erozyon parametreleri, <b>E_LIMT, EEXPN, E_CRSH</b>	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

### 4.3 Poliüretan

Çalışmanın ileri aşamalarında yapılacak Doğrudan Basınç Dalgası Düzeneği (DBDD) testlerinde kullanılması planlanan poliüretan malzemesinin mekanik karakterizasyonu tamamlanmış ve malzemenin yüksek şekil değiştirme hızı hassasiyetine sahip olduğu görülmüştür (Şekil 41). Hiperelastik davranış gösteren ve şekil değiştirme hızı hassasiyetine sahip kauçuk, poliüretan vb. gibi polimerlerin nümerik çalışmalarında MAT\_SIMPLIFIED\_RUBBER\_WITH\_DAMAGE malzeme modelinin başarılı olduğu bilinmektedir. Mekanik karakterizasyonda elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin bu malzeme modeline girdi olarak eklenebilmektedir. Bahsedilen malzeme modeli Doğrudan Basınç Dalgası Düzeneği testlerinin nümerik modelleme çalışmalarında kullanılmıştır. Poliüretan malzemesinin MAT\_SIMPLIFIED\_RUBBER\_WITH\_DAMAGE malzeme modeline ait parametreler Tablo 8'de verilmiştir.



Tablo 8. Poliüretan malzemesinin MAT\_SIMPLIFIED\_WITH\_DAMAGE malzeme modeli parametreleri.

$\rho$ , (kg.m <sup>-3</sup> )	$K$ , (GPa)	$MU$ , (GPa)
1200	5.0	0.4

## 5. MALZEME MODELİ SABİTLERİNİN DOĞRULANMASI

Bu çalışma kapsamında tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen yarı küresel çekirdek malzemesi içeren sandviç yapıların nümerik simülasyon ortamında modellenerek bunların patlama etkileri altındaki davranışları inceleneceğinden, sandviç yapıyı oluşturan malzemelerin tamamının malzeme modelleri belirlenmiştir. Bu bölümde belirlenen bu malzeme modellerinin sabitlerinin doğrulanması amacıyla derin çekme işlemlerinin yanısıra çekirdek malzemelerinin statik ve orta şekil değiştirme hızlarındaki ezilme davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Yapılan incelemelerde tüm nümerik çalışmalarda LS-DYNA kullanılmış ve hem kuvvet-deformasyon tarihçelerinin hem de deformasyon profillerinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu gösterilmiştir.

### 5.1 Derin Çekme İşlemlerinin Simülasyonu

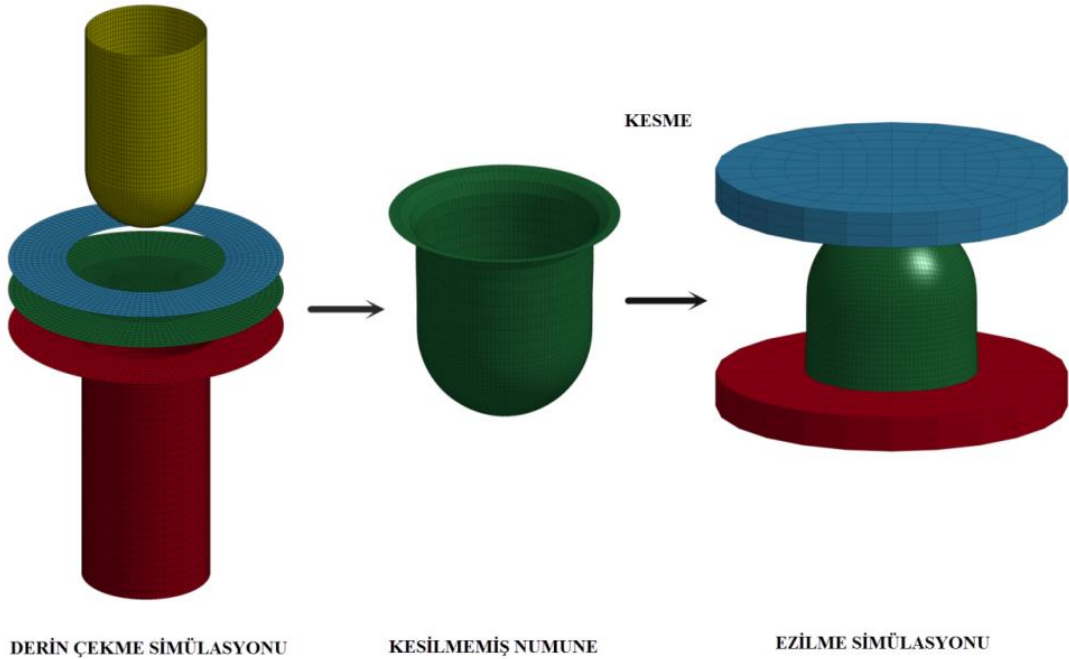
Çekirdek yapılarının üretimleri esnasında maruz kaldıkları plastik deformasyon dolayısıyla kesitleri boyunca kalınlık ve plastik gerilme/deformasyon değişimlerine maruz kaldıklarına üretim işlemlerinin anlatıldığı 2. bölümde değinilmişti. Kesit boyunca oluşan bu kalınlık ve kalıcı plastik gerilme/deformasyon değişimlerinin malzemenin mekanik davranışına etki ettiği açıktır. Bu sebeple yarı küresel yapıların nominal kalınlık ve artık gerilmesiz olarak kabul edilerek ezilmelerinin modellenmesi başarılı sonuçlar vermeyecektir. Bu duruma iki farklı yaklaşım getirilebilir: a) tüm yapının belirli bir ortalama şekil değiştirmeye veya şekil değiştirme bölgelerine maruz kaldığı nümerik modeli oluşturmak veya b) üretim prosesinin ilk adımı olan derin çekmenin de modellenmesi sonrasında elde edilen yapının bir sonraki modele giriş bilgisi olarak alarak ezilmesini modellemektir. İlk yöntem yapıda meydana gelen malzeme özellik varyasyonlarını ve kalınlık değişimini tam anlamıyla temsil edemediğinden ezilme davranışını yüksek hassasiyette yakalayamayacaktır. Yine farklı şekil değiştirmeye maruz kalmış bölgelerin farklı malzeme özellikleri ile modellenerek malzeme özelliklerindeki varyasyon göz önüne alındığı durumda da kalınlık değişimleri yapıda temsil edilemediğinden ezilme davranışı gereken hassasiyette yine yakalanamayacaktır. İkinci yöntem hem kalınlık değişimi hem de artık gerilme/şekil değiştirmeleri de ezilme problemine başlangıç değerleri olarak alacağından çok daha hassas sonuçlar verecektir.

LS-DYNA bünyesinde mevcut “Yeniden Başlatmalı Analiz Tekniği (Restart Analysis Technique)” kullanılarak yarı küresel yapıların ezilme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Öncelikli olarak yapıların derin çekme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen geometriler statik ve düşen kütle testlerinin simülasyonlarında numune olarak kullanılmıştır.

Böylece numuneler üzerindeki kalıcı gerilme ve şekil değiştirmeler ile geometrik varyasyonlar da hesaba katılmıştır.

Hem derin çekme hem de statik ezilme simülasyonlarında kütle ölçekleme (mass scaling) metodu kullanılarak çözüm zamanları makul sınırlarda tutulmuştur. Kütle ölçekleme yönteminde numune malzemesinin yoğunluğu 1000 kat azaltılırken, simülasyonun yükleme hızı 100 kat artırılmaktadır. Simülasyon süresince kinetik enerji değişimi değerinin toplam enerjinin %4'ünden daha az değerlerde kaldığı tespit edilmiştir. Toplam enerji / kinetik enerji oranının düşük seviyelerde tutulması simülasyonun statik deformasyon karakteristiklerini verip veremeyeceğinin tespiti açısından bir referans parametredir.

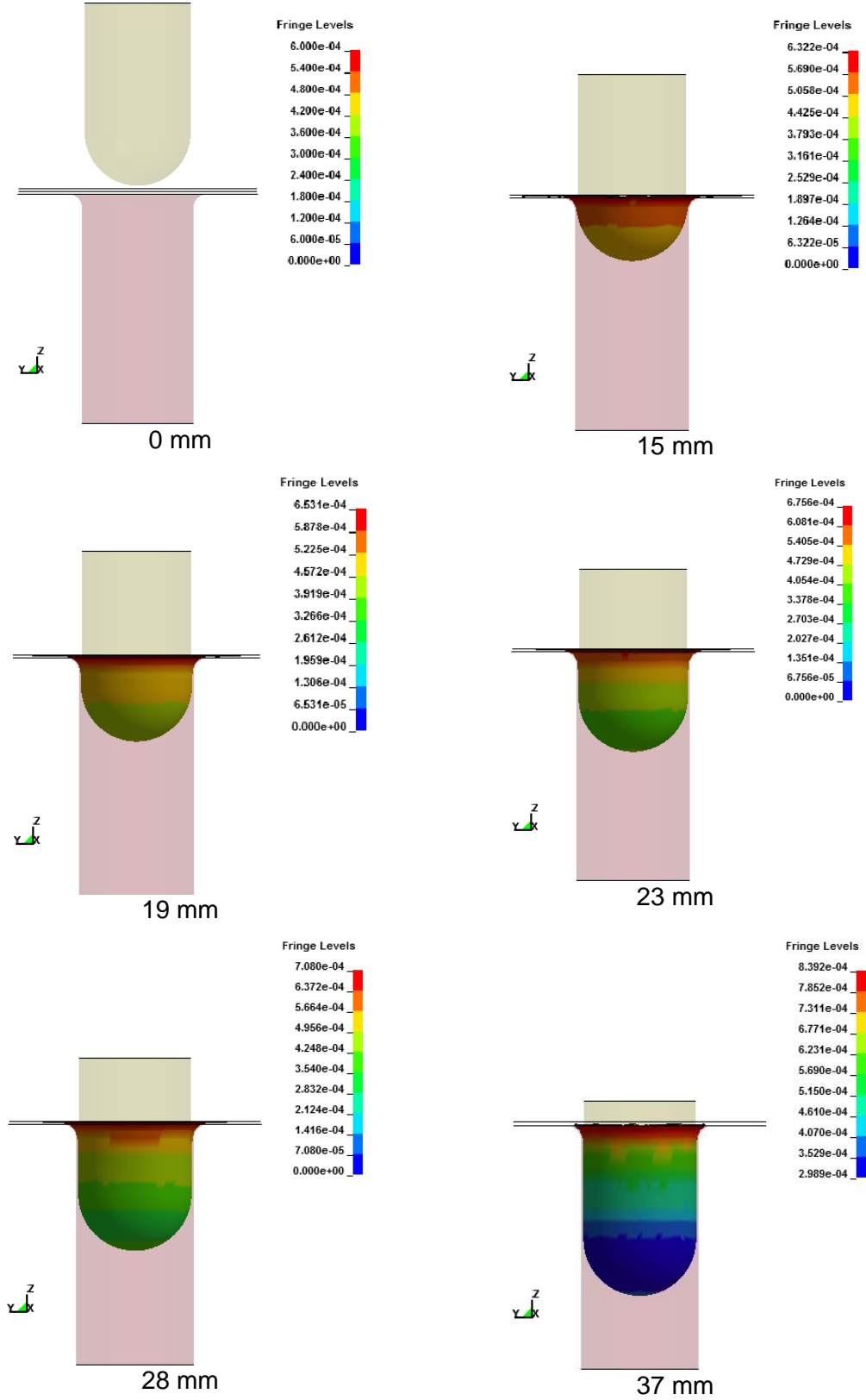
Derin çekme simülasyonunda model dört parçadan oluşmaktadır; zımba, iş parçası tutucusu, iş parçası ve kalıp. Nümerik modelleme iş akışı Şekil 49'da verilmiştir.



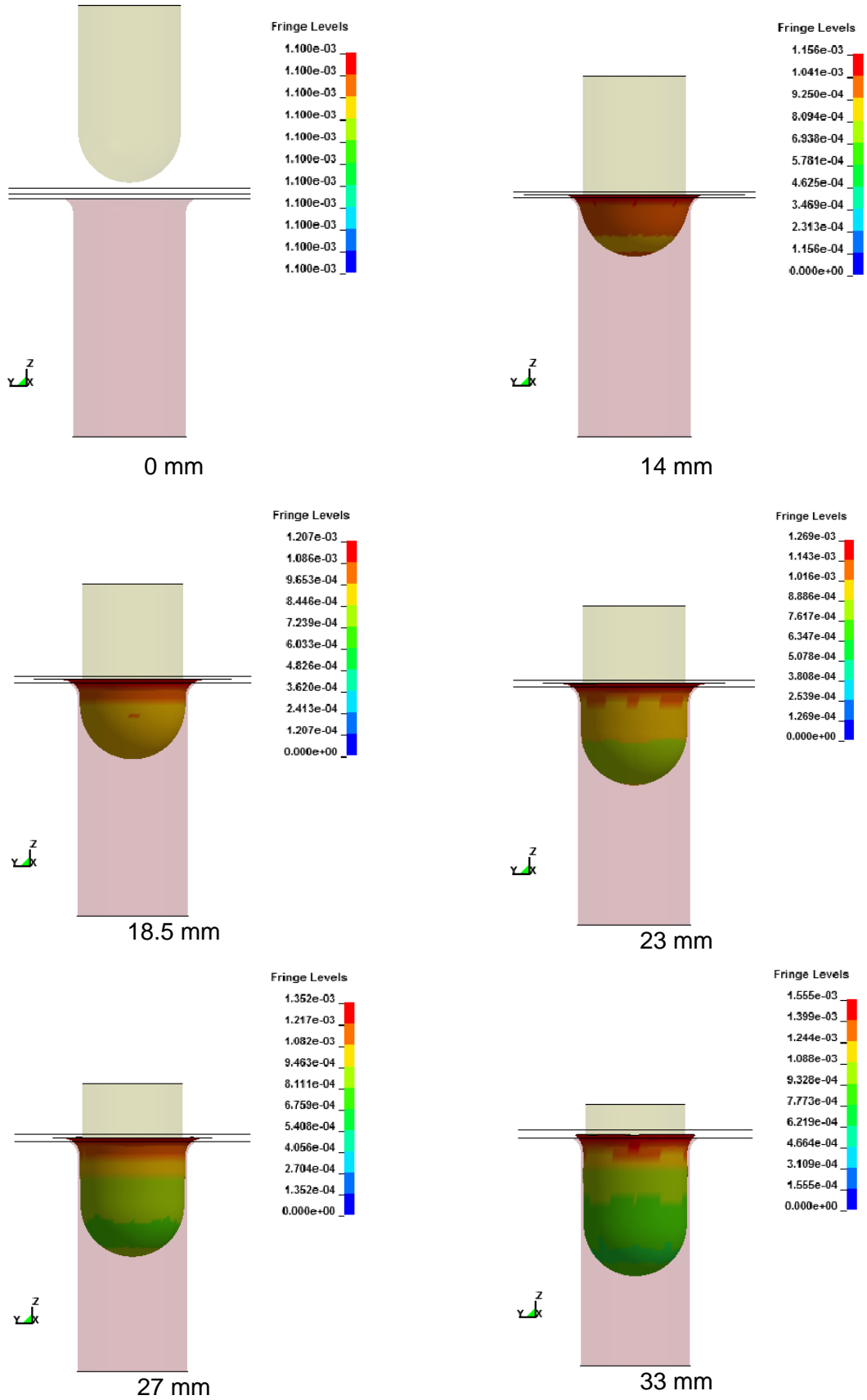
Şekil 49. Nümerik modelleme iş akışı.

Tüm bu parçalar kalınlık boyunca beş integrasyon noktasına sahip Belytschko-Tsay kabuk (shell) elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Zımba, iş parçası tutucusu ve kalıp rijit kabul edilmiştir. İş parçasının kendi katları arasındaki teması modellemek için AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE temas algoritması kullanılmıştır. İş parçasının diğer parçalar ile arasındaki temasını modellemek amacıyla CONTACT\_FORMING\_ONE\_WAY\_SURFACE\_TO\_SURFACE temas algoritması kullanılmıştır. Statik sürtünme katsayısı 0,2 ve dinamik sürtünme katsayısı 0,1 olarak

alınmıştır. R125T05 ve R125T1 numunelerine ait derin çekme nümerik simülasyonu sonuçları yer değiştirmeye bağlı olarak Şekil 50 ve 51'de verilmiştir.

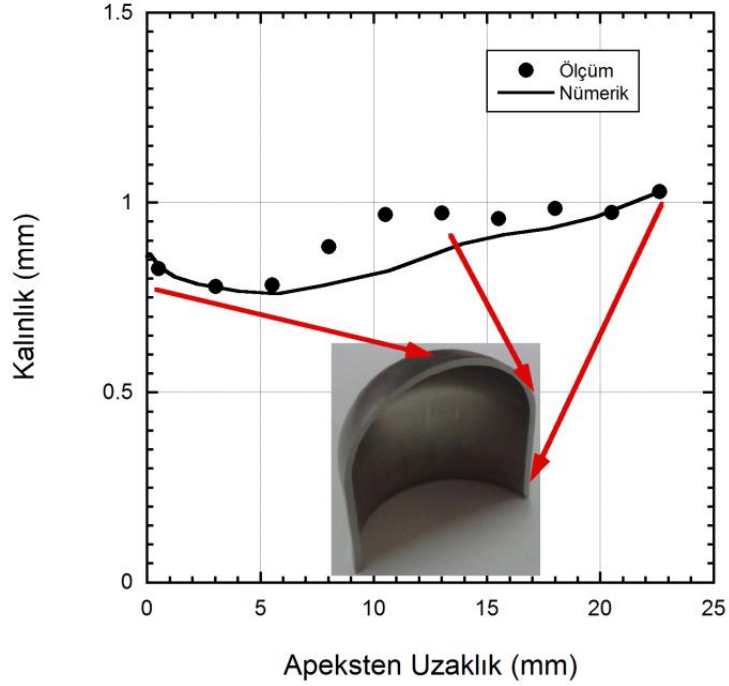


Şekil 50. R125T05 numunesi derin çekme simülasyonu (konturlar kalınlık değerleridir).

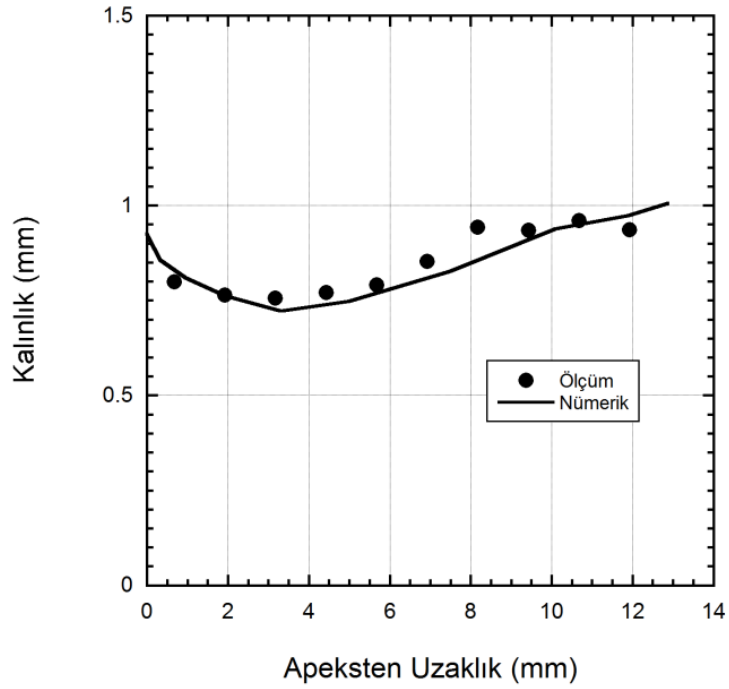


Şekil 51. R125T1 numunesi derin çekme simülasyonu (konturlar kalınlık değerleridir).

Malzeme modeli sabitlerinin doğrulanmasının ilk adımı olan derin çekme simülasyonlarından elde edilen bir sonuç da malzeme kesiti boyunca kalınlık değişimidir. Şekil 52'de numune kalınlığının apeksten uzaklığa göre değişimi R125T1 ve R75T1 numuneleri için verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 52. Numune kalınlığının apeksten uzaklığa göre değişimi; (a) R125T1 ve (b)R75T1 numuneleri.

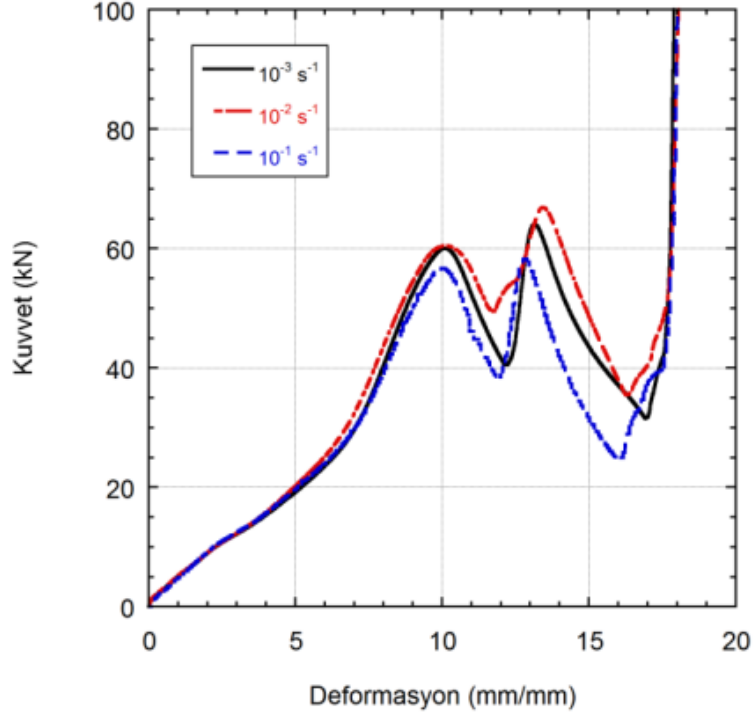
İki yarı küresel geometri için de ölçüm sonuçlarının simülasyon sonuçları ile uyum içinde oldukları görülmektedir. Bu uyumun derecesi sadece yarı küresel bölgenin silindirik bölge ile birleşme noktalarında bir miktar azalmaktadır. Bu bölgelerde ölçülen kalınlık değerleri simülasyon sonucu hesaplanan kalınlık değerlerinden bir miktar daha fazladır, özellikle bu durum R125T1 numunesinde daha belirgin olarak görülmektedir. Görülebileceği gibi iki numune için de yarı küresel bölgeler silindirik kısma göre daha incedir. Ölçüm ve simülasyon sonuçlarındaki belirtilen farkların simülasyon esnasında sabit sürtünme katsayısının kullanılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Gerçek derin çekme prosesinde sürtünme katsayısı lokal olarak deformasyon ile birlikte değişebilmektedir. Bu değişim özellikle kavisli ve kademeli bölgelerde fazlaca görülebilir. Yarı küresel ve silindirik bölgelerin birleşim noktalarındaki artan sürtünme katsayısı ise derin çekme prosesi boyunca görece üniform olmayan deformasyonlara dolayısıyla ölçülen ve hesaplanan kalınlık değişimlerinde farklara sebep olabilir. Yine de nümerik simülasyon sonuçlarının kalınlık dağılımlarının genel eğilimlerini başarılı bir şekilde yakaladığı ve en büyük değişimin yarı küresel kısımda bulunduğu sonuçlarda açık bir şekilde görülebilir.

## **5.2 Çekirdek Malzemelerinin Statik ve Orta Hızlarda Ezilme Davranışlarının İncelenmesi**

Çekirdek malzemeleri için belirlenen malzeme modeli sabitlerinin ve oluşturulan nümerik numunelerin doğrulanması işlemi daha sonra yapılacak olan patlama simülasyonlarının doğruluğu açısından önemlidir. Bu bölümün ilk kısmında yarı küresel nümerik numunelerin oluşturulması ve hesap edilen kalınlık değerlerinin numunelerden alınan ölçümlerle karşılaştırılması yapılmıştır. Ölçüm ve simülasyon sonuçları arasındaki uyum açıktır. Bu kısımda ise malzeme modeli sabitlerinin doğrulanması amacıyla yarı küresel çekirdek malzemelerinin statik ve orta hızlardaki ezilme ve enerji emme karakteristikleri deneysel ve nümerik metodlar entegre edilerek gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında statik ezilme testleri 300 kN kapasiteye sahip Shimadzu AG-X üniversal çekme basma test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testler çerçevesinde R125T1 çekirdek yapısının testleri  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  ve  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  eşdeğer silindirik malzeme deformasyon hızlarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 53'de bu testlerin sonuçları sunulmuştur. Görülebileceği üzere yarı küresel kısmın deformasyonu 10 mm'ye kadar sürmekte bu noktada burkulma tamamlanıp silindirik kısmın ezilmesi başlamaktadır. Deney sonucuna göre, yarı küresel kısmın emdiği enerji 235 J olarak hesaplanmıştır. Deneyin devamında, yarı küresel kısmın deformasyonu ile birlikte silindirik kısmın burkulması gerçekleşmiştir. Bu aşamada emilen enerji ise 358 J olarak hesaplanmıştır. Buna göre, tüm yapının densifikasyonunun başlamasına kadar emilen enerjinin yaklaşık %40'ı yarı kürenin

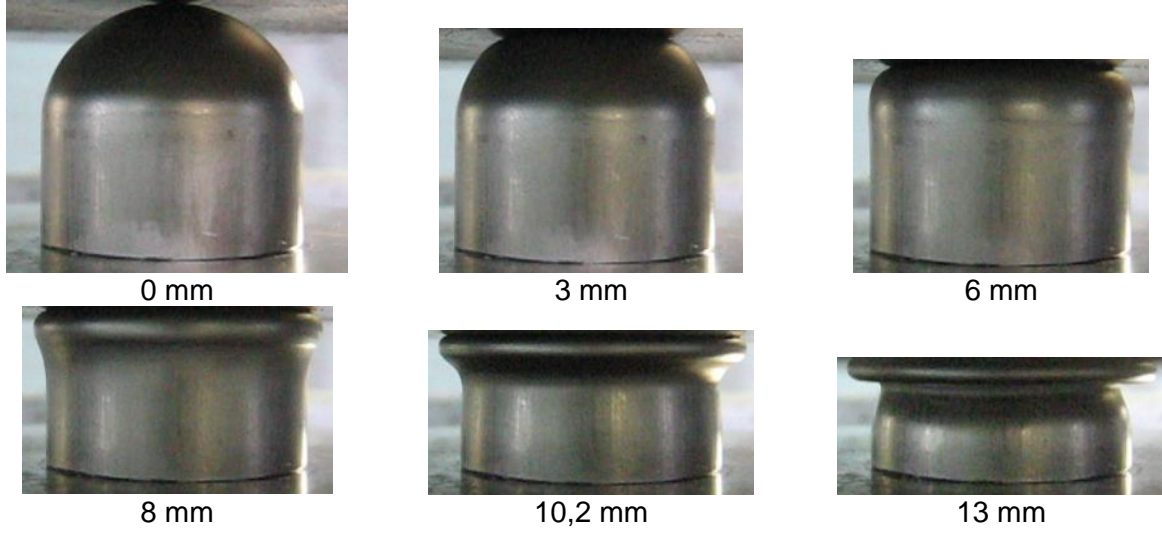
burkulması ile emilmiş kalan yaklaşık %60'lık enerji Emilimi ise yarı kürenin deformasyonunun devamı ve silindirik kısmın burkulması ile gerçekleşmiştir. Yaklaşık 18 mm ezilmeden sonra tüm yapıda densifikasyon başlamıştır. Deney sonuçlarına göre, kuasi-statik rejimdeki hız değişimleri, geometrinin ezilme davranışında değişikliğe sebebiyet vermemiştir.



Şekil 53. R125T1 numunesinin kuasi-statik ezilme test sonuçları.

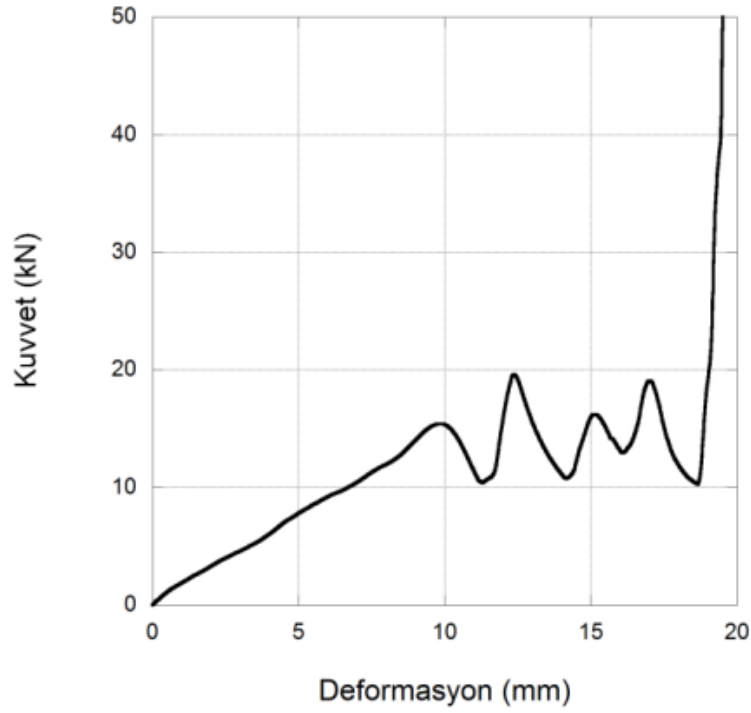
Şekil 54'de R125T1 yarı küresel çekirdek yapıları üzerinde gerçekleştirilen kuasi-statik ezilme testlerinin görüntüleri bulunmaktadır. Şekil 54'den görülebileceği gibi 3 mm ezilmiş numune literatürde yerel düzleşme (local flattening) olarak bilinen modu, 6 mm ezilmiş numune aksenal simetrik içe doğru çukurlaşma (axisymmetric inward dimpling) modunun tipik şeklini göstermektedir. 8 mm'lik ezilme de aksenal simetrik içe çukurlaşma modu devam etmekte ve yarı küresel kısmın burkulması gözle görülür bir hale gelmektedir. 10,2 mm'lik ezilme ile numunenin silindirik kısmının ezilme başlangıcı görülmektedir. Testin devamında 13 mm'lik ezilme ile silindirik kısmında burkulma başlangıcı gözlemlenmiştir. Ezilmiş numuneler incelendiğinde, yarı küresel kısımlarda asimetrik lob oluşumunun gözlenmediği tespit edilmiştir.





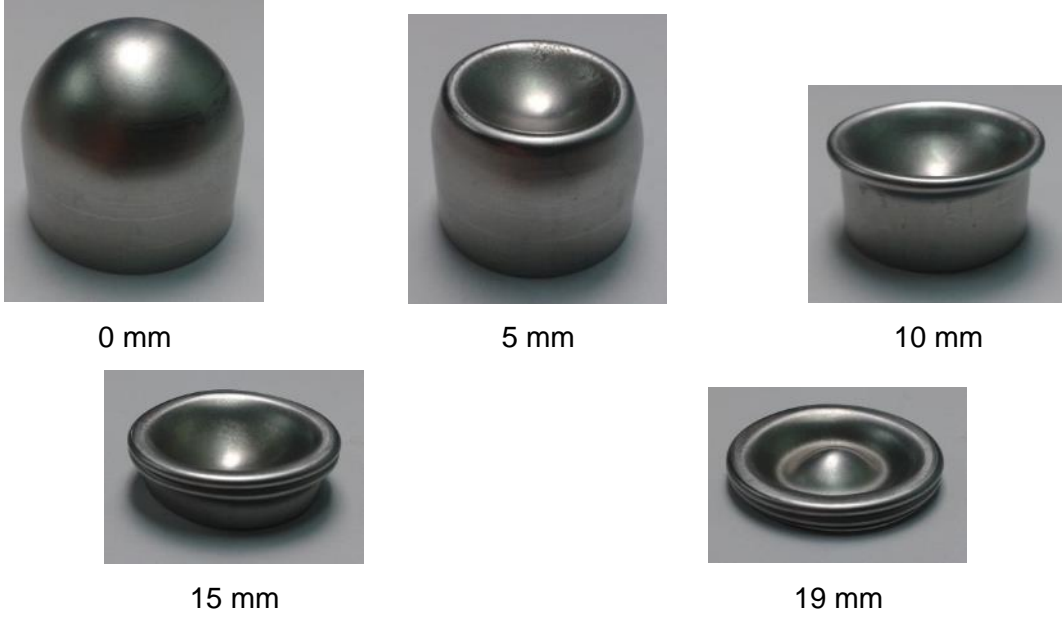
Şekil 54. R125T1 numunesi kuasi-statik ezilme tarihçesi.

R125T05 ve diğer yarı küreler  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  deformasyon hızlarında (eşdeğer silindirik malzeme) ezilmişlerdir. Şekil 55'de test sonuçları sunulmuştur. Yarı küresel üst kısmın deformasyonu yaklaşık 10 mm'ye kadar sürmekte ve bu noktada silindirik kısmın ezilmesi başlamaktadır. Deneysel sonuçlara göre yarı küresel kısmın emdiği enerji 74 J olarak hesaplanmıştır. Deneyin devamında yarı küresel kısmın deformasyonu ile birlikte silindirik kısmın burkulması gerçekleşmiştir. Bu aşamada emilen enerji 129 J olarak hesaplanmıştır. Buna göre tüm yapının densifikasyonunun başlamasına kadar emilen enerjinin yaklaşık %36'sı yarı kürenin ezilmesi ile emilmiş geriye kalan yaklaşık %64'lük enerji emilimi ise yarı kürenin deformasyonunun devamı ve silindirik kısmın burkulması ile gerçekleşmiştir. Yaklaşık 18,8 mm ezilmeden sonra tüm yapıda densifikasyon başlamıştır.



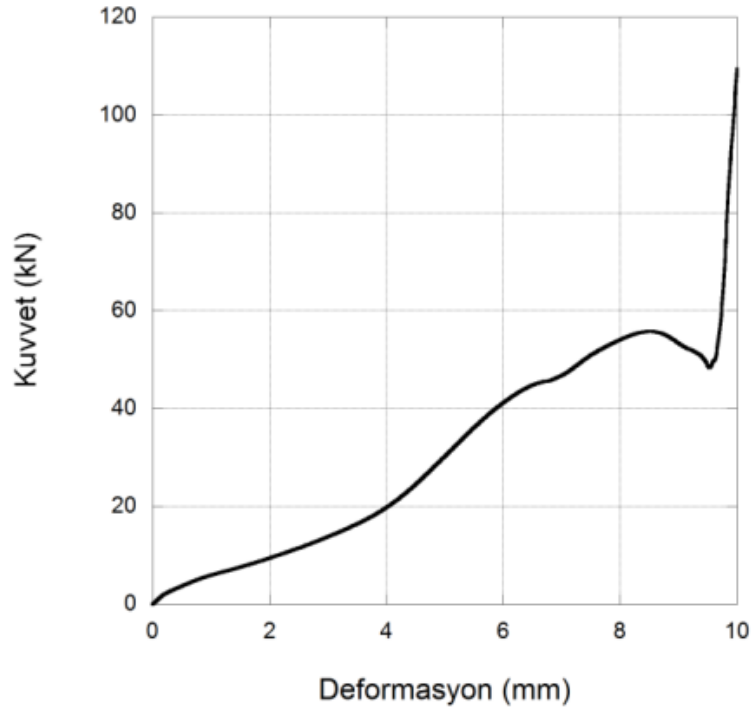
Şekil 55. R125T05 numunesinin statik ezilme test sonuçları.

Şekil 56'da R125T05 yarı küresel çekirdek yapıya ait statik ezilme test görüntüleri bulunmaktadır. Şekilden görülebileceği gibi 5 mm ezilmiş numunede literatürde aksel simetrik içe doğru çukurlaşma (axisymmetric inward dimpling) olarak bilinen mod gözlemlenmektedir. 10 mm'lik ezilmede ise aksel simetrik içe çukurlaşma modu devam etmekte ve ilerleyen plastik deformasyon bölgesinin çapı büyüyerek yarı küresel kısmın burkulması gözle görülür hale gelmektedir. Bu aşamadan sonra silindirik kısmın ezilmesi başlamaktadır. 15 mm'lik ezilme görüntüsünde silindirik kısmın burkulmasından kaynaklı iki kat oluşumu açık bir şekilde görülmektedir. Testin devamında silindirik kısmın burkulmasının devam ettiği ve silindirik kısmın alt bölgesinin dışa doğru katlanarak ezilme eğrisinde yerel maksimum noktası oluşturduğu gözlemlenmiştir. Testin devamı ile birlikte ters dönen yarı küresel kısmın tekrar dışa döndüğü ve tüm katların birlikte densifikasyona uğradığı tespit edilmiştir. Hem yarı küresel kısmın hem de silindirik kısmın deformasyonunun simetrik modda olduğu söylenebilir.



Şekil 56. R125T05 numunesi statik ezilme tarihçesi.

Testlere 7,5 mm yarıçap ve 1,0 mm kalınlıkdaki yarı kürelerin ezilmesi ( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) ile devam edilmiştir (Şekil 57). Şekilden de görülebileceği üzere deformasyon başlangıcından yaklaşık 7 mm'ye kadar olan kısım bilineer davranış sergilemektedir. Bu aşamada yerel maksimuma ulaşan kuvvet deformasyonun ilerleyişi ile tekrar yükselmeye başlamış ve 8,5 mm civarında (densifikasyon kısmı hariç) global maksimum kuvvete ulaşmıştır. 9,5 mm'den sonra tüm yapıda densifikasyon başlamıştır. Yapının deformasyonu sırasında yapılan kamera kayıtlarından 7 mm'lik kısma karşılık gelen bilineer bölgenin yarı küresel kısmın deformasyonu ile ilgili olduğu görülmektedir (Şekil 58). Yarı küresel kısmın deformasyonu ile emilen enerji 122 J olarak hesaplanmıştır. Bu deformasyon miktarından densifikasyonun başladığı deformasyon miktarına kadar emilen enerji 157 J olarak hesaplanmıştır. Tüm yapının densifikasyon başlangıcına kadar emilen enerjinin yaklaşık %44'ü yarı kürenin burkulması ile emilmiştir. Geriye kalan yaklaşık %56'lık enerji emilimi ise yarı kürenin deformasyonunu devamı ve silindirik kısmın burkulması ile gerçekleşmiştir.



Şekil 57. R75T1 numunesinin statik ezilme test sonuçları.

Şekil 58’de R75T1 yarı küresel çekirdek yapıları üzerinde gerçekleştirilen statik ezilme testlerinin görüntüleri verilmiştir. 4 mm ezilmiş numunede aksel simetrik içe doğru çukurlaşma (axisymmetric inward dimpling) modu tipik şeklini göstermektedir. 7 mm’lik deformasyondan sonra yarı küresel kısmın deformasyonunun bittiği ve silindirik kısmın deformasyonunun başladığı, silindirik kısımdaki burkulma başlangıcı görüntüsünden anlaşılabilir. 9 mm’lik ezilme görüntüsünde silindirik kısmın burkulmasından oluşan kat açık bir şekilde görülmektedir. Testin devam ettirilmesi ile birlikte ters dönen yarı küresel kısmın tekrar dönmeden tüm katların birlikte densifikasyona uğradığı tespit edilmiştir. Hem yarı küresel kısmın hem de silindirik kısmın deformasyonu simetrik mottadır.



0 mm



4 mm



7 mm



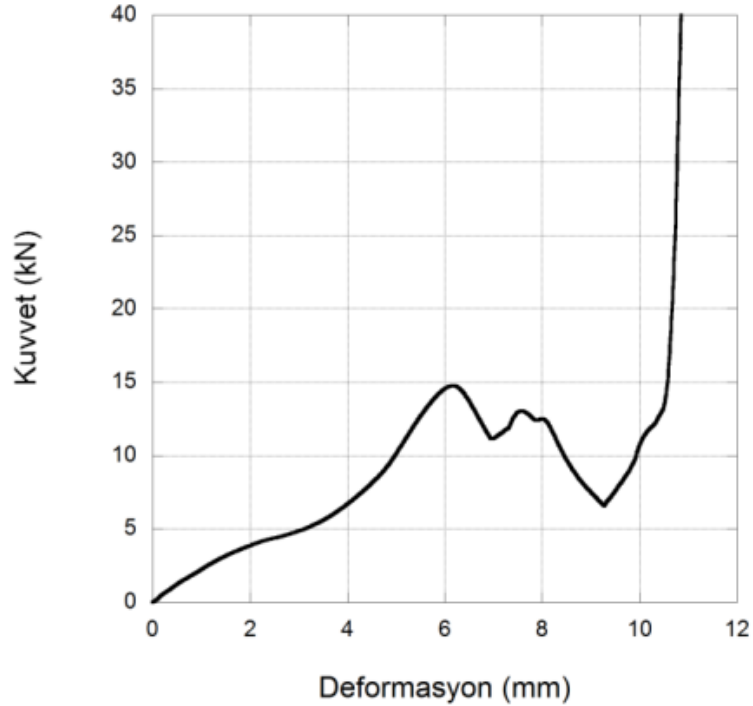
9 mm



10 mm

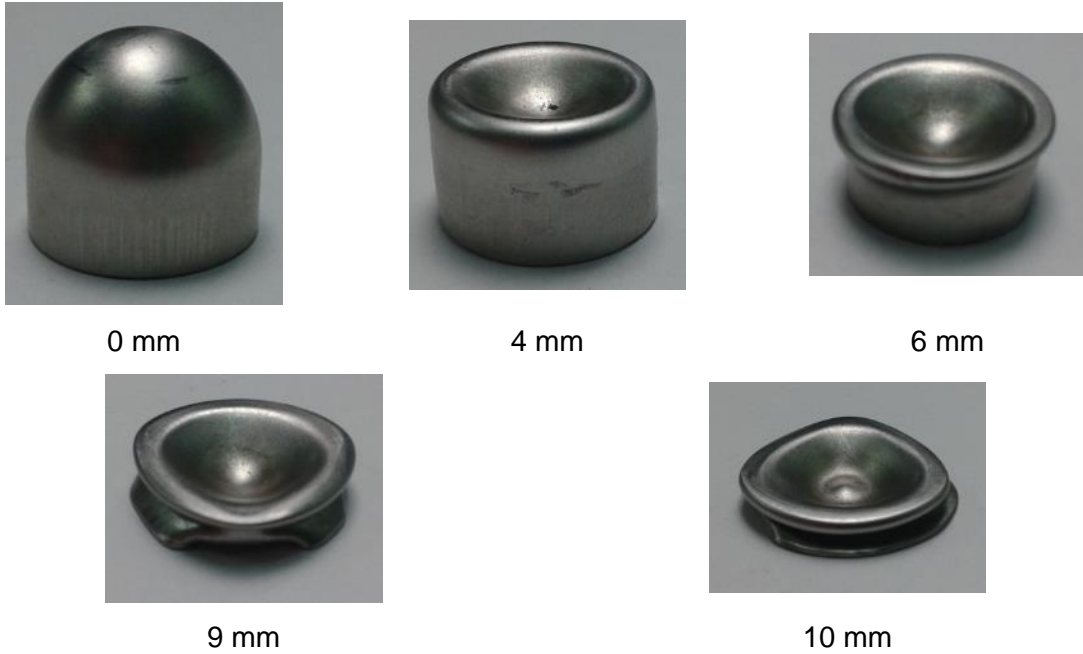
Şekil 58. R75T1 numunesi statik ezilme tarihçesi.

Statik testlere son alternatif konfigürasyon olan R75T05 yarı küreler ( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) ile devam edilmiştir. Şekil 59'da test sonuçları sunulmuştur. Deformasyon başlangıcından yaklaşık 6 mm'ye kadar olan kısım bilineer davranış göstermektedir. Bu aşamada yerel maksimuma ulaşan kuvvet sonra tekrar yükselmeye başlamış ve 7,5 mm civarında ikinci bir yerel maksimum kuvvet gözlenmiştir. 6 mm'lik kısma karşılık gelen bilineer bölgenin yarı küresel kısmın deformasyonu ile ilgili olduğu açıktır. Buna göre yarı küresel kısmın deformasyonu ile emilen enerji 38 J olarak hesaplanmıştır. Bu deformasyon miktarından densifikasyonun başladığı deformasyon miktarına kadar emilen enerji ise 47 J olarak hesaplanmıştır. Tüm yapının densifikasyonunun başlamasına kadar emilen enerjinin yaklaşık %45'i yarı kürenin burkulması ile emilmiş kalan yaklaşık %55'lik enerji emilimi ise yarı kürenin deformasyonunu devamı ve silindirik kısmın burkulması ile gerçekleşmiştir.



Şekil 59. R75T05 numunesinin statik ezilme test sonuçları.

Şekil 60'da bu numuneye ait ezilme tarihçesi verilmiştir ve 4 mm ezilmiş numunede aksel simetrik içe doğru çukurlaşma (axisymmetric inward dimpling) modu tespit edilmiştir. 6 mm'lik deformasyondan sonra ise yarı küresel kısmın deformasyonunun bittiği ve silindirik kısmın deformasyonunun başladığı silindirik kısımdaki burkulma başlangıcından anlaşılabilir. 9 mm'lik ezilme görüntüsünde silindirik kısmın burkulmasından kaynaklı asimetrik bir lob açık şekilde görülmektedir. Bu asimetrik lob oluşumu Şekil 59'daki grafikte ikinci lokal maksimumda gözlenebilir. Testin devam ettirilmesi ile birlikte terse dönen yarı küresel kısmın tekrar düze döndüğü ve tüm katların birlikte densifikasyona uğradığı tespit edilmiştir. 9 mm ve 10 mm'lik deformasyon görüntülerinden de anlaşılacağı üzere hem yarı küresel kısmın hem de silindirik kısmın deformasyonu asimetriktir.



Şekil 60. R75T05 numunesi statik ezilme tarihçesi.

Tablo 9'da yarı küresel çekirdek malzemelerin statik ezilme testleri sırasında emdikleri enerjiler toplu halde görülmektedir. Görülebileceği gibi tüm konfigürasyonlar için toplam emilen enerjilerin yaklaşık ortalama %40'ı yarı küresel kısmın deformasyonu ve geriye kalan %60'lık kısmı ise silindirik kısmın burkulması (kısmen de olsa yarı küresel kısmın ilerleyen deformasyonu) ile emilmektedir. Toplam emilen birim enerji değerleri karşılaştırıldığında alternatif konfigürasyonlardan en az kütle ile en çok enerjiyi emen konfigürasyon 7,5 mm yarıçap ve 1,0 mm kalınlık olan, en az olan ise 12,5 mm yarıçap ve 0,5 mm kalınlık olan yarı küresel çekirdek malzemesi olarak tespit edilmiştir. Görülebileceği gibi 12,5 mm yarıçapındaki çekirdek malzemelerinde kalınlığın artışı ile yarı küre tarafından emilen enerji yüzdesi artmışken, kalınlığın artışı 7,5 mm yarıçapındaki çekirdek malzemeleri

üzerinde tersi bir etki yaratmıştır. Aynı kalınlıktaki malzemeler arasında karşılaştırma yapıldığında, yarıçaptaki artışın yarı küre tarafından emilen enerji yüzdesini azalttığı ve silindirik kısım tarafından emilen enerji yüzdesini arttırdığı görülmektedir.

Tablo 9. Statik testler sonucunda yarı küresel çekirdek malzemeleri tarafından emilen enerji.

Numune	Yarı küre tarafından emilen enerji yüzdesi (%)	Silindirik kısım tarafından emilen enerji yüzdesi (%)	Toplam emilen birim enerji (kJ/kg)
R125T1	40	60	49
R125T05	36	64	34
R75T1	44	56	93
R75T05	45	55	43

Yarı küresel yapıların statik ezilme davranışlarının deneysel olarak incelenmesinin tamamlanmasının ardından orta şekil değiştirme hızlarındaki ezilme davranışlarının incelenmesine başlanmıştır. Bu amaçla düşen ağırlık testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde Fractovis Plus düşen ağırlık test cihazı kullanılmıştır. Bahsedilen test cihazı 25 m/s'lik maksimum düşen kütle hızına ulaşabilmekte ve 70 kg'a kadar düşen ağırlıklar testlerde kullanılabilir. Farklı kapasitelerde piezoelektrik sensörlü ve gerinim ölçerli vurucular mevcuttur. Bu çalışmada 90 kN'luk gerinim ölçerli vurucu 70 mm çapında silindirik bir ezme kafası ile birlikte kullanılmıştır.

Gerçekleştirilen testlerin kaydedilebilmesi yarı küresel çekirdek malzemelerin ezilme davranışlarının incelenebilmesi açısından oldukça önem arz etmektedir. Bu amaçla tüm testler Photron FastCam yüksek hızlı kamera (10000 fps) ile kaydedilmiştir.

Testlerde kullanılması gereken kütle miktarları ve düşen ağırlık hızları numune boyutlarına göre değişmektedir. Aynı boydaki numuneler her iki kalınlık değeri için de aynı hızda test edilmiş ve statik testlerden belirlenen enerji emme verileri kullanılarak düşen ağırlık miktarları belirlenmiştir. 12,5 mm yarıçaplı numuneler 9,1 m/sn ve 7,5 mm yarıçaplı numuneler 5,1 m/sn hızlarında test edilmişlerdir.

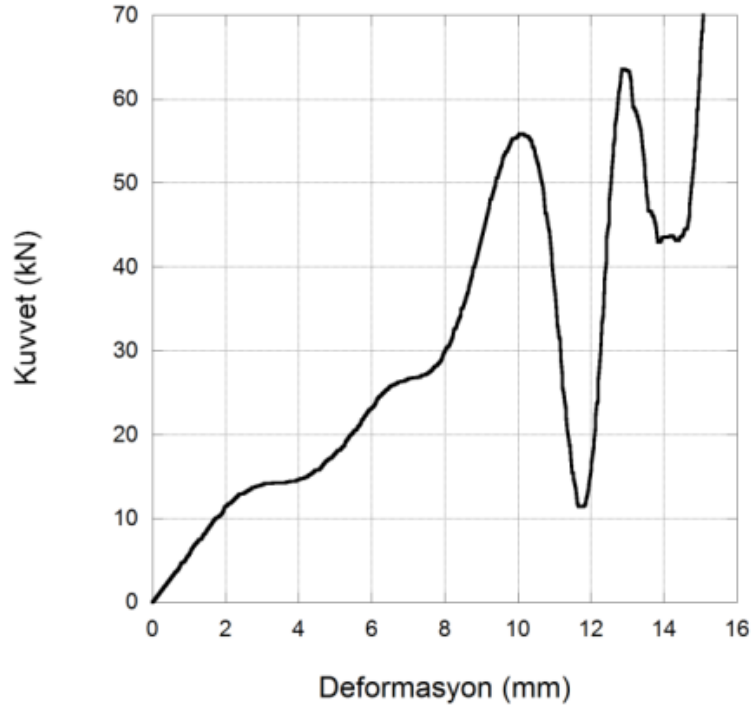
Test şartları Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. Düşen ağırlık test şartları.

Numune	Düşen ağırlık (kg)	Hız (m/sn)
R125T1	14,4	9,1
R125T05	7,4	9,1
R75T1	23,4	5,1
R75T05	10,4	5,1

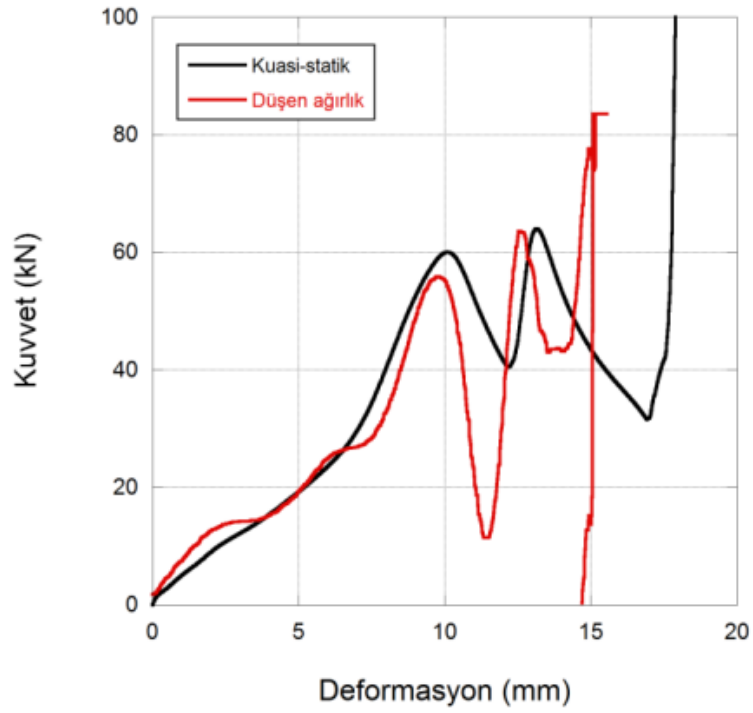
Şekil 61 (a)'da R125T1 numunesinin düşen ağırlık test sonucu görülmektedir. Şekil 61 (b)'de aynı numunenin statik ve dinamik test sonuçları birarada verilmiştir. Statik ve

dinamik deformasyon eğrileri incelendiğinde her ikisinde de bilineer bir ilk bölgenin varlığı ve arkasından 10 mm deformasyondan sonra lokal bir maksimuma ulaşıldığı görülebilir. İkisinde de bu lokal maksimumdaki kuvvet değeri yaklaşık 60 kN olarak bulunmuştur. Statik test sonucunda olduğu gibi silindirik kısmın ezilmesi ile birinci lokal maksimumdan daha yüksek bir ikinci lokal maksimum gözlemlenmiştir. Statik testten farklı olarak numunede daha erken bir densifikasyon meydana geldiği grafikten görülebilir. Bunun sebebi, numunede, silindirik kısmın burkulması tamamlanmadan meydana gelen hasardır. Şekil 62'de ilgili ayrıntı mevcuttur.



(a)

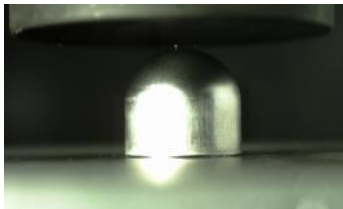




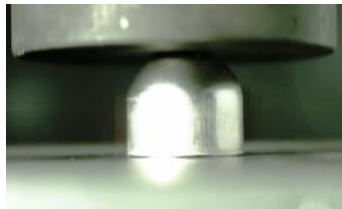
(b)

Şekil 61. (a) R125T1 numunesinin düşen ağırlık ezilme test sonuçları, (b) statik ve düşen ağırlık test sonuçları.

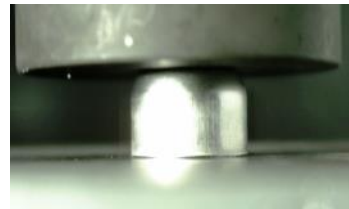
Şekil 62 (a)'da R125T1 yarı küresel çekirdek yapı üzerinde gerçekleştirilen düşen kütle ezilme testlerinin görüntüleri bulunmaktadır. 4 mm ezilmiş numunede aksel simetrik içe doğru çukurlaşma (axisymmetric inward dimpling) modunun başladığı ve bu modun yarıçaptaki artış ile birlikte 13 mm'ye kadar devam ettiği açıktır. Bu noktada yarı küresel kısmın deformasyonunun önemli bölümü tamamlanmakta ve silindirik kısmın deformasyonu başlamaktadır. Ancak 15 mm'lik deformasyonun görüntüsünden ve Şekil 62 (b)'den görülebileceği gibi yarı küresel kısımda oluşan kat bir halka şeklinde numuneden ayrılmıştır. Bu durum grafikte densifikasyon olmadan kuvvet düşümü olarak kendini göstermektedir.



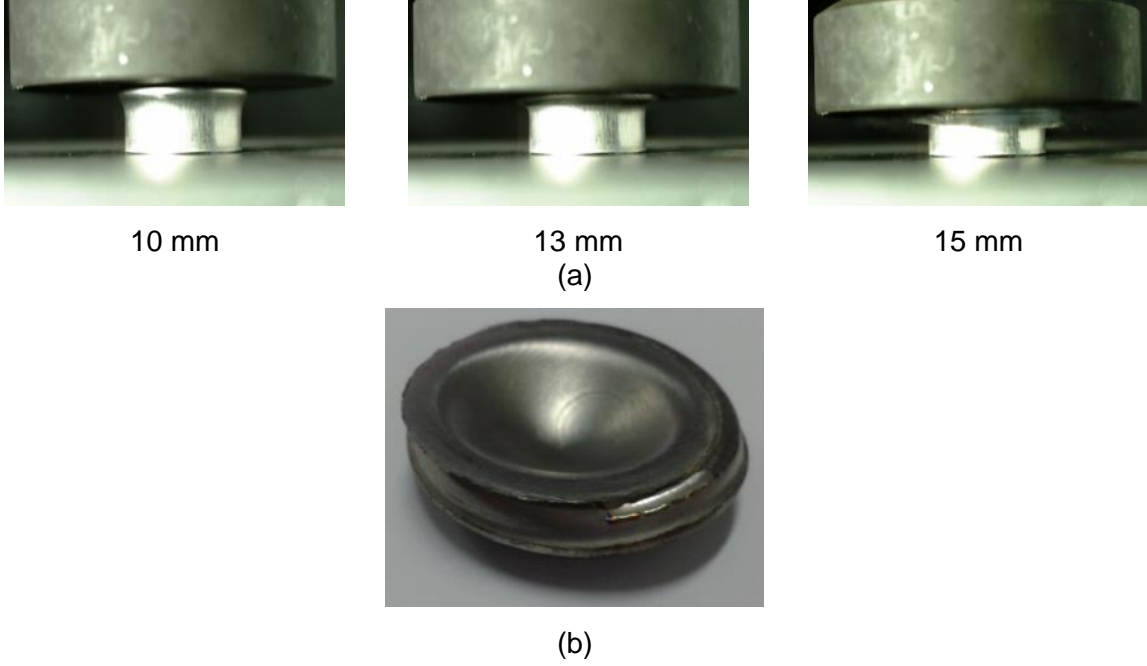
0 mm



3 mm

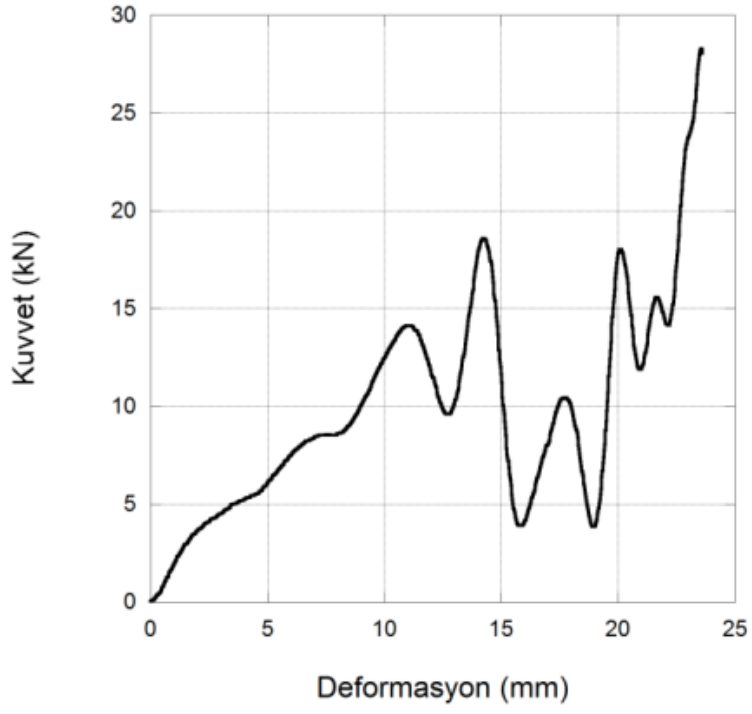


6 mm

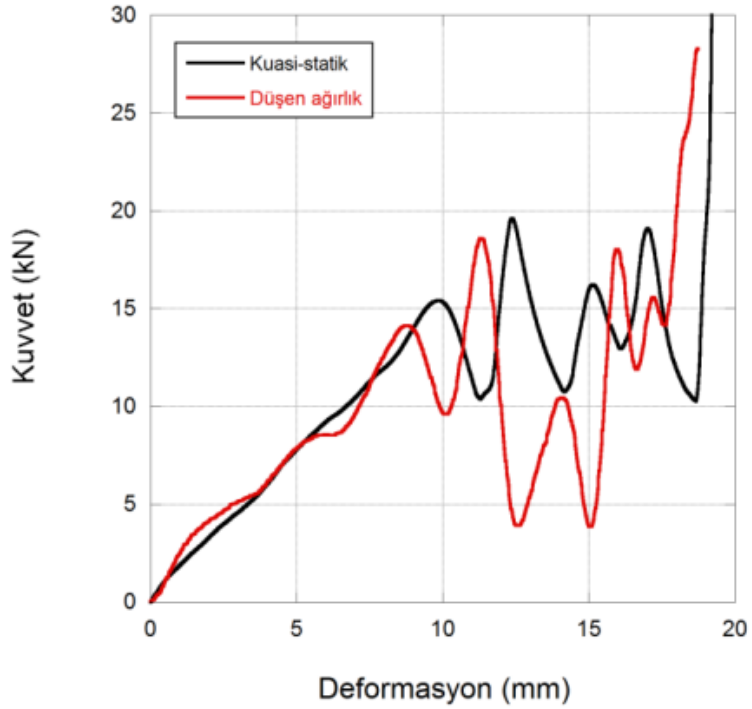


Şekil 62. (a) R125T1 numunesi düşen ağırlık ezilme tarihçesi, (b) test sonucu hasar almış numune.

Şekil 63 (a)'da R125T05 numunesinin düşen ağırlık test sonucu verilmiştir. Şekil 63 (b)'de aynı numunenin statik ve dinamik test sonuçları birarada görülmektedir. Statik ve dinamik deformasyon eğrileri karşılaştırıldığında önceki konfigürasyonda olduğu gibi yaklaşık 10 mm deformasyonda lokal maksimuma ulaşıldığı görülebilir. Dinamik eğri statik eğriden farklı olarak ilk lokal maksimuma kadar lineer olmayan bir davranış göstermektedir. Dinamik test sonucunda statik test sonucunda da varolan tepe noktaları mevcut olup, bu tepelerin gerçekleştiği deformasyon değerlerinde bir kayma görülmüştür. Densifikasyon bölgesinin de kaydığı Şekil 63 (b)'den görülebilir.



(a)

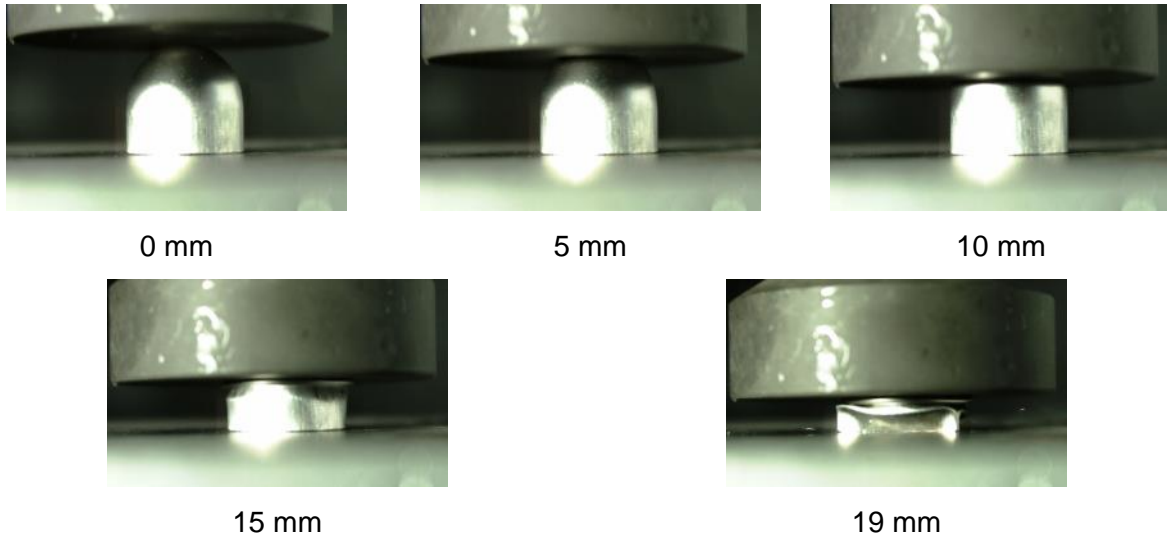


(b)

Şekil 63. (a) R125T05 numunesinin düşen ağırlık ezilme test sonuçları, (b) statik ve düşen ağırlık test sonuçları.

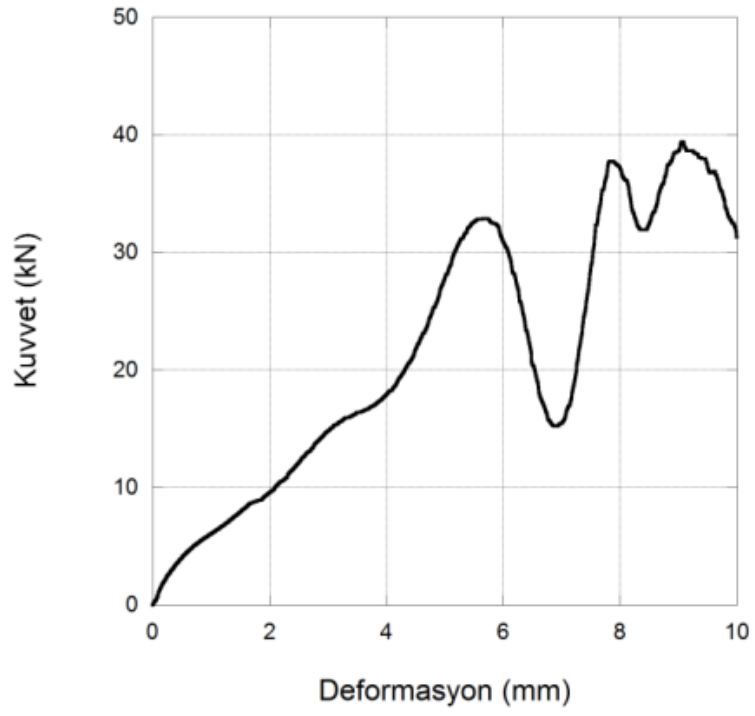
Şekil 64'de R125T05 yarı küresel çekirdek yapıları üzerinde gerçekleştirilen düşen kütle ezilme testlerinin görüntüleri bulunmaktadır. Numunenin ezilmesi, yarı küresel

kısımdaki simetrik içe doğru çukurlaşma modu ile başlamakta ve bu mod 10 mm kadar devam etmektedir. Statik deformasyon profilinden farklı olarak 10 mm'lik kısımda bu modun tamamlanmadığı görülmektedir. Deformasyonun devamında 15 mm'lik görüntü incelendiğinde silindirik kısmın burkulmaya başladığı gözlenmiştir. Statik deformasyon profilinden farklı olan bir diğer kısım da silindirik kısmın asimetrik burkulma davranışı göstermesi ve üç lob oluşturmaktır. Bu da kuvvet-deformasyon eğrilerindeki farkı açıklamaktadır. Geometrik ve malzeme parametrelerinin deformasyon hızına bağlı olarak farklı deformasyon davranışı göstermesi sonucu, statik hızdaki simetrik deformasyon yerine dinamik hızda asimetrik bir burkulma davranışı açıkça gözlenmiştir.

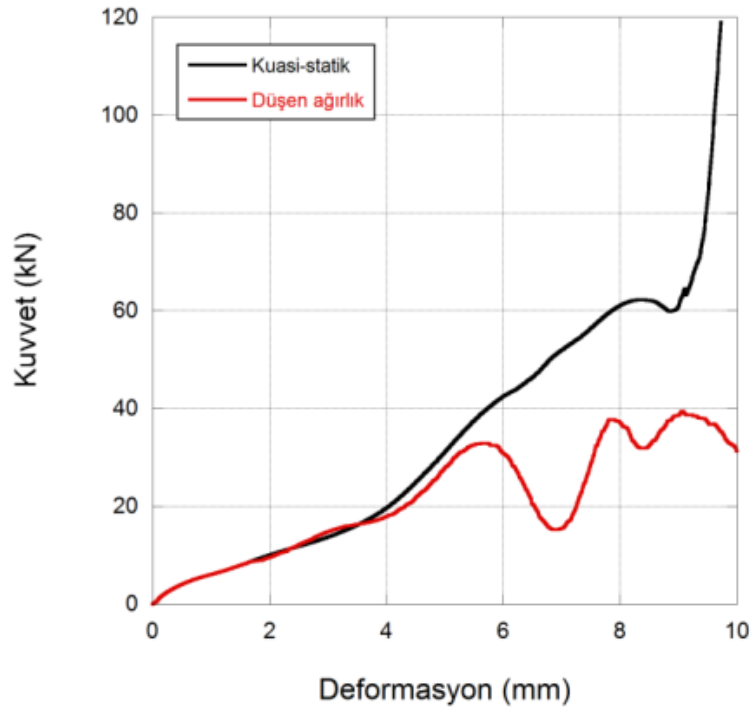


Şekil 64. R125T05 numunesi düşen ağırlık ezilme tarihçesi.

Şekil 65 (a)'da R75T1 numunesinin düşen ağırlık test sonucu görülmektedir. Şekil 65 (b)'de aynı numunenin statik ve dinamik test sonuçları birarada verilmiştir. Statik ve dinamik deformasyon eğrileri incelendiğinde, statik test sonucunda görülen tek lokal maksimum yerine dinamik test sonucunda yapı birden fazla lokal maksimum noktası göstermiştir. Deformasyon hızındaki değişimin deformasyon modunda bir değişikliğe sebebiyet verdiği açıktır.



(a)

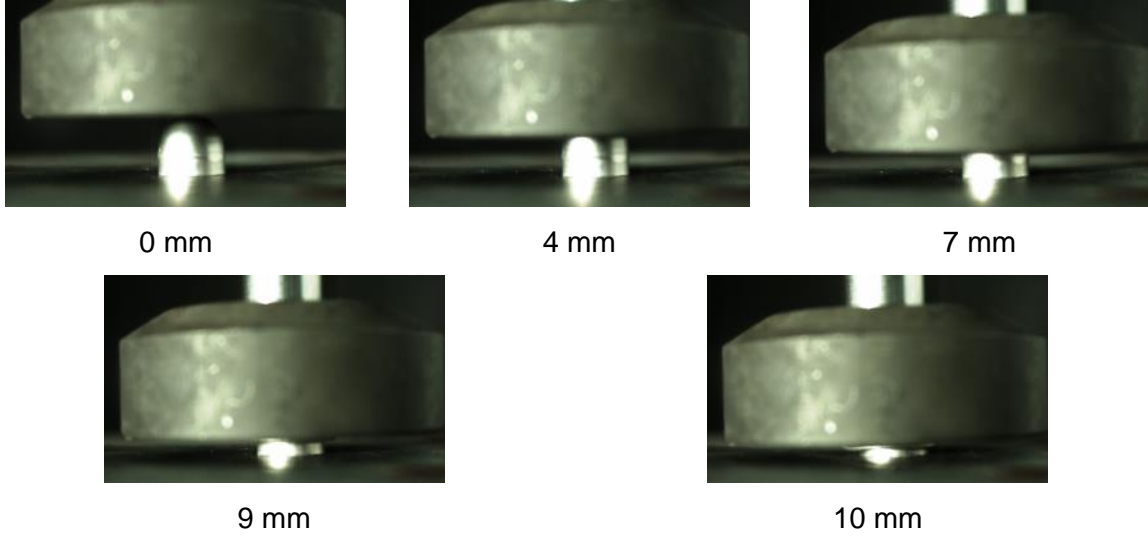


(b)

Şekil 65. (a) R75T1 numunesinin düşen ağırlık ezilme test sonuçları, (b) statik ve düşen ağırlık test sonuçları.

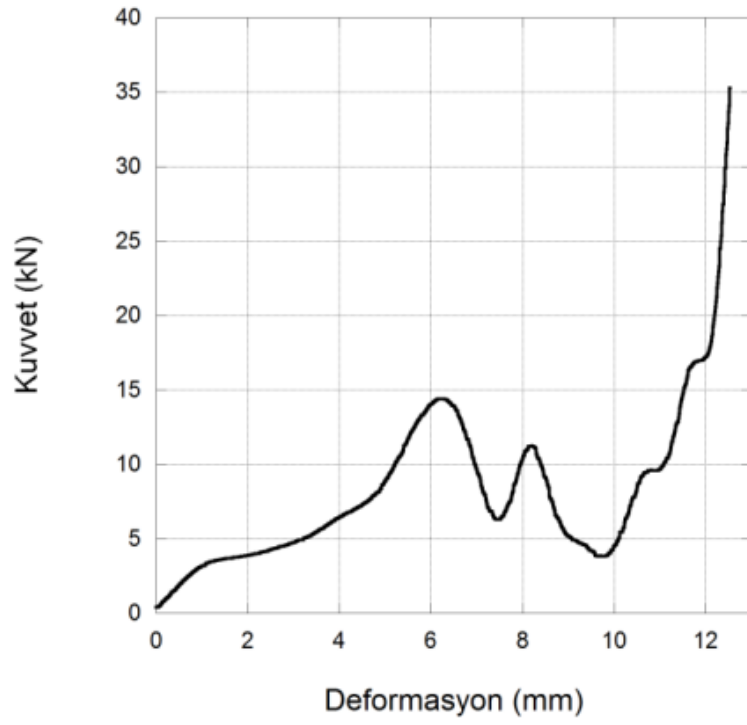
Şekil 66'da R75T1 yarı küresel çekirdek yapıları üzerinde gerçekleştirilen düşen kütle ezilme testlerinin görüntüleri verilmektedir. Diğer numunelerde de görülen simetrik içe doğru

çukurlaşma modu bu numunede de görülmüştür. 9 mm' lik deformasyon görüntüsü incelendiğinde yarı küresel kısmın deformasyonunun bittiği ve silindirik kısmın deformasyonunun başladığı görülmektedir. 10 mm'lik deformasyon görüntüsünden de görülebileceği gibi test ilerledikçe yarı küresel kısmın hasara uğrayarak yapıdan halka şeklinde ayrıldığı görülmüştür. Bu da statik eğri ile dinamik eğri arasındaki farka sebebiyet vermektedir.

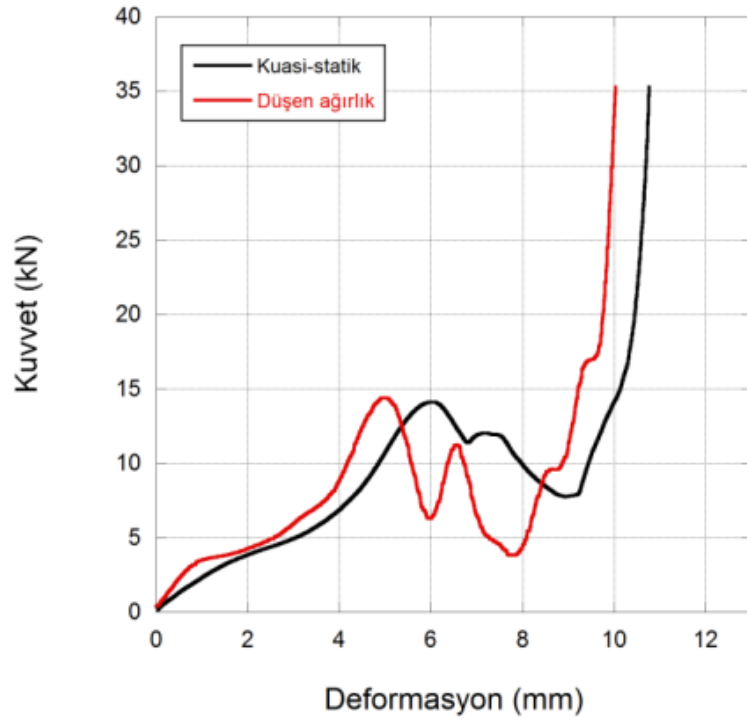


Şekil 66. R75T1 numunesi düşen ağırlık ezilme tarihçesi.

Şekil 67 (a)'da R75T05 numunesinin düşen ağırlık test sonucu görülmektedir. Şekil 67 (b)'de aynı numunenin statik ve dinamik test sonuçları birarada verilmiştir. Statik ve dinamik deformasyon eğrileri incelendiğinde düşen ağırlık testi sonucunda elde edilen modun statik test sonucunda elde edilene yakın olduğu görülmektedir. Yarı küresel kısmın deformasyonuna karşılık gelen ilk kısım statik testte bilineerken düşen ağırlık testinde üç farklı eğimden oluşan parçalı bir eğridir. Yaklaşık 6 mm'lik deformasyon sonucunda 15 kN'luk bir lokal maksimum görülmüştür. Statik eğriden daha yüksek bir kuvvet düşümü oluşmuş ve ikinci lokal maksimum hemen hemen aynı değerinde gözlemlenmiştir. İkinci lokal maksimum ve densifikasyon deformasyon değerlerinde 1-2 mm kayma olduğu görülmüştür.



(a)

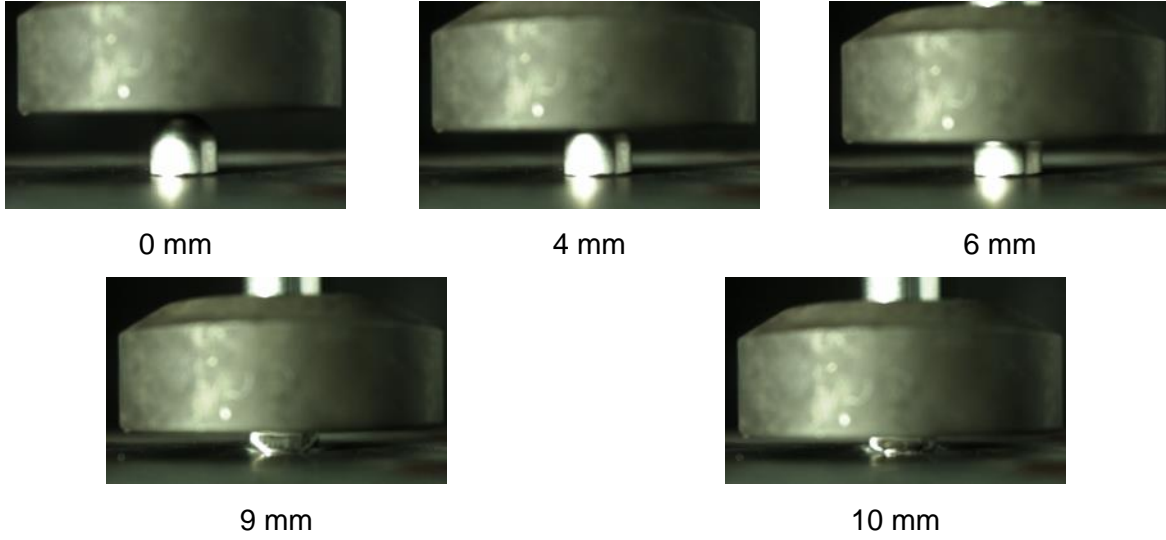


(b)

Şekil 67. (a) R75T05 numunesinin düşen ağırlık ezilme test sonuçları, (b) statik ve düşen ağırlık test sonuçları.

Şekil 68'de R75T05 yarı küresel çekirdek yapıları üzerinde gerçekleştirilen düşen kütle ezilme testlerinin görüntüleri bulunmaktadır. Şekilden görülebileceği gibi yarı küresel

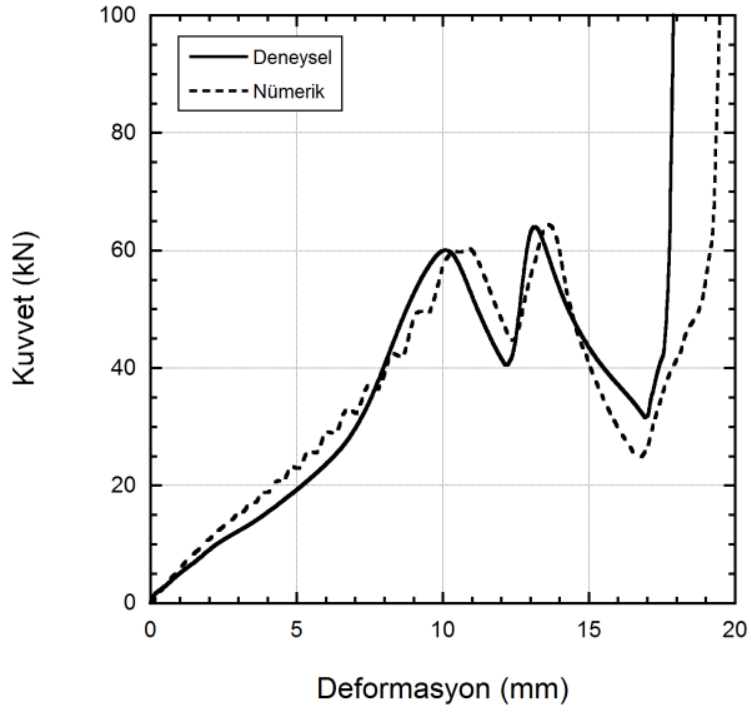
kısmın ezilmesi 6 mm'ye kadar devam etmektedir. Daha sonra silindirik kısmın ezilmesi başlamaktadır. Statik test sonucunda olduğu gibi bu testte de silindirik kısım asimetrik modların oluşumu ile ezilmiştir. Üç adet lob oluştuğu gözlemlenmiştir. Deformasyon değerlerindeki kayma dışında, statik test sonucuyla benzer sonuçlar elde edildiği söylenebilir.



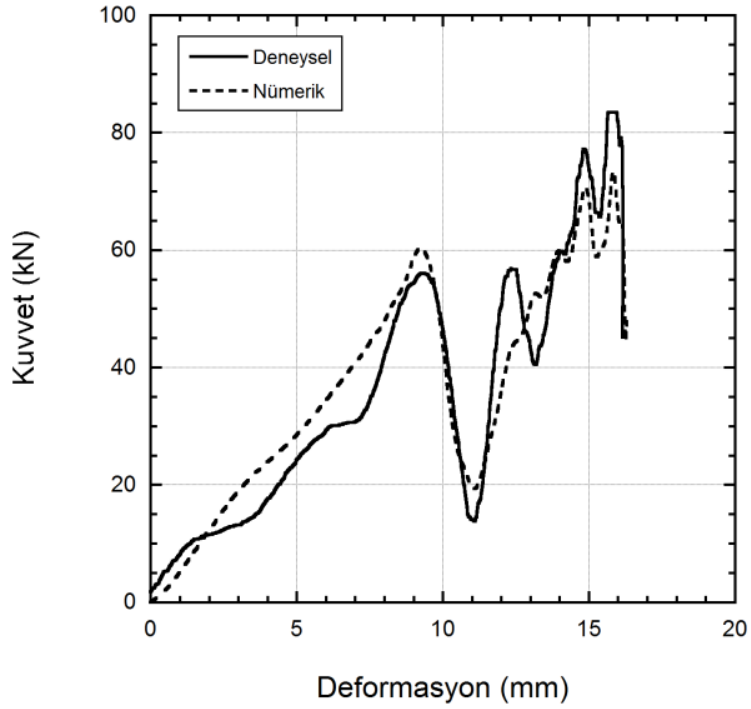
Şekil 68. R75T05 numunesi düşen ağırlık ezilme tarihçesi.

DeneySEL çalışmaların tamamlanmasının ardından yarı küresel çekirdek geometrilerinin ezilme davranışlarının nümerik olarak incelenmesine geçilmiştir. Bu nümerik çalışmaların kuasi-statik testlerin modellendiği kısımda yine derin çekme simülasyonlarına benzer şekilde kütle ölçekleme yöntemi kullanılmıştır. Testlerin modellenmesinde hareketli üst ve sabit alt kafalar gerçek ölçülerinde çizilmiştir. Kuasi-statik simülasyonlarda üst kafa sabit hızda hareket ettirilirken alt kafa sabitlenmiştir. Düşen kütle testlerinin simülasyonlarında ise yine alt kafa sabitlenmişken, üst kafaya deneydeki ilk hız verilmiş ve düğüm noktası bazlı kütle eklemesi ile deneydeki düşen kütle değerleri atanmıştır. Hızın artması ile birlikte meydana gelmesi olası olan erozyonu ve katların birbirleri arasındaki temasını hesaba katabilmek için ERODING\_SINGLE\_SURFACE temas algoritması yarı küresel yapı için kullanılmıştır. Ayrıca ERODING\_SURFACE\_TO\_SURFACE temas algoritması yarı küresel yapı ve temas halinde olduğu kafalar arasında kullanılmıştır. Temas halindeki tüm yüzeyler arasındaki sürtünmenin hesaba katılabilmesi için statik sürtünme katsayısı 0,3 ve dinamik sürtünme katsayısı 0,2 alınmıştır.





(a)



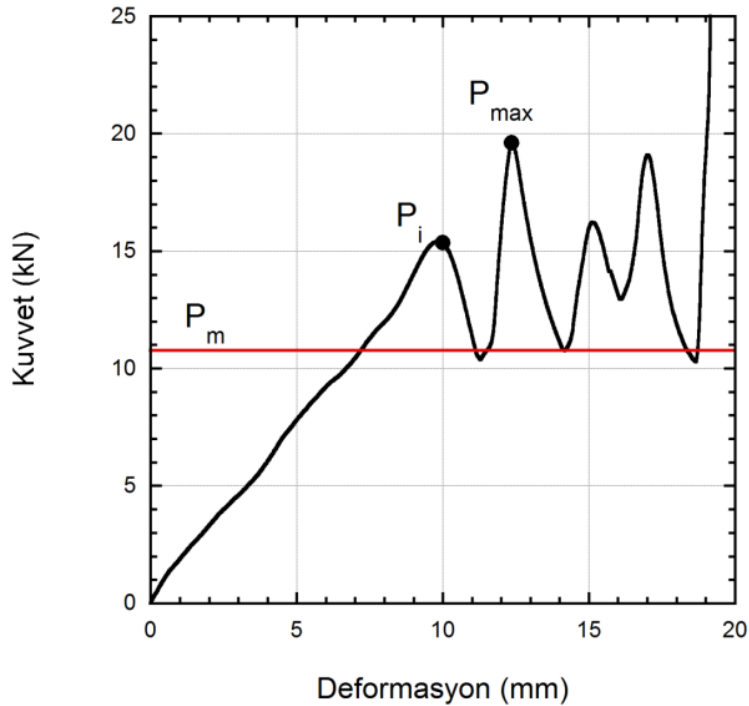
(b)

Şekil 69. (a) R125T1 numunesi kuasi-statik test ve simülasyon sonucu, (b) R125T1 numunesi düşen kütle test ve simülasyon sonucu.

Şekil 69 (a) ve (b)'de R125T1 numunesinin kuasi-statik ve düşen kütle testleri ile bu testlerin simülasyon sonuçları deney ve simülasyon sonuçlarını gösteren karşılaştırılmalı

örnekler olarak sunulmuştur. Nümerik modeller ezilme karakteristiklerini oldukça başarılı şekilde yakalamaktadır. Şekil 69 (b)'den de görülebileceği gibi deney esnasında numunede meydana gelen hasar (10 mm deformasyon seviyesinde yarı küresel kısımda meydana gelen kopma sonucu yük taşıma kabiliyetinde ani düşme ve daha sonra kalan yüklemenin silindirik alt kısım tarafından taşınması sonucu yüksek enerji sönümlene kabiliyeti) modelde başarı ile yakalanmıştır. Tüm deneyler ve nümerik simülasyon çalışmalarının sonuçları ise Tablo 11'de özetlenmiştir.

Tablo 11'de verilen sonuçlarda,  $P_i$  ile gösterilen değer kuvvet – deformasyon eğrisinde yarı kürenin deformasyonuna karşılık gelen ilk maksimum kuvvet değerini,  $P_{max}$  ile gösterilen değer tüm ezilme davranışı boyunca kuvvet – deformasyon eğrisinde görülen densifikasyon bölgesi hariç maksimum kuvvet değerini (kimi testlerde bu değer ilk maksimuma eşitken kimi testlerde bu değer ilk maksimumdan farklı olabilmektedir),  $P_m$  ile gösterilen değer tüm deformasyon sırasındaki ortalama kuvvet değerini,  $SAE$  (specific absorbed energy) değeri ise birim kütle başına yapının emdiği enerji değerini göstermektedir. Bu değerlerin bir kısmı Şekil 70'de temsili olarak gösterilmektedir.



Şekil 70. Yarı küresel yapıların ezilme davranışları incelenirken kullanılan karakteristik değerler.

Tablo 11. Kuasi-statik ve düşen kütle test ve simülasyon sonuçları.

Numune	Sonuç	Test Hızı (m/s)	Düşen Kütle (kg)	$P_i$ (kN)	$P_{max}$ (kN)	$P_m$ (kN)	Enerji (J)	SAE (kJ/kg)
R75T05	Deneysel	13,01e-06	-	14,8	14,8	8,076	85	43
	Nümerik			14,346	14,346	9,16	93,49	46,74
R75T05	Deneysel	5,1	10,4	14,9	16,24	9,35	105,7	52,85
	Nümerik			16,53	19,86	10,96	121,30	60,65
R75T1	Deneysel	13,06e-06	-	62,7	62,7	31,14	279	93
	Nümerik			52,72	60,11	34,28	353,53	117,84
R75T1	Deneysel	5,1	23,4	34,8	48,8	25,13	267,12	89,04
	Nümerik			51,11	63,3	27,6	280,90	93,63
R125T05	Deneysel	23,06e-06	-	15,5	19,617	10,76	203	34
	Nümerik			17	19,83	11,58	222,06	37,01
R125T05	Deneysel	9,1	7,4	15,42	22,969	10,67	204,0957	34,02
	Nümerik			19,55	26,11	15,843	297,16	49,52
R125T1	Deneysel	22,62e-06	-	59,8	64,016	33,9	593	49
	Nümerik			59,72	64,17	33,6	677,2	56,43
R125T1	Deneysel	9,1	14,4	56,11	77,05	31,74	497,67	41,47
	Nümerik			60,14	73,02	35,57	562,012	46,83

Tablo 11’de verilen sonuçlar incelendiğinde, nümerik sonuçların deneysel sonuçlarla oldukça uyum gösterdiği görülmektedir. En yüksek ilk maksimum kuvvet değeri R75T1 numunesinde ölçülmüşken, en düşük ilk maksimum kuvvet değeri R75T05 numunesinde ölçülmüştür. En yüksek maksimum kuvvet değeri R125T1 numunesinde ölçülmüşken, en düşük maksimum kuvvet değeri yine R75T05 numunesinde ölçülmüştür. Hesaplanan ortalama kuvvet değerlerinden en yükseği R125T1 numunesinin kuasi statik testinde gözlemlenmiş, en düşüğü ise R75T05 numunesinin kuasi-statik testinde gözlemlenmiştir.

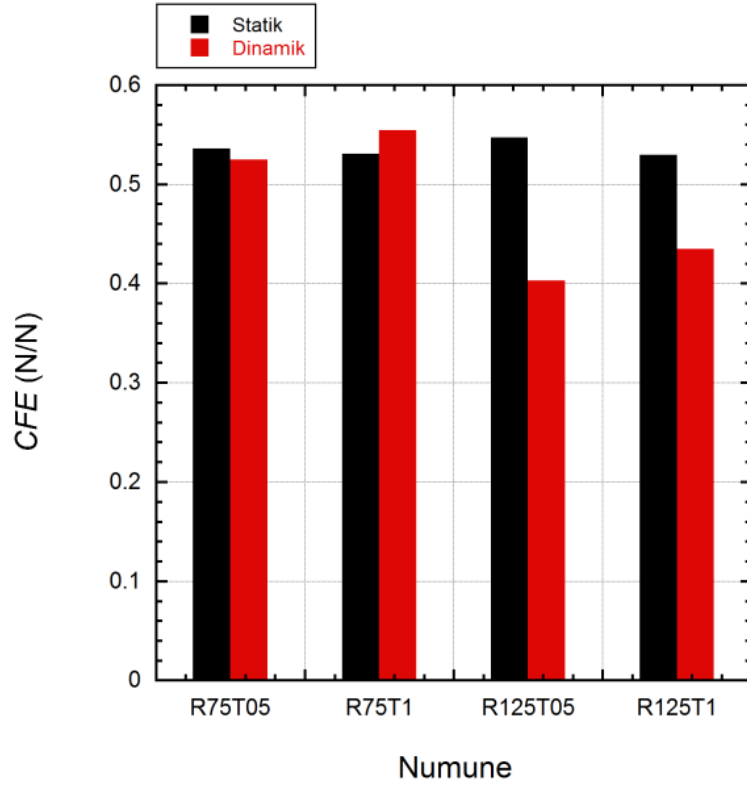
Ezilme mekanizmasıyla enerji emen yapıların ezilirken koruma yaptıkları yapıya ilettikleri maksimum yükün ( $P_{max}$ ) düşük olması istenirken, toplam enerji emme kapasitesinin yüksek olması için ortalama kuvvet değerinin yüksek olması istenir. Bu sebeple yapıların bu açıdan avantajını değerlendirirken  $P_m/P_{max}$  bir parametre olarak belirlenip bu değer maksimum olduğu yapının diğerlerine göre daha avantajlı olduğu söylenebilir. Bu parametre literatürde CFE (Crushing Force Efficiency) - Ezilme Kuvveti Etkinliği olarak bilinmektedir. Yarı küresel geometrilerin CFE değerleri Şekil 71 (a)’da verilmiştir. Sonuçlar CFE açısından incelendiğinde, tüm numuneler için bu değer yaklaşık 0,4 ile 0,58 arasında değişmektedir. En

yüksek değer R75T1 numunesinin dinamik testinde hesaplanmışken, en düşük değer R125T05 numunesinin dinamik testinde hesaplanmıştır. Bu parametre dikkate alınarak sonuçlar incelendiğinde, tüm çekirdek türleri makul bir maksimum kuvvet ile bu maksimum kuvvetin yaklaşık yarısına karşılık gelen bir ortalama kuvvet ile ezilmektedir.

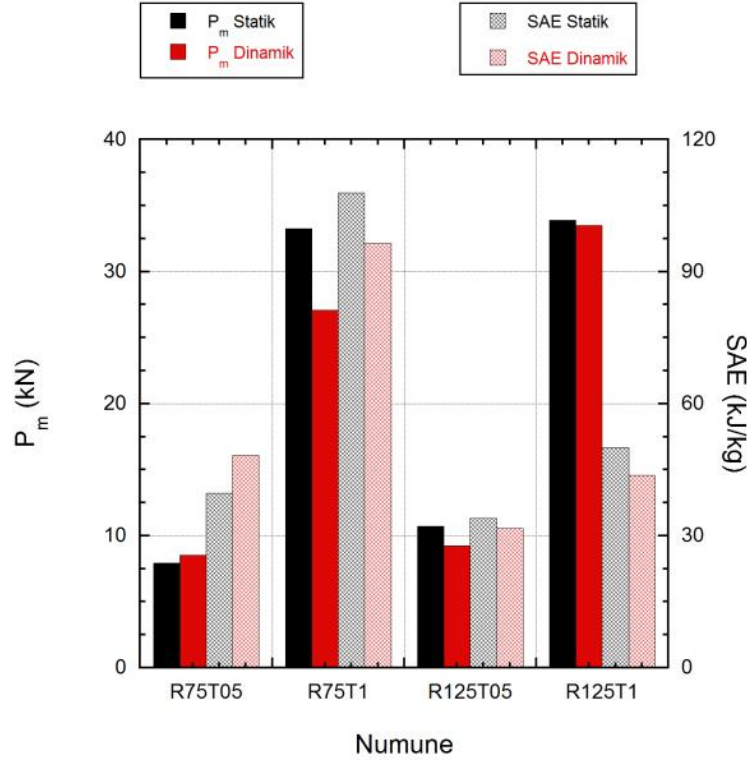
Ayrıca  $P_i$ ,  $P_m$  ve  $P_{max}$  değerleri incelenerek, maksimum yükün hangi bölgenin (küre veya silindir) ezilmesi sırasında ölçüldüğü görülebilir. Bu bilgi optimizasyon çalışmaları için bilgi sağlayarak  $P_{max}$ 'ın minimizasyonu ile  $P_m$ 'nin maksimizasyonu çalışmalarında kullanılabilir.

Yukarıda bahsi geçen parametrelerin yanısıra yapıların birim kütleye karşılık emdiği enerji miktarları da uygun geometrik tasarımların tercihi için önemlidir. Bu açıdan, Tablo 11'de verilen birim kütle başına emilen enerji miktarları da (SAE) tasarımların verimliliklerinin incelenmesinde kullanılmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde birim SAE değeri en yüksek R75T1 numunesinin düşen kütle test sonucunda ölçülmüştür. En düşük SAE değeri ise R125T05 numunesinin düşen kütle test sonucunda ölçülmüştür.  $P_m$  ve SAE değerleri statik ve dinamik sonuçlara göre Şekil 71 (b)'de verilmiştir.

Deney sonuçları incelendiğinde, R75T05 ve R75T1 numunelerin kuasi-statik testlerinde, ilk maksimum ve maksimum kuvvet değerlerinin aynı olduğu görülmektedir. Diğer bütün numune çeşitleri ve yükleme hızlarında maksimum kuvvet ilk burkulmada gözlenmemektedir. Aynı yarıçaplı numunelerde kalınlığın artışı ile  $P_m$  ve SAE değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Ancak aynı kalınlıktaki numunelerde yarıçapın artışı ile SAE değerlerinin küçüldüğü  $P_m$  değerlerinin aynı kaldığı veya küçüldüğü gözlemlenmiştir.



(a)



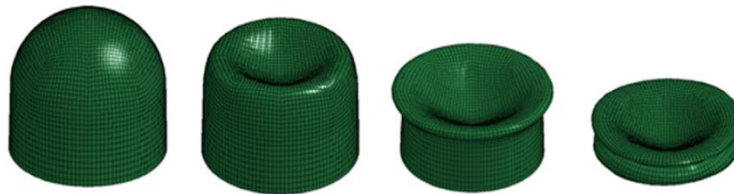
(b)

Şekil 71. (a) Statik ve dinamik CFE ve (b)  $P_m$  ve SAE değerleri.

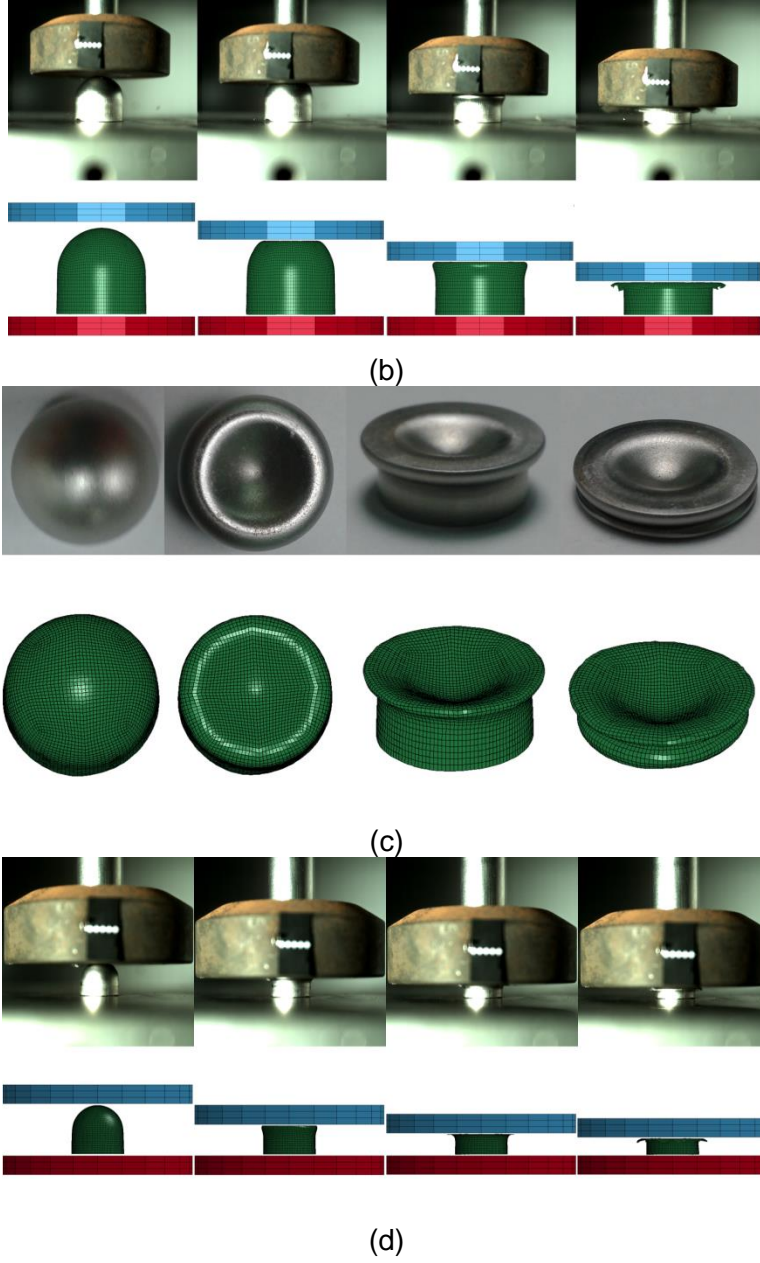
Tablo 11'de verilen veriler kullanılarak, farklı hızlarda test edilen numunelerin de ilgili parametreler açısından değerlendirilmesi mümkündür. Örneğin R75T1 numunesi, kuasi-

statik test esnasında 62,7 kN bir maksimum yük göstermişken düşen kütle testinde bu yük 34,8 kN olarak kendini göstermiştir. Bu düşüş, numunenin düşen kütle testi esnasında burkulma ile ezilmek yerine deformasyonun başlarında yarı küresel kısmının silindirik kısmından koparak hasar almasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 72'de R125T1 ve R75T1 numunelerinin kuasi-statik ve düşen kütle testlerinden elde edilen görüntüler ile bu görüntülerin nümerik karşılıkları verilmiştir. Şekil 72 (a)'da görüldüğü gibi kuasi-statik testte numunede bir hasar (malzemede kopma veya yırtılma) görülmemiş ve deformasyon modu başarılı bir şekilde nümerik simülasyonda yakalanmıştır. Düşen kütle testi sırasında numune ezilme esnasında hasar almış ve simülasyon bu hasarı başarılı bir şekilde yakalayabilmiştir. Deformasyonun başlangıcı ile birlikte yarı küresel kısım içeriye doğru katlanmaktadır, deformasyonun ilerleyişi ile birlikte şekil değiştirme hızı artmakta (geometrik etki, küresel noktasal temastan dairesel yüzeysel temasa geçiş) ve hasar meydana gelmektedir. Çekirdek malzemesinin statik ve dinamik mekanik karakterizasyonu sırasında bu malzemenin kopma şekil değiştirme değerinin şekil değiştirme hızının artışı ile birlikte azaldığı önceki bölümlerde sunulmuştur. Nümerik modelleme sırasında kullanılan malzeme modeli bu bahsi geçen etkiyi verebilecek şekilde seçildiğinden dolayı model sonuçları ile deneysel sonuçlar birbirleriyle oldukça uyumludur. Şekil 72 (c) ve (d) incelendiğinde R75T1 numunesi için de aynı durumun geçerli olduğu görülmektedir. Kuasi-statik hızda hasar almadan ezilme ile enerji absorbe eden numune, deformasyon hızı arttırıldığında hasara uğramıştır. Nümerik model yine bu hasarı da başarı ile yakalamıştır.



(a)



Şekil 72. R125T1 numunesinin (a) kuasi-statik test ve simülasyon ve (b) düşen kütle test ve simülasyon sonucu, R75T1 numunesini (c) kuasi-statik test ve simülasyon ve (d) düşen kütle test ve simülasyon sonucu.

Şekil 73'de R75T1 numunesinin düşen kütle testi sonrasında numunede meydana gelen deformasyon deneysel ve nümerik olarak verilmiştir. Numunede meydana gelen yırtılma başarı ile modellenmiştir. Bireysel çekirdek malzemelerinin statik ve dinamik testlerinde elde edilen bu başarılı sonuçlar, çoklu çekirdek ihtiva eden sandviç yapıların modellenmesinde başarılı sonuçların alınacağını kesinleştirmiştir.



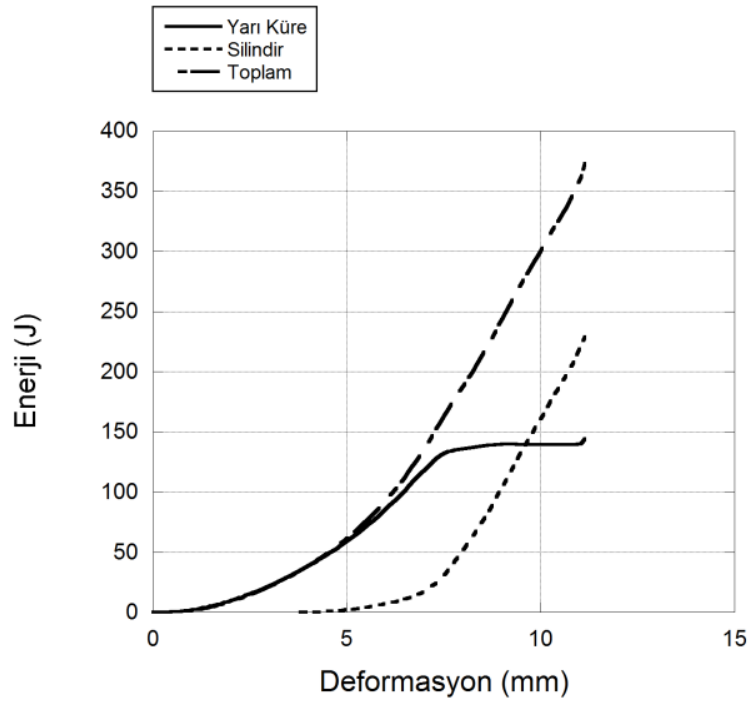
(a)



(b)

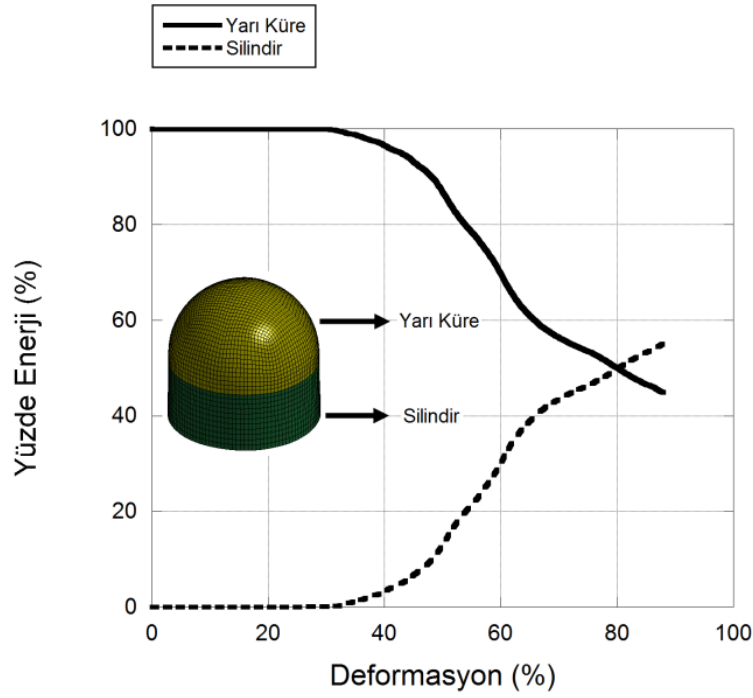
Şekil 73. (a) R75T1 numunesinin düşen kütle testi ve (b) simülasyon sonucu.

Deney sonuçları incelenirken yarı küresel çekirdek yapıların hem yarı küre hem de silindirik kısmının bir bütün olarak incelendiği aşıkardır. Yapının etkinliğini incelemek ve emilen enerji miktarları açısından daha sonraki tasarım çalışmalarına bilgi sağlamak amacıyla, çekirdek malzemelerinin iki ayrı bölgesinin ayrı parçalar (yeni parça tanımı) olarak modellendiği simülasyonlar da hazırlanmıştır. Bu simülasyonlar ile yarı küresel bölgenin ve silindirik bölgenin bireysel olarak ne kadar enerji emdikleri belirlenebilmiştir. Bu simülasyonların sonuçları Şekil 74'de verilmiştir.

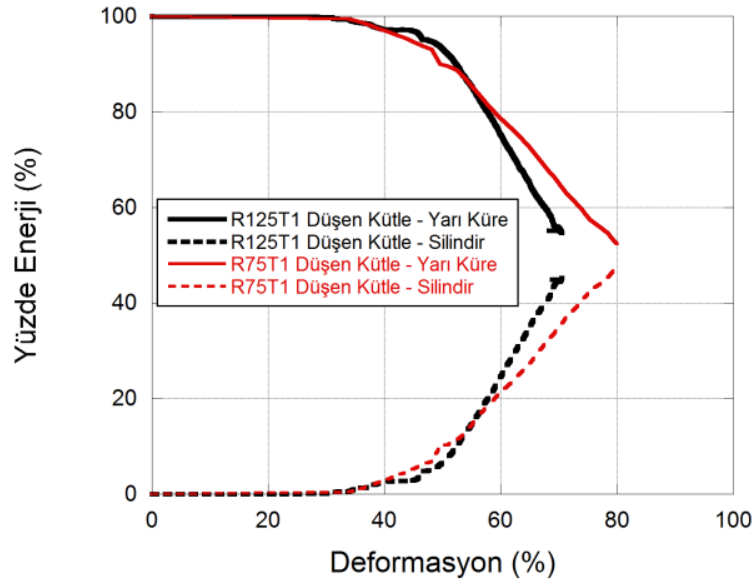


(a)





(b)



(c)

Şekil 74. (a) R75T1 numunesinin bileşenlerinin kuasi-statik hızdaki enerjileri, (b) R125T1 numunesinin bileşenlerinin kuasi-statik hızlarda enerji yüzdesi ve (c) R125T1 ve R75T1 numunelerinin bileşenlerinin orta hızlardaki enerji yüzdeleri

Şekil 74 (a)'da R75T1 numunesi bileşenlerinin kuasi-statik hızda emdikleri enerjileri verilmiştir. Grafik incelendiğinde deformasyonun başlangıcında yarı küresel kısmın enerji emmeye başladığı, deformasyonun ilerleyen safhalarında ise silindirik kısmın da enerji emmeye katkı verdiği görülebilir. Toplam enerji grafiği deformasyonun başlangıcında yarı

kürenin enerji grafiğiyle çakışırken, testin devamında yarı kürenin emdiği enerji neredeyse sabit kalmakta ve bu sebeple toplam enerji grafiği silindirik kısmın enerji grafiğine paralel olarak seyretmektedir.

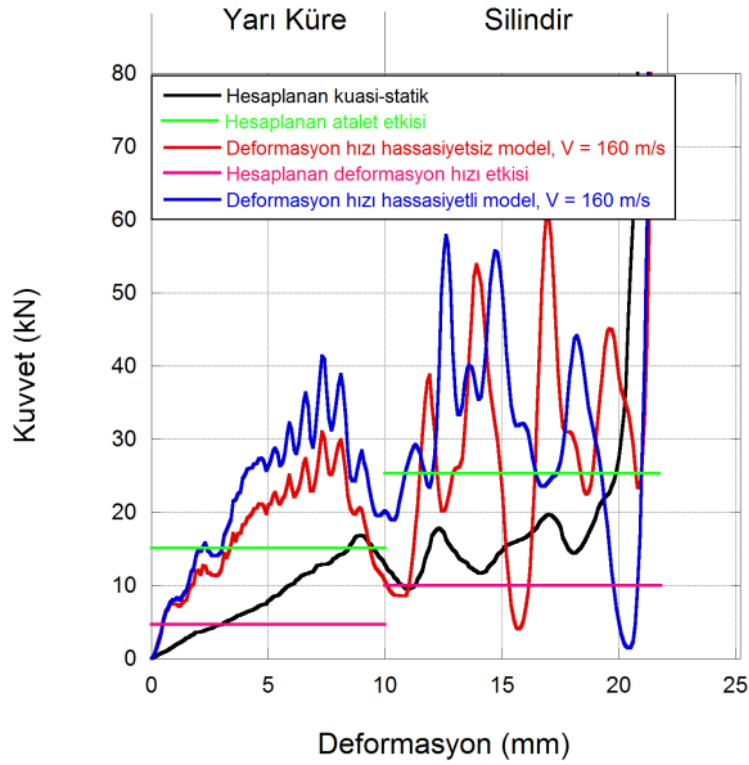
Şekil 74 (b) incelendiğinde kuasi-statik hızda yaklaşık %30 seviyelerinde deformasyona kadar R125T1 numunesinin emdiği enerjinin tamamı neredeyse yarı küresel kısım tarafından emilmektedir. Daha sonra yarı küre ile birlikte silindirik kısım da enerji emmeye başlamaktadır. Yaklaşık %80'lik bir deformasyonda yarı küresel ve silindirik kısımların emmekte oldukları enerji miktarları eşitlenmektedir. Yaklaşık %65 deformasyondan sonra eğimde meydana gelen değişiklik ise birinci katlanmanın bitmesi ve o kattaki deformasyon miktarının azalmasıyla ilgilidir.

Şekil 74 (c)'de R75T1 ve R125T1 numuneleri düşen kütle test simülasyonlarında bileşenlerin yüzde enerji emme grafikleri verilmiştir. Her iki numunenin bileşenleri %50 deformasyon seviyesine kadar aynı yüzdelerde enerji emmektedir. İlerleyen deformasyonla birlikte R125T1 numunesinin bileşenlerinin emdiği enerji R75T1 numunesinin bileşenleri ile karşılaştırılırsa, yarı küre kısmında daha yüksek bir negatif eğim ve silindir kısmında daha yüksek bir pozitif eğimle grafiğin devam ettiği görülmektedir. Deformasyonun başında plastik deformasyon ve burkulma ile gerçekleşen enerji emme mekanizması, deneyin sonlarında kırılma hasarıyla kesilmektedir. İki numunede de hasar görülse de, kırılmanın olduğu deformasyon miktarının ve oluşan kat kalınlıklarının farklı olması sebebiyle bu iki numunenin yüzde enerji emme grafiklerinde farklılıklar görülmektedir.

İncelenen sonuçlar, nümerik modelin deney sonucunda elde edilen ezilme ve enerji emme karakteristiklerini başarı ile gösterdiğinin kanıtlamaktadır. Dolayısıyla, nümerik çalışma atalet ve çekirdeğin malzemesinin deformasyon hızı hassasiyetini hesaba katacak şekilde genişletilmiştir. Bu amaçla, bu faktörlerin etkilerini birbirinden ayırt edebilmek için nümerik modeller malzemenin deformasyon hızı hassasiyetinin olmadığı kabulü ile tekrar çalıştırılmışlardır. Sonra, deformasyon hızı hassasiyetinin dahil edildiği ve dahil edilmediği sonuçlar kuasi-statik ezilme sonuçları ile karşılaştırılarak bu etkiler irdelenebilmiştir.

Enerji emme amacıyla kullanılan yapılar, kuvvet-deformasyon eğrilerinin şekline göre iki kategoriye ayrılmaktadırlar (Calladine ve English 1984; Zhang ve Yu 1989; Tam ve Calladine 1991). Görece düz tavanlı kuvvet-deformasyon eğriler Tip I ve hızlı bir şekilde azalan eğimli eğriler ise Tip II yapıların karakteristik özellikleridir. Kiriş ve tüplerin yanal basılması Tip I yapıya bir örnektir. Eksenel olarak basılan kiriş ve tüpler ise Tip II yapıya örnektir. Tip II yapılar Tip I yapılara göre deformasyon hızı ve atalet etkilerine karşı daha hassastır (Calladine ve English 1984). Tip II yapıların enerji emme eğilimlerinin yapıların malzemelerinin deformasyon hızı hassasiyetlerinin artışı ile arttığı gösterilmiştir (Tam ve Calladine 1991).

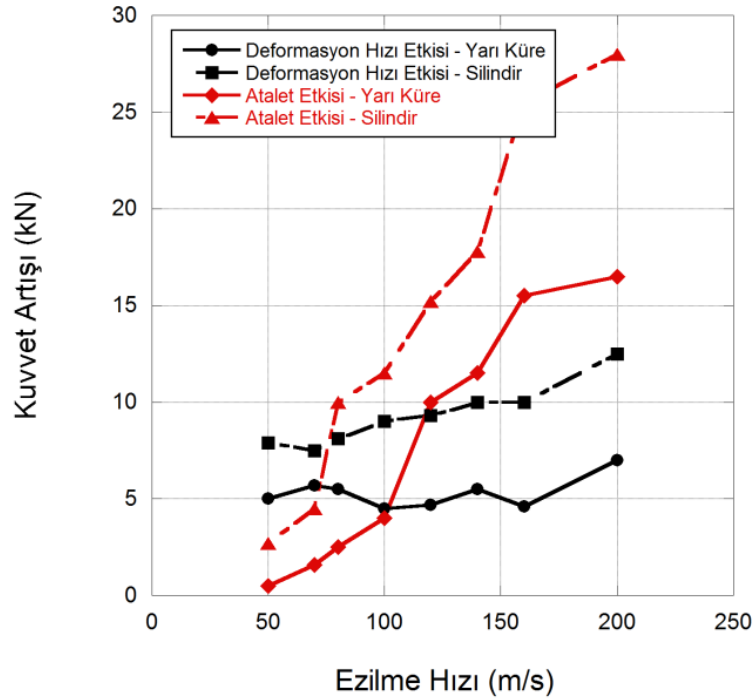
Bu çalışmada incelenen yarı küresel çekirdek yapılar Tip I yarı küresel kısım ile Tip II silindirik kısmın birleşmesinden oluşmaktadır. Dolayısıyla deformasyon hızı ve atalet etkilerinin hem yapıların bileşenlerinden farklı hem de bunların bir bileşkesi olacağı açıktır. Bu çalışmada bu etkilerin incelenmesi amacıyla 50-200 m/s sabit ezme hızlarında modeller deformasyon hızı hassasiyetini hesaba katacak ve katmayacak şekilde oluşturulmuşlardır. Hesaplamalarda kullanılan bir örnek olarak 160 m/s hızda gerçekleştirilen simülasyon sonuçları kuasi-statik simülasyon sonucu ile karşılaştırmalı olarak Şekil 75'de görülebilir.



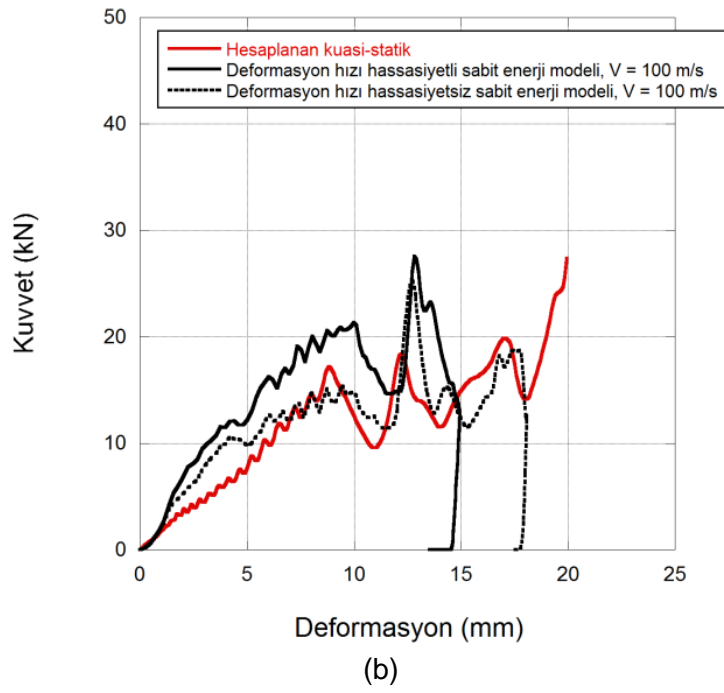
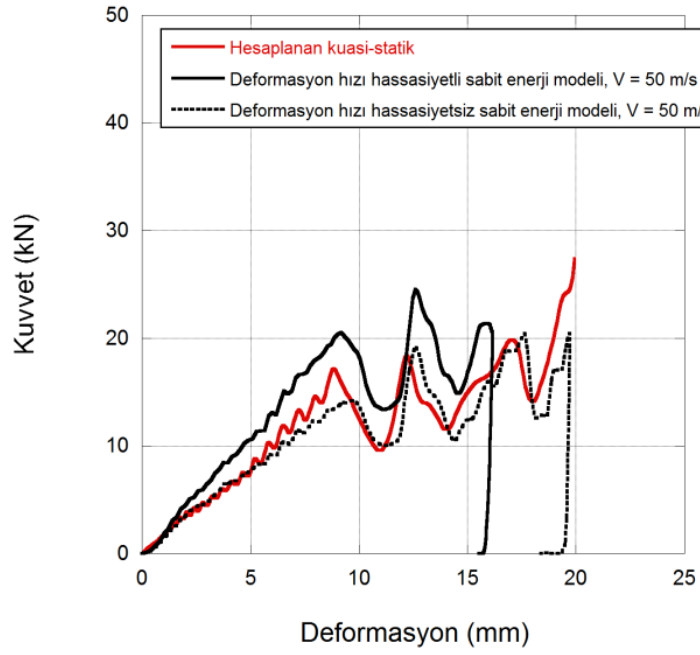
Şekil 75. 160 m/s hızda deformasyon hızı ve atalet etkileri.

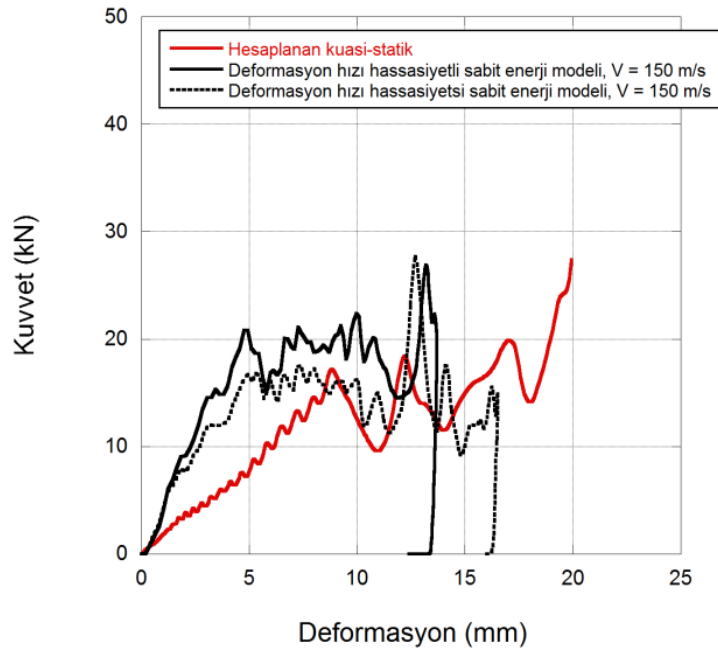
Şekil 75'de 160 m/s'lik örnek sonuçtan görülebileceği gibi, kuvvet-deformasyon eğrisi yarı küresel ve silindirik olmak üzere iki alana bölünerek atalet ve deformasyon hızı etkilerinin ayrı ayrı incelenmesi gerçekleştirilebilmiştir. Bu sonuçlardan anlaşılacağı gibi deformasyon hızı hassasiyetli ve hassasiyetsiz modellerin arasındaki fark atalet etkileri dolayısıyla kuvvetteki artışı göstermektedir. Bu artışın deformasyon miktarına göre ortalaması alınarak, atalet etkileri bulunmuştur. Şekil 75'den görülebileceği gibi silindirik kısımda hem atalet hem de deformasyon hızı etkileri yarı küresel kısma göre daha fazladır. Ayrıca 160 m/s sabit ezilme hızında her iki bileşen için de atalet etkilerinin deformasyon hızı etkilerinden daha fazla olduğu yine grafikten görülmektedir.

Yarı küresel ve silindirik kısımlarda atalet ve deformasyon hızı etkileri dolayısıyla gerçekleşen kuvvet artışlarının ezme hızlarına göre değişimi Şekil 76'da verilmiştir. Atalet etkisinden dolayı kuvvet artışı 100 m/s ezme hızında deformasyon hızı etkisini aşmıştır. Ayrıca yine grafikten görülebileceği gibi, yarı küresel bölgede deformasyon hızı etkisi neredeyse tüm hızlar için eşitken silindirik kısımda bu etki ezme hızının artışı ile birlikte artmaktadır. Bu sonuçlara göre iki bileşen için de atalet etkisinin deformasyon hızı etkisini aştığı bir kritik hızın olduğu açık bir şekilde görülebilmektedir. Benzer sonuçlar Liu ve diğerleri (Liu vd. 2009) tarafından gözenekli malzemeler için sunulmuştur.



Şekil 76. 160 m/s hızda deformasyon hızı ve atalet etkileri.





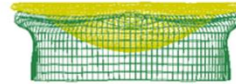

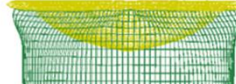




(c)

Şekil 77. (a) 50 m/s, (b) 100 m/s ve (c) 150 m/s sabit enerji modellerinin kuasi-statik modelle karşılaştırılması.

Atalet etkisinin incelenmesi amacıyla deformasyon hızı hassasiyetli ve hassasiyetsiz modeller sabit enerjili yükleme durumu altında incelenmişlerdir. Bu modellerin sonuçları Şekil 77'de kuasi-statik model sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Burada kuasi-statik modelde 20 mm deformasyona sebep olan 250 J'lük enerjili modellerin sonuçları 50, 100 ve 150 m/s hızlarında sunulmuştur. Deformasyon hızı hassasiyetsiz modellerde görülen son deformasyon miktarları sırasıyla 19,6 mm, 17,98 mm ve 16,5 olarak bulunmuştur. Hızın artışıyla azalan deformasyon miktarları atalet etkisini sabit enerjide açıkça göstermektedir. Deformasyon hızı hassasiyetli modellerde ise kuasi-statik modelde 20 mm olarak bulunan son deformasyon miktarı sırasıyla 16,04 mm, 14,9 mm ve 13,68 mm olarak hesaplanmıştır. Sabit enerji modellerinin son deformasyon şekilleri Şekil 78'de gösterilmektedir. Buna göre atalet ve deformasyon hızı etkileri deformasyon profillerinde azalan son deformasyon değeri olarak kendilerini göstermektedirler. Öte yandan atalet etkisi dolayısıyla son deformasyon değerindeki azalma deformasyon hızı etkisinden dolayı azalmadan oldukça fazladır.

Kuasi -Statik	Deformasyon hızı hassasiyetsiz	Deformasyon hızı hassasiyetli
		
	50 m/s	
		
	100 m/s	
		
150 m/s		

Şekil 78. Sabit enerji modellerinin son deformasyon profilleri.

## 6. SANDVIÇ YAPININ STATİK VE DİNAMİK EZİLME KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

Bu bölümde yarı küresel tekrarlı çekirdek malzemelerinin kullanımı ile oluşturulan sandviç yapıların statik ve dinamik yükleme altında ezilme karakteristiklerinin ve enerji emme davranışlarının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneysel ve nümerik çalışmalar sunulmuştur. Ayrıca yarı küresel çekirdek malzemelerinin sandviç konfigürasyonu içerisinde birbirleri ile etkileşimi ve bu etkileşimin ezilme ve enerji emme karakteristiklerine etkileri de incelenmiştir. Nümerik çalışmalarda LS-DYNA kullanılmış ve hem kuvvet-deformasyon tarihçelerinin hem de deformasyon profillerinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu gösterilmiştir.

### 6.1 Deneysel İncelenme

Mayın patlamasına karşı koruma sistemlerinde, sandviç yapılar genellikle ilave bir katman (add-on) olarak kullanılmaktadırlar. Burada esas amaç patlama yükü ile karşılaşıldığında sandviç katmanın (sacrificial layer) deforme olması ve bu deformasyon esnasında patlama yükünü absorbe etmesidir. Sandviç katmanın arkasında bulunan ve korunması istenen sisteme ait olan yapısal elemanın ise (araçlarda taban plakası) deforme olmaması ve patlama yükü iletiminin mümkün olduğu kadar azaltılıp ve iletim zamanının gecikmesinin artırılması istenmektedir. Bütün bu hususlar göz önüne alındığında proje kapsamında yapılan hem deneysel hem de nümerik çalışmalarda sandviç yapının arka yüzeyinin desteklenmiş olduğu sınır şartlarının incelenmesine ağırlık verilmiştir. Eğilme-ezilme etkisinin bir arada olduğu ve arka yüzeyin deformasyonuna müsaade edildiği durumla ilgili olarak ilave bir konfigürasyon da incelenmiş ve bununla ilgili ayrıntılar bir sonraki bölümde verilmiştir. Bu bahsi geçen iki farklı sınır şartının yanı sıra DBDD testinde yanal sınırlamanın olmadığı bir üçüncü sınır şartı da modelleme çalışmalarının etkinliğini test edebilmek için çalışmaya dahil edilmiştir.

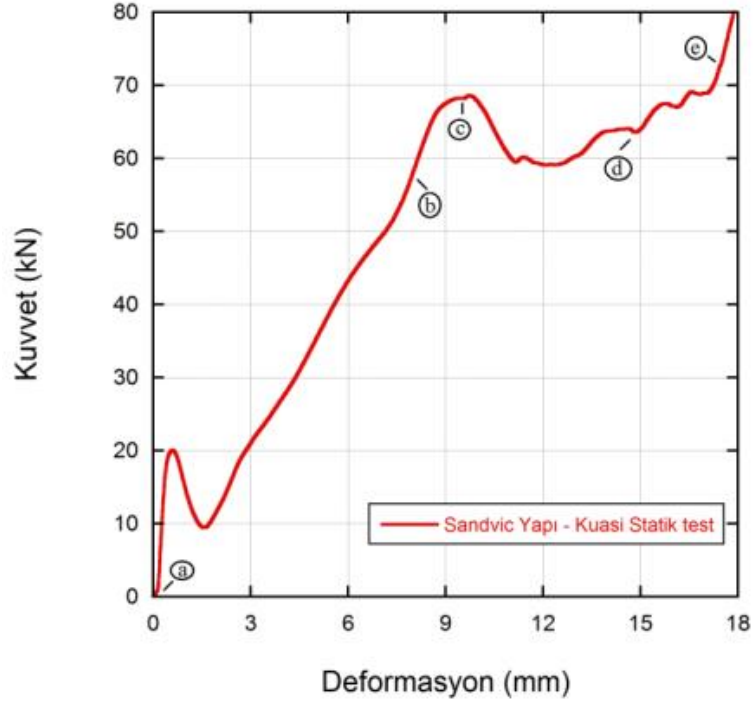
Arka yüzeyin destekli olduğu sınır şartını sağlamak amacıyla DBDD düzeneği modifiye edilmiş ve ayrıca serbest sınır şartını da sağlayan deneylerin gerçekleştirilmesi amacıyla iki farklı aparat tasarlanıp üretilmiş ve modifiye-DBDD düzenekleri oluşturulmuştur. Bahsi geçen amaçlarla kullanılan iki farklı aparatın katı modelleri ve görüntüleri Şekil 88'de verilmiştir. DBDD düzeneğinin modifiye edilmesi ile gerçekleştirilen deneylerde poliüretan kullanılmamıştır.

Çalışmanın başlangıcında kompozit malzemedan oluşturulmuş yüzey malzemesinin kullanımını incelemek adına, ön ve arka yüzünde 2 mm kompozit bulunan R125T05 yarı



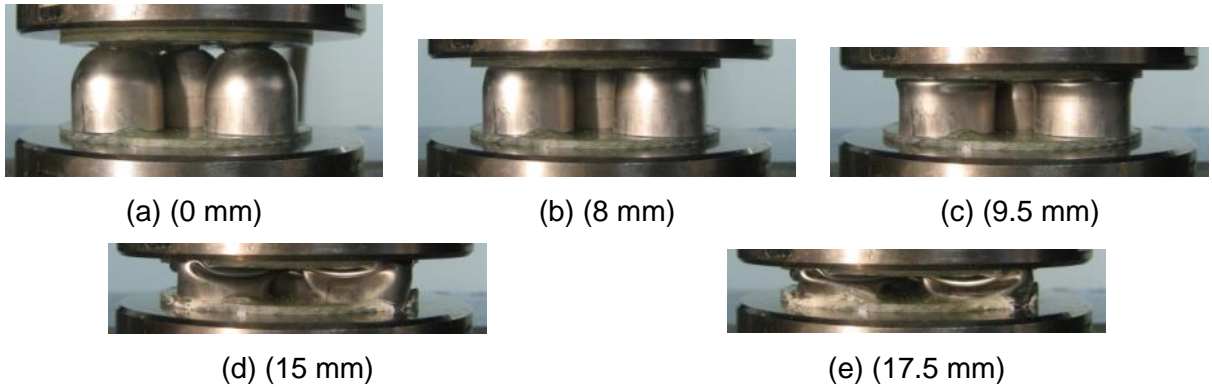
küresel çekirdekli sandviç yapılar statik ve düşen ağırlık testine tabi tutulmuştur. Statik basma testleri 300 kN yükleme kapasiteli Shimadzu AG-X konvansiyonel test cihazında  $10^{-3}$  s<sup>-1</sup> deformasyon hızında tamamlanmış ve Şekil 79'da görülen sonuçlar elde edilmiştir.

Testler sırasında meydana gelen deformasyon profilleri incelendiğinde birbirine komşu yarı küre yapıların deformasyonları sırasında birbirlerine olan yanıl temaslarından deformasyon profillerinin değiştii (constraining effect) görölmüştür.



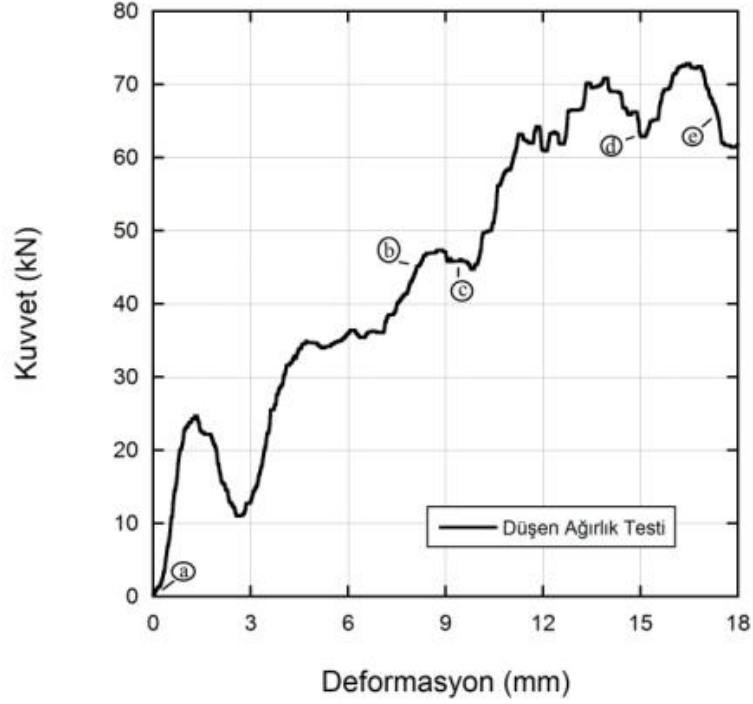
Şekil 79. R125T05 yarı küresel çekirdekli ve kompozit yüzeyli sandviç yapının statik test sonucu.

Şekil 80'de belirtilen konfigürasyonun statik testine ait ezilme görüntüleri bulunmaktadır.



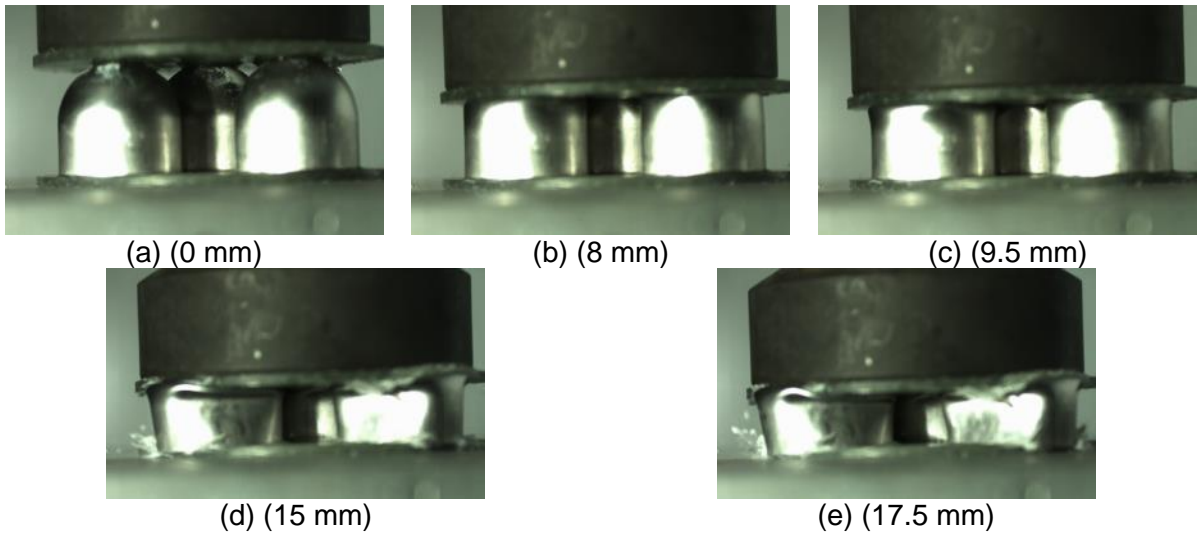
Şekil 80. R125T05 yarı küresel çekirdekli sandviç yapının statik test görüntüleri.

Aynı konfigürasyonda üretilmiş sandviç yapı düşen ağırlık testine tabi tutulmuş ve elde edilen kuvvet-deformasyon eğrisi Şekil 81'de verilmiştir. Test esnasında numuneye etkiyen toplam ağırlık 30,368 kg ve ağırlık düşüş hızı 7,495 m/s seçilmiş, bu sayede statik testte densifikasyon başlangıcına kadar açığa çıkan enerjiye (852 J) ulaşılmıştır.



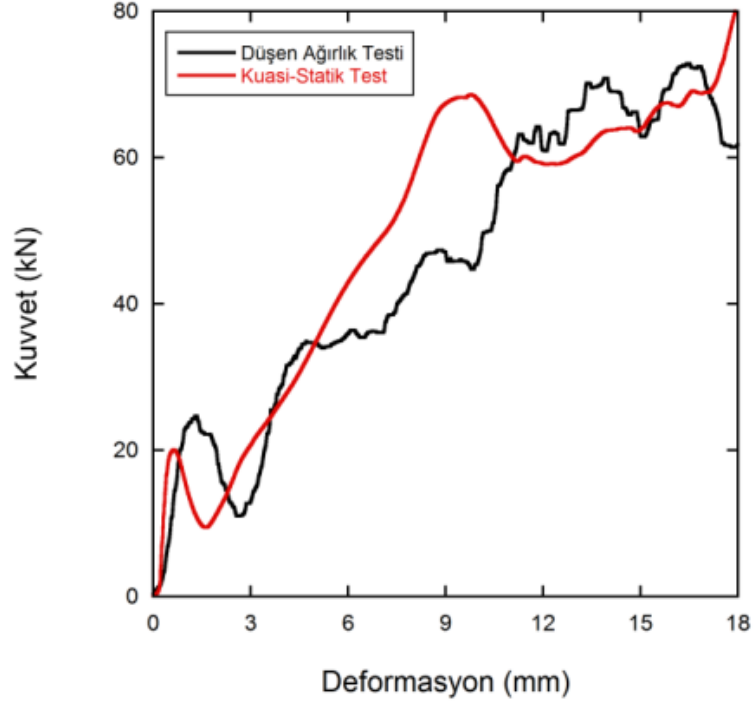
Şekil 81. R125T05 yarı küresel çekirdekli sandviç yapıya ait düşen ağırlık test sonuçları.

Sandviç yapıya ait düşen ağırlık testi yüksek hızlı kamera ile kaydedilmiş ve numunenin ezilme tarihçesi Şekil 82'de verilmiştir.



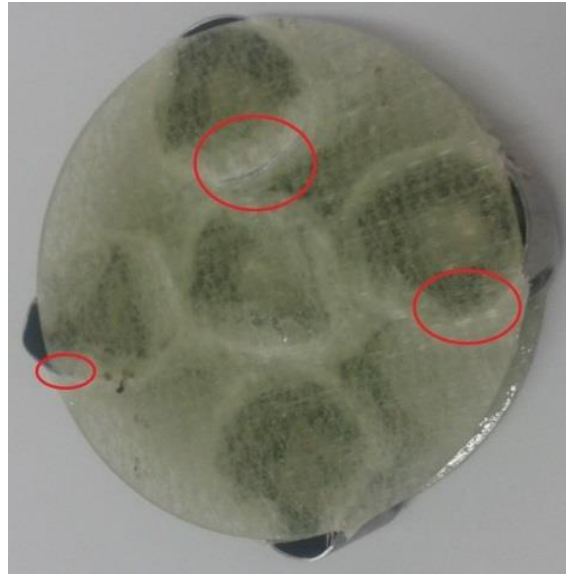
Şekil 82. R125T05 çekirdekli sandviç yapıya ait düşen ağırlık testlerinde ezilme tarihçesi.

Yarı küresel çekirdekli sandviç yapının statik ve düşen ağırlık test sonuçları Şekil 83'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 83. R125T05 yarı küresel çekirdekli sandviç yapıya ait testlerin karşılaştırılması.

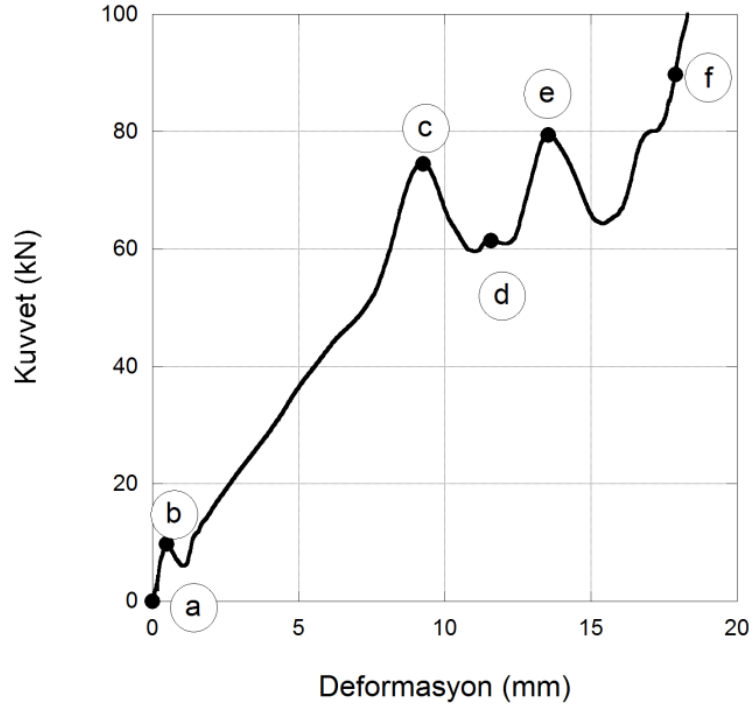
2 mm kompozit yüzey malzemesi içeren bu sandviç yapının düşen ağırlık testi sonucu ezilmiş alttan görünüşü Şekil 84'de verilmiştir.



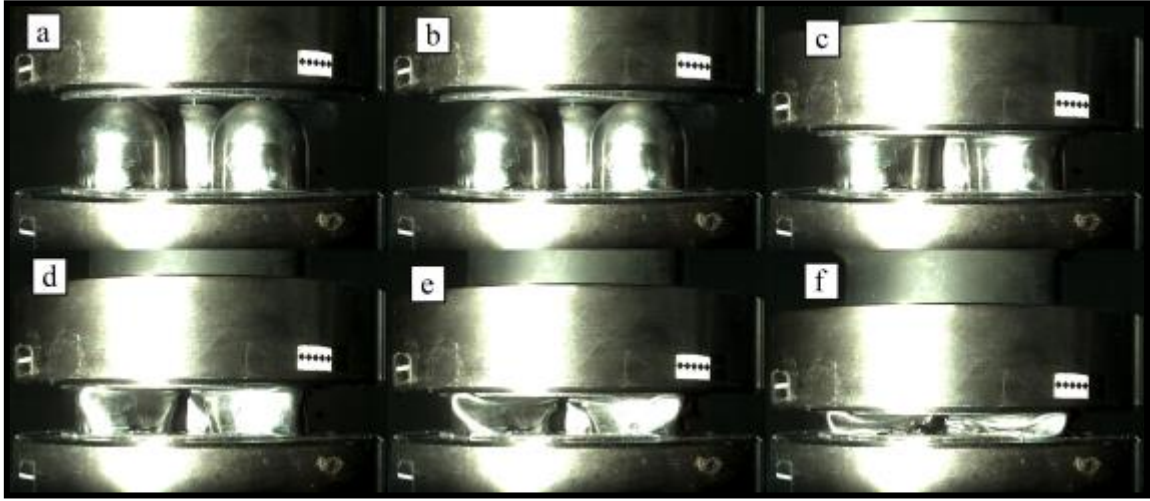
Şekil 84. R125T05 yarı küresel çekirdekli ezilmiş sandviç yapının alttan görünüşü.

Şekil 84'de alt yüzey malzemesinin çekirdek malzemelerinin alt sınırları ile olan çizgisel temaslarından kaynaklı ve hızın orta hız rejimine geçmesi dolayısıyla alt yüzey malzemesinde oluşan muhtemel fiber ezilmesi ve lokal delaminasyon hasarı açık bir şekilde görülmektedir. Dahası kırmızı ile işaretli bölgelerde çekirdek malzemelerinin silindirik bölgelerinin taban kısımlarının kompozit yüzey malzemesini perfore ederek diğer yüzden çıkmaya başladığı ve hızın orta hız rejiminden yüksek hız rejimine geçişle bu perforasyon miktarının artacağı aşikardır. Bu hasarın ve perforasyonun özellikle artan hızlarda çekirdek malzemelerinin de deformasyonunu etkileyeceği ve böylece bu yapıların ezilme karakteristiklerinin tam olarak anlaşılamayacağı açıktır. Dolayısıyla bu çalışmanın devamında gerçekleştirilen deneyler R125T05 çekirdek malzemesi içeren AISI 304L paslanmaz çelik yüzey malzemeli sandviç yapılar üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 16 (a)). Gerçekleştirilen kuasi-statik testlerde ezici kafanın ilerleme hızı 2 mm/dk olarak seçilmiştir. Tekli numuneler üzerinde gerçekleştirilen testlerden de bilindiği üzere, kuasi-statik bölgedeki farklı hızların ezilme davranışı üzerinde etkisi görülmediğinden sandviç numuneler tek hız değerinde test edilmişlerdir. Statik testler iki farklı konfigürasyonda yapılmıştır. Bunlar radyal deformasyonun engellendiği kapalı kalıp ve çevresel sınırlandırmanın olmadığı serbest ezilme halidir. Bu testler sayesinde sandviç yapıların çekirdek malzemelerinin birbirleri ile teması sonucunda oluşan etkiler de incelenebilmiştir. Sınırlandırılmış testlerde iç çapı sandviç malzemelerin çapına eşit ve dış çapı ise 120 mm olan bir silindir kullanılmıştır.

Şekil 85 (a)'da R125T05 sandviç numunesinin kuasi-statik - serbest test sonucu verilmiştir. Kuvvet – deformasyon eğrisinin şeklinden ve deformasyon tarihçesinden de anlaşılacağı gibi, numunedeki deformasyon progresif ezilen bir yapının tipik karakteristiklerini taşımaktadır. Bu test sonucu incelendiğinde yaklaşık 75 kN bir lokal maksimum kuvvetin (c noktası) yaklaşık 9 mm deformasyonda meydana geldiği görülmüştür. Bu lokal maksimum, yarı küresel kısımda oluşan burkulma sonrasında oluşan kattan kaynaklanmaktadır. İkinci lokal maksimum noktası aynı zamanda test esnasında ölçülen en yüksek maksimum değerdir ve 13 mm deformasyonda yaklaşık 80 kN (e noktası) olarak ölçülmüştür. Görülebileceği gibi bahsedilen maksimum kuvvet noktalarını kuvvet düşümleri takip etmiştir. Bu kuvvet düşümlerinin sebebi de yapının o bileşeninin burkulma yükünün aşıldığını ve burkulma dolayısıyla bir düğüm noktasının oluşarak daha düşük kuvvet ile yanal hareketin başlamasıdır. Ayrıca Şekil 86 (b)'den de görülebileceği gibi ortada bulunan çekirdek malzemesinin yanal hareketi çevrede bulunan dört adet çekirdek malzemeleri tarafından engellenmektedir. Testin devamında yarı küresel çekirdek malzemelerinin taban yüzey malzemelerine temas halindeki taban alanları büyümüş, malzemeler arası sürtünme kuvvetleri artmış ve 17,5 mm deformasyondan sonra ise tüm yapıda densifikasyon başlamıştır.



(a)

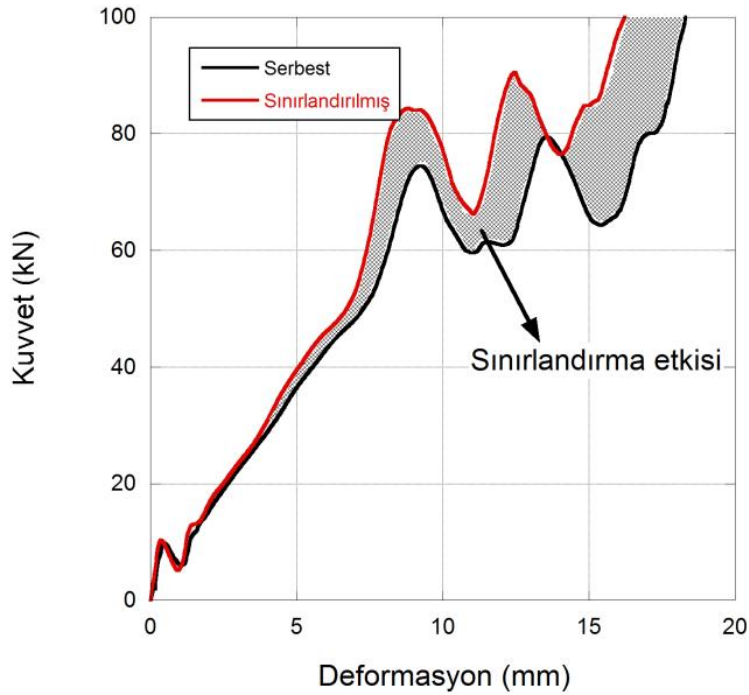


(b)

Şekil 85. (a) Sandviç yapının kuasi-statik – serbest test sonucu ve (b) deformasyon tarihçesi.

Sandviç yapı üzerinde gerçekleştirilen kuasi-statik – serbest ve kuasi-statik – sınırlandırılmış test sonuçları Şekil 86’da verilmiştir. Benzer progresif ezilme karakteristiğinin varlığı sınırlandırılmış test için de gözlemlenmiştir. Serbest teste göre daha düşük deformasyon seviyesinde daha yüksek kuvvet seviyeleri gözlemlenmiştir. İki eğri arasındaki taralı alan sınırlandırma etkisi dolayısıyla yapının deformasyonundaki değişimi göstermektedir. Sınırlandırılmış testte belirli bir deformasyon seviyesinden sonra, yarı

küresel kısımda oluşan katlanma sınırlandırma duvarına temas etmekte ve bu katın yanal hareketi sınırlandırma tarafından engellenmektedir. Dolayısıyla, sınırlandırma duvarı tarafından sağlanan ekstra desteğin aşılması burkulmanın gerçekleşmesi gerektiğinden yüksek burkulma kuvvetleri gözlemlenmektedir. Benzer bir durum literatürde progresif ezilen oluklu bir sandviç malzeme için de gözlemlenmiştir (Kılıçaslan vd. 2014). İlgili çalışmada sınırlandırmanın sonucu olarak burkulma ve burkulma sonrası gerilmelerinin arttığı gözlemlenmektedir. Sınırlandırma etkisi Şekil 86 (b) ve (c)'de verilen ezilmiş numunelerin üst görünüşlerinde de açık bir şekilde gözlemlenmektedir. Görülebileceği gibi, serbest testteki yanal sınırlandırmanın eksikliğinden dolayı çevresel çekirdek malzemeleri üçgenel asimetrik formda deforme olmaktadır. Diğer taraftan sınırlandırılmış testte numuneler global olarak daha simetrik bir formda deforme olmakta ayrıca sınırlandırma ile temas halindeki köşelerde lokal düzlenmeler gözlemlenmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 86. (a) Sandviç yapının kuasi-statik – serbest ve sınırlandırılmış test sonuçları karşılaştırması, (b) serbest test sonucu ezilmiş numune ve (c) sınırlandırılmış test sonucu ezilmiş numune.

Tablo 11’de R125T05 çekirdek malzemesinin tek başına test edilmesi durumundaki deneysel sonuçlar sunulmuştu. Tablo 12’de ise bu çekirdek malzemesinin beş tanesinin (sandviç yapı beş adet çekirdek ihtiva ettiğinden dolayı) temassız şekilde yan yana koyulduğu takdirde elde edilecek kuvvet ve enerji değerleri ile sandviçlerde deneysel olarak ölçülen sonuçlar birlikte sunulmuştur. Bu analizde sandviçlerin yüzey malzemelerinde oluşabilecek deformasyonların etkisi ihmal edilmiştir.

Tablo 12. Kuasi-statik test sonuçlarının çekirdek malzemesi ile karşılaştırması.

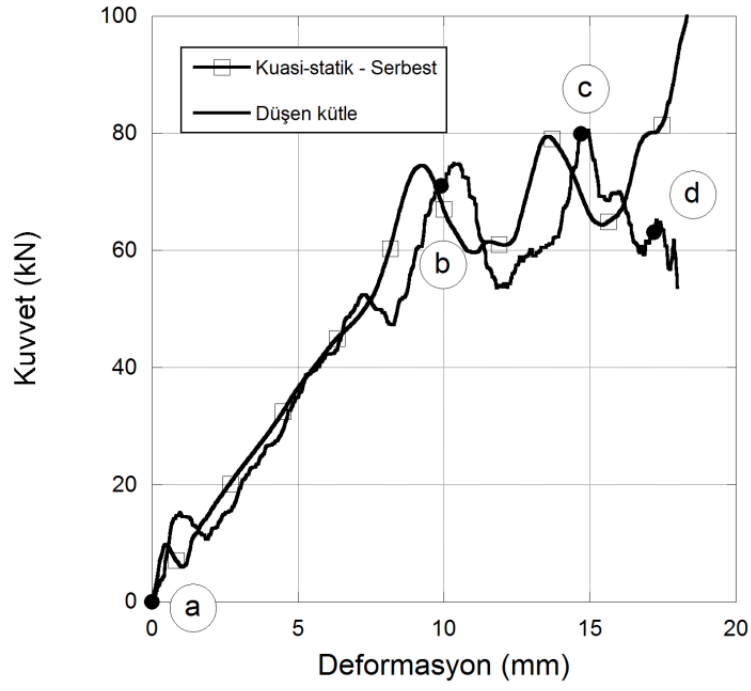
Numune	Test Hızı	$P_i$ (kN)	$P_{max}$ (kN)	$P_m$ (kN)	Enerji (J)	SAE (kJ/kg)
R125T05 Çekirdek Malzemesi (5 adet)	Kuasi-statik	77,5	98,085	53,8	1015	34
R125T05 Sandviç – Serbest	Kuasi-statik	75	80	52,49	961,57	32,05
R125T05 Sandviç - Sınırlandırılmış	Kuasi-statik	84	90	57,09	927,2	30,9



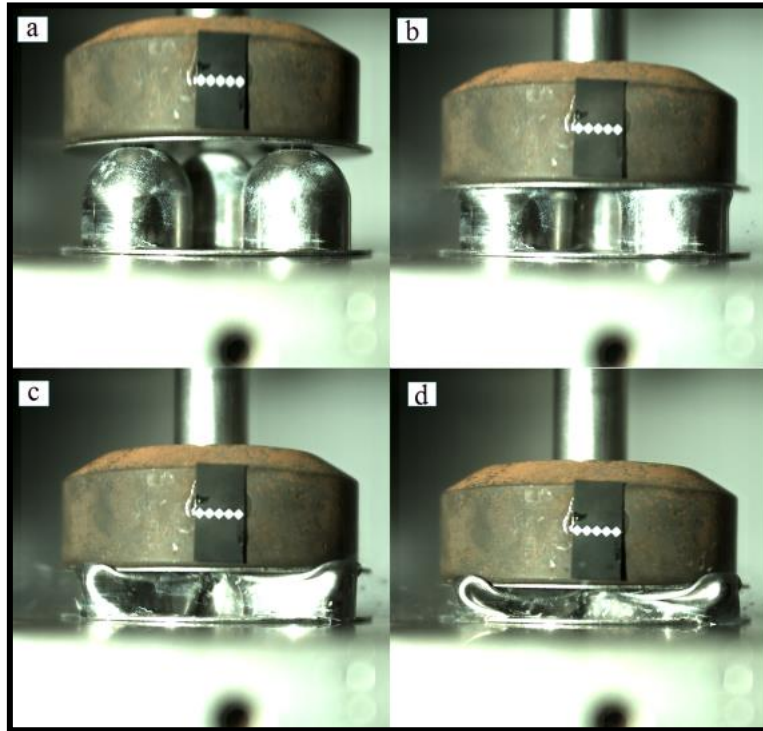
Tablo 12’de verilen sonuçlar incelendiğinde, serbest durumda sandviçin ilk maksimum kuvvetinde beş adet çekirdek malzemesine (tek çekirdek malzemesinin değerleri beş çarpanı ile çarpılarak elde edilen sonuçlar) göre bir düşüş gözlenmiştir. Aynı durum en yüksek maksimum kuvvet için de geçerlidir. Bu düşüşün sebebi, yanlardaki dört adet çekirdek malzemesinin yanal olarak merkezden dışa doğru serbest hareketinden kaynaklanmaktadır. Aynı durum ortalama kuvvet değeri için de geçerli olmakla birlikte toplam emilen enerji ve SAE miktarlarında çok fazla bir düşüş gözlemlenmemiştir. Fakat sınırlandırılmış sandviçte durum serbest sandviçten farklıdır. İlk maksimum kuvvet değeri beşli çekirdek malzemesinden ve serbest sandviçten oldukça fazladır. Bunun sebebi, ilk maksimum değere ulaşılırken yarı küresel kısmın çevresel sınırlama geometrisinden daha fazla deforme olmaya çalışması ancak sınırlandırmanın buna müsaade etmemesidir. Sınırlandırılmış durumda en yüksek maksimum kuvvet değeri serbest durumdan oldukça yüksek olmasına rağmen beş adet çekirdek malzemesinden düşük kalmıştır. Bu durumun çekirdek malzemelerin birbirleri arasında bulunan boşluklara doğru hareket edebilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. İncelenen alternatifler arasında en yüksek ortalama kuvvet değeri sınırlandırılmış sandviçte görülmüştür. Densifikasyon deformasyon seviyesi daha düşük kaldığı için toplam emilen enerji diğer durumlardan daha küçükse de SAE miktarları arasındaki fark hala azdır.

R125T05 çekirdek malzemesi içeren sandviç yapının kuasi-statik ezilme testlerinin tamamlanmasından sonra, şekil değiştirme hızının sandviç yapının ezilme karakteristiklerine etkisini ortaya koyabilmek için düşen kütle testleri yapılmıştır. Bu testler serbest konfigürasyon için Fractovis Plus düşen kütle test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen testlerin kamerayla kaydedilebilmesi sandviç yapıların ezilme davranışlarının incelenebilmesi açısından oldukça önem arz etmektedir. Bu amaçla tüm testler Photron FastCam yüksek hızlı kamera (10000 fps) ile kaydedilmiştir. Gerçekleştirilen test sonuçları Şekil 87’de görülebilir.





(a)

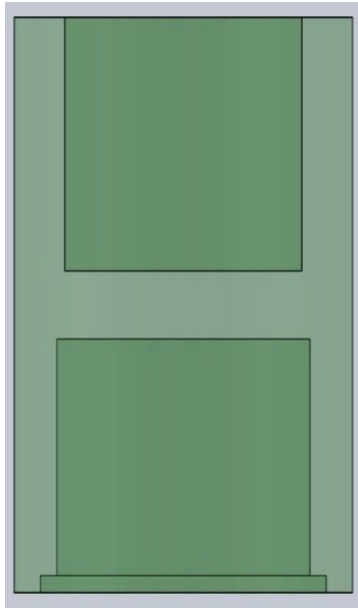


(b)

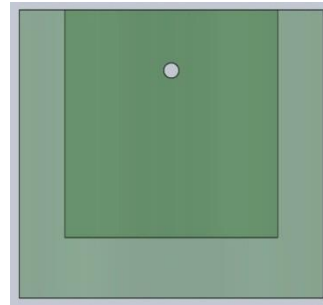
Şekil 87. (a) R125T05 sandviç yapının statik ve düşen kütle kuvvet-deformasyon eğrileri ve (b) deformasyon tarihçesi.

Şekil 87'de görülebileceği gibi, sandviç yapının üzerinde gerçekleştirilen düşen kütle test sonucuna göre, ilk lokal maksimum kuvvet 75 kN olarak 10,4 mm deformasyon seviyesinde ve silindirik kısmın deformasyonuna karşılık gelen ikinci lokal maksimum ise 80

kN olarak gözlemlenmiştir. Progresif ezilme davranışı açık bir şekilde bu deformasyon hızı seviyesinde de gözlemlenmiştir. Karşılaştırmalı sonuçtan da görülebileceği gibi düşen kütle testinin sonucu kuasi-statik – serbest test sonucu ile maksimum kuvvet noktalarındaki deformasyon miktarlarındaki değişim haricinde neredeyse aynıdır. Bunun sebebi, çekirdek malzemesinin düşük hızlarda düşük deformasyon hızı ve düşük atalet etkilerine maruz kalmasıdır. Bu konu ile ilgili yarı küresel çekirdek malzemeleri ile ilgili ayrıntılı inceleme önceki bölümde verilmiştir. Bu bölümde sandviçler üzerindeki atalet ve deformasyon hızı etkilerine değinilmiştir. Deformasyon şekillerinden görülebileceği gibi çekirdek yapıların deformasyonu yarı küresel kısımda tipik içe çukurlaşma modu ile başlamaktadır. Komşu yarı küresel çekirdek malzemeleri arasındaki etkileşim dolayısıyla bu mod asimetrik olarak oluşmaktadır. Bu mod plastik düğüm noktalarının oluşumu ile sonlanmakta ve yanal sınırlandırmanın olmayışı dolayısıyla da kuasi-statik serbest numunede olduğu gibi çevresel çekirdek malzemeleri yanal olarak hareket etmektedirler.



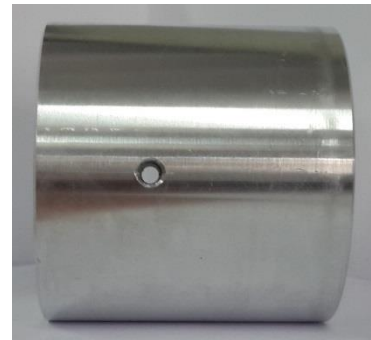
(a)



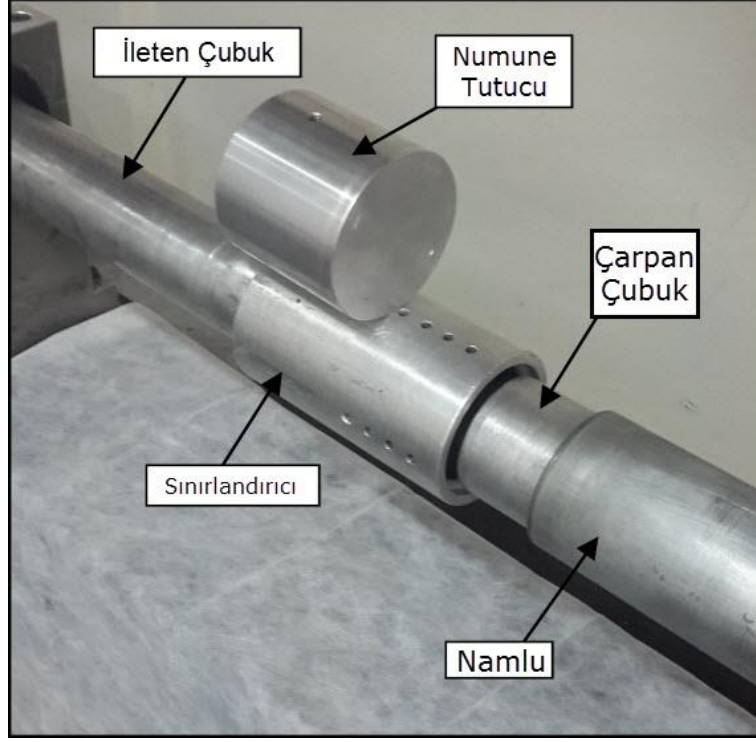
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 88. (a) ve (c) sırasıyla sınırlandırılmış modifiye-DBDD aparatı katı modeli ve üretilen parça, (b) ve (d) sırasıyla serbest modifiye-DBDD aparatı katı modeli ve üretilen parça, (e) modifiye-DBDD test cihazı.

Proje kapsamında malzemelerin maruz kaldığı deformasyon hızı ve atalet etkilerini daha iyi anlayabilmek için dinamik ezilme veya modifiye-DBDD testleri gerçekleştirilmiştir. Bu test düzeneği ve numunelerin bağlandığı ekipmanlar Şekil 88'de görülebilir. Bu düzenek Şekil 4'de resmi görülen düzeneğin modifiye edilmesiyle oluşturulmuştur ve çubuk malzemesi olarak 7075-T6 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Bu düzenek; bir gaz tabancasından, 150 mm uzunluğunda ve 75 mm çapında bir çarpan çubuktan ve 2000mm uzunluğunda ve 70 mm çapında bir ileten çubuktan oluşmaktadır. Sınırlandırılmış modifiye-DBDD testlerinde 100 mm dış çapa sahip bir sınırlandırıcı kullanılarak radyal sınırlandırma etkisi sağlanmıştır. Bu testlerde sınırlandırıcı ayrıca bir boyutsal adaptör olarak da çalışmaktadır. Serbest modifiye-DBDD testlerinde ise numune tutucusu sadece numune ve ileten çubuk arasında boyutsal adaptör olarak kullanılmıştır.

Sınırlandırılmış testlerde çarpan çubuk 50 mm kalınlığında bir pistonla çarptırılmış ve numune bu piston ile ezilirken, serbest testlerde çarpan çubuk direkt olarak numuneye çarptırılmıştır. Çarpan çubuğun ilk hızı namlu üzerine monte edilmiş lazerli hız ölçer sensörler sayesinde ölçülmüştür. Tüm testlerde çarpan çubuk ilk hızı ortalama 40 m/s olarak ölçülmüştür.

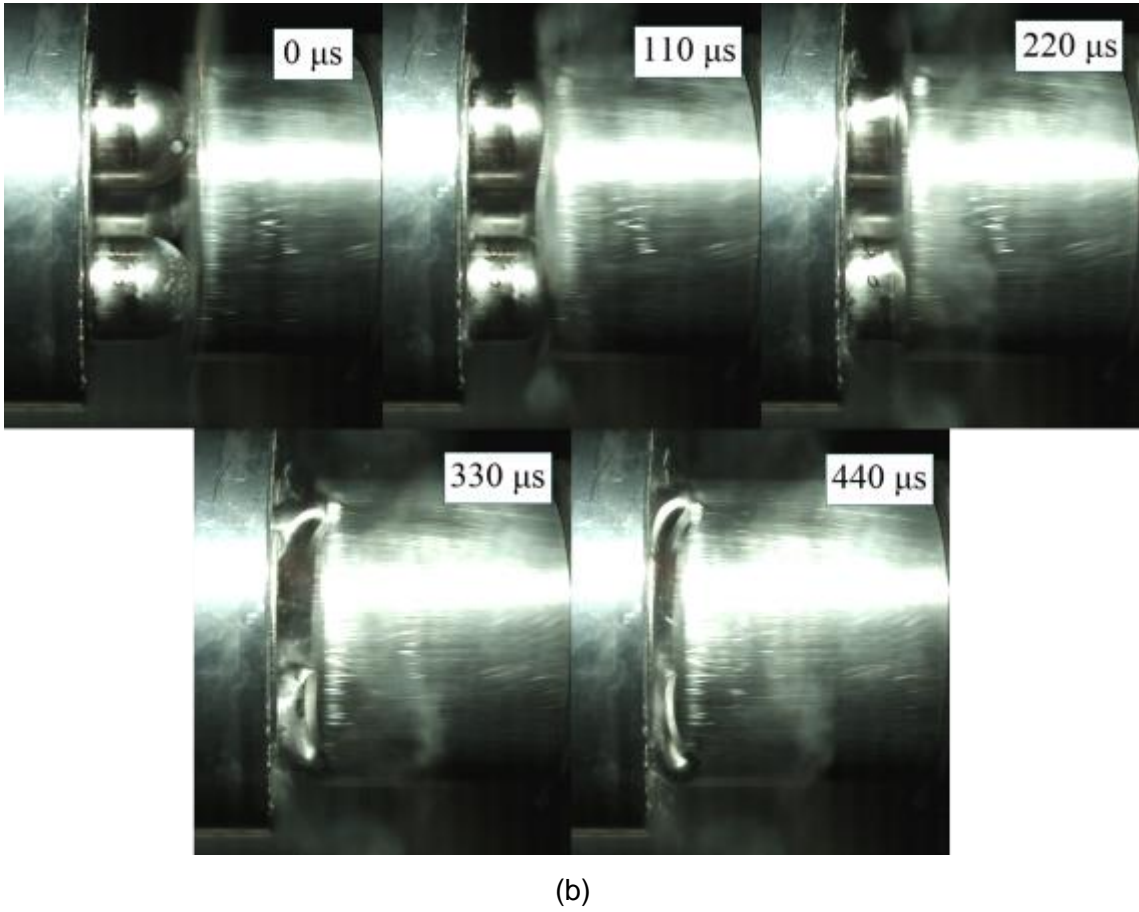
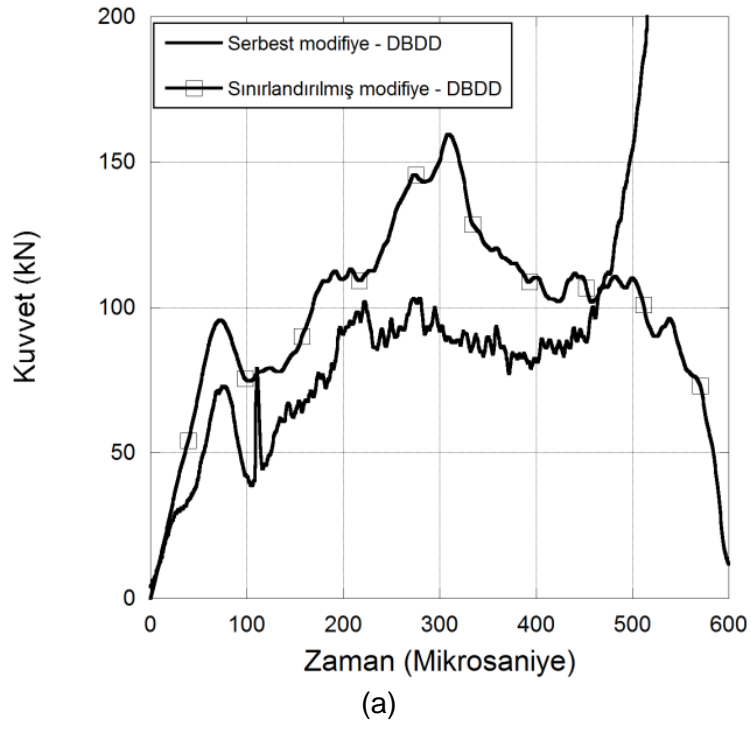
Bu testlerde ezilme kuvvetinin ölçülmesi için ileten çubuk üzerine gerinim ölçerler monte edilerek gerinim tarihçesi ( $\varepsilon_T$ ) bir osiloskop vasıtasıyla kaydedilmiştir. Sonrasında gerinim tarihçesi çubuk gerilmesini ( $\sigma_T$ ) hesaplamada kullanılmış ve sonuç kuvvet tarihçesine ( $F_{Dinamik}$ ) aşağıdaki denklemler kullanılarak dönüştürülmüştür;

$$\sigma_T = E_{bar} \varepsilon_T \quad \text{Denklem (22)}$$

$$F_{Dynamic} = \sigma_T A_{bar} \quad \text{Denklem (23)}$$

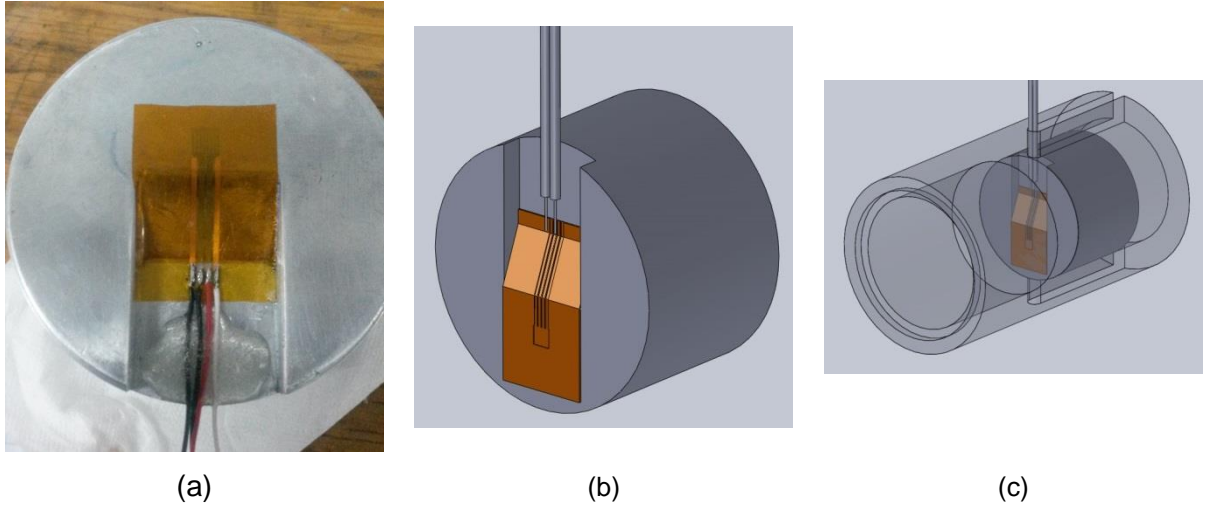
Bu testlerde yüksek hızlı kamera (18000 fps) kullanılarak sandviçlerin yüksek hızlarda deformasyon tarihçeleri incelenebilmiştir. Sınırlandırılmış testlerin deformasyon görüntülerinin kaydedilemeyeceği açıktır.

Şekil 89 (a)'dan görülebileceği gibi, sınırlandırılmış ve serbest testlerde benzer sonuçlar elde edilmiş, en göze çarpan fark ise sınırlandırılmış testte çarpan çubuğun ilk hızının sandviç yapıyı densifikasyon noktasına kadar ezmeyi başaramamış ve bir geri yükleme bölgesinin grafikte görülmüş olmasıdır. İki test için de ortalama kuvvetler kuasi-statik ve düşen kütle testlerinden yüksek bulunmuştur. Kılıçaslan ve diğerleri (Kılıçaslan vd. 2014) benzer bir sonucu oluklu bir sandviç yapı için de rapor etmişler ve bu durumu yüksek çarpma hızındaki yüksek atalet etkisine bağlamışlardır. Bu çalışmadaki sonuçlarda da benzer bir durum geçerli olsa da Şekil 89 (b) ve Şekil 85 (b)'nin karşılaştırılmasında görülebileceği gibi deformasyon modunun da değiştiği açıktır. Serbest modifiye – DBDD testinde, deformasyon esnasında çekirdek malzemelerinin deformasyonu ile oluşan düğüm noktaları, yüksek radyal ivme ile yanal olarak hareket etmektedirler. Bu durum sınırlandırılmış modifiye – DBDD testinde radyal sınırlandırıcı tarafından kısıtlandığından elde edilen ortalama ezilme kuvvetinde bir artışa sebep olmaktadır.



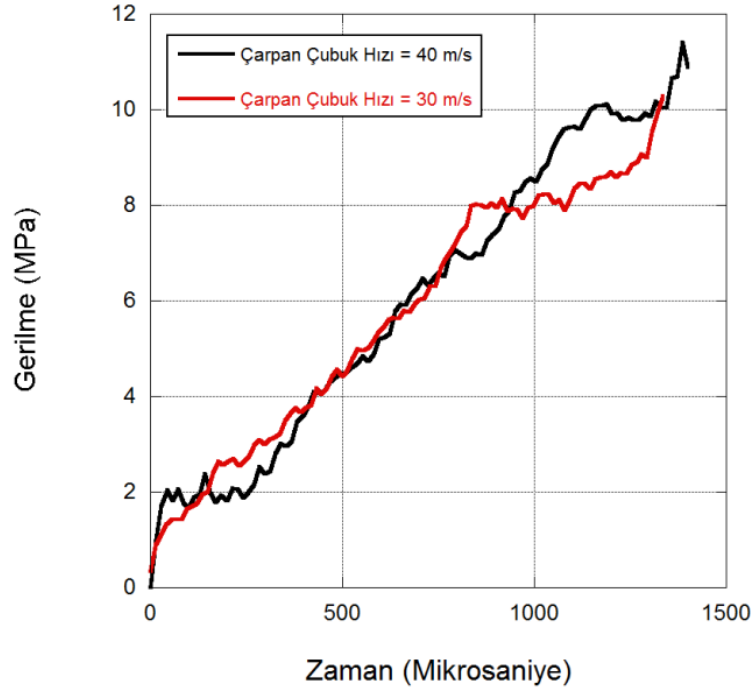
Şekil 89. (a) R125T05 sandviç yapının serbest ve sınırlandırılmış modifiye - DBDD kuvvet-zaman eğrileri ve (b) serbest deneydeki deformasyon tarihçesi.

Proje kapsamında sandviç yapılarda arka yüzeyde oluşan gerilmenin ölçülmesi amacıyla gerilme ölçerler kullanılmış ve bu amaçla modifiye-DBDD düzeneği oluşturulmuştur. Sınırlandırılmış modifiye-DBDD düzeneğinin temel olarak kullanıldığı bu testlerde, gerilme ölçer bağlandığı silindirik elemanın bir tarafı sınırlandırıcının arka yüzüne temas ederken diğer tarafı iletken çubuğa temas etmesiyle gerilme dalgasının iletimi sağlanmıştır. Kullanılan gerilme ölçer aparat üzerindeki durumu ve testlerde kullanılan aparatların montaj resimleri Şekil 90'da verilmiştir.



Şekil 90. (a) Aparat üzerine yapıştırılan gerilme ölçer, (b) ve (c) gerilme ölçer aparatının montaj resimleri.

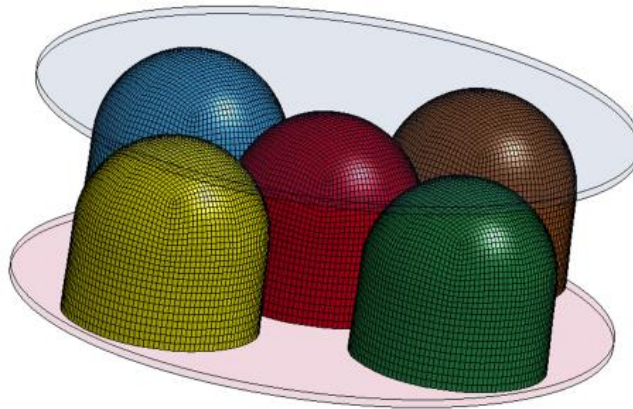
Gerilme ölçer ve aparatın montajının tamamlanmasının ardından, modifiye-DBDD düzeneğinde farklı çarpan çubuk hızlarında ezilme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler kapsamında AISI 304L paslanmaz çeliği yüzey malzemesine sahip R125T05 çekirdek numunelerini içeren sandviç yapılar, 50 mm boya sahip pistonla 150 mm'lik çarpan çubuğun vurması ile ezilmiştir. Farklı çarpan çubuk hızlarında gerilme ölçerden elde edilen gerilme-zaman eğrileri Şekil 91'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sonuçlardan görüleceği üzere farklı çarpan çubuk hızlarında numunelerin arka yüzeyinden ölçülen gerilmelerde belirgin bir farklılık görülmemiştir. Sonuçlardaki benzerliğin sebebi olarak, belirtilen çarpan çubuk hızları ile ulaşılan deformasyon hızlarında atalet etkisinin ve deformasyon hızı hassasiyetinin yakın olması düşünülmektedir.



Şekil 91. Gerilme ölçerden elde edilen gerilme-zaman eğrileri.

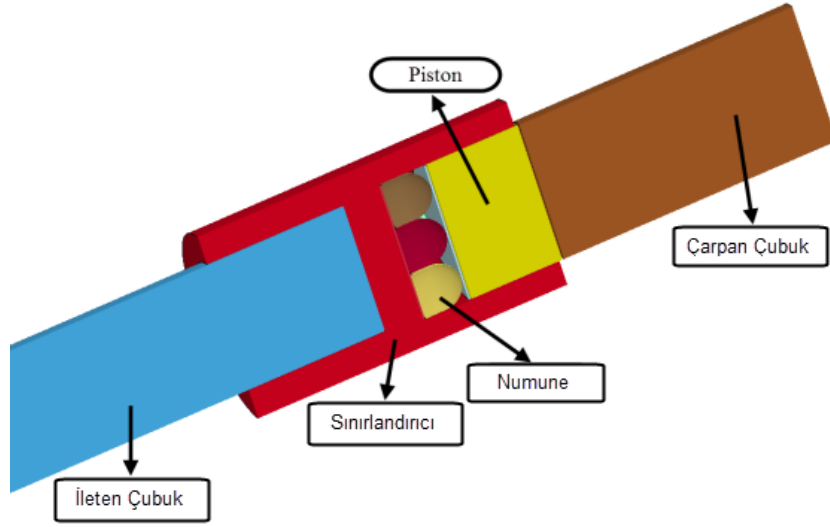
## 6.2 Nümerik İnceleme

Sandviç malzemelerin ezilme karakteristiklerinin kuasi-statik, orta ve yüksek hızlarda deneysel yöntemler kullanılarak incelenmesinin tamamlanmasının ardından bu testlerin nümerik modelleme çalışmalarına geçilmiştir. Nümerik modellerde kullanılan numune ve dinamik test modelleri Şekil 92'de verilmiştir.

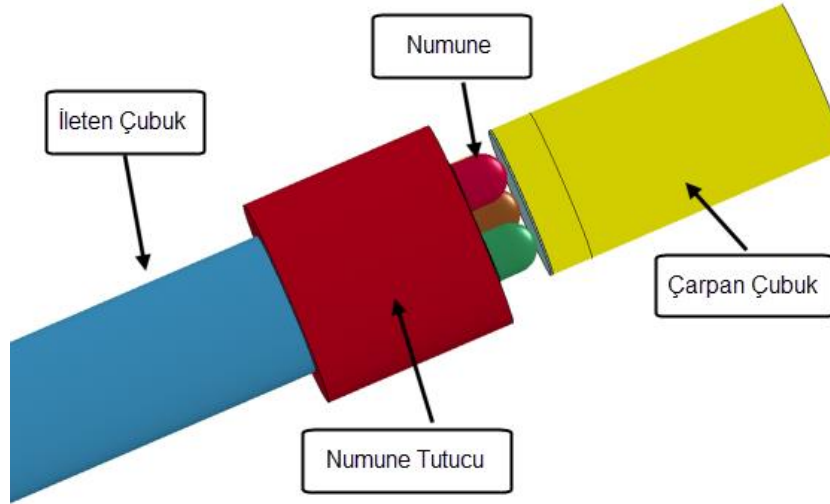


(a)





(b)



(c)

Şekil 92. (a) Sandviç numune modeli, (b) sınırlandırılmış ve (c) serbest modifiye-DBDD nümerik modelleri.

Kuasi-statik ve düşen kütle testlerinin modellenmesinde tek yarı küresel geometrilerinin modellenmesinde bir önceki bölümde açıklanan metodoloji kullanılmıştır. Tüm modellerde yüzey malzemeleri haricindeki parçalarda eleman formülasyonu olarak sabit gerilmeli katı elemanlar kullanılmıştır. Yüzey malzemelerinin modellenmesinde ise tam integrasyonlu katı elemanlar kullanılmıştır. Çekirdek yapılar daha önce de bahsedildiği gibi Yeniden Başlatmalı Analiz Tekniği kullanılarak oluşturulmuş ve bunların modellenmesinde Belytschko-Tsay kabuk elemanlar kullanılmıştır. Kabuk elemanlarda kalınlık boyunca integrasyon noktası sayısı 5 olarak belirlenmiştir. Kabuk elemanların kalınlığı Yeniden Başlatmalı Analiz Tekniği'nin sonucu olarak üretim aşamasında bulunduğu noktaya göre

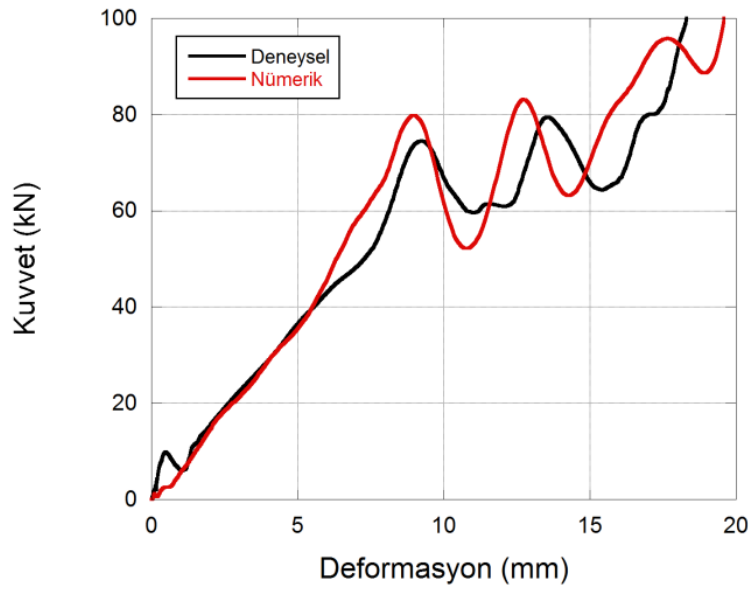


değişmektedir. Bu kalınlık bilgisi kalıcı şekil değiştirme miktarları ve kalıcı gerilme miktarları ile birlikte önceki simülasyon adımından (derin çekme) gelmektedir.

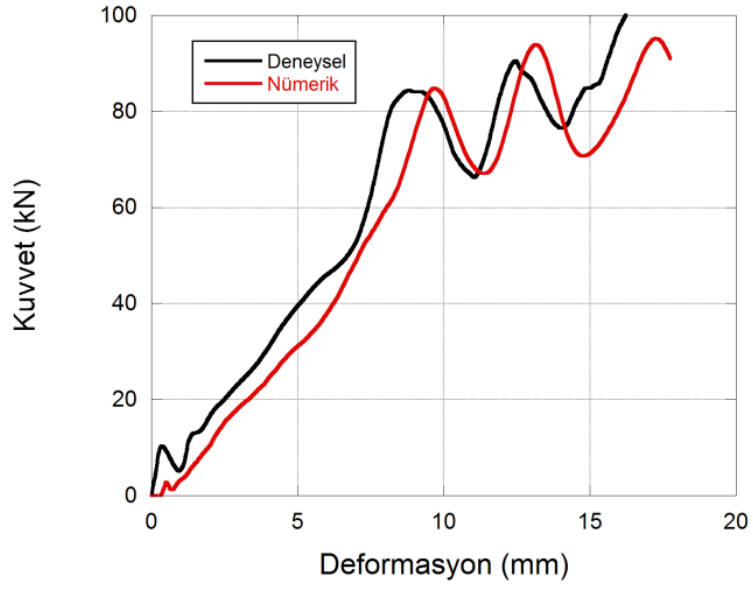
Simülasyonlarda SURFACE\_TO\_SURFACE temelli temas algoritmaları deney düzeneği parçalarının birbiri ile temasını tanımlamak için kullanılmıştır (dinamik testler). Deney düzeneği parçaları ile numune arasındaki temas algoritması ERODING\_SURFACE\_TO\_SURFACE (tüm testler) seçilmiş ve çekirdek malzemelerin hasarı sonucunda oluşacak erozyonun temas algoritması tarafından hesaba katılması garanti altına alınmıştır. Son olarak numuneyi oluşturan çekirdek malzemelerinin ve yüzey plakalarının birbirleri ile temaslarının modellenmesi amacıyla ERODING\_SINGLE\_SURFACE algoritması kullanılmıştır.

Gerçekleştirilen dinamik simülasyonlarda çarpan çubuğa deneyde ölçülen ilk hız değerleri tanımlanarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarının deney sonuçları ile karşılaştırılması amacıyla, deneyde ileten çubuk üzerine monte edilen gerinim ölçerlerin bulunduğu noktalar simülasyonlarda belirlenmiş ve kuvvet tarihçeleri bu noktalardaki elemanlardan alınmıştır. Bu noktalardaki elemanlar simülasyon esnasında o bölgedeki kuvveti, kendi fiziksel boyutlarına bağlı olarak kaydettiğinden deney ve model sonuçları arasında kabul edilebilir küçük sapmalar gözlenebilir. Esasen aynı durum deney esnasında gerinim ölçerin kapladığı alan için de geçerlidir.

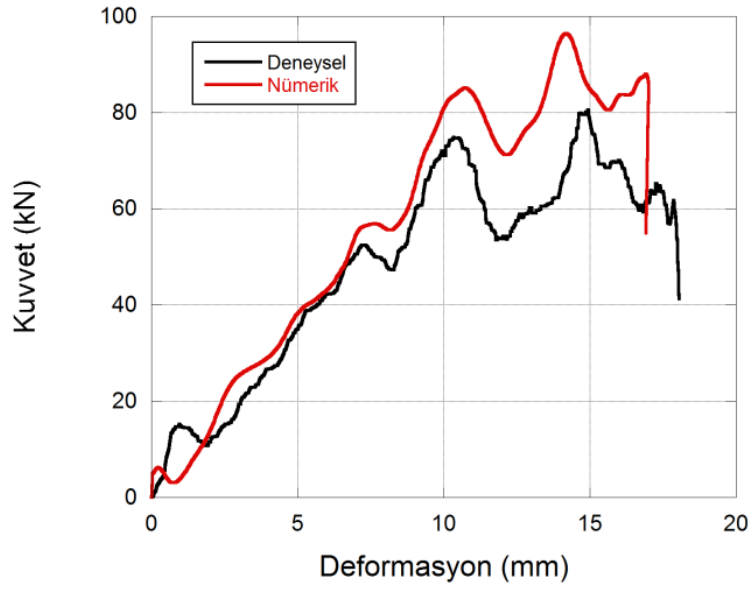
Şekil 93'de R125T05 çekirdek malzemesi içeren sandviç yapılara ait kuasi-statik ve düşen ağırlık test ve nümerik model sonuçları verilmiştir. Model sonuçlarının deney sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Bu noktada esas amaç sadece bu uyumu görmek yerine hazırlanan modelin (malzeme modeli ve nümerik model) farklı yükleme ve geometrik şartlar altında başarılı sonuçlar verdiğini tespit etmek ve bu noktadan sonra patlama testleri nümerik model sonuçlarının güvenilirliğini arttırmaktır. Yine ayrıca modelin başarılı çalışması bazı farklı kombinasyonların (farklı kalınlık ve farklı yerleşim) ezilme karakteristiklerinin sadece nümerik yaklaşım kullanılarak parametrik olarak incelenbilmesine olanak verecektir.



(a)

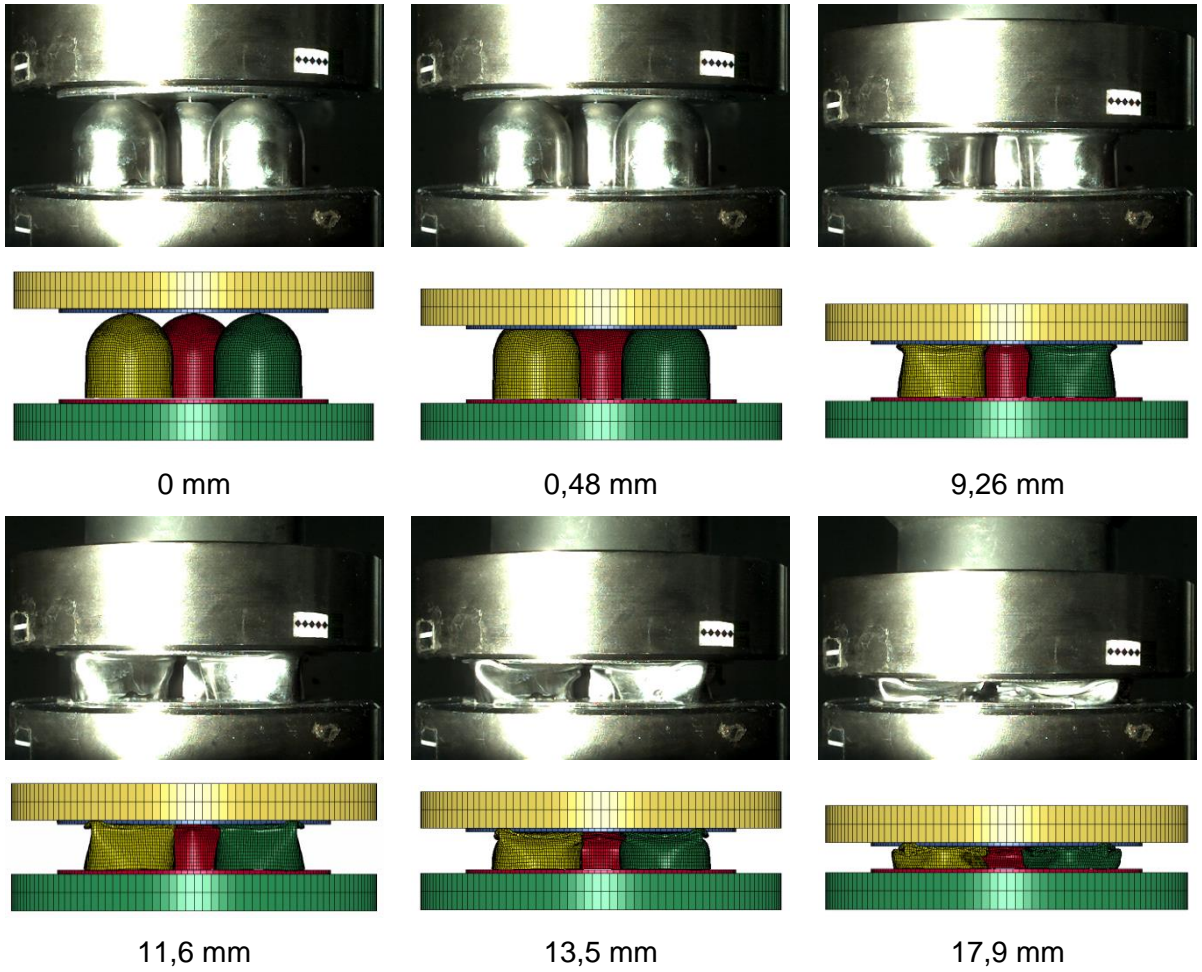


(b)



(c)

Şekil 93. R125T05 sandviç yapının test ve simülasyon sonucu karşılaştırmaları (a) kuasi- statik – serbest, (b) kuasi- statik – sınırlandırılmış, (c) düşen kütle test ve simülasyon sonucu.



Şekil 94. R125T05 numunenin statik – serbest test ve simülasyon deformasyon tarihçeleri.

Şekil 94'de R125T05 sandviç numunenin kuasi-statik – serbest deneysel ve nümerik deformasyon tarihçeleri verilmiştir. Seçilen noktalar incelendiğinde; 0,48 mm deformasyon numunelerde yarı küresel kısmın tepe noktasının üst yüzey plakasından ayrıldığı ana karşılık gelen ilk maksimum noktadır. 17,9 mm deformasyon ise yapının densifikasyona başladığı andır. Şekil 94'den görülebileceği üzere çevresel dizili yarı küreler deformasyonun ilerlemesi ile birlikte yüzey plakalarının arasından sıyrılma eğilimi göstermektedirler ve merkezdeki yarı kürenin engellemesi dolayısıyla dışa doğru katlanma eğilimi göstermektedirler. Bu eğilim deformasyonun en kolay olacağı şekilde yapının deforme olmasıyla açıklanabilir. Tekli çekirdek testlerinde görülen içe doğru katlanma modu sandviç yapıdaki yarı küresel çekirdeklerde görülmekle birlikte ortadaki yarı kürenin engellemesiyle simetrik yapıdan uzaklaşmıştır. Sandviç yapının son deforme olmuş durumu Şekil 95'de nümerik simülasyon sonucu ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



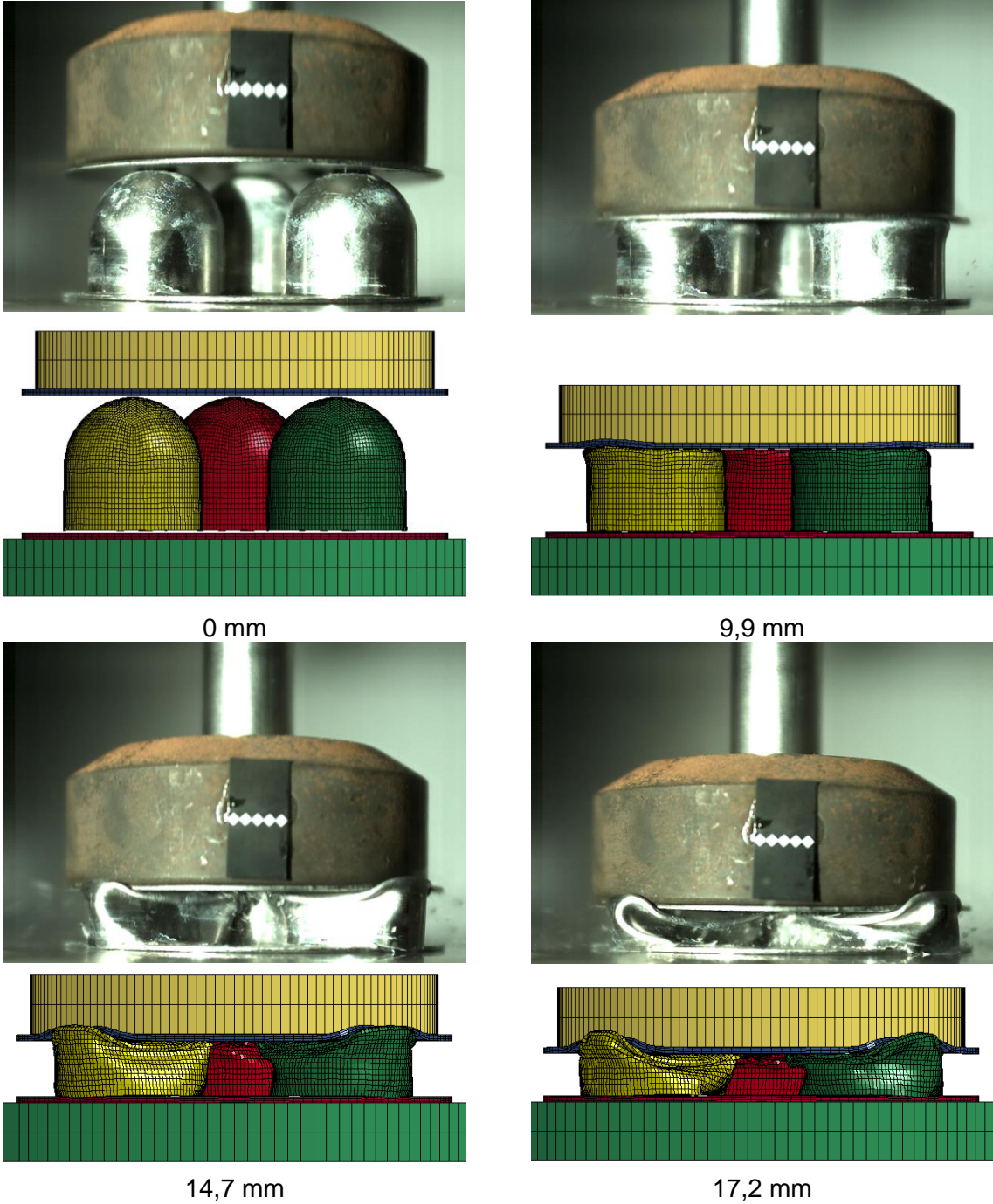
Şekil 95. R125T05 sandviç numunenin kuasi-statik – serbest test ve simülasyon sonucu ezilmiş şekli.



Şekil 96. R125T05 sandviç numunenin kuasi-statik – sınırlandırılmış (a) test ve (b) simülasyon sonucu ezilmiş şekli.

Şekil 96'da R125T05 sandviç numunenin kuasi-statik – sınırlandırılmış test ve simülasyon sonucu ezilme geometrisi verilmiştir. Serbest test ve simülasyon sonucunda

olduğu gibi ortadaki yarı küre simetrik şekilde deforme olmaktadır. Bu durumda çevrede kalan dört adet yarı küre sınırlandırma kalıbı tarafından engellendiğinden çevresel yarı kürelerin yanal deformasyonu belirli bir miktardan fazla ilerleyememektedir. Bu durum ortadaki yarı kürenin de deformasyonunu etkilemekte ve ortadaki yarı küre yaklaşık kare kesit şeklinde deforme olmaktadır.

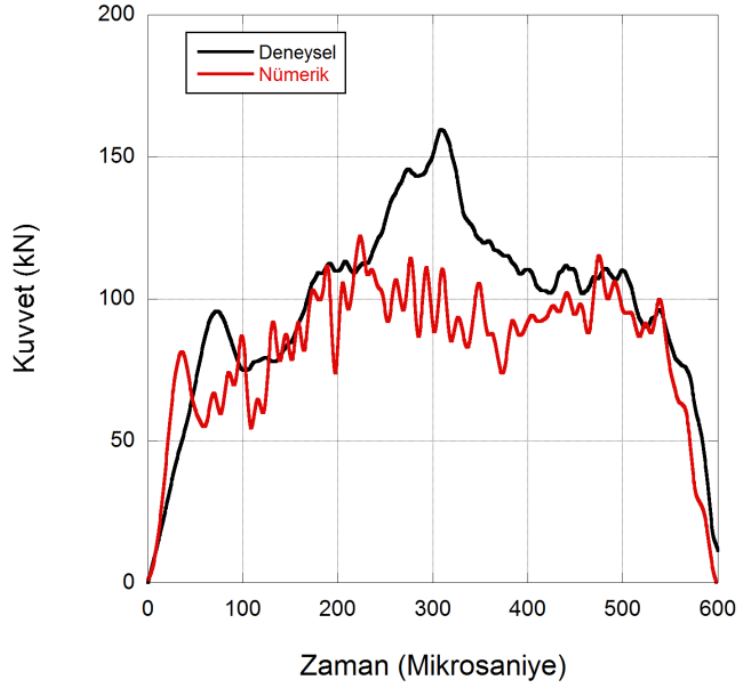


Şekil 97. R125T05 sandviç numunenin düşen kütle test ve simülasyon sonucu deformasyon tarihçeleri.

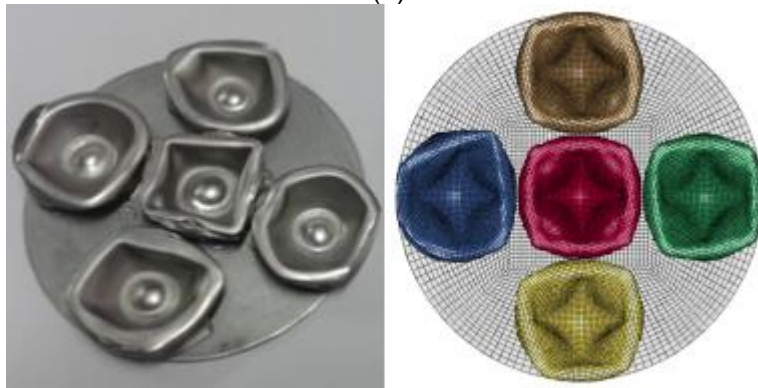


Şekil 97'de R125T05 sandviç numunenin düşen kütle test ve simülasyon deformasyon tarihçeleri verilmiştir. Serbest kuasi-statik test sonucunda olduğu gibi çevredeki yarı küreler yanal olarak serbest deforme olma eğilimi göstermektedirler. 9,9 mm deformasyon yarı küresel kısmın deformasyonunun son anlarına denk gelmektedir. Bu anlardan sonra deformasyon silindirik kısma aktarılmaya başlanmış ve silindirik kısımda oluşan katlar dışa doğru yayılma eğilimi göstermeye başlamıştır.

Kuasi-statik ve orta hızlarda ezilme davranışının nümerik olarak incelenmesinin tamamlanmasının ardından, dinamik ezilme davranışlarının belirlenebilmesi amacıyla modifiye-DBDD simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Şekil 98'de R125T05 sandviç yapının sınırlandırılmış modifiye-DBDD deney ve simülasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



(a)

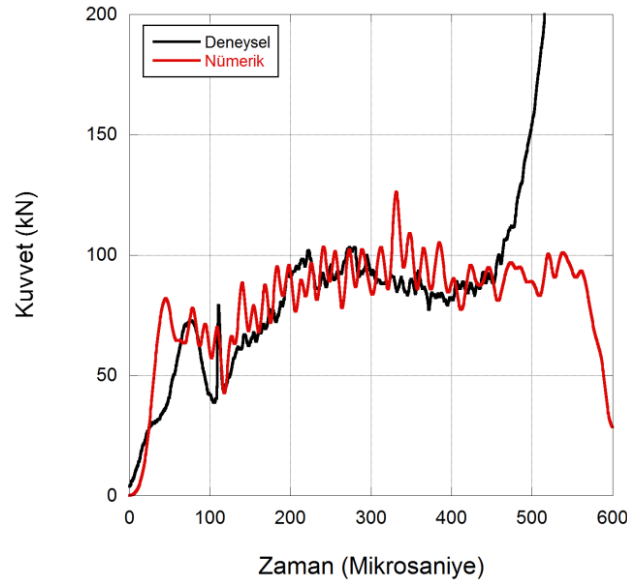


(b)

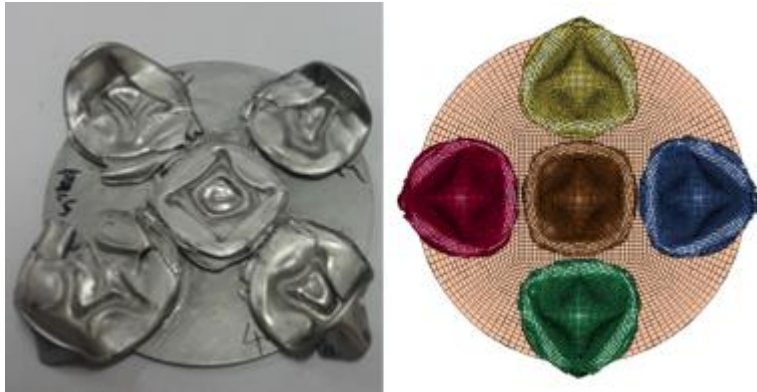
Şekil 98. (a) R125T05 sandviç yapının sınırlandırılmış modifiye-DBDD deney ve simülasyon sonucu, (b) deney ve simülasyon sonucu ezilmiş numune.

Model sonuçları incelendiğinde modelin kuvvet-zaman tarihçesini kuvvet değerleri ve zaman skalası açısından başarılı şekilde yakaladığı görülmektedir. Sınırlandırılmış test ve nümerik simülasyonlarda deformasyon yaklaşık 600 mikrosaniyede tamamlanmaktadır. Şekil 98 (b)'de ise ezilmiş numuneler görülmektedir. Sınırlandırma etkisi dolayısıyla çevresel yarı kürelerin yanal deformasyonu engellenmiş, bu yarı küreler ortadaki çekirdek yapısını da sınırlandırarak simetrik şekilde deforme olmasına sebep olmuştur. Deneyde çevresel yarı kürelerde gözlenen geometrik olarak trapezoid kesitli deformasyon simülasyonda da gözlemlenmiştir.

Serbest modifiye-DBDD deney ve simülasyon sonucu Şekil 99'da sunulmuştur. Benzer şekilde hem kuvvet zaman tarihçesi hem de deformasyon profilleri nümerik model tarafından başarı ile yakalanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 99. (a) R125T05 sandviç yapının serbest modifiye-DBDD deney ve simülasyon sonucu, (b) deney ve simülasyon sonucu ezilmiş numune.

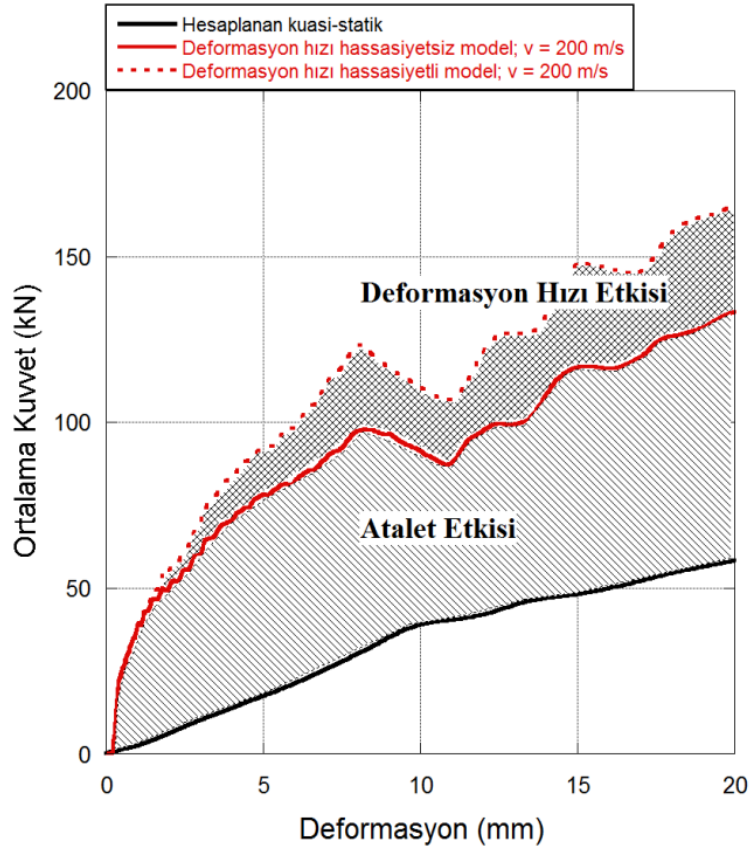
### 6.2.1 Sandviç Yapılarda Deformasyon Hızı ve Atalet Etkilerinin Nümerik İncelenmesi

Sandviç yapılar üzerinde gerçekleştirilen deneysel ve nümerik incelemeler, çekirdek malzemeleri üzerinde gerçekleştirilen ve daha önceki bölümde verilen sonuçlarla da birlikte düşünüldüğünde nümerik modellerin deneyler sonucunda elde edilen ezilme ve enerji emme karakteristiklerini tüm incelenen hız rejimlerinde başarı ile gösterdiğini kanıtlamaktadır. Dolayısıyla, yine yarı küresel çekirdek geometrisinde benzeri gerçekleştirilen nümerik atalet ve çekirdek malzemesinin deformasyon hızı hassasiyetini hesaba katacak şekilde bir çalışma sandviç yapılar için gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, bu faktörlerin etkilerini birbirinden ayırt edebilmek için nümerik modeller malzemenin deformasyon hızı hassasiyetinin olmadığı kabulü ile tekrar çalıştırılmışlardır. Sonra, deformasyon hızı hassasiyetinin dahil edildiği ve dahil edilmediği sonuçlar kuasi-statik ezilme sonuçları ile karşılaştırılarak bu etkiler irdelenebilmiştir. Bu çalışmaların sandviç yapılar üzerinde ayriyetten gerçekleştirilmesi ile birim çekirdek yapılarının birbirleri ve etrafları ile etkileşimlerinden dolayı oluşacak farklılıklar hesaba katılmış olacaktır.

Daha önceki bölümde de bahsedildiği gibi bu çalışmada incelenen yarı küresel yapılar Tip I yarı küresel kısım ile Tip II silindirik kısımların birleşmesinden oluşmaktadır. Dolayısıyla deformasyon hızı ve atalet etkilerinin hem yapıların bileşenlerinden farklı hem de bunların bir bileşkesi olacağı açıktır. Bu bileşik etkinin yanısıra, oluşturulan sandviç yapının içindeki yarı küresel çekirdek malzemelerinin birbirleri ile de etkileşim içerisinde olacağı açıktır. Bu etkilerin incelenmesi amacıyla 50 – 200 m/s sabit ezme hızlarında modeller deformasyon hızı hassasiyetini hesaba katacak ve katmayacak şekilde oluşturulmuşlardır.

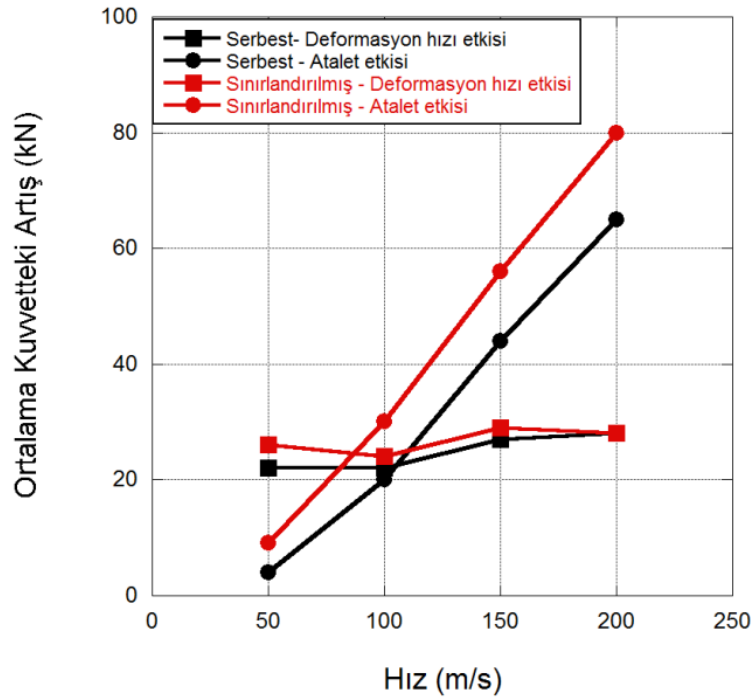
Şekil 100'de 200 m/s sabit ezme hızındaki bir simülasyon sonucu ile incelemenin nasıl gerçekleştirildiği görülebilir. Burada görülebileceği gibi, deformasyon hızı hassasiyetsiz ve kuasi-statik modeller arasında kalan alan atalet etkisinden dolayı oluşan artışı ve deformasyon hızı hassasiyetli ve hassasiyetsiz modeller arasında kalan alan ise şekil değiştirme hızı hassasiyetinden dolayı artışı vermektedir.





Şekil 100. Sandviç yapıda 200 m/s hızda deformasyon hızı ve atalet etkileri.

Şekil 100'de verilen örnek inceleme tüm incelenen hızlar için gerçekleştirilmiş ve ortalama kuvvette gerçekleşen artış ortalama cinsinden Şekil 101'de verilmiştir. Görülebileceği gibi bu grafikte verilen sonuçlarda hem sınırlandırılmış hem de serbest konfigürasyonlarda sonuçlar verilmektedir.



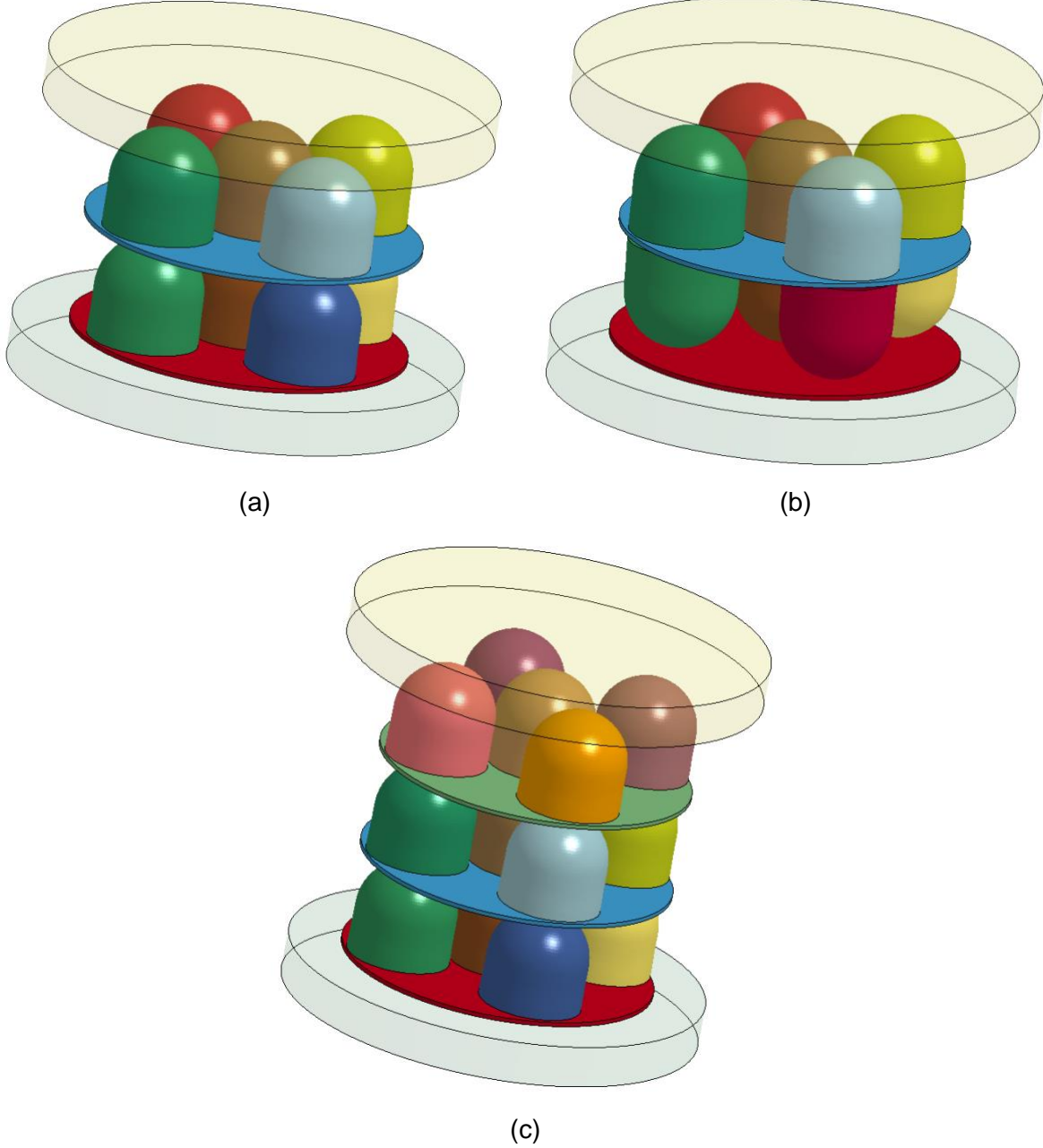
Şekil 101. Ortalama kuvvetteki artış – hız grafiği.

Sonuçlardan da görülebileceği gibi, hem sınırlandırılmış hem de serbest konfigürasyonlarda atalet etkisinin deformasyon hızı etkisine göre daha yüksek olduğu açıktır. Dahası, deformasyon hızı etkilerinin aynı daha önceki bölümde verilen yarı küresel çekirdek geometrilerinde de olduğu gibi neredeyse ezme hızından bağımsız olduğu tesbit edilmiştir. Her iki etki de sınırlandırılmış durumda serbest durumdan daha yüksektir. Görülebileceği gibi atalet etkilerini gösterir eğriler sınırlandırılmış ve serbest durumda birbirlerine paralel ve sınırlandırılmış durumdaki eğri bir ofset değeri ile serbest durumdan fazladır. Aradaki bu fark sınırlandırma etkisinden kaynaklanmaktadır.

### 6.2.2 Sandviç Yapılarda Katmanlama Etkilerinin Nümerik İncelenmesi

Sandviç yapılarda çekirdek malzemelerinin çok katmanlı olarak kullanıldığı uygulamalara, yapının toplam ağırlığını fazla arttırmadan enerji emme kapasitesini arttırdığından dolayı sıkça rastlanılmaktadır. Katmanlama ile sandviç yapının toplam ezilme miktarı artar ve dolayısıyla kuvvet-deformasyon eğrisi altında kalan alan arttığından emilen enerji miktarı artmış olur. Ayrıca temas halindeki katmanlar arasındaki etkileşimler, deformasyon modunda değişikliklere sebep olabileceğinden, ezilme kuvveti ve enerjisinde bir artış gözlenebilir. Dolayısıyla çalışmaya çok katmanlı sandviçlerin nümerik incelenmesi ile devam edilmiştir. Bu incelemeler 50 m/s sabit ezme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 102'de verilen çok katmanlı konfigürasyonlar tek katmanlı sandviç yapılar (Şekil 92 (a) ) ile

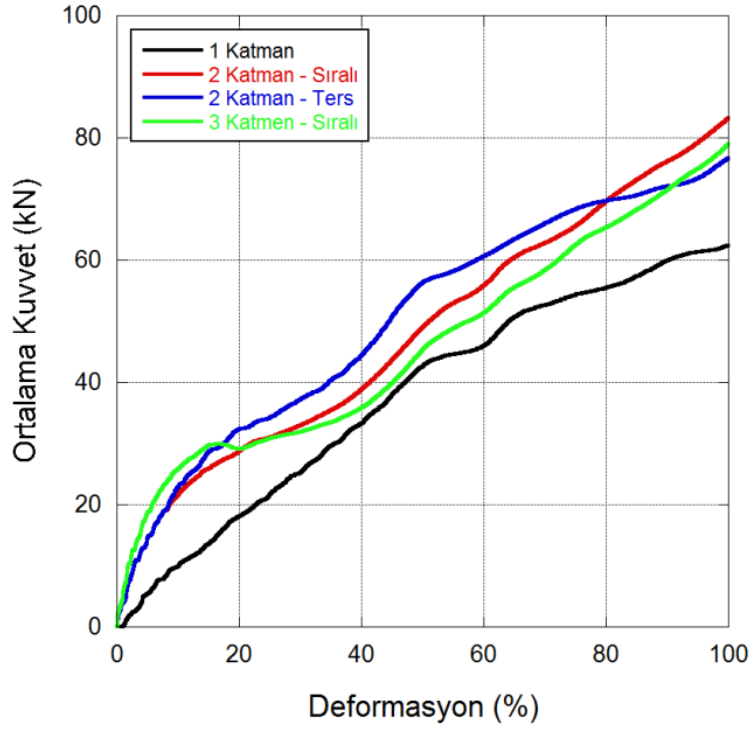
karşılaştırılmışlardır. Oluşturulan konfigürasyonlarda AISI 304L paslanmaz çeliği malzemeden ara yüzey malzemeleri kullanılmış ve ön yüzey malzemeleri modellemeden çıkarılarak ilk momentum transferi esnasında gözlenen yüksek kuvvet değerleri elimine edilmiştir.



Şekil 102. (a) Sıralı iki katmanlı, (b) Ters iki katmanlı, (c) Sıralı üç katmanlı sandviç yapılar.

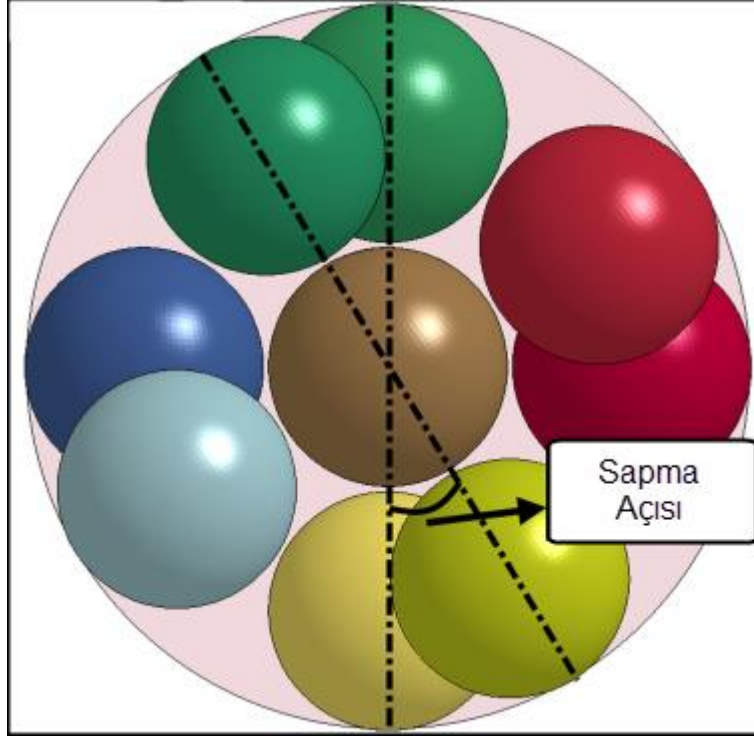
Şekil 103'de tüm konfigürasyonların ortalama kuvvet – yüzde deformasyon eğrileri karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Şekilden görülebileceği gibi tek katmanlı yapı için elde edilen ortalama kuvvet değeri her deformasyon seviyesinde diğerlerinden daha düşük

kalmaktadır. Deformasyon süresince farklı deformasyon miktarlarındaki ortalama kuvvet değerleri için farklı sonuçlar elde edilmiş olsa da, toplamda en yüksek ortalama kuvvet sıralı iki katmanlı konfigürasyon için elde edilmiştir.

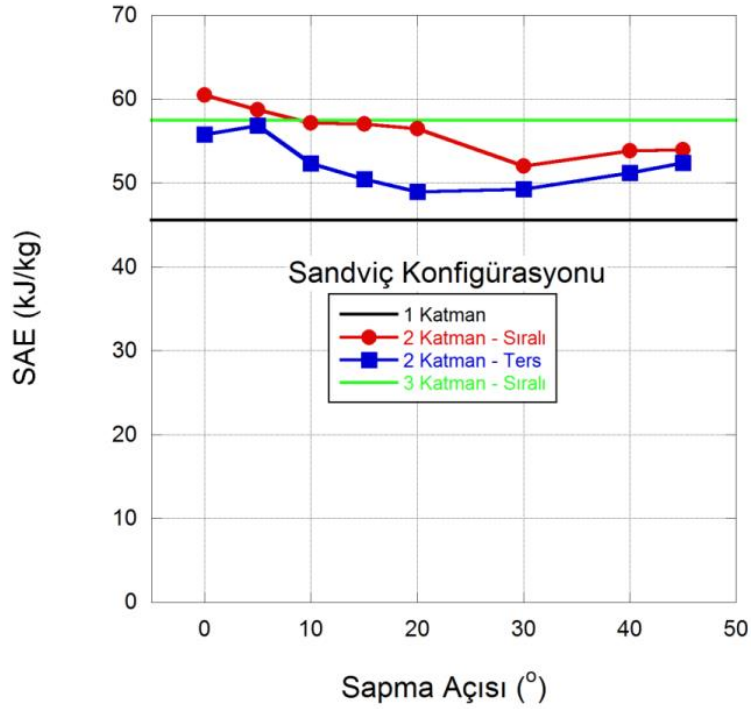


Şekil 103. Ortalama kuvvet – Yüzde deformasyon.

Katmanlama etkisinin incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarından SAE değerleri hesap edilerek, yapıların etkinliği karşılaştırılmıştır. Bu incelemelerde ayrıca iki katmanlı yapılar için kimi zaman bir kusur olarak gözlemlenebilecek kimi zaman da istenen bir modifikasyon olarak tercih edilebilecek olan bir özellik olarak açılma etkisi incelenmiştir (Şekil 104 (a)). Düşük açılma sapmaları bir üretim hatasından kaynaklanabileceği gibi, yüksek açılma sapmaları ile deformasyon modu değişiklikleri istenilen şekillerde gerçekleştirilebilir. Sonuçlar Şekil 104 (b)'de sunulmuştur.



(a)



(b)

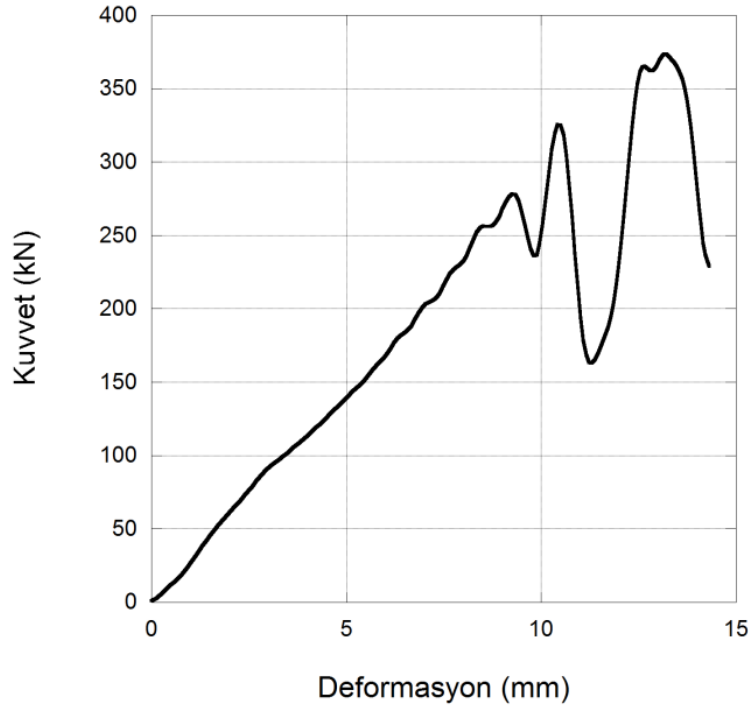
Şekil 104. (a) R125T05 sandviç yapının serbest modifiye-DBDD deney ve simülasyon sonucu, (b) deney ve simülasyon sonucu ezilmiş numune.

Şekil 104 (b)'den görülebileceği gibi, tüm çok katmanlı sandviç yapıların emdiği enerji miktarları tek katmanlı yapıdan daha fazla olduğu gibi çok fazla ağırlık artışına da sebep

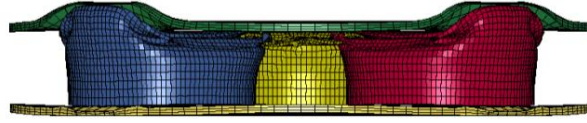
olmadıkları SAE değerlerinden anlaşılabilir. Tüm sıralı iki katmanlı sandviç yapıların SAE değerleri ters konfigürasyondan daha yüksektir. Bu sonuç, katmanların birbirlerine göre pozisyonlarındaki değişiklikten dolayı deformasyon sıralamasında oluşan değişiklikten kaynaklanmaktadır. İlgili çekici bir diğer sonuç da ters konfigürasyondaki 5°'lik sapma dışındaki tüm sapma açıları, emilen enerji miktarlarında bir azalmaya sebep olmaktadır. Sapma açısının artışı ile birlikte alt katmanın üst katmanı desteklediği alan azalmaktadır. Bu sebeple, sapma açısı arttıkça ara yüzey malzemesi üst katman tarafından eğilme eğilimi göstermekte ve relatif olarak asimetrik bir global deformasyon modu gözlemlenmekte ve emilen enerji miktarı azalmaktadır. Bir diğer ilginç sonuç ise sıralı konfigürasyonda 20° sapmaya kadar SAE değerinin üç katmanlı konfigürasyondan daha yüksek veya eşit olduğu görülmüştür. Ters iki katmanlı konfigürasyondaki sandviçlerin SAE değerleri dahi üç katmanlı sandviçlere oldukça yakındır. Bu sonuçlara göre, seçilen konfigürasyonlar içinde maksimum 20° sapmaya kadar sıralı iki katmanlı konfigürasyonun optimum olduğu söylenebilir. Bu inceleme ile de patlama etkisi altında kalacak sandviç yapıların davranışları ile ilgili bir ön bilgi sağlanmıştır.

## **6.2.2 R125T1, R75T05 ve R75T1 Çekirdek Malzemelerini İçeren Sandviçlerin Simülasyonu**

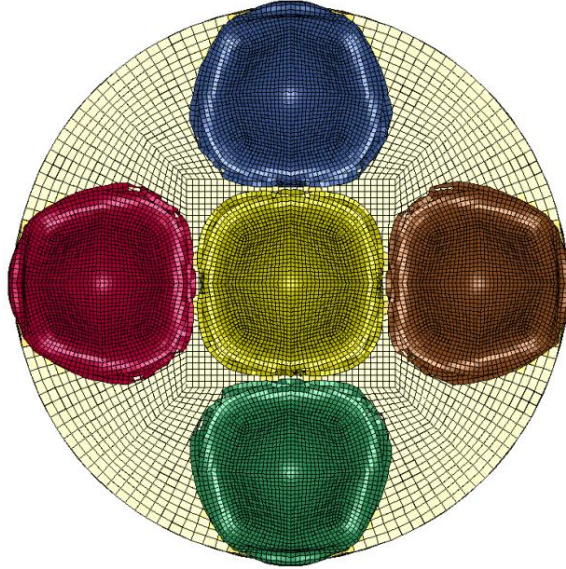
R125T05 çekirdek geometrisi içeren sandviç yapıların kuasi-statik ve düşen kütle testlerinin başarı ile modellenemesinin ardından diğer alternatif çekirdek geometrilerini içeren sandviçlerin düşen kütle simülasyonları gerçekleştirilmiştir. R125T1 çekirdek geometrisi içeren sandviçlerin simülasyonunda hız 10 m/s ve düşen kütle 72 kg olarak belirlenmiş ve yaklaşık 3700 J'lük düşen kütle enerjisi ile simülasyon gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyon sonucu kuvvet – deformasyon eğrisi ve deforme olmuş numune Şekil 105'de görülebilir.



(a)



(b)



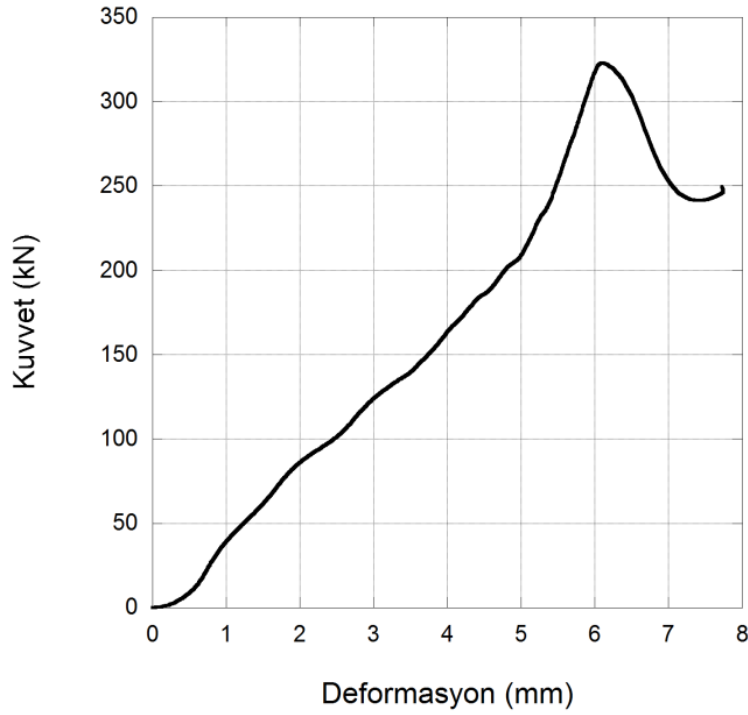
(c)

Şekil 105. R125T1 sandviç düşen kütle simülasyonu sonucu; (a) kuvvet-deformasyon eğrisi, (b) deforme olmuş numunenin önden görünüşü, (c) deforme olmuş numunenin üstten görünüşü.



Bu numunede ilk maksimum kuvvet değeri 300 kN'un üzerindedir ve deformasyon şekli R125T05 numunesinin deformasyon şekline benzemektedir. Ortadaki çekirdek yapısı, etrafındaki dđrt adet şekirdeğin etkisiyle simetrik olarak deforme olmaktadır. çekirdek malzemelerinin yđksek yđk taşıma kapasitelerinden dolayı yđzey malzemelerinde eğilmeyle birlikte deformasyon meydana gelmektedir.

R75T05 çekirdek geometrisi içeren sandviçlerin simđlasyonunda ise hız 5,1 m/s ve kđtle 175 kg olarak belirlenmiş ve yaklaşık 2300 J'lđk dđřen kđtle enerjisi ile simđlasyon geręekleřtirilmiřtir. Bu simđlasyon sonucu kuvvet – deformasyon eğrisi ve deforme olmuş numune şekil 106'da gđrđlebilir. Bu simđlasyon sonucunda 300 kN'un üzerinde bir maksimum kuvvet hesaplanmış ve global olarak simetrik bir deformasyon şekli gđzlemlenmiřtir. R125T1 numunesindeki gibi bir yđzey malzemesi eğilme deformasyonu bu yapıda da gđzlemlenmiřtir.

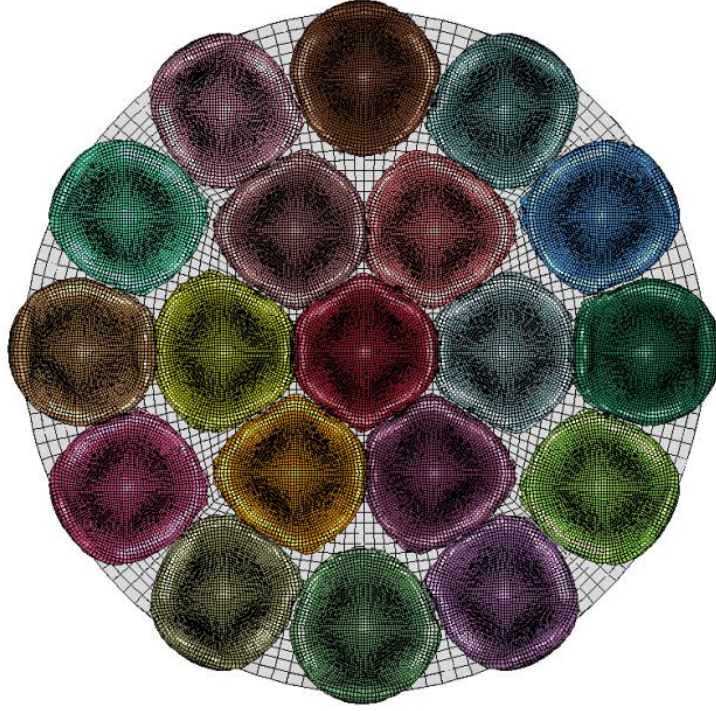


(a)



(b)

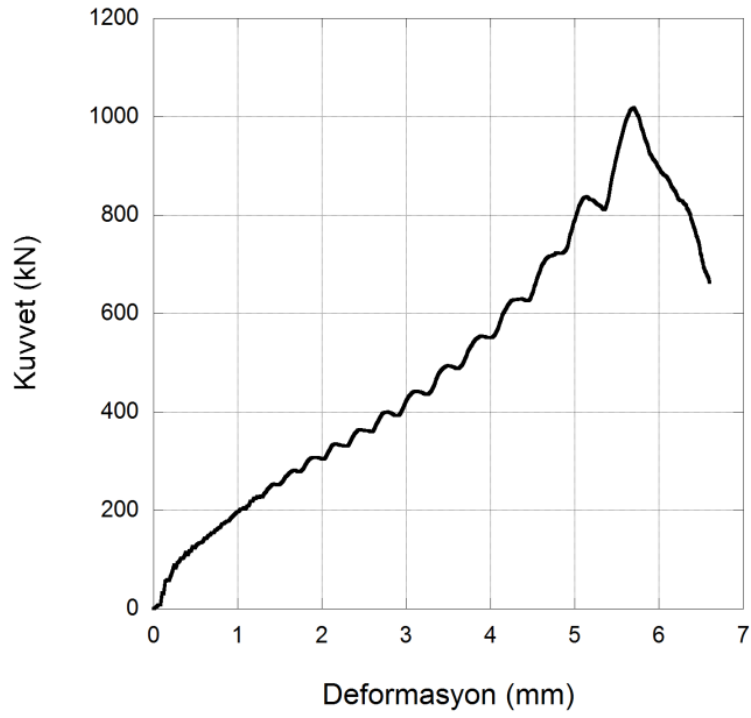




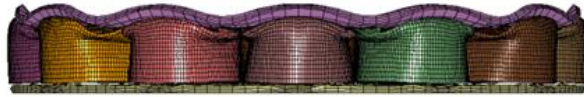
(c)

Şekil 106. R75T05 sandviç düşen kütle simülasyonu sonucu; (a) kuvvet-deformasyon eğrisi, (b) deforme olmuş numunenin önden görünüşü, (c) deforme olmuş numunenin üstten görünüşü.

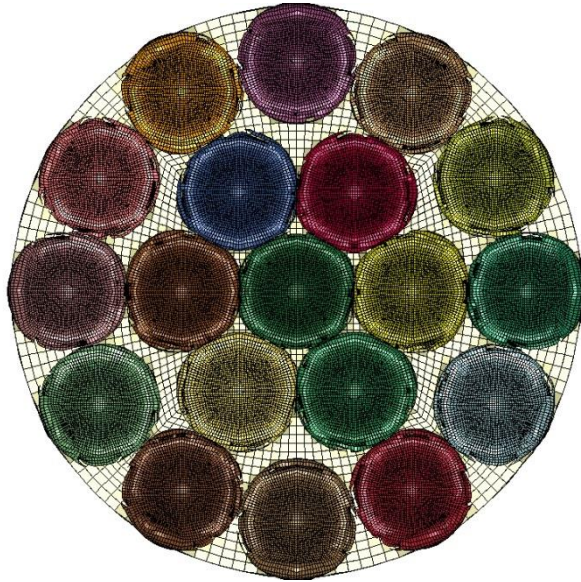
R75T1 çekirdek geometrisi içeren sandviçlerin simülasyonunda hız 5,1 m/s ve kütle 320 kg olarak belirlenmiş ve yaklaşık 4200 J'lük düşen kütle enerjisi ile simülasyon gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyon sonucu kuvvet – deformasyon eğrisi ve deforme olmuş numune Şekil 107'de görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

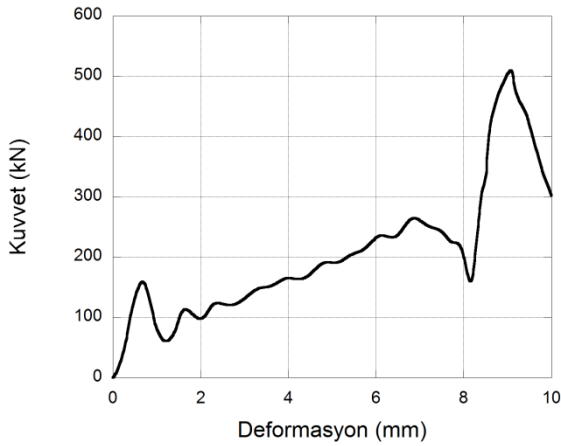
Şekil 107. R75T1 sandviç düşen kütle simülasyonu sonucu; (a) kuvvet-deformasyon eğrisi, (b) deforme olmuş numunenin önden görünüşü, (c) deforme olmuş numunenin üstten görünüşü.

R75T1 numunesinin simülasyon sonucunda bu orta hızda dahi 1000 kN'un üzerinde bir maksimum kuvvet hesaplanmıştır. R75T1 ve R75T05 sandviç yapılar yüksek yük taşıma

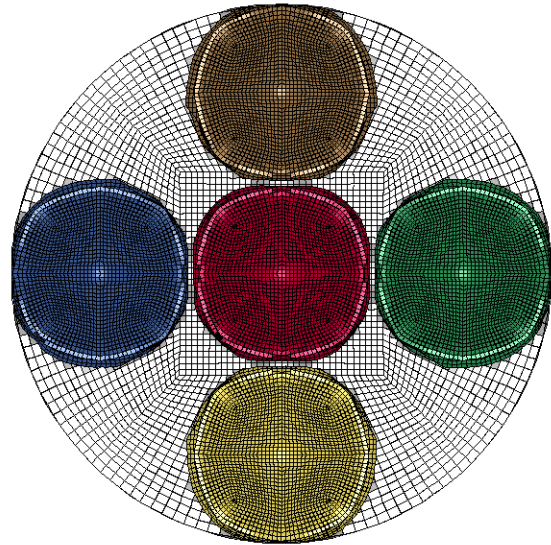
kapasiteleri ile ön plana çıkmaktadırlar. Bu yüksek yük taşıma kabiliyeti, yüksek seviyeli patlama tehditlerine karşı korumada uygun yüzey malzemesi kullanımı ile birlikte oldukça önem kazanacaktır.

Nümerik modellerin orta hızlarda başarılı sonuçlar vermesi diğer sandviç konfigürasyonlarının analizlerinde nümerik modellerin güvenle kullanılabilmesine olanak sağlamıştır. Bu amaçla nümerik çalışmaların devamında, R125T1, R75T05 ve R75T1 çekirdek yapılarını içeren sandviç yapıların sınırlandırılmış modifiye-DBDD simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

Simülasyonlarda çarpan çubuk hızı R125T1 çekirdek yapısı içeren sandviç için değiştirilmezken R75T05 ve R75T1 çekirdek malzemesi içeren sandviç yapılarda çekirdek yüksekliklerine göre çarpma hızı oranlanarak şekil değiştirme hızının benzer seviyelerde kalması sağlanmış ve bu hız 22,6 m/sn olarak belirlenmiştir. Çarpan çubuğun boyu değiştirilerek kütle ve dolayısıyla enerjisinin artması sağlanmıştır. R125T1, R75T05 ve R75T1 sandviç yapılarının simülasyonlarında çarpan çubuk boyları sırasıyla 600, 979,3 ve 1500 mm olarak seçilmiştir. Bu simülasyonların kuvvet-deformasyon grafikleri ve deformasyon profilleri Şekil 108'de verilmiştir.

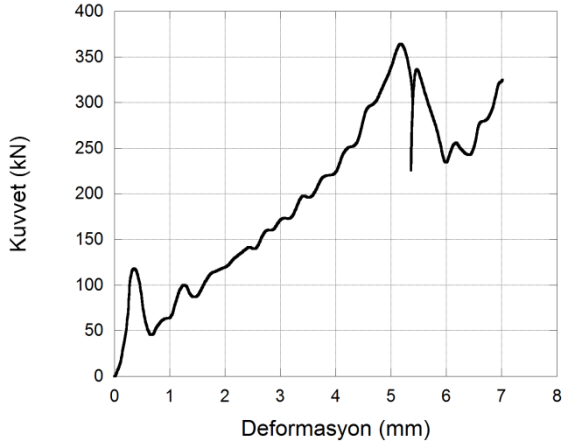


(a)

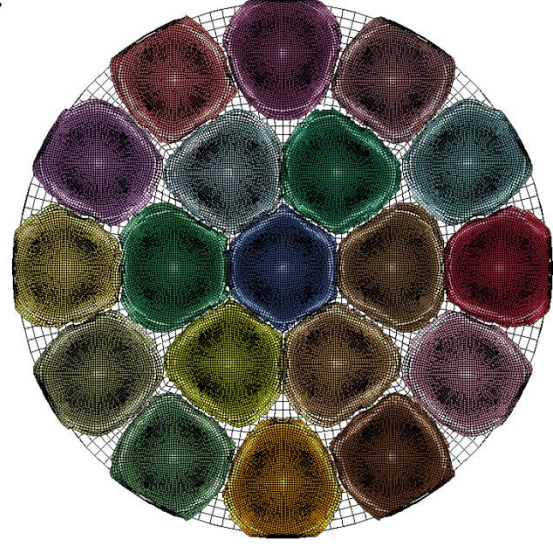


(b)

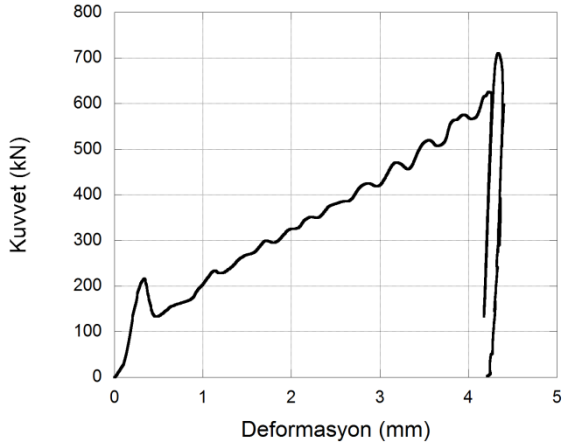




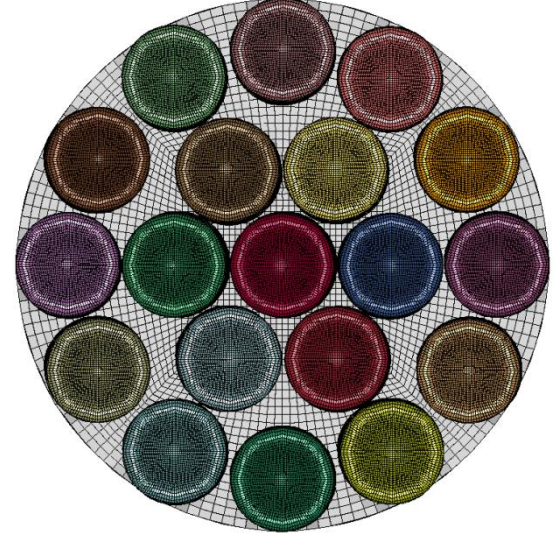
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 108. Sınırlandırılmış modifiye-DBDD simülasyon kuvvet tarihçeleri ve ezilmiş numune görüntüleri; (a) ve (b) R125T1 sandviç, (c) ve (d) R75T05 sandviç ve (e) ve (f) R75T1 sandviç.

Şekil 108'de sınırlandırılmış modifiye-DBDD simülasyon sonuçları hem kuvvet-deformasyon eğrileri cinsinden hem de ezilmiş numunelerin görüntüleri ile birlikte verilmiştir. Bu simülasyonlarda en yüksek deformasyon miktarı R125T1 sandviç yapısında hesaplanmıştır. Bu durum R75 çekirdek yapılarını içeren sandviçlerin daha fazla sayıda çekirdek içermesinden ve bu çekirdeklerin aralarındaki etkileşimin daha fazla olması ile açıklanabilir. İlk kuvvetin maksimum değeri R75T1 sandviç yapıda hesaplanmıştır. Deformasyon esnasında en yüksek kuvvet yine bu sandviç yapının simülasyonunda ve yaklaşık 4 mm deformasyon miktarında hesaplanmıştır. Tüm simülasyonlar için numuneler

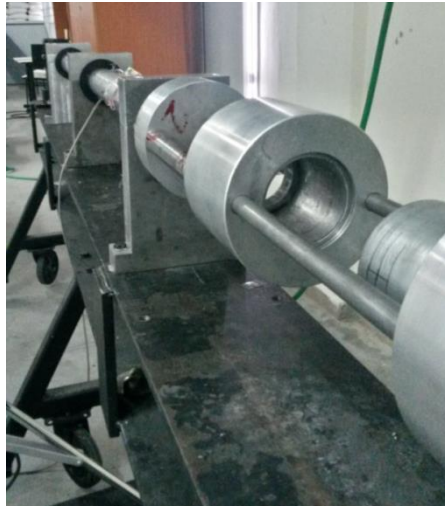
zerindeki sınırlandırma etkisi açık bir Şekilde görülebilir. R125T1 numunesinin düşen kütle simülasyonu sonucu ile bu simülasyon karşılaştırılırsa, hızın artması ile birlikte sınırlandırmanın da etkisi dolayısıyla, düşen kütle simülasyonunda 350 kN olarak hesaplanan ikinci maksimum değer bu simülasyonda 500 kN olarak hesaplanmıştır. R75T05 simülasyonunun ezilmiş hali incelendiğinde ise düşen kütle simülasyonlarından farklı olarak bu numunede hasar gözlemlenmiştir. Bu sebeple düşen kütle simülasyonlarından daha düşük kuvvetler hesaplanmıştır.

## 7. SANDVIÇ YAPILARIN PATLAMA YÜKLERİNE KARŞI DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Projede önerilen yarı küresel çekirdek yapıların ve bu yapıların kullanımı ile oluşturulan sandviç yapıların farklı deformasyon hızlarında ezilme davranışlarının ve deformasyon hızı ile ataletin yapılar üzerindeki etkilerinin belirlenmesinin ardından, hem kompozit ve çelik malzemelerin hem de sandviç malzemelerin patlama etkileri altındaki davranışları ile ilgili incelemelere geçilmiştir. Çalışmanın ilk kısmında Doğrudan Basınç Dalgası Deneyleri ile deneysel incelemeler gerçekleştirilmiş, devamında ise ConWep fonksiyonu kullanılarak patlama yüklerinin uygulandığı nümerik modeller vasıtasıyla incelemeler gerçekleştirilmiştir.

### 7.1 Doğrudan Basınç Dalgası Deneyleri ve Nümerik Modelleri

Patlama yüklerinin yapılara uygulanması amacıyla laboratuvar ortamında yapılabilen emniyetli, kontrollü ve tekrar edilebilir yükler uygulayan deneysel tekniklerin geliştirilmesi son derece önemlidir. Bu amaçla geliştirilen sistemlere içerisinde en önemli örnek Doğrudan Basınç Dalgası Deney Düzenegidir (DBDD). Bu sistemde Şekil 109'dan da görülebileceği gibi test numunesi sınırlayıcı bir kalıp içerisinde sabitlenmekte, üzerine bir polimerik yükleme plakası yerleştirilmekte ve bir çarpan çubuk bu malzemelere yüksek hızda çarparak yapıya patlama basınç dalgasına benzer bir yük uygulamaktadır. Bu tarz bir sistemle poliüre kaplı DH-36 çelik sandviç yapıların patlama etkilerine karşı davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir (Amini vd. 2010; Amini vd. 2010). Bu tarz bir Doğrudan Basınç Dalgası Deney Düzenegi İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü bünyesinde proje yürütücüsü tarafından 2011 yılında başarı ile kurulmuştur.



(a)

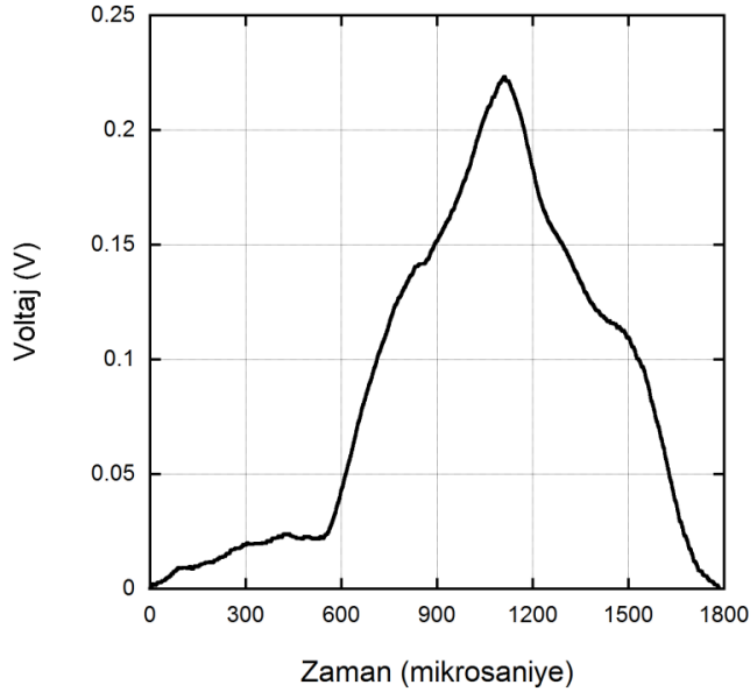


(b)

Şekil 109. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü bünyesinde kurulu Doğrudan Basınç Dalgası Test Sistemi (DBDD).

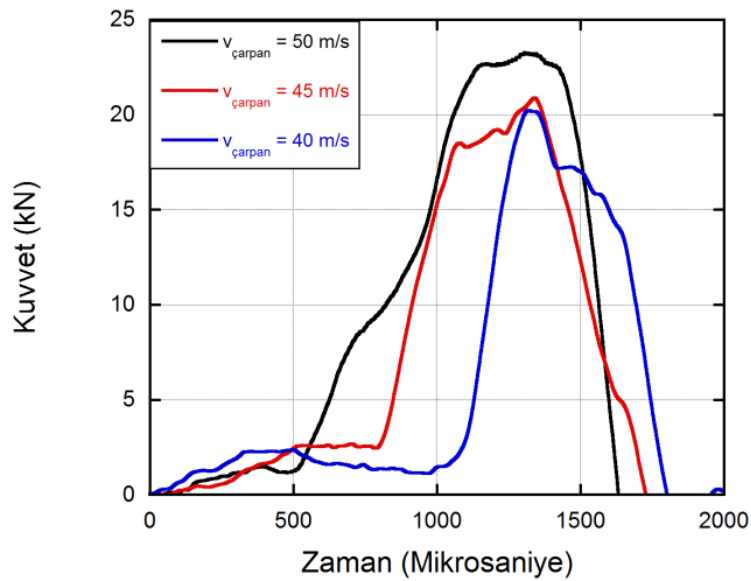
Genel olarak bakıldığında DBDD test cihazı bir çarpan çubuk, aynı çaplı ve yük iletiminde görevli 7075-T6 alüminyum pistonlar, poliüretan, numune tutucu ve ileten çubuktan meydana gelmektedir. Test esnasında gaz tabancası ile hız kazandırılan çarpan çubuğun pistonlara çarpmasıyla, sahip olduğu momentum tek eksenli yüklemeye çevrilir. İletilen bu yük poliüretan tabakasından sırasıyla numuneye ve iletilen çubuğa aktarılır. İletilen çubuğun yüksek akma mukavemeti ve göreceli büyük çapı sayesinde elastik bölgede kaldığı bilindiğinden, aktarılan yük iletilen çubuktan gerinim ölçerler ve osiloskop aracılığıyla kaydedilir. Ek olarak test sırasında çarpan çubuk hızı lazerli hızölçerler, numunenin ezilme davranışı ise yüksek hızlı kamera ile kaydedilebilmektedir. DBDD testlerine öncelikli olarak sandviç yapılarda kullanılan 304L ve kompozit yüzey malzemelerinin testlerinin yapılması ile başlanmıştır. Burada esas amaç, statik ve dinamik mekanik karakterizasyonu daha önceden tamamlanmış ve başarı ile modellenmiş malzeme gruplarını kullanarak DBDD testleri ile gerçek patlama modellerini kıyaslamaktır. Böylece laboratuvar ortamında gerçek patlayıcı kullanmadan yapılan bu testlerin patlama eşdeğerliliklerini bulmak mümkün olacaktır.

Şekil 110'da Tipik bir DBDD testi datası görülmektedir. Bu data ileten çubukta bulunan gerinim ölçerlerden elde edilen örnek voltaj zaman bilgisidir.



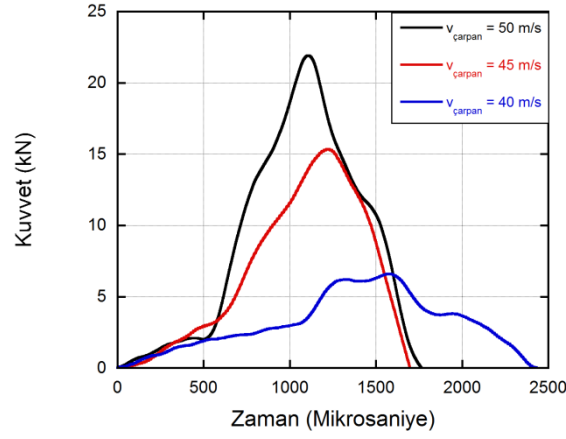
Şekil 110. Doğrudan Basınç Dalgası testi Voltaj-Zaman eğrisi

DBDD testlerine 1 mm kalınlığa sahip 304L paslanmaz çelik ile 2 ve 3 mm kalınlıklardaki E-Glass/Polyester yüzey malzemeleri ile başlanmıştır, belirtilen malzemeler farklı patlayıcı miktarlarını temsil edecek şekilde farklı değişen çarpan çubuk hızlarında Doğrudan Basınç Dalgası testlerine tabi tutulmuştur. Bu testlerden elde edilen Kuvvet-Zaman grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 111-113'de görülmektedir.

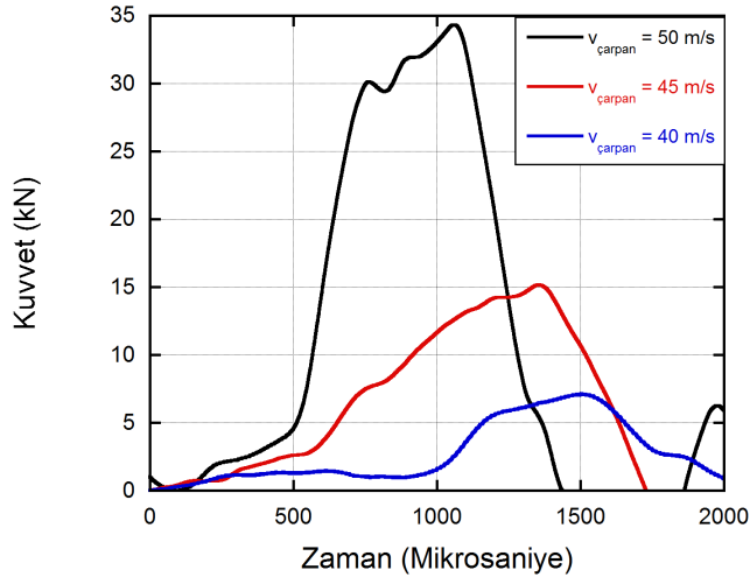


Şekil 111. 304L Yüzey malzemesi Doğrudan Basınç Dalgası test sonuçları.



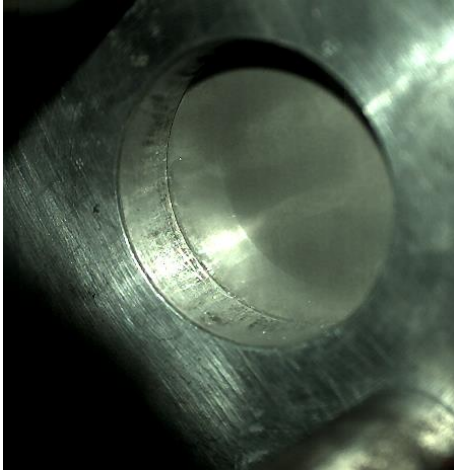
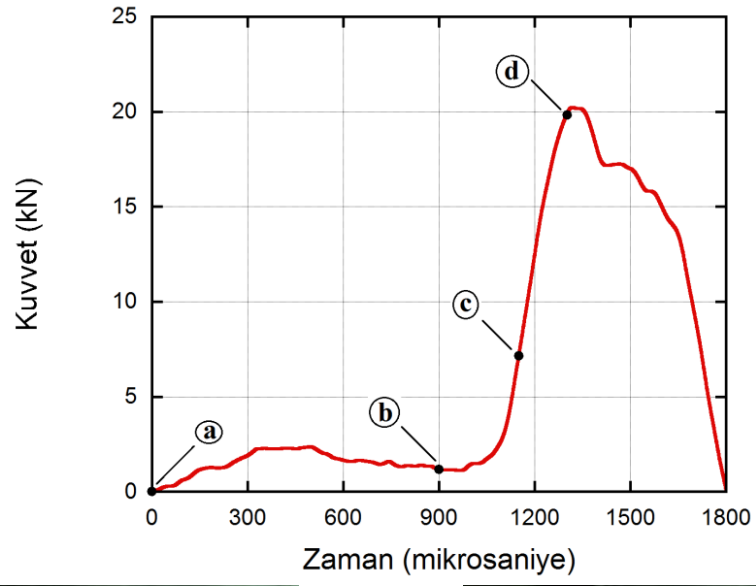


Şekil 112. E-Glass/Polyester Yüzey malzemesi Doğrudan Basınç Dalgası test sonuçları. (kalınlık = 2 mm)

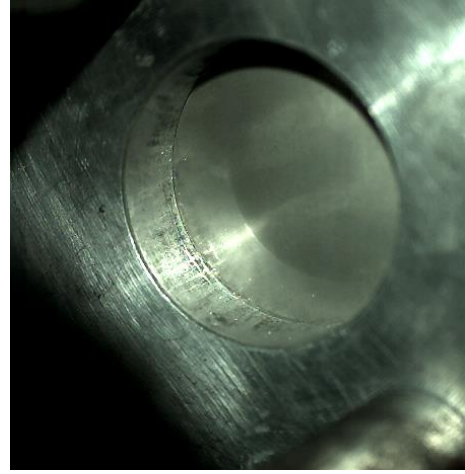


Şekil 113. E-Glass/Polyester Yüzey malzemesi Doğrudan Basınç Dalgası test sonuçları. (kalınlık = 3 mm)

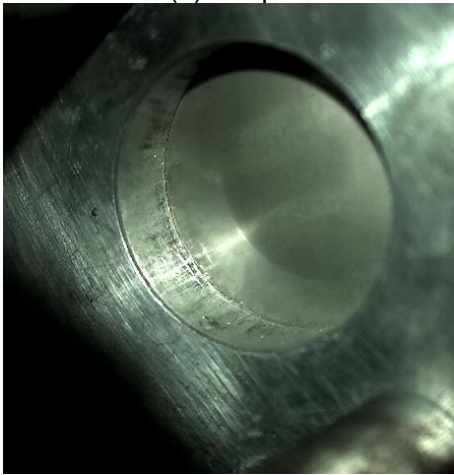
DBDD testleri eş zamanlı olarak Photron Fastcam yüksek hızlı kamera ile kaydedilmiş, farklı çarpın çubuk hızlarında yüzey malzemelerinde oluşan hasarın zamana bağlı ilerleyişi Şekil 114-122'de verilmiştir.



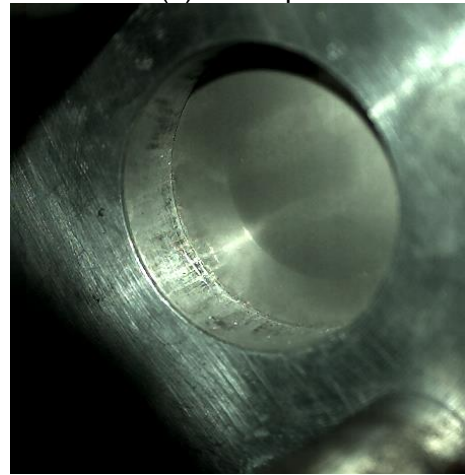
(a) – 0  $\mu$ s



(b) – 900  $\mu$ s

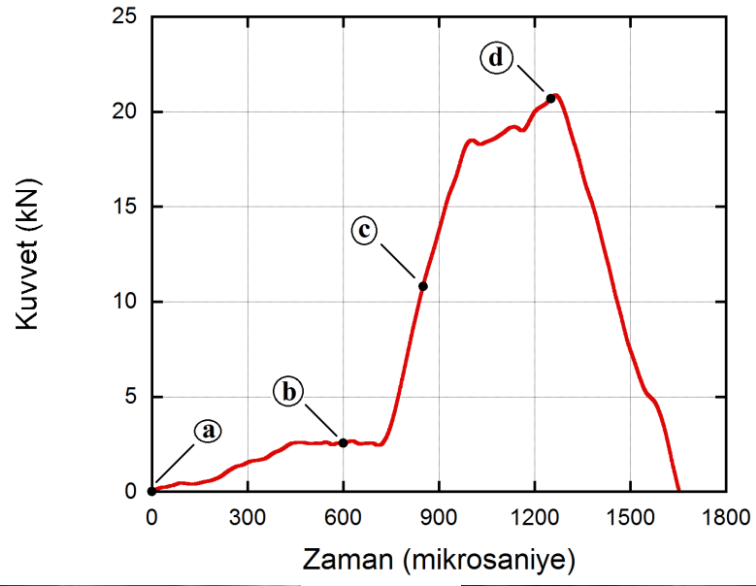


(c) – 1150  $\mu$ s

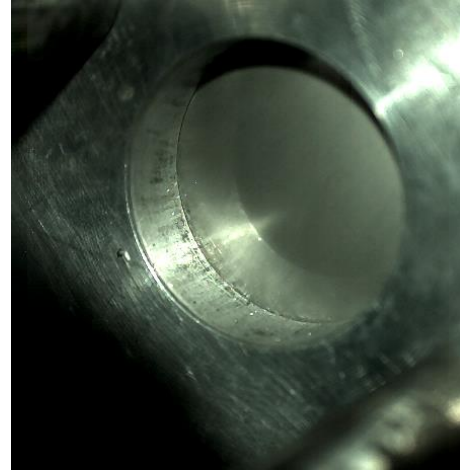


(d) – 1300  $\mu$ s

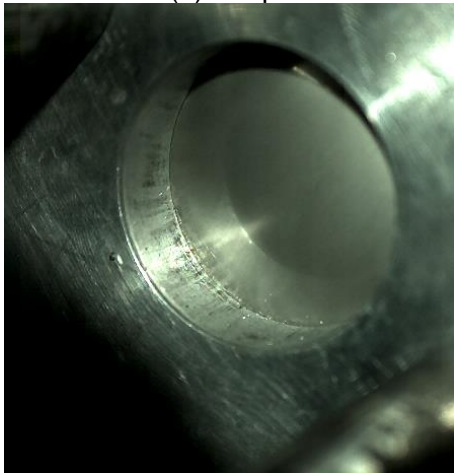
Şekil 114. 304L yüzey malzemesinde hasar ilerleyişi. ( $v_{\text{çarpan}} = 40$  m/s)



(a) – 0  $\mu$ s



(b) – 600  $\mu$ s

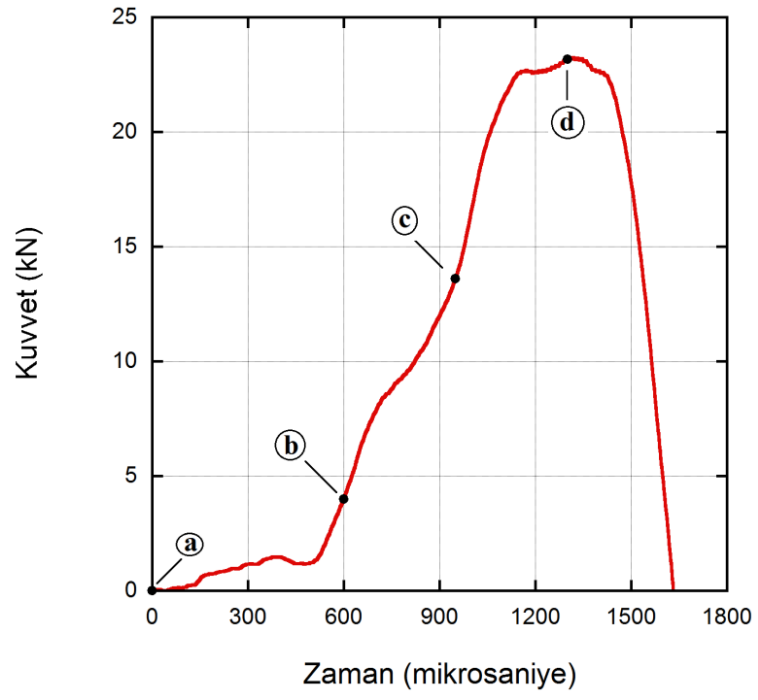


(c) – 850  $\mu$ s

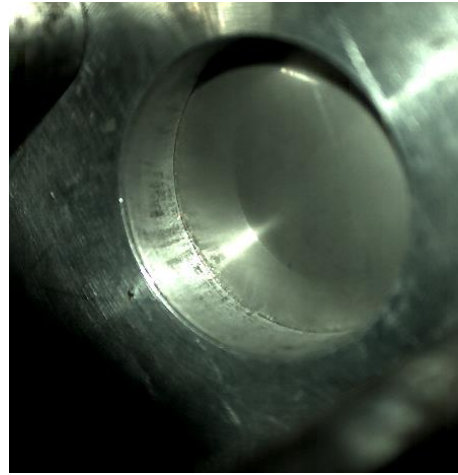


(d) – 1250  $\mu$ s

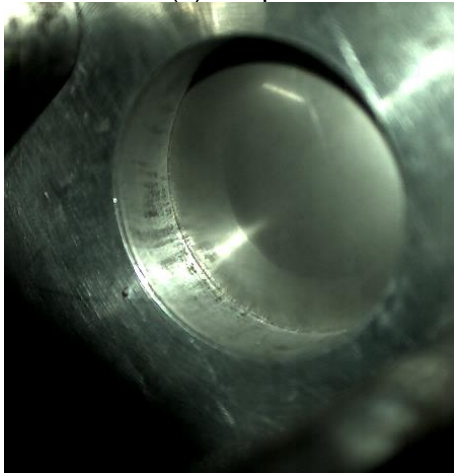
Şekil 115. 304L yüzey malzemesinde hasar ilerleyişi. ( $v_{\text{çarpan}} = 45$  m/s)



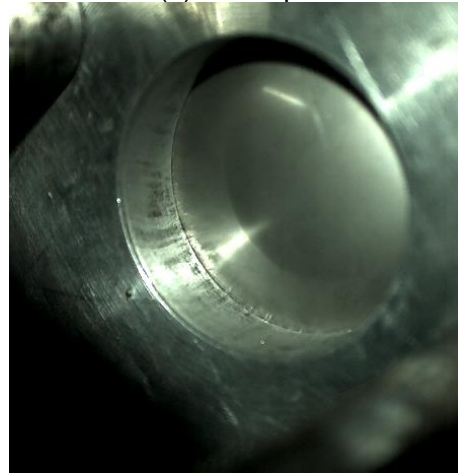
(a) – 0 μs



(b) – 600 μs

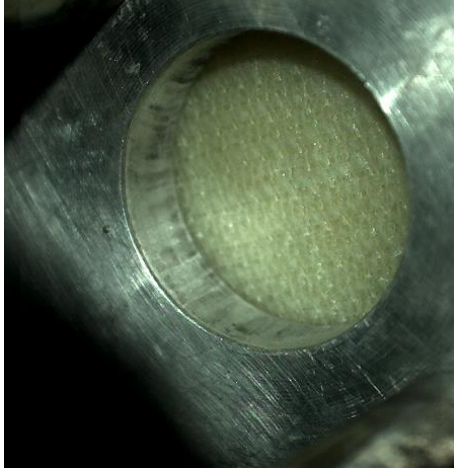
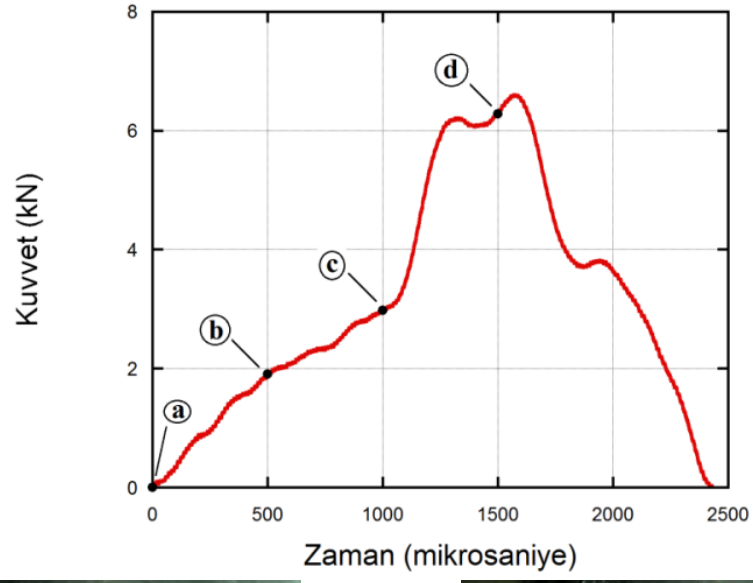


(c) – 950 μs

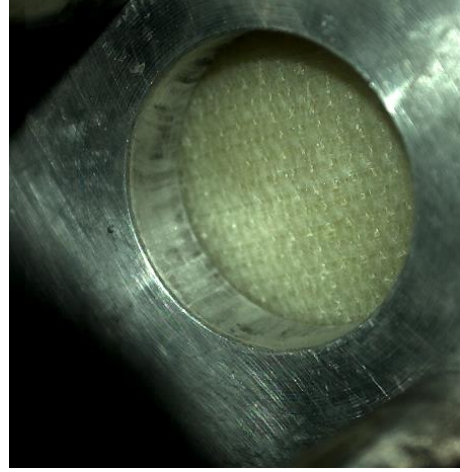


(d) - 1300 μs

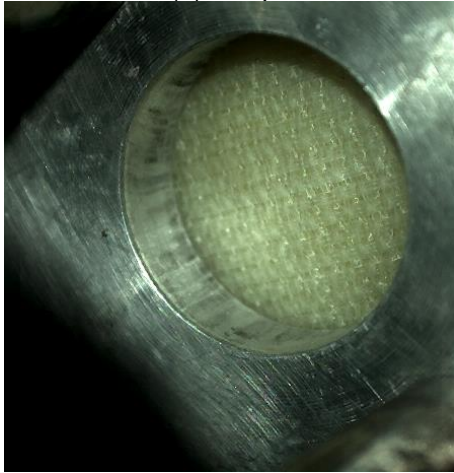
Şekil 116. 304L yüzey malzemesinde hasar ilerleyişi. ( $v_{\text{çarpın}} = 50 \text{ m/s}$ )



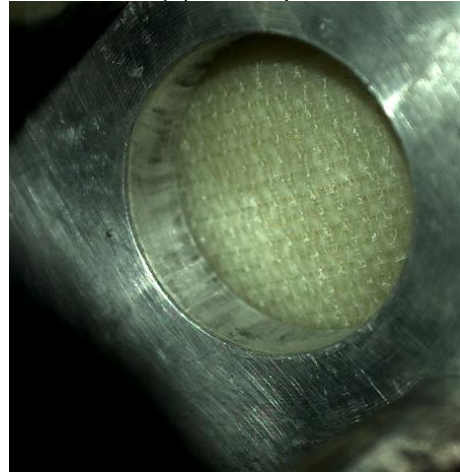
(a) – 0  $\mu$ s



(b) – 500  $\mu$ s



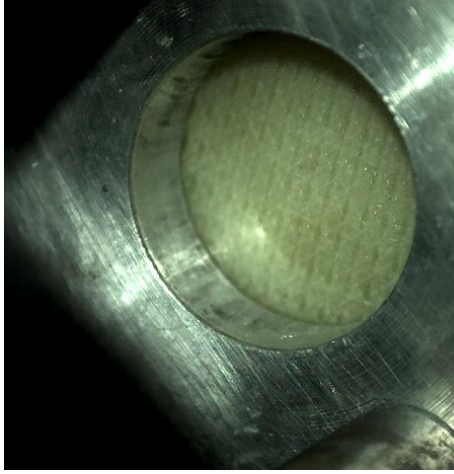
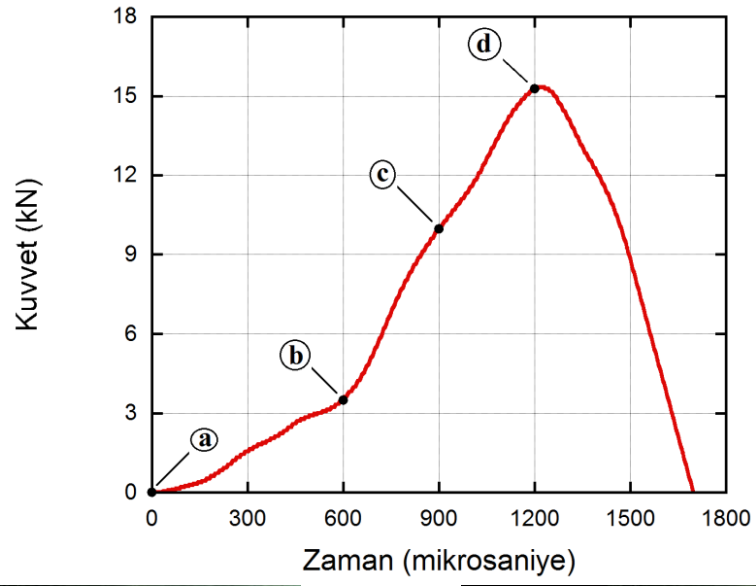
(c) – 1000  $\mu$ s



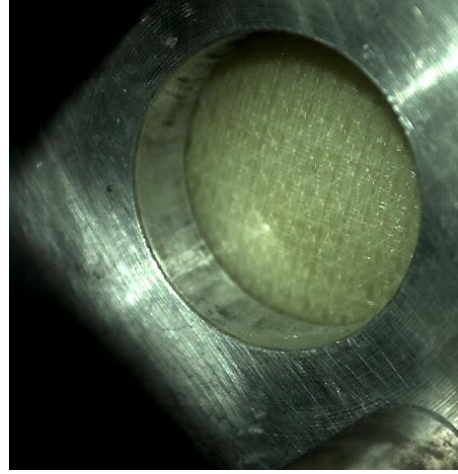
(d) – 1500  $\mu$ s

Şekil 117. E-Glass/Polyester yüzey malzemesinde hasar ilerleyişi. ( $v_{\text{çarpma}} = 40$  m/s, kalınlık = 2 mm)

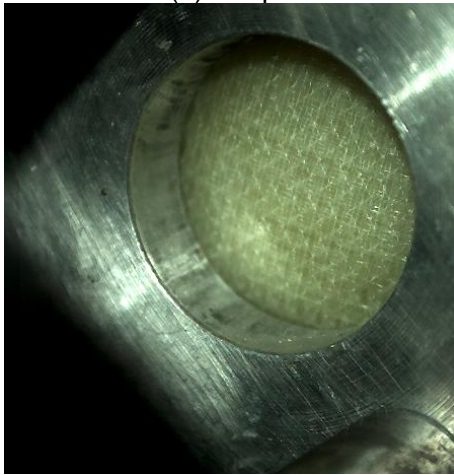




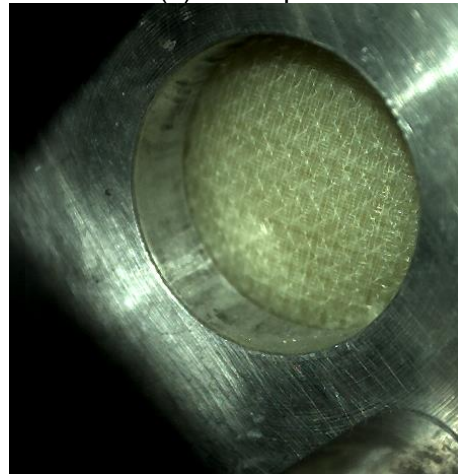
(a) – 0  $\mu$ s



(b) – 600  $\mu$ s

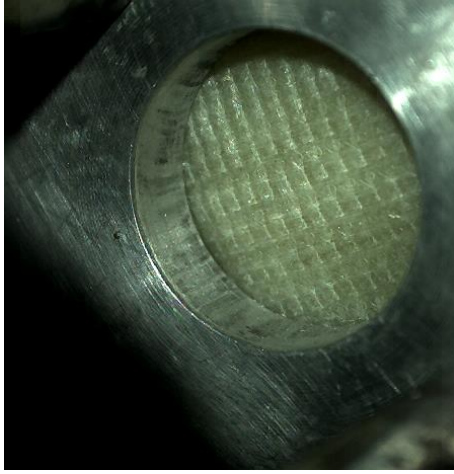
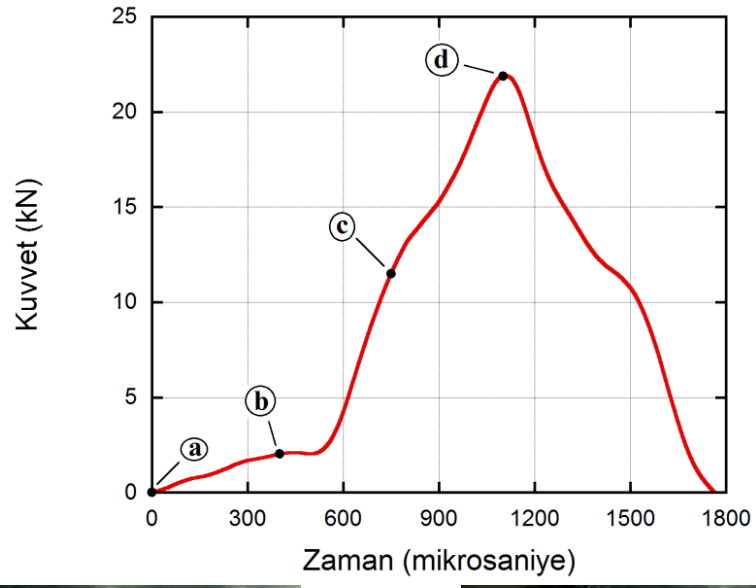


(c) – 900  $\mu$ s

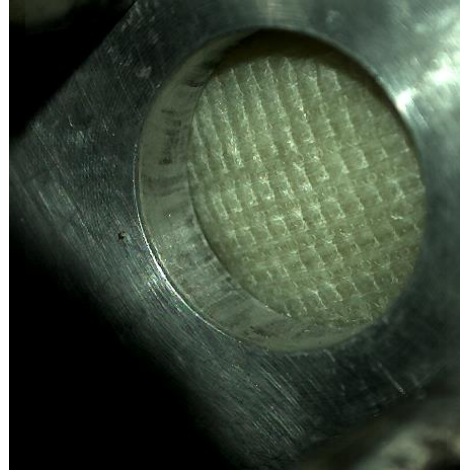


(d) – 1200  $\mu$ s

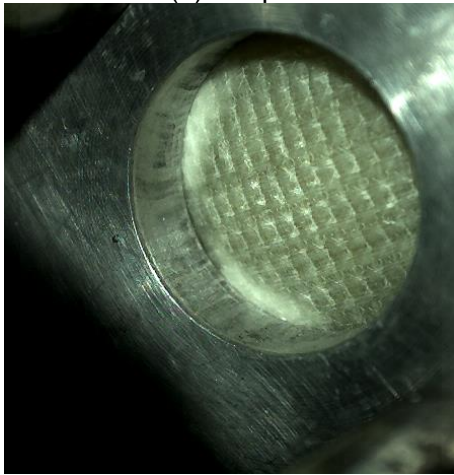
Şekil 118. E-Glass/Polyester yüzey malzemesinde hasar ilerleyişi. ( $v_{\text{çarpın}} = 45$  m/s, kalınlık = 2 mm)



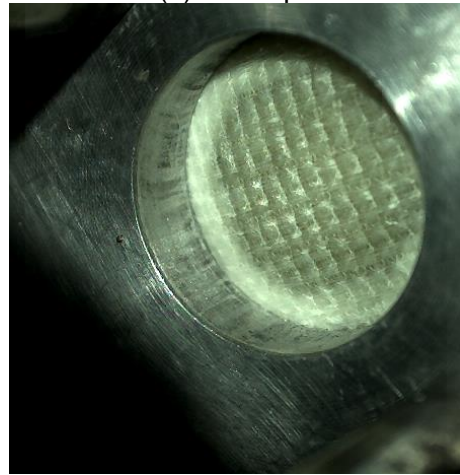
(a) – 0  $\mu$ s



(b) – 400  $\mu$ s

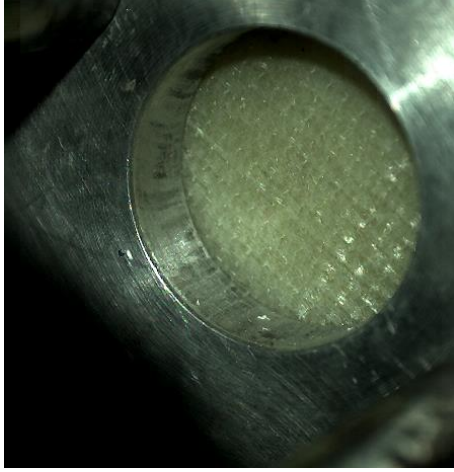
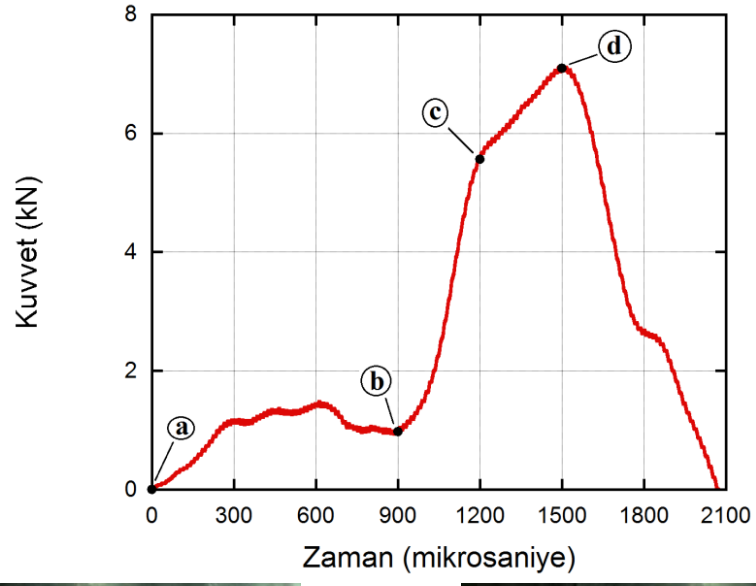


(c) – 750  $\mu$ s

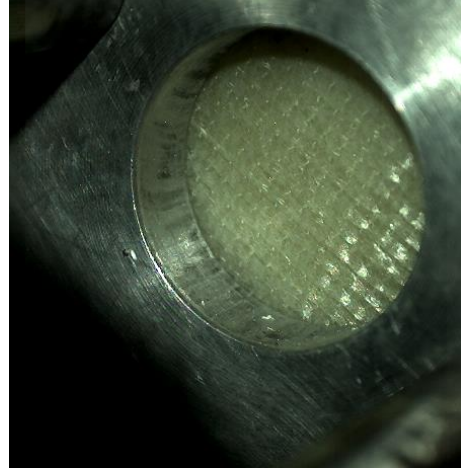


(d) – 1100  $\mu$ s

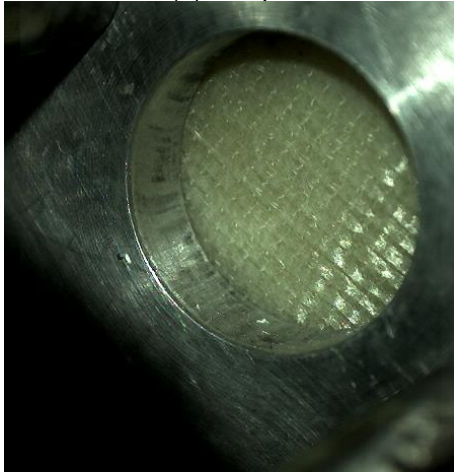
Şekil 119. E-Glass/Polyester yüzey malzemesinde hasar ilerleyişi. ( $v_{\text{çarpma}} = 50$  m/s, kalınlık = 2 mm)



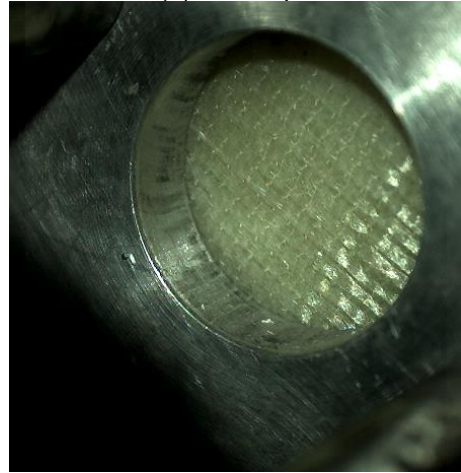
(a) – 0  $\mu$ s



(b) – 900  $\mu$ s



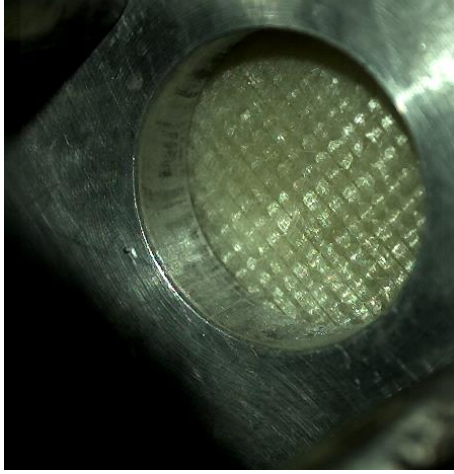
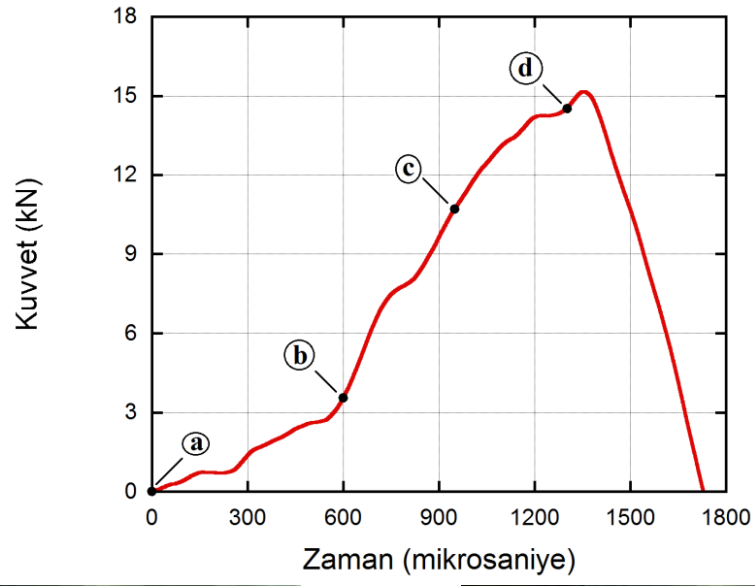
(c) – 1200  $\mu$ s



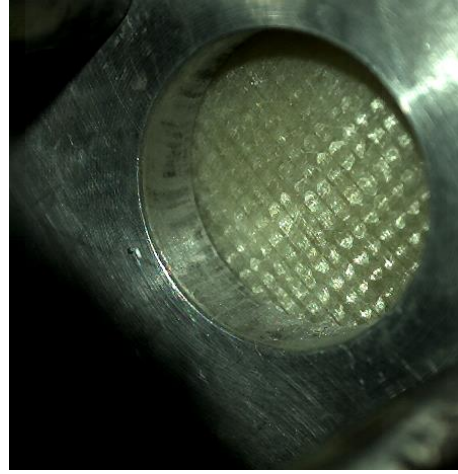
(d) – 1500  $\mu$ s

Şekil 120. E-Glass/Polyester yüzey malzemesinde hasar ilerleyişi. ( $v_{\text{çarpın}} = 40$  m/s, kalınlık = 3 mm)

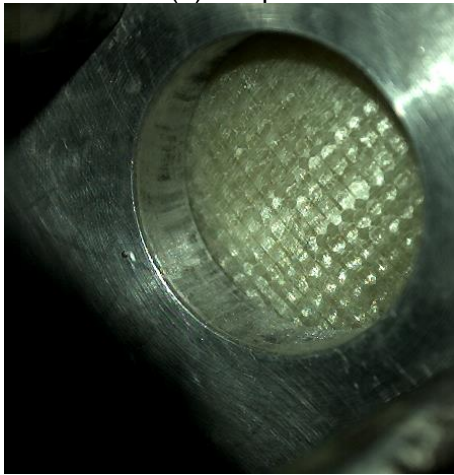




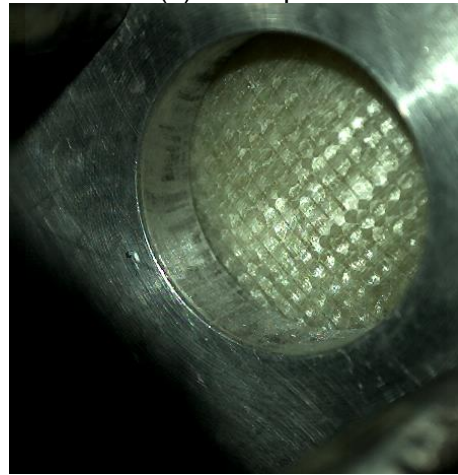
(a) – 0  $\mu$ s



(b) – 600  $\mu$ s

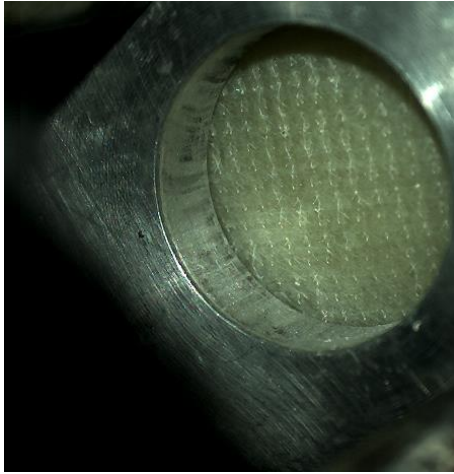
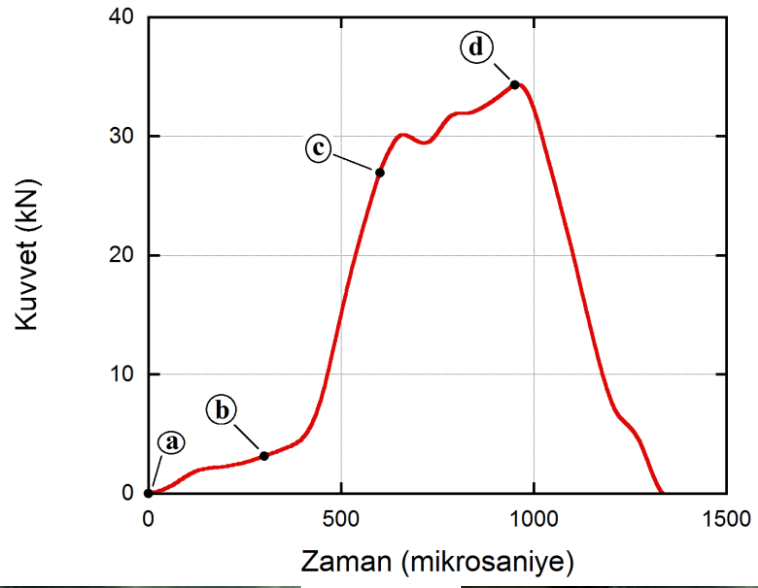


(c) – 950  $\mu$ s

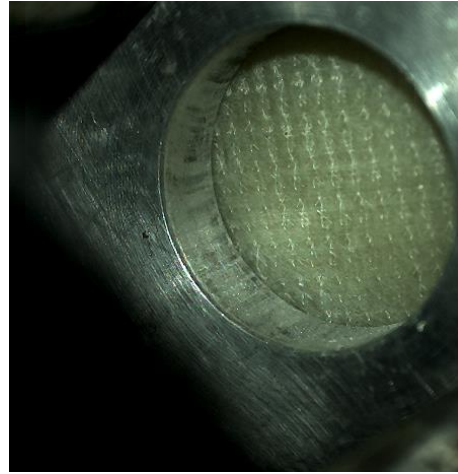


(d) – 1300  $\mu$ s

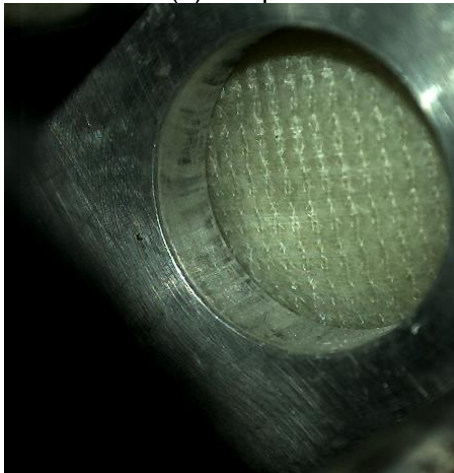
Şekil 121. E-Glass/Polyester yüzey malzemesinde hasar ilerleyişi. ( $v_{\text{çarpın}} = 45$  m/s, kalınlık = 3 mm)



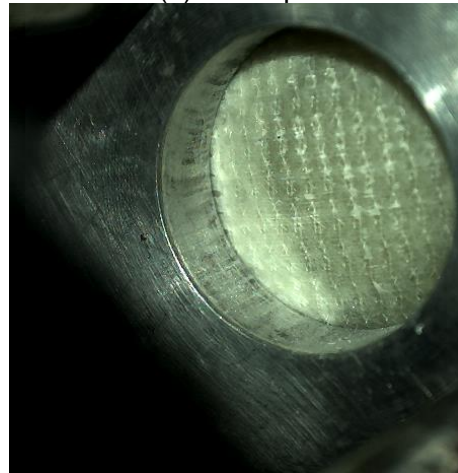
(a) – 0  $\mu$ s



(b) – 300  $\mu$ s



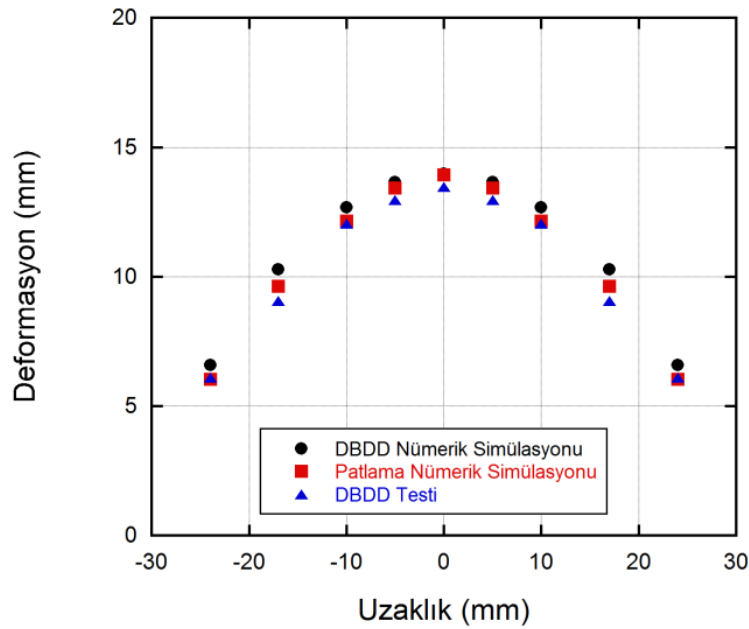
(c) – 600  $\mu$ s



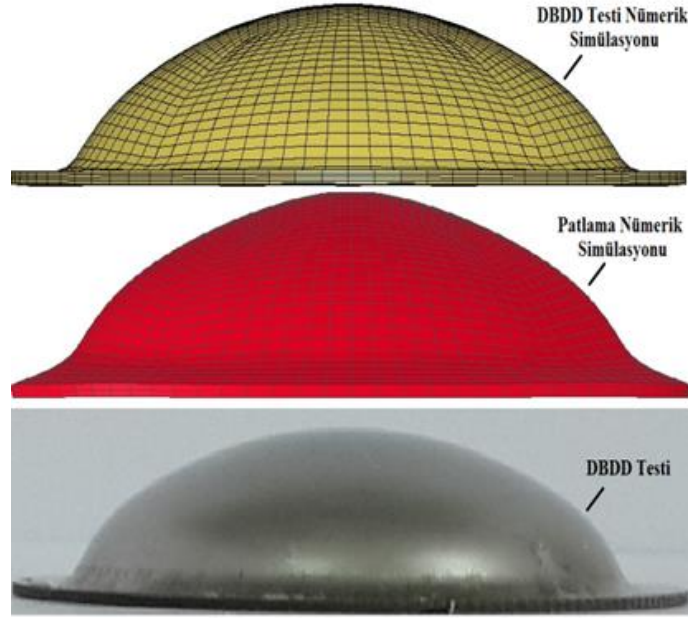
(d) – 950  $\mu$ s

Şekil 122. E-Glass/Polyester yüzey malzemesinde hasar ilerleyişi. ( $v_{\text{çarpma}} = 50$  m/s, kalınlık = 3 mm)

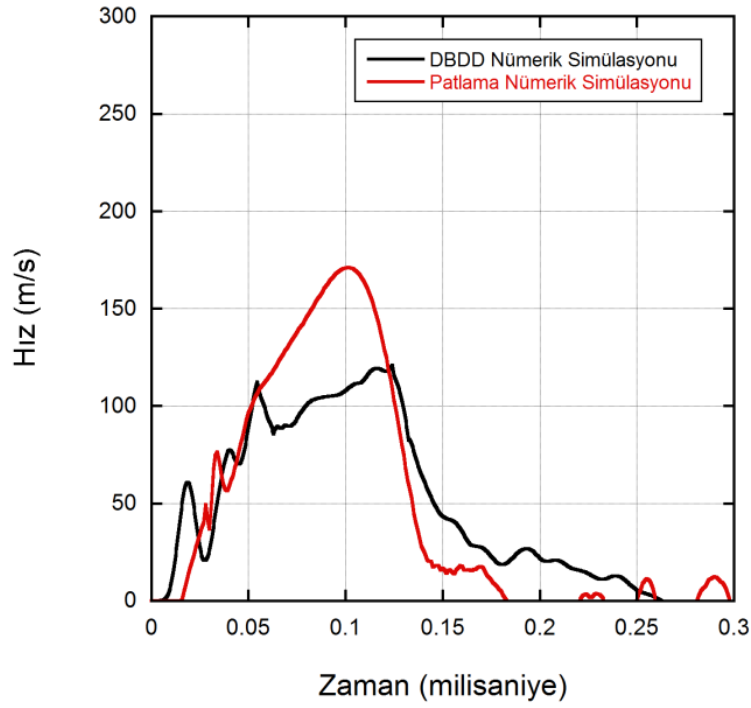
DBDD referans testlerinin tamamlanmasının ardından testlerde kullanılan numune geometrisine gerçek patlama yüklerinin uygulandığı nümerik modeller hazırlanmıştır. Gerçek patlama yüklerinin uygulandığı nümerik modellerle ilgili bilgiler sonraki bölümde detaylı olarak anlatılacaktır. Bu noktada DBDD testleri ile patlama testleri arasında etkileşimi görmek amaçlı bazı referans değerler ortaya konacaktır. Bu sebeple öncelikli olarak farklı çarpan çubuk hızları için DBDD testleri ve gerçek patlayıcı yüklerinin aynı numune geometrisine uygulandığı testler nümerik olarak modellenmiştir. Burada esas amaç DBDD testi sonrasında elde edilen numune geometrisini verecek olan patlayıcı miktarı ve patlama mesafesinin tespitidir. Şekil 123'den de görüleceği üzere oluşturulan DBDD testlerinde meydana gelen deformasyon profili ile patlayıcı kullanılarak yapılan nümerik model sonuçları birbirine oldukça yakındır. Örnek verilecek olursa 50 mm çarpan çubuk kullanılarak yapılan bir teste 50 m/s çarpma hızı ile 500 gr TNT'nin 36,4 cm'den patlatılması sırasında meydana gelen yükleme ve buna karşılık gelen deformasyonu elde etmek mümkündür. Yine Şekil 123'den görüleceği üzere patlama ve DBDD nümerik modellerinde numunenin maksimum deformasyon gösteren kısmından okunan hız tarihçeleri de birbirine oldukça yakındır. Nümerik modellerde yakalanan bu başarının ardından, çalışmalara farklı çarpan çubuk hızları için sabit patlayıcı miktarına karşılık mesafe değişiminin bulunması ile devam edilmiştir. (Şekil 124-127).



(a)

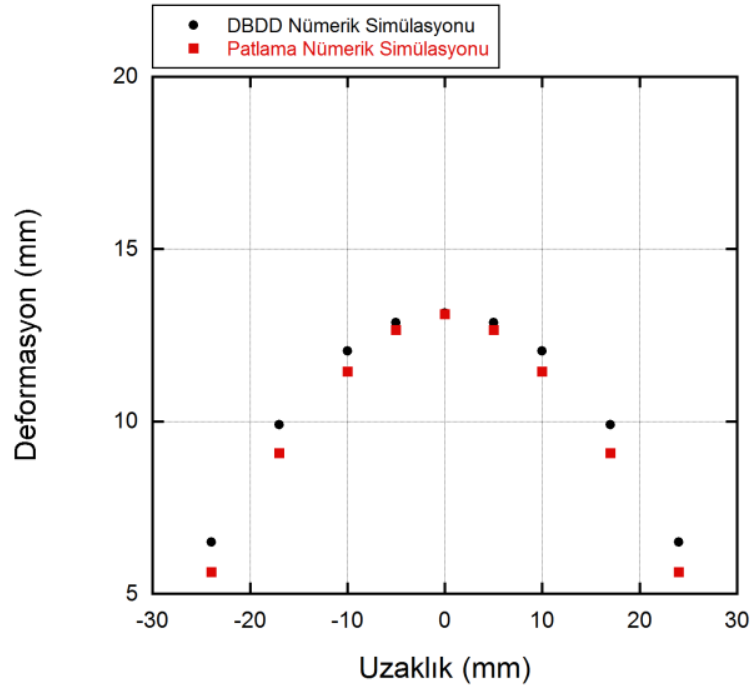


(b)

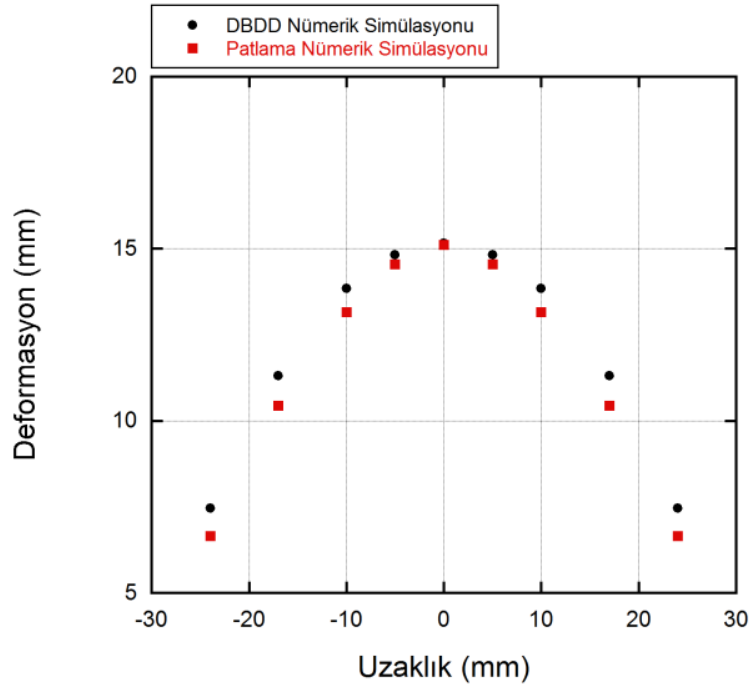


(c)

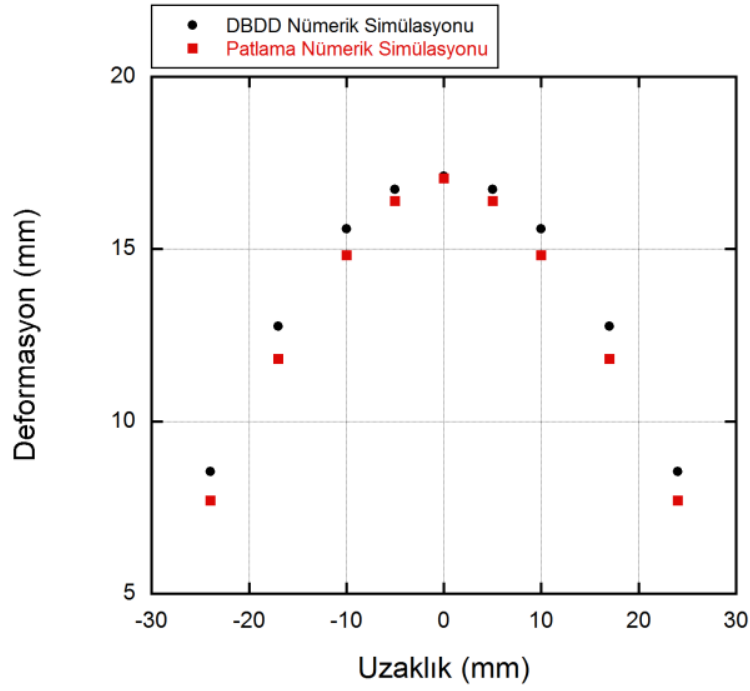
Şekil 123. 304L yüzey malzemesinde deformasyon profili karşılaştırması; a) Deformasyonun numune içinde değişimi, b) Yüzey malzemesine ait deformasyon profili karşılaştırması ( $v_{\text{çarpan}} = 50$  m/s, çarpan çubuk boyu= 50 mm, patlayıcı miktarı= 500 g, patlama mesafesi= 36,4 cm), c) DBDD ve Patlama Nümerik simülasyonlarında hız tarihçelerinin karşılaştırması.



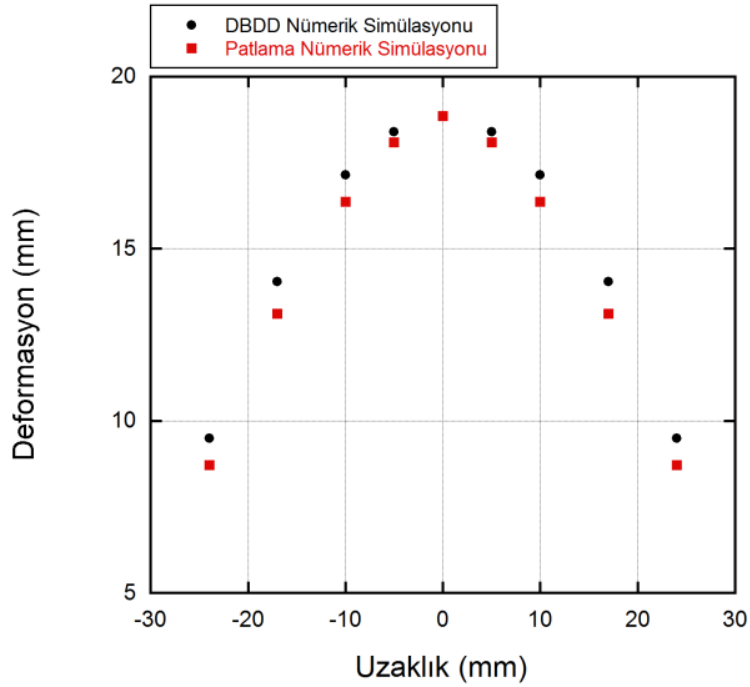
Şekil 124. 304L yüzey malzemesinde deformasyon profili karşılaştırması. ( $v_{\text{çarpma}} = 25$  m/s, patlayıcı miktarı = 500 g, patlama mesafesi = 38 cm)



Şekil 125. 304L yüzey malzemesinde deformasyon profili karşılaştırması. ( $v_{\text{çarpma}} = 30$  m/s, patlayıcı miktarı = 500 g, patlama mesafesi = 34,3 cm)



Şekil 126. 304L yüzey malzemesinde deformasyon profili karşılaştırması. ( $v_{\text{çarpma}} = 35$  m/s, patlayıcı miktarı = 500 g, patlama mesafesi = 31,3 cm)



Şekil 127. 304L yüzey malzemesinde deformasyon profili karşılaştırması. ( $v_{\text{çarpma}} = 40$  m/s, patlayıcı miktarı = 500 g, patlama mesafesi = 29 cm)

Patlama ile oluşan basınç dalgasında etkin parametrelerin patlayıcı miktarı ve patlama mesafesi olduğu Denklem 24 ve 25'ten de anlaşılacağı gibi açıktır. Patlama ile meydana gelen basınç dalgası teorik olarak aşağıda tekrar verilen Denklem 24'teki gibi ifade edilmiştir:

$$P(\tau) = P_r * \cos^2\theta + P_i * (1 + \cos^2\theta - 2 * \cos\theta) \quad \text{Denklem (24)}$$

İki patlama etkisini birbirleri ile karşılaştırma amacıyla ölçeklenmiş mesafenin literatürde sıkça kullanılmaktadır. Bu ölçekleme mesafesi denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

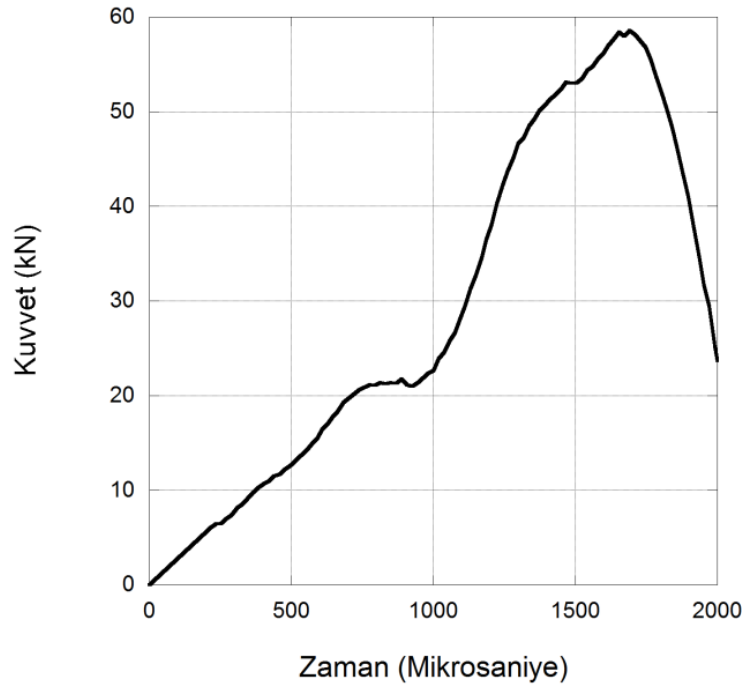
$$Z = \frac{d}{\sqrt[3]{W}} \quad \text{Denklem (25)}$$

Burada  $Z$  ölçeklenmiş mesafeyi,  $d$  patlama mesafesini,  $W$  ise patlayıcı kütlesini ifade eder. Patlama nümerik simülasyonlarında kullanılan patlayıcı miktarı değiştirildiğinde eşdeğer basıncı oluşturacak patlama mesafeleri Tablo 13'de verilmiştir.

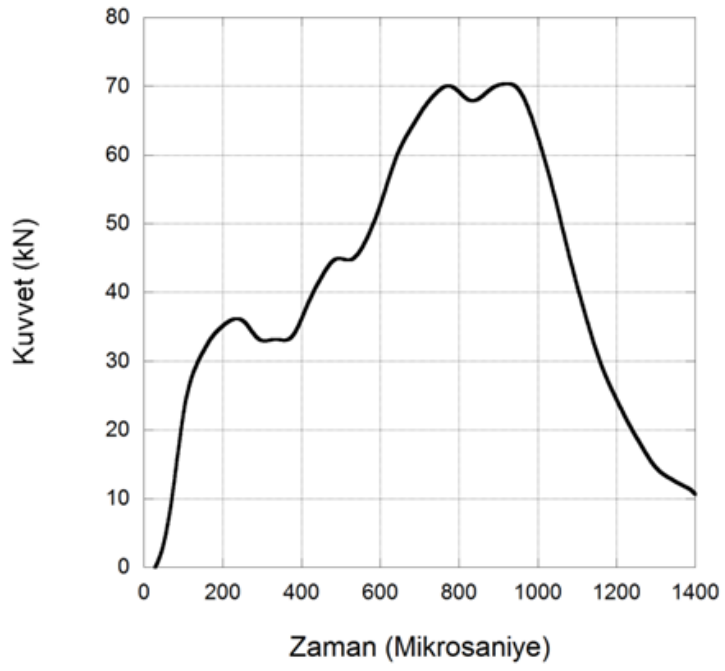
Tablo 13. Patlayıcı kütlesi ile değişen eşdeğer patlama mesafeleri.

Patlayıcı Kütlesi	Patlama Mesafesi
500 g	38 cm
1000 g	47,9 cm
2000 g	60,3 cm
5000 g	81,9 cm

DBDD testlerinin patlayıcı etkinliği kalibrasyonun tamamlanmasının ardından sandviç yapılar üzerinde Doğrudan Basınç Dalgası Deneyleri (DBDD) gerçekleştirilmiştir. Şekil 128'de R125T05 sandviç yapının DBDD deney ve simülasyon sonucu ve numunede meydana gelen deformasyon görülmektedir. Bu deneyde 150 mm boyunda bir çarpan çubuk 40 m/s hız ile poliüretan yükleme malzemesine çarptırılmıştır. Kapalı kalıp içerisinde sıkışan poliüretan yükü sandviç yapıya aktarmıştır.



(a)

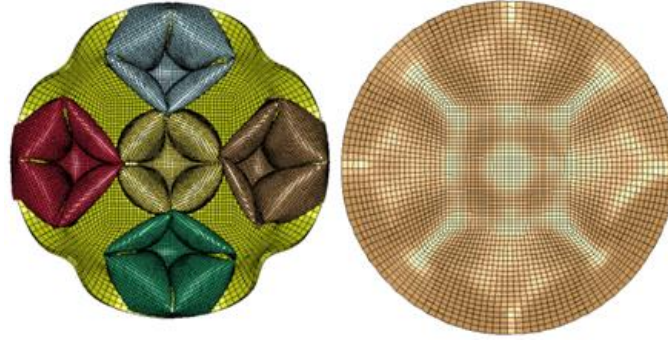


(b)



(c)



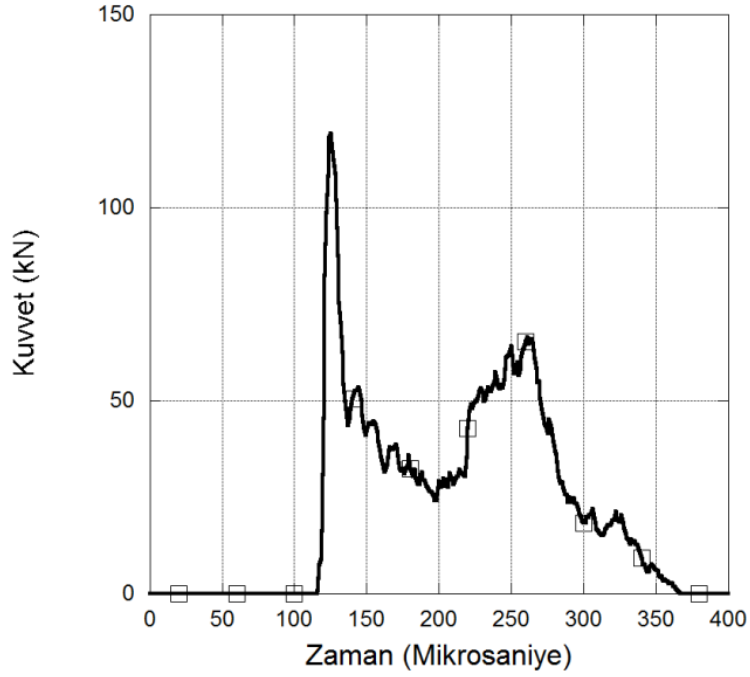


(d)

Şekil 128. (a) ve (b) R125T05 sandviç yapının DBDD deney ve simülasyon sonucu, (c) ve (d) deney ve simülasyon sonucu ezilmiş numune.

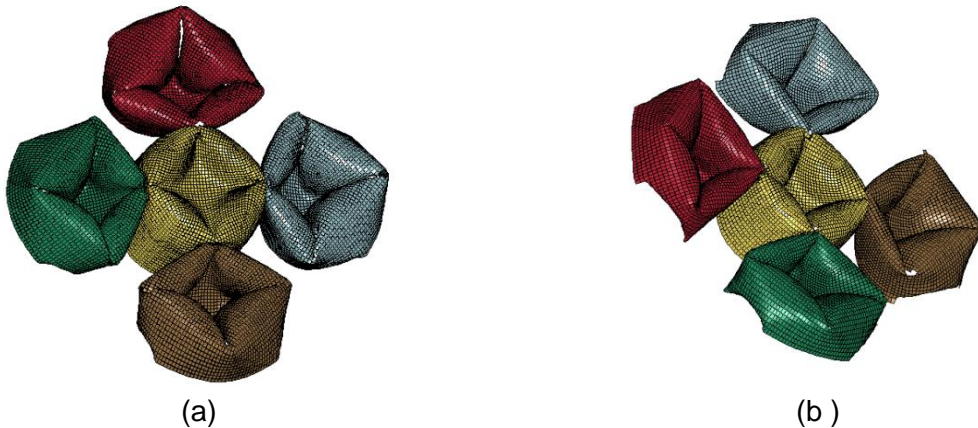
Sandviç yapı yaklaşık 750 mikrosaniyede 20 kN'luk bir ilk maksimum kuvvetle deforme olmuştur. Deformasyonun artışıyla birlikte kuvvet de artmaya devam etmiş ve yaklaşık 1750 mikrosaniyede 60 kN'luk bir global maksimum değer tespit edilmiştir. Deformasyon profili incelendiğinde sandviç yapının arka yüzeyinin serbest olmasından kaynaklı ve düşen kütle testlerinde elde edilen deformasyondan farklı bir sonuç görülmektedir. Ön yüzey plakası oldukça fazla şekilde hem global olarak hem de çekirdek malzemelerin temas noktalarında lokal olarak eğilmiştir. Çekirdek malzemelerinin özellikle çevresel olanlarında içe doğru katlanma şeklinde aşırı bir deformasyon ve diğer testlerde gözlemlenmemiş bir hasar modu görülmüştür. Model ve deney sonuçları incelendiğinde nümerik modelin ezilme davranışını başarılı olarak yakaladığı görülmektedir. Kuvvet değerleri başarıyla yakalanmış olmakla beraber zaman skalasında ufak bir sapma gözlemlenmiştir. Bu durumun ana sebebinin kuvvet okuması yapılan noktaların deneyde çıkış barı üzerinde, nümerik modelde ise numune kalıp ara yüzeyinden seçilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 128 (c) ve (d)'de ezilmiş numunelerin son şekilleri görülebilir. Sınırlandırma etkisi dolayısıyla çevresel yarı kürelerin yanal deformasyonu engellenmiştir. Bu yarı küreler ortadaki çekirdek yapısını da sınırlandırarak kısmen simetrik şekilde deforme olmasına sebep olmuştur. Deneyde gözlemlenen aşırı deformasyon ve hasar nümerik modelde de gözlenmiştir. Ön yüzey plakasının yarı kürelerin üzerine sıvanma şeklindeki deformasyonu modelde de tespit edilmiş, arka yüzey plakasındaki aşırı eğilme de simülasyonda gözlemlenmiştir.

Gerçekleştirilen DBDD simülasyonlarının deneysel sonuçlar ile uyumu gösterildikten sonra, benzer sınır şartlarında ConWep fonksiyonu ile patlama simülasyonları gerçekleştirilmiş ve sonuçları Şekil 129'da verilmiştir. Bu incelemede TNT kütlesi 500 g ve patlama mesafesi 29 cm'dir.



Şekil 129. DBDD deneyi ile eşdeğer patlama simülasyonu sonucu.

Şekil 129 ile Şekil 128 (a)'nın karşılaştırılmasından görülebileceği gibi, patlama simülasyonunda patlama dalgasının yapıya ilk ulaşma anında anlık yüksek momentum transferi dolayısıyla yüksek bir kuvvet değeri gözlemlenmiştir. Bir diğer fark da zaman skalasındaki farklılıktır – oluşan şok etkisi dolayısıyla patlama olayı daha hızlı gerçekleşmekte ancak kuvvet seviyeleri başarılı bir şekilde benzetilebilmektedir. Simülasyon sonucu elde edilen deformasyon profilleri ise Şekil 130'da verilmiştir. İki simülasyon arasındaki uyum açıktır.



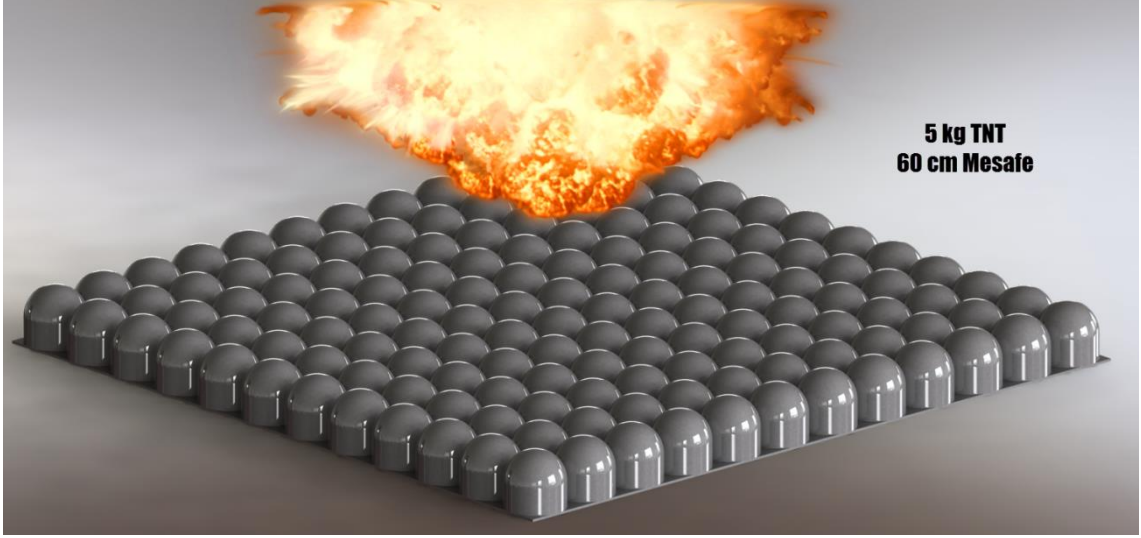
Şekil 130. DBDD ve patlama simülasyonlarının deformasyon şekilleri; (a) Patlama, (b) DBDD.

## 7.2 Sandviç Yapıların Patlama Yüklerine Karşı Davranışlarının İncelenmesi

Deneysel sistemlerin başarıyla modellenmesinin ardından sandviç yapıların gerçek patlama yükleri etkisi altındaki davranışlarının incelenmesine geçilmiştir. Patlama yüklerinin yapıların üzerindeki etkilerinin incelenmesinde sonlu elemanlar metodu yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar metodunda patlama yükleri yapılara genellikle iki farklı yöntem kullanılarak uygulanmaktadır. Bunlardan ilki patlayıcının, patlayıcının gömülü olduğu ortamın (genellikle toprak), patlama yükünün etki ettiği yapının bulunduğu ortamın (genellikle hava veya su) fiziksel olarak modellendiği ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) metodudur. İkinci metod ise patlayıcının üretmiş olduğu basınç yükünün yapıya etki ettirildiği ConWep metodudur. ConWep metodu kullanılarak hem serbest hava (free air blast) hem de ortama gömülü patlayıcıların etkileri simüle edilebilmektedir. ConWep metodu kullanılarak yapılan analizlerin çözüm sürelerinin nispeten kabul edilebilir sınırlar dâhilinde kalabilmesi ve parametrik çalışmalara (farklı mesafeler farklı ve TNT eşdeğerlikleri) daha uygun olmasından dolayı bu çalışmada tercih edilmiştir.

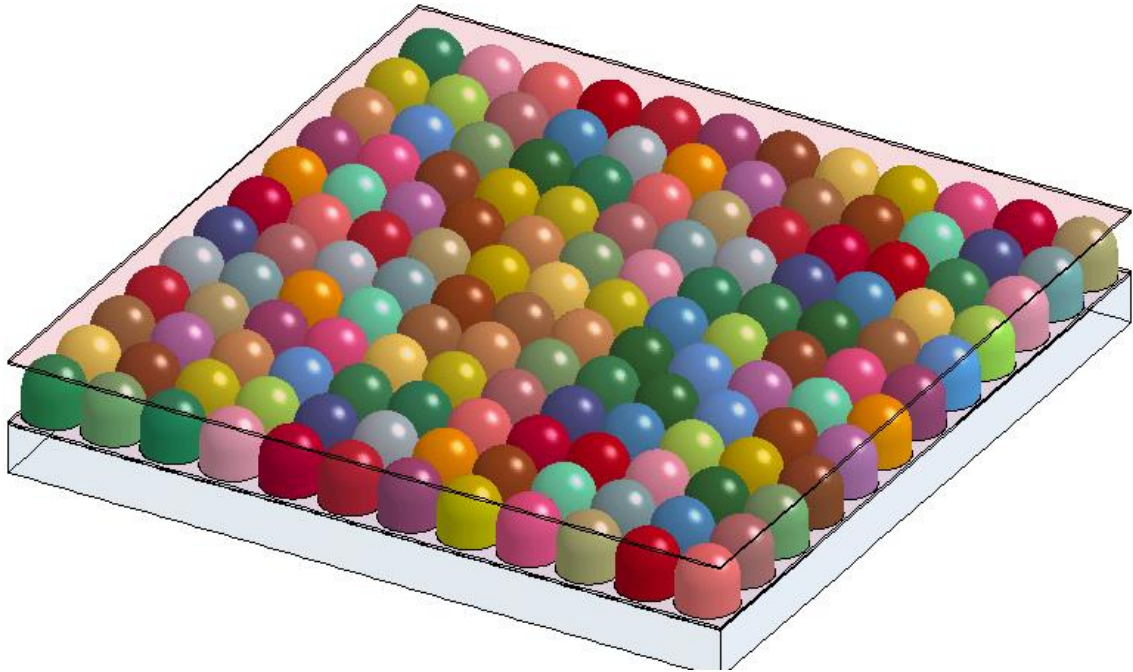
Yarı küresel çekirdek malzeme içeren sandviç yapıların düşük ve yüksek şekil değiştirme hızlarındaki davranışlarının statik, düşen ağırlık ve doğrudan basınç dalgası deneyleri ve nümerik modelleri kullanılarak başarı ile incelenmesinden ve etkili enerji emilim mekanizmaları ve deformasyon şekillerinin ortaya konmasından sonra çalışmaya bu yapıların gerçek patlama yüklerinin etkisi altında davranışlarının incelenmesi ile devam edilmiştir.

Sandviç yapıların patlama yüklerine karşı davranışlarının incelenmesinde öncelikli olarak dört farklı geometrideki çekirdek malzemelerinin bireysel olarak kullanıldığı sandviç yapıların modellenmesi ile başlanmıştır. Bu çalışmaları takiben söz konusu çekirdek malzemeler farklı konfigürasyonlar ve kombinasyonları kullanılarak nümerik modeller hazırlanmıştır. Yapılan bu çalışmalarda çekirdek malzemeleri 30x30 cm ebatlarında 1 mm kalınlığında 304L paslanmaz çelik malzemeden yüzey plakaları arasına yerleştirilmiş ve 60 cm'den 5 kg TNT yüküne tabi tutulmuştur. Sandviç yapı 2 cm kalınlığında bir plaka ile desteklenmiştir. Burada amaç hem patlamadan kaynaklanan enerjinin emilim performansını değerlendirmek hem de korunan yapıya iletilen kuvvetin şiddet ve iletim zamanı gecikmelerini incelemektir. Sandviç yapı temsili patlama modeli Şekil 131'de görülebilir.

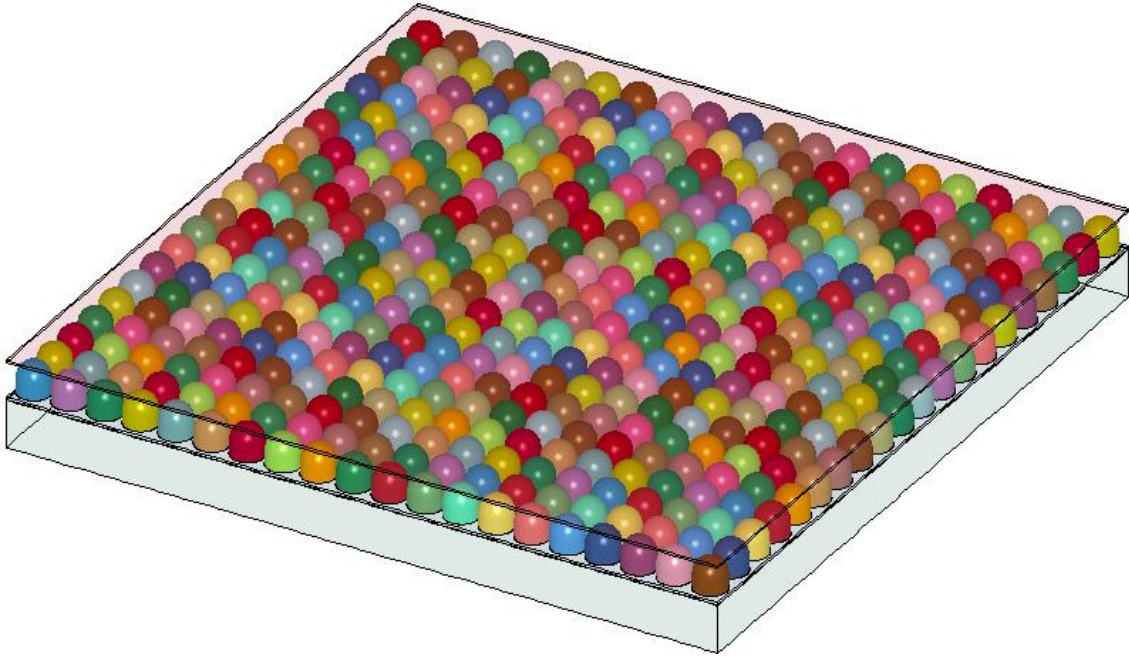


Şekil 131. Sandviç yapı temsili patlama modeli

Analizlere ilk olarak R125T05, R125T1, R75T05 ve R75T10 çekirdek malzemelerinin kullanıldığı sandviçler ile başlanmıştır. Şekil 132’de farklı çekirdek malzemelerin kullanıldığı sandviç yapıların mayın patlaması nümerik modelleri görülmektedir. Tablo 14’de tek çeşitli çekirdek malzemesi içeren sandviç modellerin ağırlıkları, çekirdek malzemesi adetleri ve boyutları yer almaktadır.







(a)



(b)

Şekil 132. (a) R125T05 ve R125T1 çekirdek malzemeli sandviç yapısı simülasyon modeli, (b) R75T05 ve R75T1 çekirdek malzemeli sandviç yapısı simülasyon modeli.

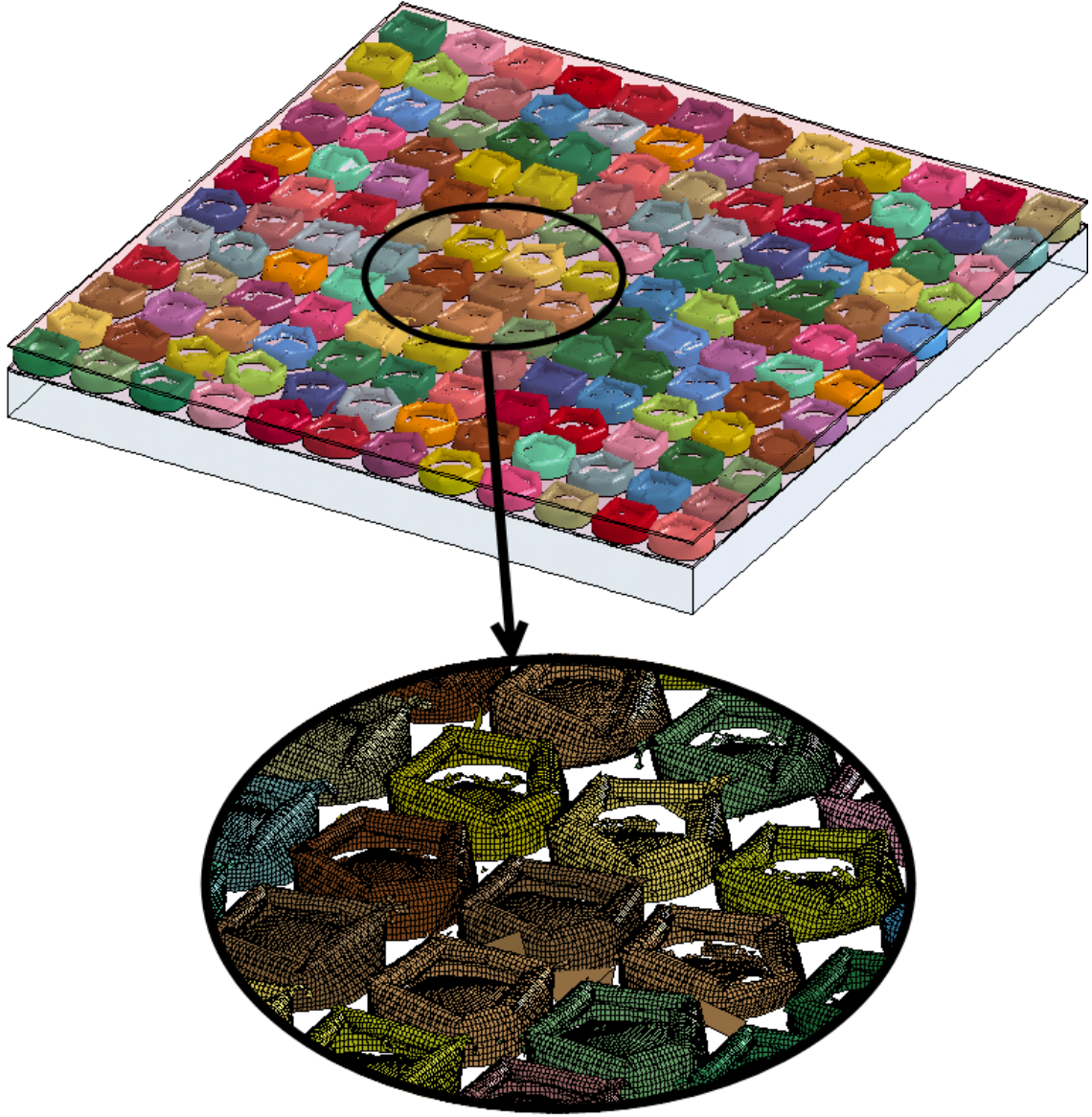
Tablo 14. Tek çeşitli sandviç yapıların kesit, ağırlık ve boyutsal özellikleri

	Model Kesit	Ağırlık (kg)	Boyut (mm)
R125T05		0,792	300x300x25
R125T1		1,653	300x300x25
R75T05		0,750	300x300x15
R75T1		1,476	300x300x15

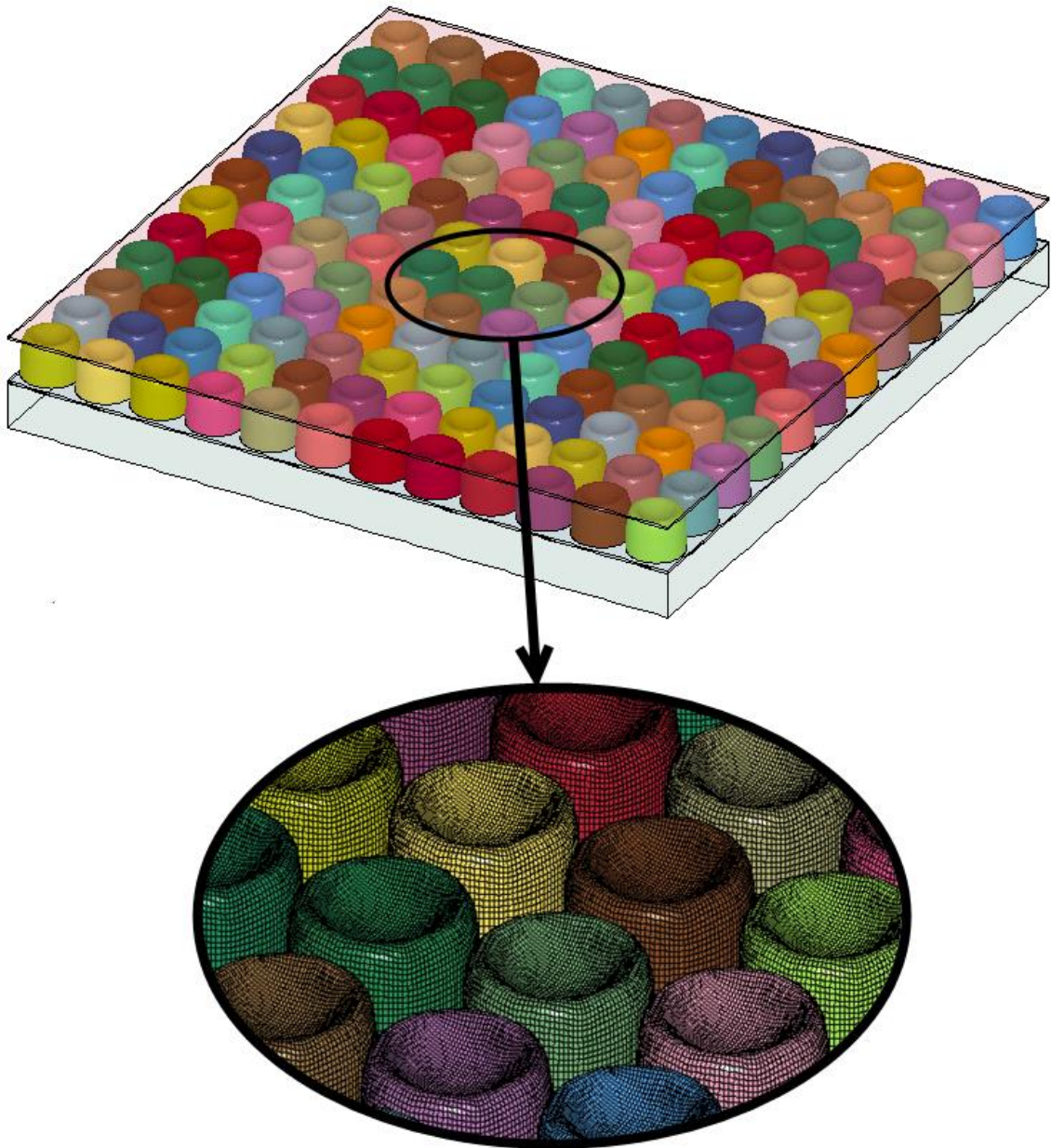
Modelde sandviç yapıyı oluşturan çekirdeklerin birbirleri ve yüzey plakaları ile aralarında temas algoritması tanımlanmıştır. Bu noktada esas amaç alternatif sandviç sistemlerin aynı tehdit karşısında davranışlarını karşılaştırmaktır. Yapıların patlama yüküne



maruz kalmasından sonra çekirdeklerde meydana gelen deformasyonlar Şekil 133'de verilmiştir.

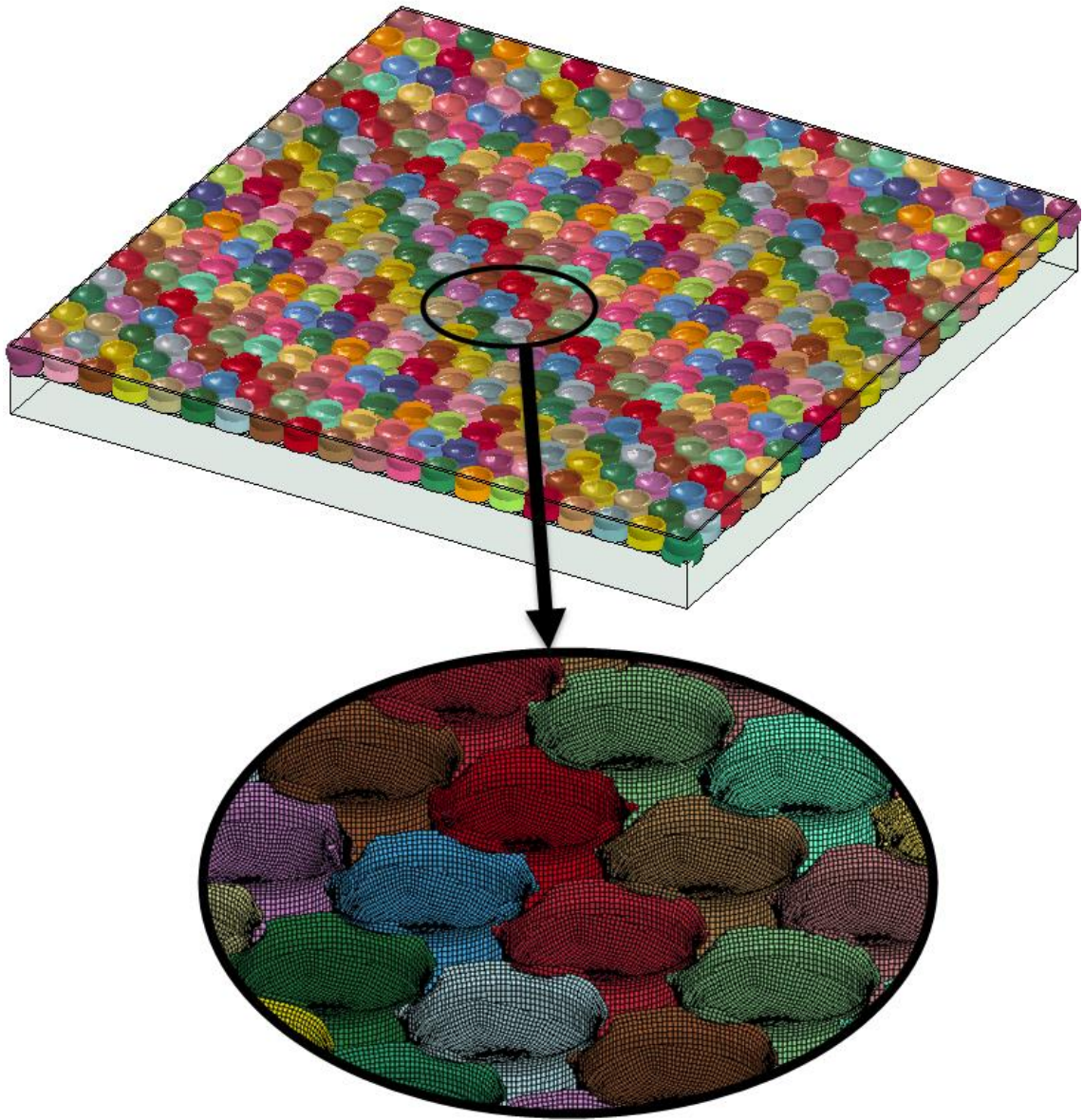


(a)



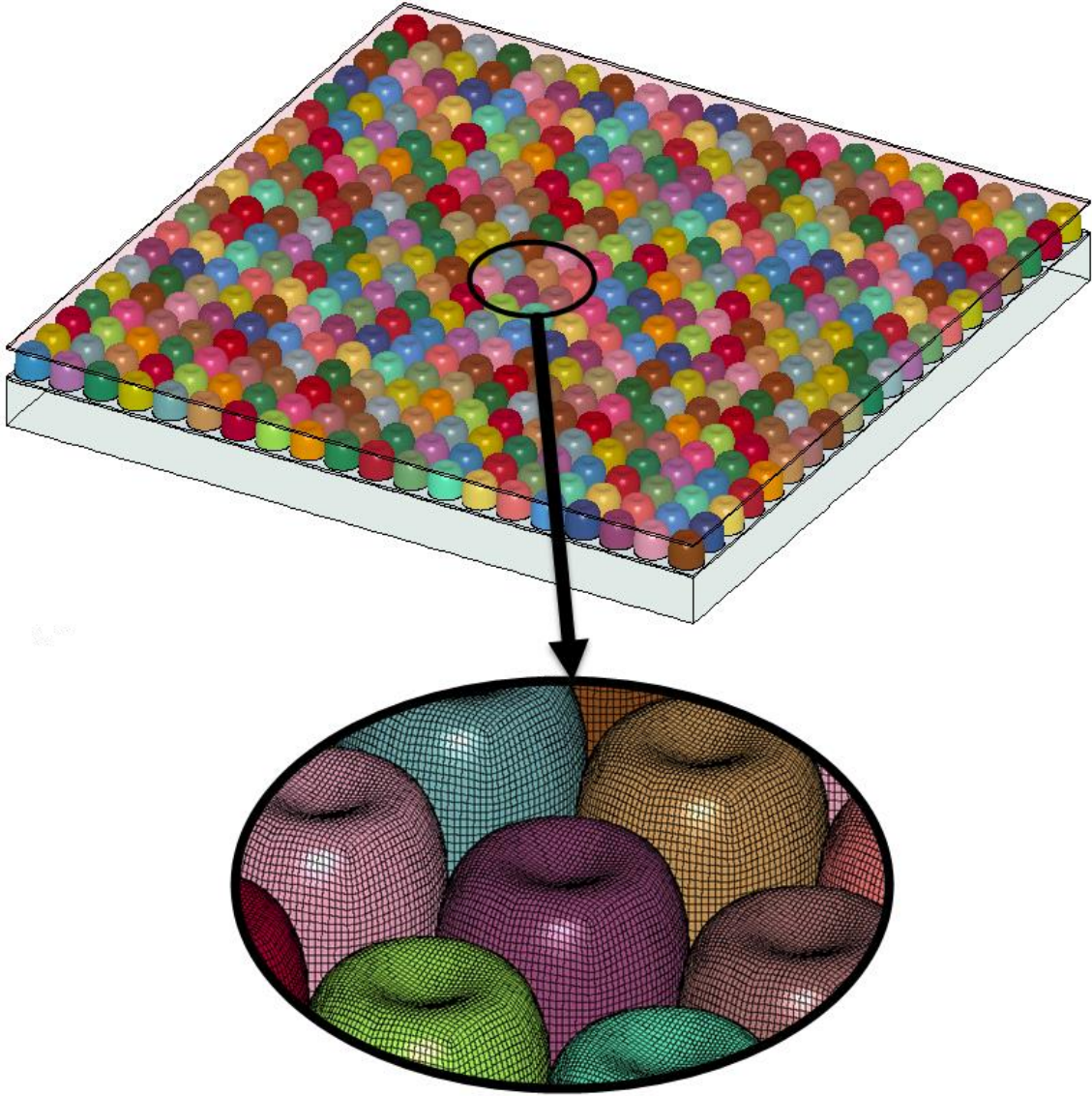
(b)





(c)

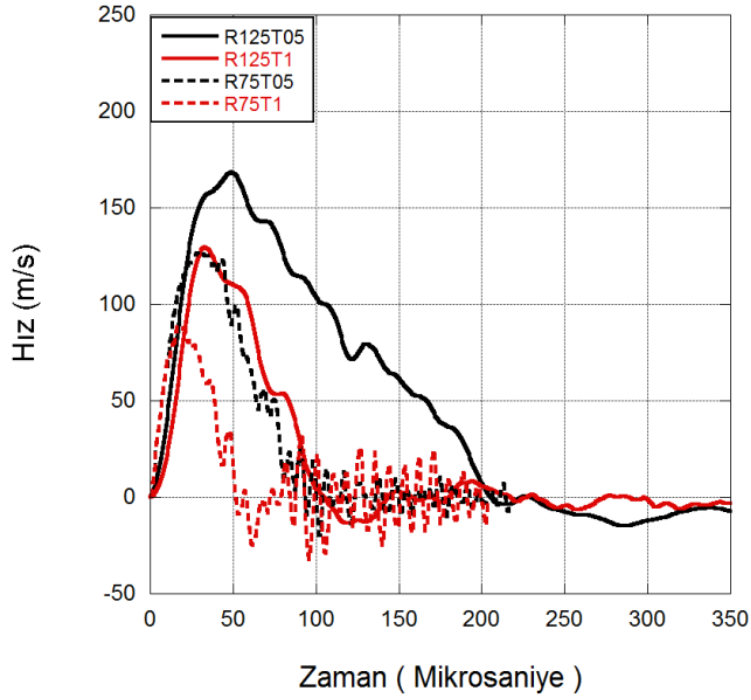




(d)

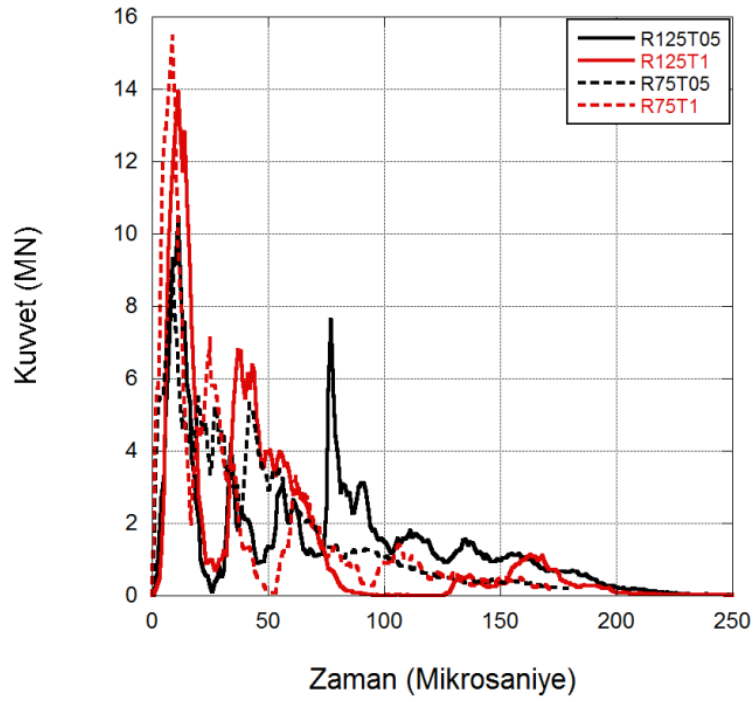
Şekil 133. Tek çeşit çekirdek malzemeli sandviç yapıların deformasyonları; (a) R125T05, (b) R125T1, (c) R75T05, (d) R75T1

Tek çeşitli çekirdek malzemesi kullanılan yapıların karşılaştırılmalarında çarpmanın gerçekleştiği ön yüzey plakalarının hızlarındaki değişimler birim şekil değiştirme hızlarında farklılıklara sebep olacaktır. Bu nedenle şekil değiştirme hızı hassasiyeti olan çekirdek malzemeleri söz konusu olduğunda, aynı etkiler altında dahi geometrilerin deformasyon şekillerinde farklılıklar olması doğaldır. Şekil 134' den de görülebileceği gibi ön plaka hızı en yüksek olan sandviç yapı R125T05 çekirdek malzemesine sahip olan yapıdır ve bu yapıyı sırası ile R125T1, R75T05 ve R75T1 takip etmektedir.



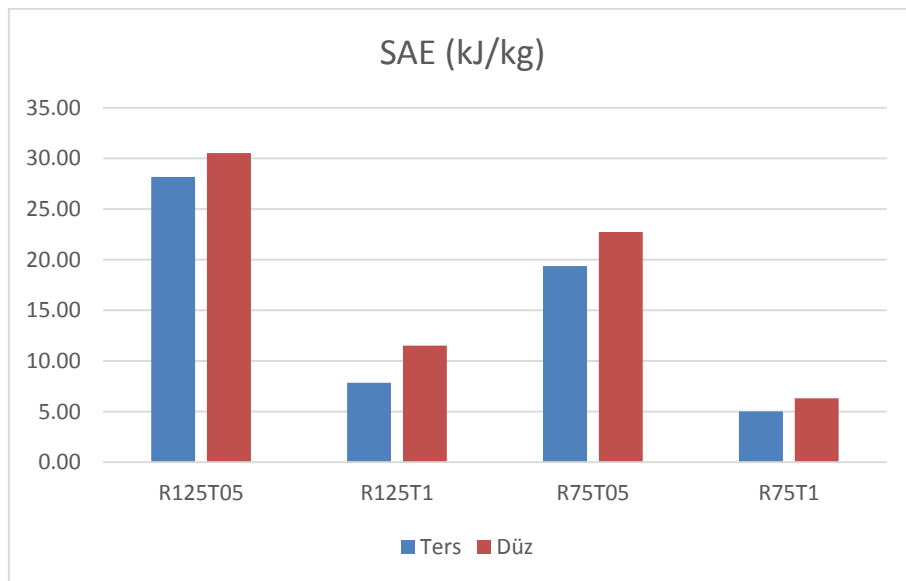
Şekil 134. Tek çeşit çekirdek malzemeli sandviç yapıların ön yüzey plakalarının hız tarihçeleri.

Tek çeşitli çekirdek malzemeli sandviç yapıların arka plakaya iletilen kuvvet tarihçelerini incelendiğinde çarpmanın etkisi ile oluşan ilk tepe değerlerinin en yüksek R75T10 çekirdek malzemeli sandviç yapıda olduğu görülmektedir (Şekil 135). Bu değeri takiben R125T1, R125T05 ve R75T05 çekirdek malzemeli sandviç yapılar izlemektedir. Bunun sebebi çekirdek malzemesinin söz konusu patlama etkisinde diğer numunelere nazaran daha az deforme olması ile açıklanmaktadır. Patlama enerjisi R75T1 çekirdek malzemesinin sadece küresel bölgesinin deformasyonu ile sönmülebilmıştır ve R125T05 çekirdek malzemesindeki gibi küresel ve silindirik bölgelerde kademeli ezilme meydana gelmemiştir. R125T1 ve R75T1 geometrilerinin düşen ağırlık test sonuçları incelendiğinde neredeyse aynı kuvvet değerinde ilk tepe değerleri görülmektedir. Ancak sandviç yapıda çekirdek malzemeleri arasındaki etkileşimler de sonuçları etkiledikleri için R75T1 kullanılan sandviç yapı daha yüksek kuvvet değerlerine (%12) ulaşmaktadır (Şekil 156).



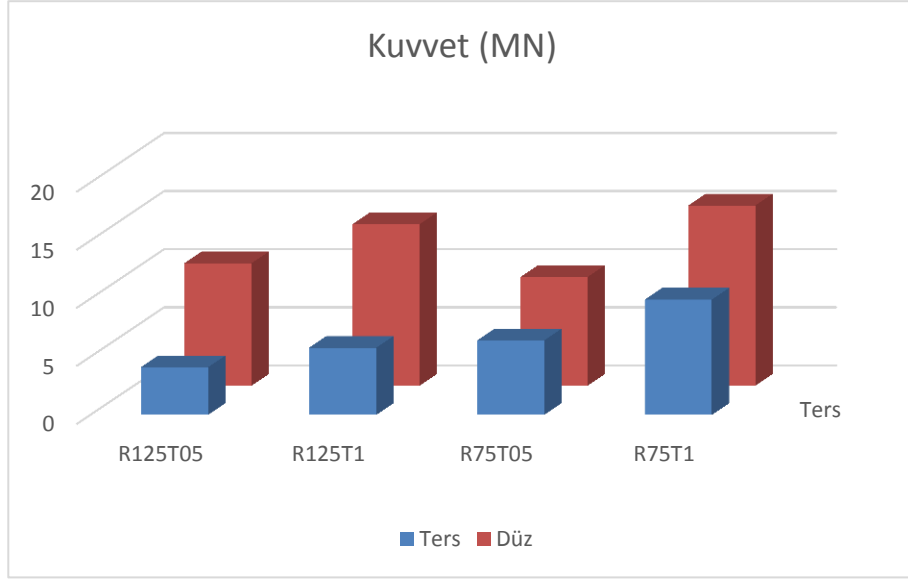
Şekil 135. Tek çeşit çekirdek geometrili sandviç yapıların tehdit altında kuvvet tarihçeleri.

Söz konusu çekirdek malzemeleri ihtiva eden sandviç yapıların özgül enerji emme kapasiteleri incelendiğinde en yüksek değeri R125T05 çekirdek malzemesi ihtiva eden sandviç yapının verdiği (31 kJ/kg ) ve bunu sırası ile R75T05, R125T1 ve R75T1 içeren sandviç yapıların takip ettiği görülmektedir (Şekil 136).



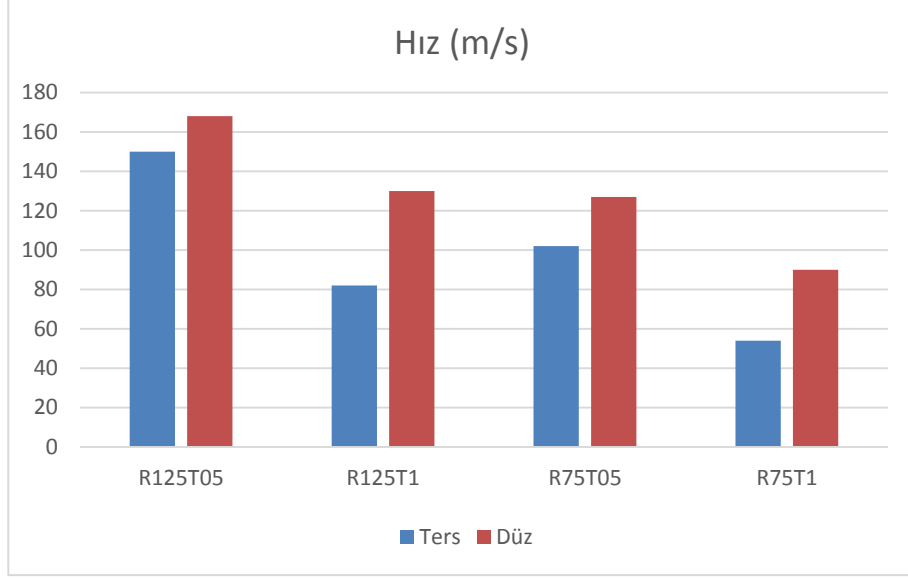
Şekil 136. Tek çeşit çekirdek malzemeli sandviç yapıların SAE değerleri

Çalışmanın devamında sandviç yapılarda yer alan çekirdek malzemeleri patlama yüküne ilk olarak silindirik bölge maruz kalacak şekilde ters yerleştirilmiştir. Bu ters konfigürasyon sonucunda iletilen kuvvet tarihçelerinde deformasyon hızlarında ve miktarlarında değişiklikler meydana gelmiştir. Bu değişim ile R125 çekirdek malzemeleri için ilk tepe kuvvetinde % 60'lık R75 çekirdek malzemeleri için ise % 33'lük bir düşüş meydana gelmiştir (Şekil 137).



Şekil 137. Tek çeşitli sandviç yapıların normal ve ters modellerde maksimum kuvvet değerleri.

Kuvvet değişiminin yanı sıra ön yüzey plakası hızında da azalma görülmüş ve sonuçlar Şekil 138'de verilmiştir. Bu azalmanın maksimum olduğu sandviç R75T1 çekirdek malzemesi ihtiva eden (% 40 azalma ) ve en az değişim gözlenen R125T05 (% 10 azalma) sandviç yapılarıdır. Gerilme dalgasının ilk olarak silindirik bölgeden geçmesi kuvvet değerlerinde düşüşe sebep olmuştur. Ancak yüzey plakasının hızının düşmesinin sebebi kuvvet değişiminin etkisinden ziyade çekirdek malzemelerinin kalınlığı ve çapı ile ilgilidir.

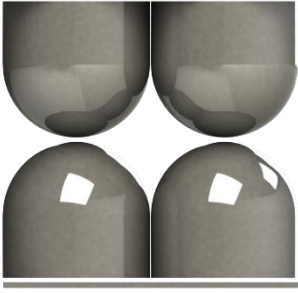
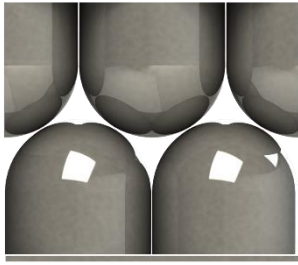



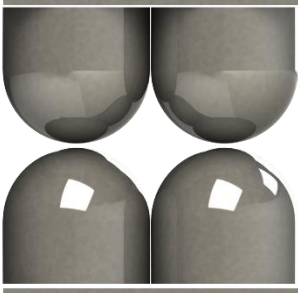


Şekil 138. Ters durumda ön yüzey plakası maksimum hız değerleri

Ters konfigürasyonlarda özgül enerji emme kapasiteleri incelendiğinde çekirdek malzemelerin daha az enerji absorbe etmesi sonucunda *SAE* değerlerinde düşüşler görülmektedir (Şekil 136). Şekil değiştirme hızında ve kuvvetin iletimindeki düşüşlerin azalması sistemin kullanılabilirliğini arttıran etkenler olurken özgül enerji emme kapasitesindeki düşüş ise çekirdek malzemelerinin sisteme bu tarz entegrasyonunda daha az verimli çalışmalarına neden olmuştur.

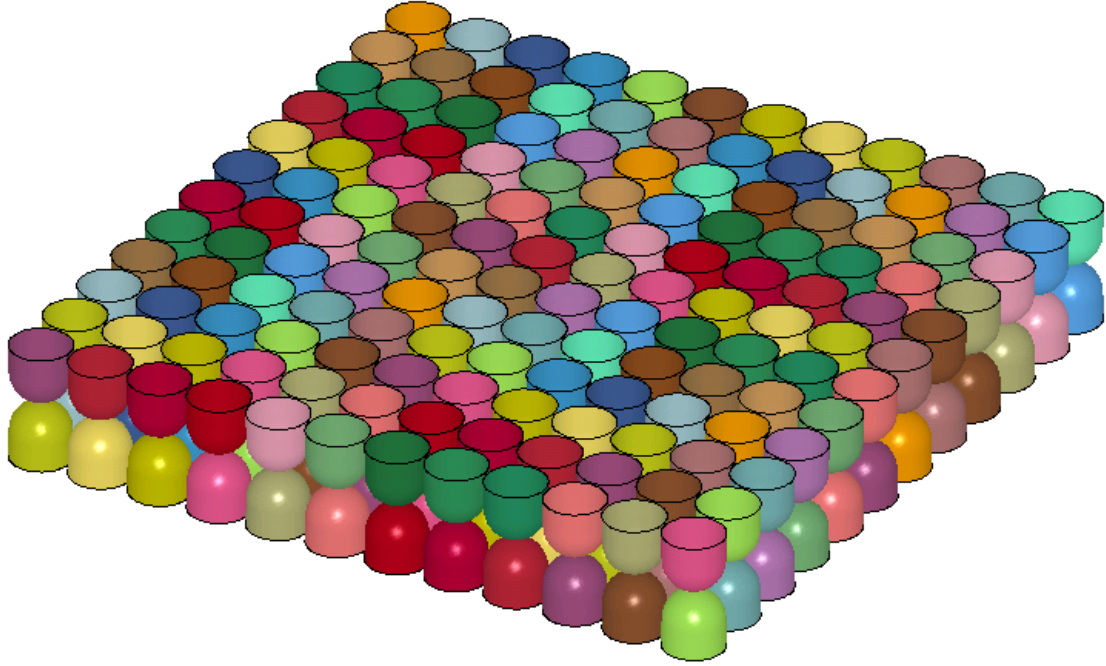
Tek çeşitli çekirdek malzemesi ihtiva eden sandviç yapıların incelenmesinin ardından çekirdek malzemelerinin *SAE* değerleri, kuvvet iletimi ve deformasyonları temel alınarak tek çeşitli ve çok çeşitli farklı konfigürasyonlar oluşturulmuştur. Oluşturulan konfigürasyonlarla ilgili detaylar Tablo 15'de verilmiştir.

Tablo 15. Sandviç modellerinin kesit, ağırlık ve boyutsal özellikleri

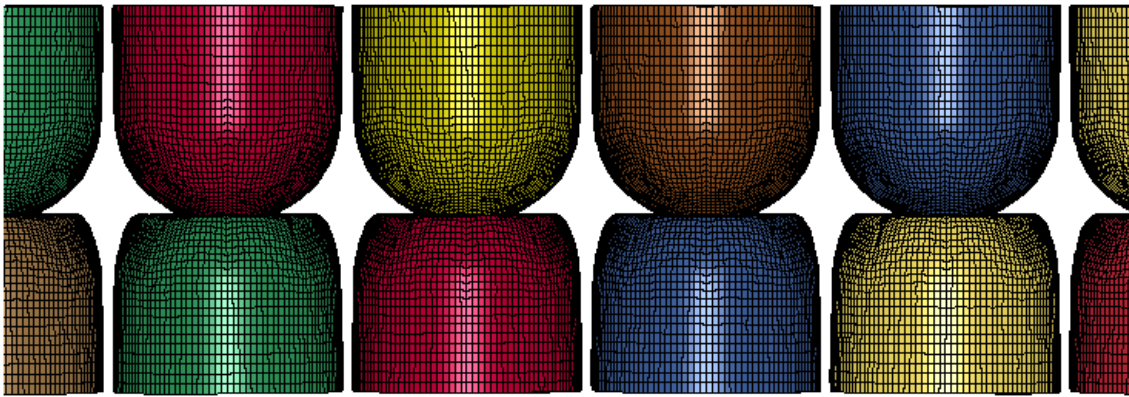
	Kesit	Ağırlık (kg)	Boyut (mm)
Tip 1		3,305	300x300x48
Tip 2		3,041	300x300x45
Tip 3		0,760	300x300x25
Tip 4		1,062	300x300x25
Tip 5		0,918	300x300x25
Tip 6		1,584	300x300x48



Bu çalışmalara ilk olarak Tip 1 modeli ile başlanmıştır. Tip 1, R125T1 çekirdek malzemelerinin küresel kısımları birbirleriyle temas halinde olan iki katman şeklinde sandviç yapının içerisine yerleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Söz konusu yapı sınır koşulları dâhilinde 288 çekirdek malzemesi içermekte olup 3,305 kg ağırlığa sahiptir. Patlama etkisi bütün modellerde olduğu gibi yine 5 kg TNT eş değerliliği ile 60 cm uzaklıktan ConWep metodu ile sağlanmıştır. Simülasyon sonucu deforme olmuş numune Şekil 139'da görülebilir.



a)



b)

Şekil 139. a) Tip 1 sandviç yapısı simülasyon modeli, b) Tip 1 modelinin deformasyonu

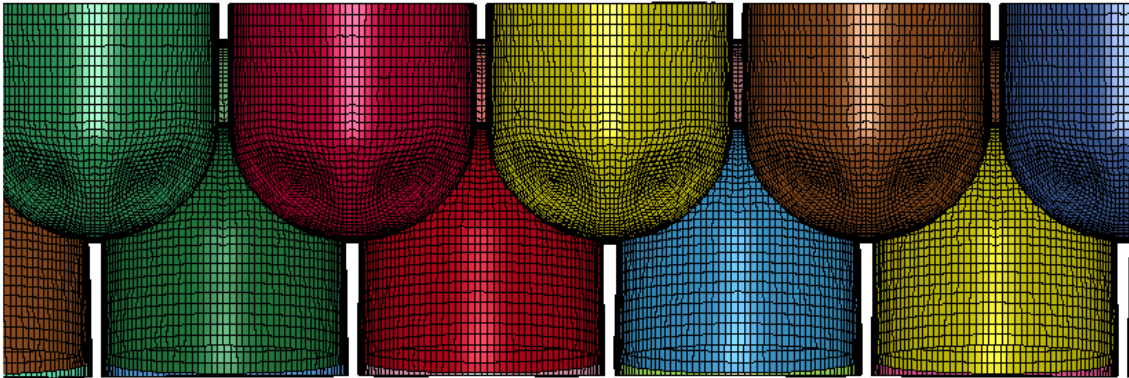
Tip 1 modeli tek çeşitli R125T1 çekirdek malzemesi içeren sandviç yapı ile karşılaştırıldığında maksimum kuvvet değerinde % 43'lük bir azalma görülüyor iken yüzdelik

deformasyon miktarında % 26 'lık bir azalma mevcuttur. Kuvvetteki ve deformasyon miktarındaki değişimlerin aksine deformasyon hızında bir değişim gözlenmemiştir. Sistemin özgül enerji emme kapasitesi R125T1 çekirdek malzemesi içeren sandviç yapıya göre % 52 daha düşüktür ( Şekil 158).

Tip 2 modeli tek çeşitli R125T1 çekirdek malzemelerinin yine küresel kısımları temas halinde olacak şekilde ancak aksenal bir kaçıklık verilerek yerleştirilmesi ile meydana getirilmiştir. 265 adet çekirdek malzemesi kullanılan sistemin ağırlığı 3,041 kg dir. Kuvvet iletiminde düşüş gözlemlenmesine rağmen SAE değeri bazında en düşük değer Tip 2'de görülmüştür (Şekil 158). Simülasyon sonucu deforme olmuş numune Şekil 140'da görülebilir.



a)



b)

Şekil 140. a) Tip 2 sandviç yapısı simülasyon modeli, b) Tip 2 modeli deformasyonu.



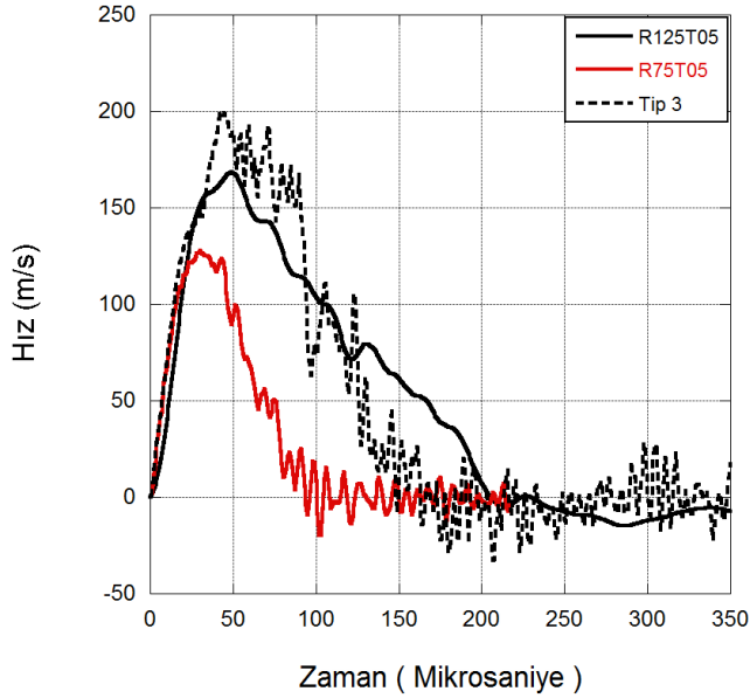
R125T1 sandviç malzemeleri meydana gelen patlama etkisinde en fazla % 30 deformasyon gerçekleşmiştir.

Tip 3 modelinde R125T05 ve R75T05 çekirdek malzemeleri birlikte kullanılmıştır. Bu konfigürasyonda 108 adet R125T05 ve 88 adet R75T05 olmak üzere toplam 0,759 kg ağırlığında çekirdek malzemesi yer almaktadır. Bu sandviç yapı oluşturulurken kuvvet iletiminde ilk tepe değerin düşmesi ön görülerek gelen gerilme dalgasının daha az çekirdek malzemesi tarafından karşılanması istenmiştir. Bu bağlamda R125T05 geometrisi ilk yüklemeyi küresel bölgelerindeki ezilme ile karşılamış, silindirik bölgedeki ezilmeye R75T05 çekirdek malzemesinin katılması ile birlikte deformasyon devam etmiştir. İletilen kuvvet değerine bakıldığında R125T05 çekirdek malzemesi kullanılan sandviç malzemeye göre %20, R75T05 çekirdek malzemesine göre ise %10 azalma görülmüştür (Şekil 156). Tip 3 sandviçin deformasyon profili Şekil 141'de görülebilir.



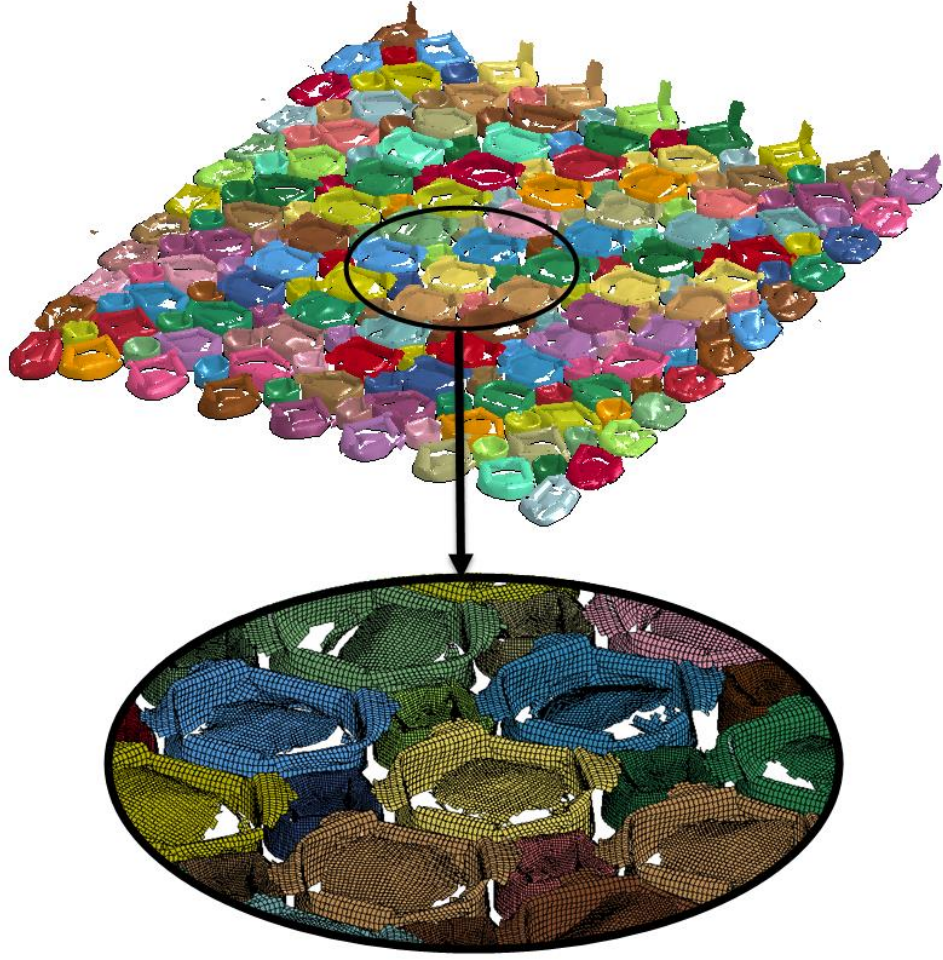
Şekil 141. Tip 3 sandviç modeli simülasyonu.

Tip 3 sandviç yapısında ön yüzey plakası hız tarihçeleri incelendiğinde R125T05 ve R75T05 sandviç yapılarına nazaran daha yüksek olduğu görülmektedir. R125T05 sandviç yapısına göre maksimum hız değeri %19 daha fazla iken, R75T05 sandviç yapısına göre %57 daha fazladır. Şekil 142'de hız tarihçeleri incelendiğinde, Tip 3 sandviç yapısında sadece R125T05 çekirdek malzemelerinin küresel bölgeleri ezilirken, deformasyon hızının yüksek olduğu fakat; silindirik bölgenin ve R75T05 çekirdek malzemesinin ezilmeye başlaması ile birlikte deformasyon hızının tek çeşitli R125T05 çekirdek malzemesi ihtiva eden sandviç yapısına göre azaldığı görülmüştür.

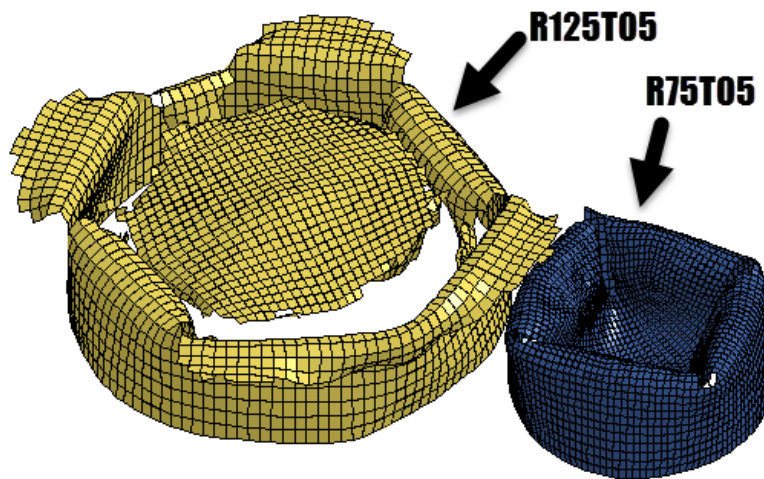


Şekil 142. R125T05, R75T05 ve Tip 3 çarpma yüzey plakası hız tarihçeleri.

Bu konfigürasyon söz konusu çekirdek malzemelerin kombine geometrili olmasının getirdiği yararların yanı sıra farklı bölgelerde deformasyon hızlarının isteğe göre değiştirilebileceğini göstermektedir. Atalet etkileri ve birim şekil değiştirme hızı hassasiyetinin önemli olduğu kombine geometrili çekirdek malzemelerinde bu husus oldukça önem teşkil etmektedir. Tip 3 modelinin deforme olmuş hali Şekil 143 ve Şekil 144'de görülebilir. R125T05 çekirdek malzeme de yarı küresel bölgenin deformasyonundan sonra deformasyonun silindirik bölgeye doğru ilerlemesi ile birlikte yapı içerisinde şekil değiştirme hızı artmaktadır. Bu raporda detayları belirtildiği gibi 304L paslanmaz çelik malzemenin kopma şekil değiştirme değeri şekil değiştirme hızı ile birlikte azalmaktadır. Bu durum yapılmış bütün dinamik test sonuçlarında da malzemelerde hasar oluşumu ile kendini göstermiştir. Patlama yüklerine karşı korumada kullanılacak bu tarz yapıda yarı küresel kısmın deformasyon hızını ve kuvvet iletim miktarını azaltarak deforme olması sonrasında yapıdan koparak ayrılması ve silindirik yapıya yükün iletilmesi yapının patlama yüklerine karşı etkinliğini oldukça arttırmaktadır. Silindirik yapı yarı küresel kapağın kendisinden ayrılması ile birlikte katlar oluşturarak oldukça yüksek seviyelerde enerji emmektedir.



Şekil 143. Tip3 modelinin deforme olmuş hali.



Şekil 144. Tip 3 sandviç modelinde R125T05 ve R75T05 çekirdek malzemelerinin deformasyonları.



Özgül enerji emme kapasitesi incelendiğinde Tip 3 modelinin R125T05 geometrili sandviç yapısından %3 daha düşük fakat R75T05 geometrili sandviç yapıdan %30 daha yüksektir (Şekil 158).

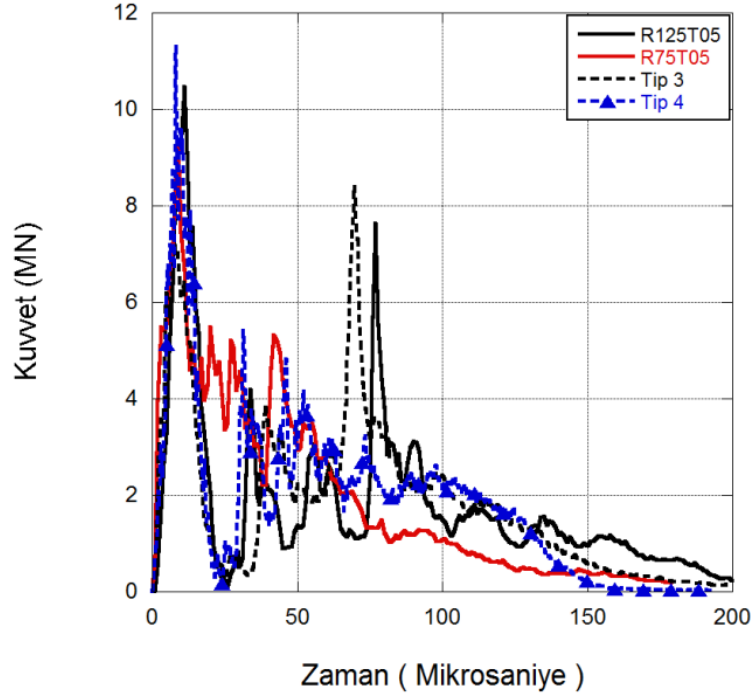
Bir diğer çalışmada ise Tip 3 modelinde kullanılan çekirdek malzemelerinin iç içe yerleştirilmesi ile Tip 4 modeli elde edilmiştir. Aynı alanda kademeli destekleme yapmayı amaçlayan bu çalışmada 144'er adet R125T05 ve R75T05 geometrileri kullanılmıştır. Sistemin ağırlığı 1,062 kg'dır. Şekil 145'de Tip 4 sandviç simülasyon modeli görülebilir.



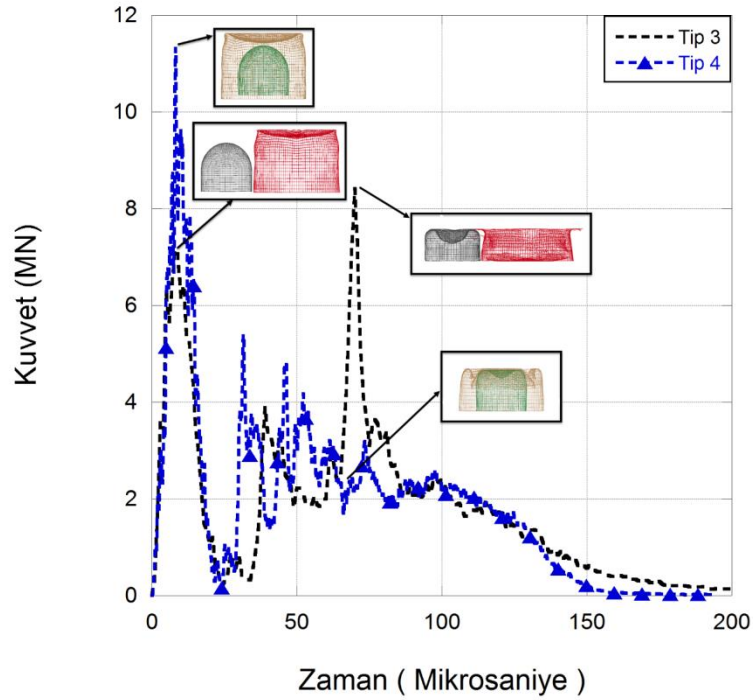
Şekil 145. Tip 4 sandviç simülasyonu modeli.

Gerilme dalgası tek çeşitli R125T05 geometrisi içeren sandviç yapısındaki gibi aynı sayıda çekirdek malzemesi ile karşılanmıştır ve bunun sonucunda kuvvet tarihçesinde oluşan ilk tepe noktaları birbirine çok yakındır. R125T05 geometrisinin küresel bölgesinin ezilmesinin ardından silindirik bölgesinin ezilmesi kademeli olarak devam etmekte ve bu süreçte R75T05 geometrisinin deformasyonu gerçekleşmektedir. Şekil 146'da kuvvet tarihçeleri incelendiğinde Tip 3'deki gibi ikinci bir tepe noktası oluşmadığı görülmektedir. Bunun nedeni R125T05 çekirdek malzemesinin küresel kısmının katlanmasının ardından kırılarak yaklaşık 240 m/s bir hız ile arka plakaya çarpması sonucu meydana gelmektedir. Tip 3 modelinde de bunun gerçekleştiği aşikârdır. Tip 4 modelinde R125T05 çekirdek malzemesinden kırılan parça R75T05 geometrisi tarafından tutularak arka plakaya çarpması engellenmiştir. Böylelikle kuvvet tarihçesine kırılan parçanın momentum iletiminden kaynaklı ikinci bir tepe

noktası oluşumu görülmemektedir. Şekil 147'de Tip 4 modelinin deforme olmuş şekli görülebilir.



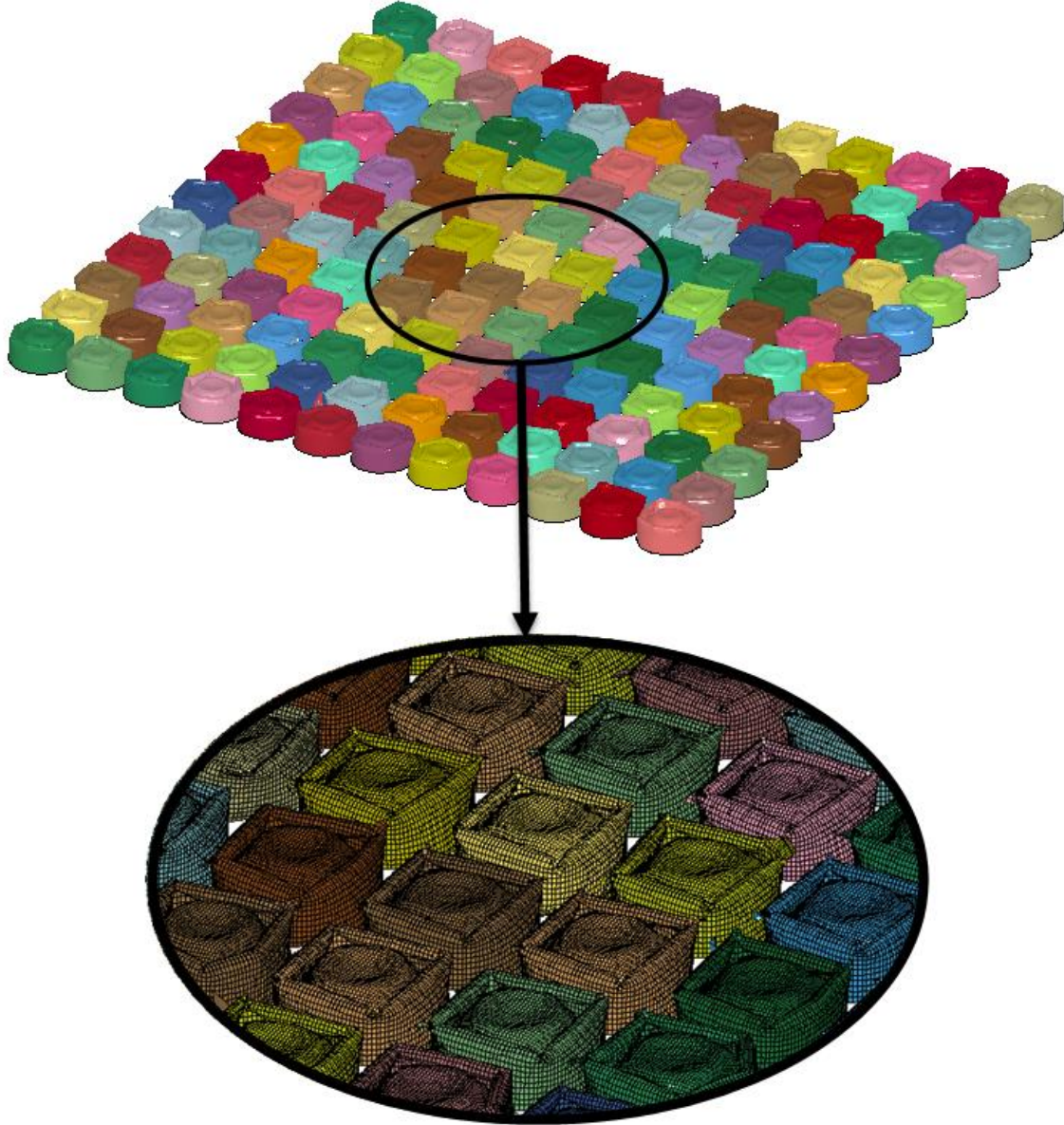
(a)



(b)

Şekil 146. (a) R125T05, R75T05, Tip 3 ve Tip 4 sandviç yapılarının kuvvet tarihçeleri, (b) Tip 3 ve Tip 4 sandviç modeli kuvvet tarihçeleri ve deформasyon şekilleri.

Tip 4 çalışmasında özgül enerji emme kapasiteleri incelendiğinde R125T05 geometrili sandviç yapısından % 23,5 daha düşük, R75T05 geometrili sandviç yapısından ise % 3 daha yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 158).



Şekil 147. Tip 4 modelinin deforme olmuş hali

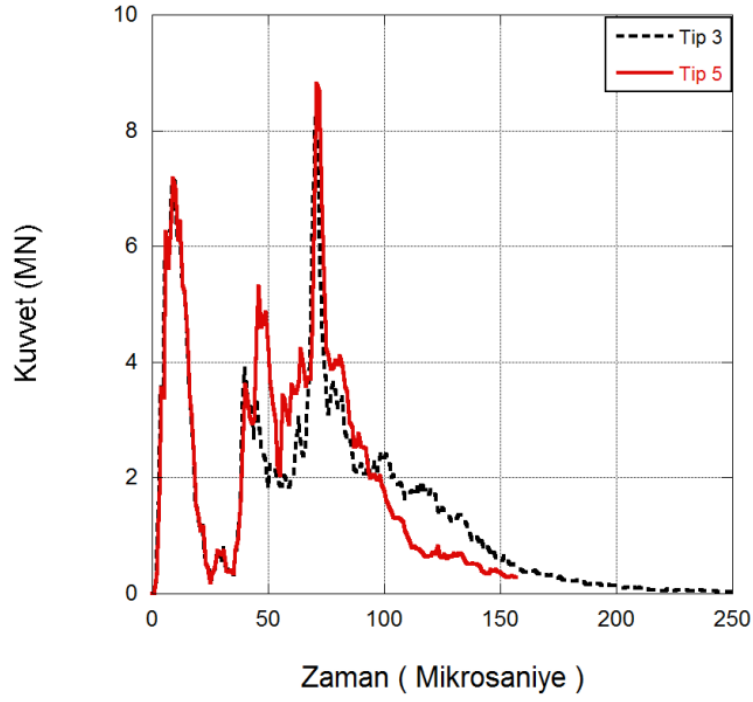
Bir sonraki çalışmada R125T05 ve R75T10 çekirdek malzemeleri birlikte kullanılmıştır. Tip 5 olarak kodlanan bu çalışmada 108 adet R125T05 ve 88 adet R75T1 geometrileri kullanılmıştır. Şekil 148'de Tip 5 modeli görülebilir. Sistemin toplam ağırlığı 0,918 kg'dır. Bu çalışma Tip 3 modeli ile benzerlik göstermektedir. Yine aynı sayıda R125T05 çekirdek malzemesi gelen gerilme dalgasını ilk olarak karşılamış daha sonra

R75T05 geometrisi yerine kuvvet R75T1 geometrisi ile ezilme devam etmiştir. R125T05 geometrisinin küresel bölge deformasyonu tamamlandıktan sonra kırılması ve kırılan parçanın yüksek hızla duvara çarpması sonucu oluşan ikinci tepe noktası yine iletilen kuvvet tarihçesinde görülmektedir. Ancak R75T1 çekirdek malzemesinin ezilmesi sonucu oluşan burkulma kuvvetinin Tip 3 modeline nazaran daha yüksek olduğu görüşmüştür. Şekil 149'da Tip 3 ve Tip 5 konfigürasyonlarının kuvvet tarihçeleri incelendiğinde R75T05 yerine R75T1 çekirdek malzemesi kullanılması halinde değişimin etkileri görülmektedir.



Şekil 148. Tip 5 sandviç modeli simülasyonu.

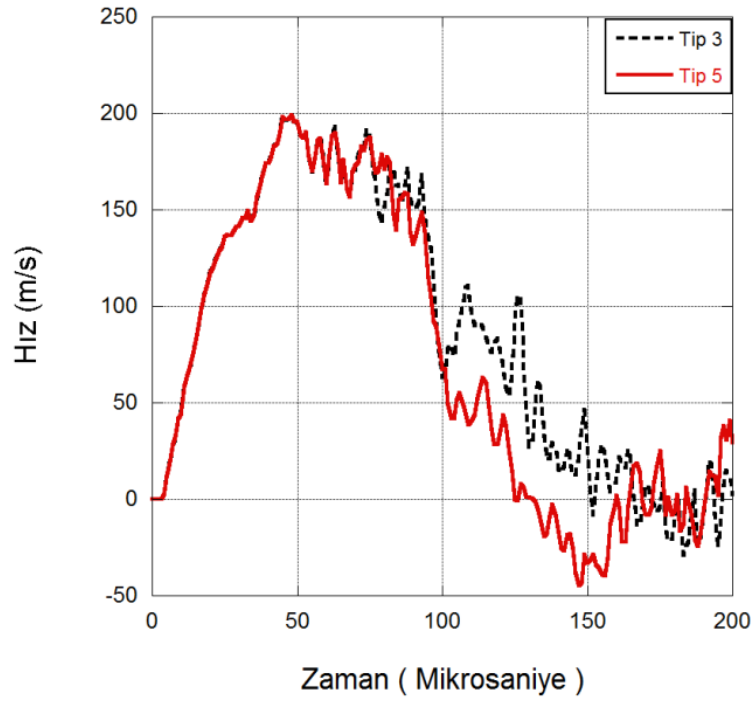




Şekil 149. Tip 3 ve Tip 5 modellerinin kuvvet tarihçeleri.

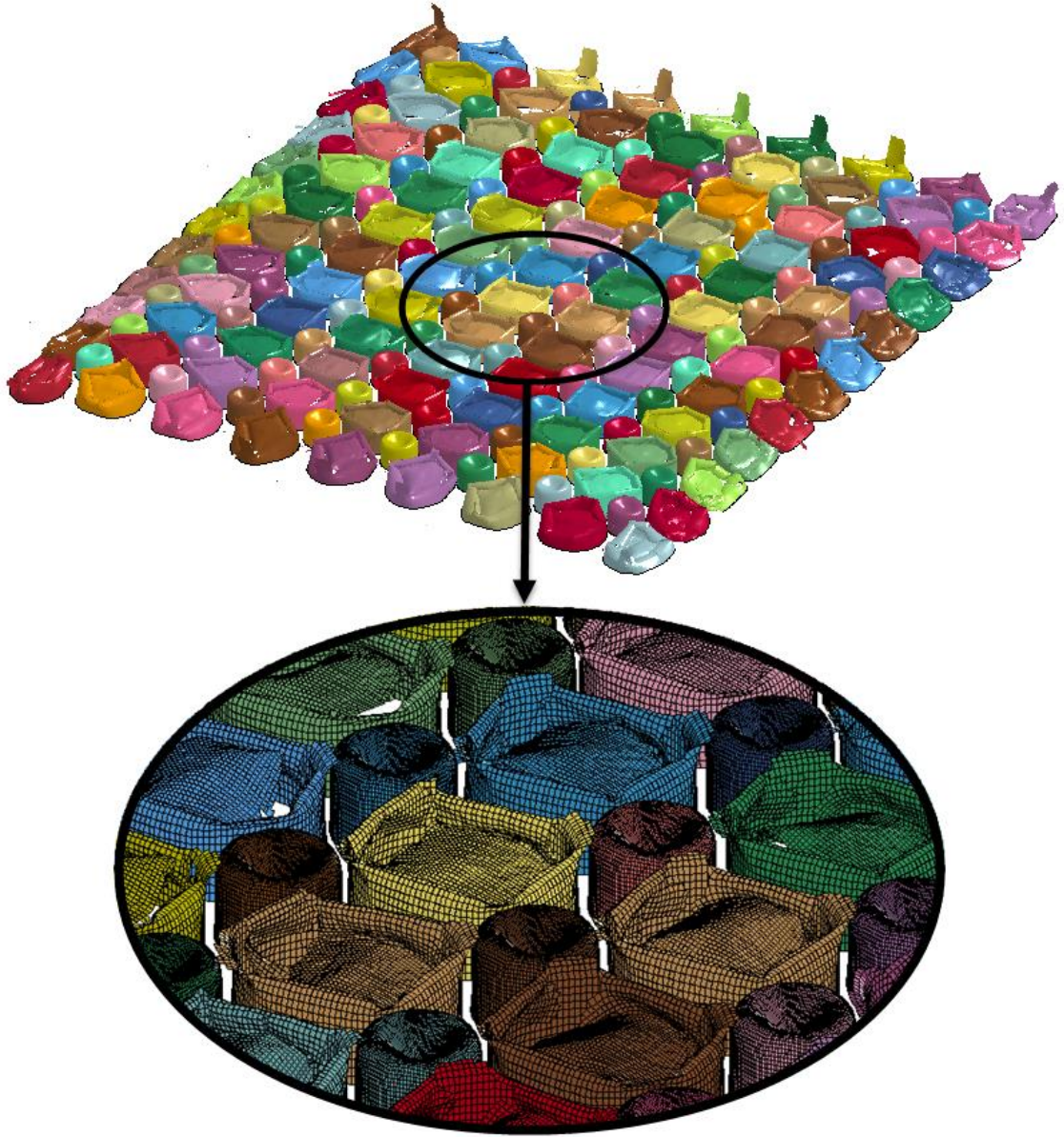
Şekil 150'de verilen Tip 5 modeli ön yüzey plakası hız tarihçelerini incelediğimizde, Tip 3 modelinde de değinilen deformasyon hızının değişebileceği olgusu yine görülmektedir. R75T1 çekirdek malzemesinin burkulma kuvveti R75T05'den daha yüksek olduğundan plakanın hızını oldukça düşürmüştür. Böylelikle R125T05 geometrisinin küresel bölgedeki deformasyon hızı Tip 3 ve Tip 5 çalışmasında aynı iken silindirik bölgelerinde farklılık göstermiştir.





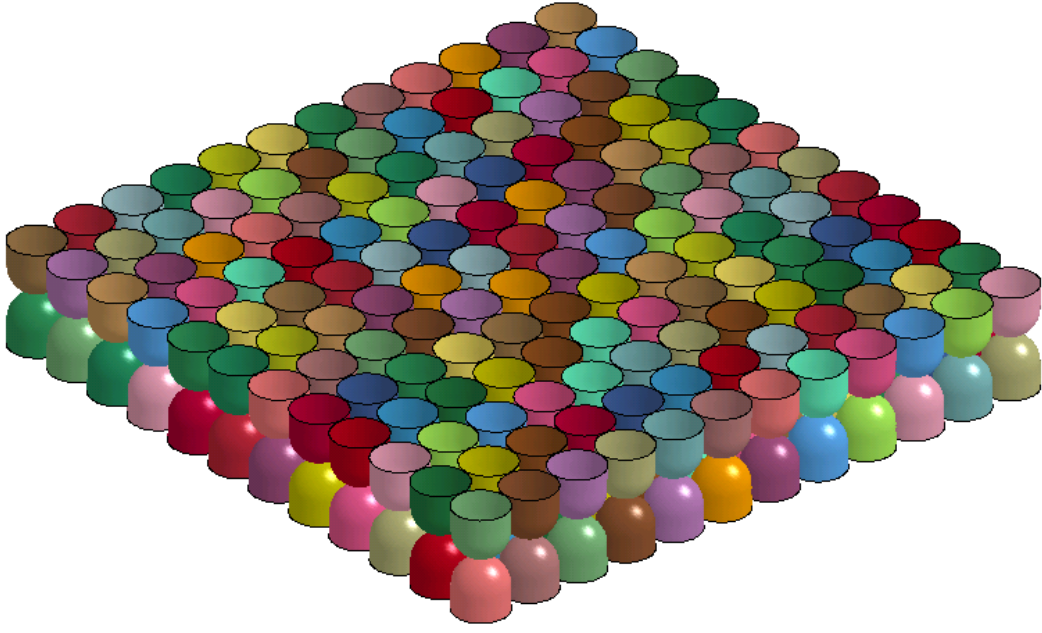
Şekil 150. Tip 3 ve Tip 5 modellerinin ön yüzey plaka hız tarihçeleri

Tip 5 modelinde özgül enerji emme kapasiteleri incelendiğinde tek çeşitli R125T05 çekirdek malzemesi ihtiva eden sandviç yapısına göre % 20 daha düşük olduğu görülmüştür (Şekil 158). Şekil 151’de Tip 5 modelinin deforme olmuş şekli görülebilir.



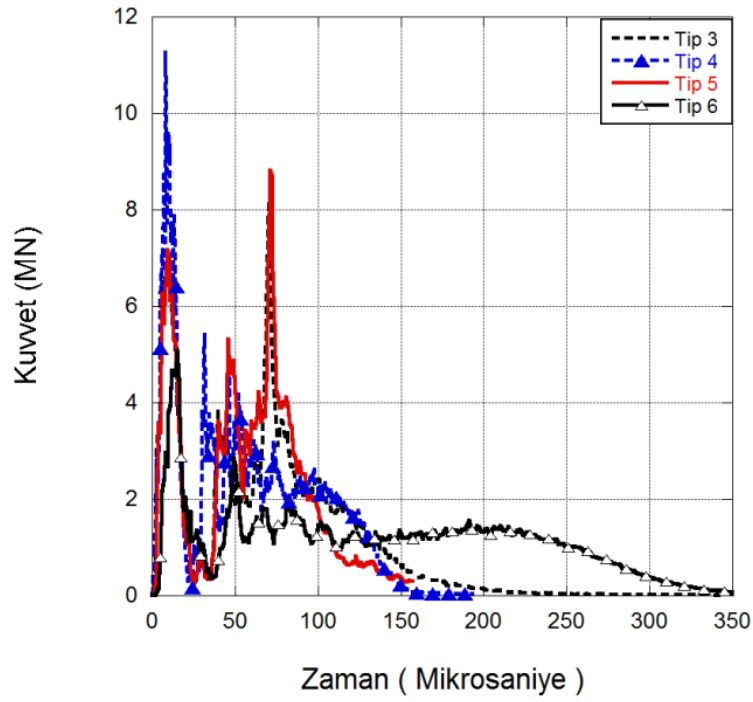
Şekil 151. Tip 5 modeli deforme olmuş hali

Bir diğer konfigürasyon olan Tip 6 modelinde ise özgül enerji emme kapasitesi nispeten yüksek olan R125T05 çekirdek malzemesi farklı bir konfigürasyon ile incelenmiştir. Söz konusu geometride yarı küresel kısımlar karşı karşıya gelecek şekilde sandviç yapının içerisine yerleştirilmiş ve 288 adet çekirdek yapı kullanılmıştır. Sistemin ağırlığı 1,584 kg'dır. Şekil 152'de sandviç yapının modeli görülmektedir.



Şekil 152. Tip 6 sandviç modeli simülasyonu

Tip 6 modelinin ön yüzey plakası hızı diğer konfigürasyonlara göre daha yüksektir (Şekil 157). Ancak R125T05 çekirdek malzemesi içeren diğer çalışmalar ile iletilen kuvvet tarihçeleri karşılaştırıldığında çarpmanın etkisi ile oluşan ilk tepe noktasının daha geç oluştuğu görülmektedir. Bunun yanı sıra iki kat üst üste çekirdek malzemesi kullanılmasından dolayı kuvvet iletimi daha uzun sürede ve plato şeklinde devam etmektedir. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak Şekil 153'de verilmiştir.



Şekil 153. Tip 3,4,5 ve 6 sandviç yapılılarının kuvvet tarihçeleri

Tip 6 çalışmasında küresel bölgeleri temas halinde olacak şekilde konumlandırılan R125T05 çekirdek malzemeleri olağandan farklı bir deformasyon sergilemektedir. Gerilme dalgasını ilk karşılayan çekirdek malzemesi ön yüzey plakasının hareketi ile birlikte kuvveti, karşısında bulunmakta olan çekirdek malzemesine iletmektedir. Gerilme dalgası ilerlerken karşısında konumlandırılmış çekirdek malzemesinde önemli ölçüde deformasyon görülmemektedir ve ilk hareketi kazanan geometrinin küresel bölgesindeki deformasyonu devam etmektedir. Küresel bölgenin deformasyonunun ardından geometrinin silindirik bölgesi ve karşı konumlandırılmış geometrinin deformasyonu başlamaktadır. Deformasyon ilerleyişi Şekil 154'de ve son deformasyon görüntüsü Şekil 155'de verilmiştir.



Şekil 154. Tip 6 sandviçte çekirdek malzemelerinin deformasyon şekilleri.



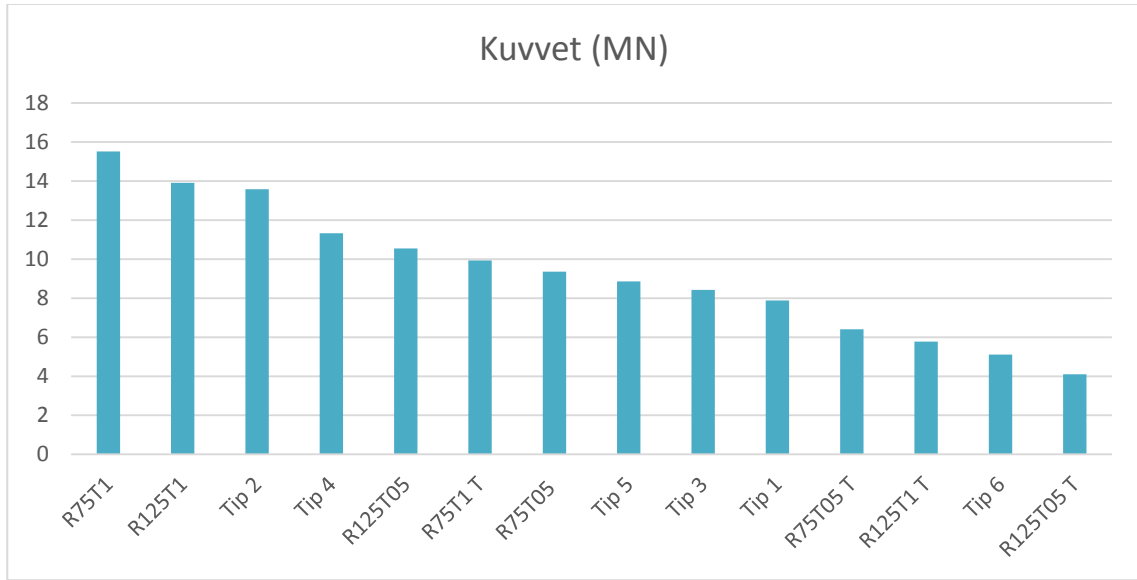


Şekil 155. Tip 6 modelinin son deforme olmuş hali.

Özgül enerji emme kapasitesi incelendiğinde R125T05 çekirdek malzemesi ihtiva eden sandviç yapıya göre Tip 6 modeli %32 daha düşüktür (Şekil 158). Ancak toplam deformasyonlarıyla karşılaştırıldığında %10 daha az ezildiği görülmüştür. Ayrıca Şekil 154'de görülebileceği gibi arka yüzeydeki çekirdek malzemenin küresel bölgesinde bir deformasyon gerçekleşmemiş ve silindirik bölgelerde tam anlamıyla bir ezilme görülmemiştir. Söz konusu sandviç yapının daha güçlü bir tehdit ile karşılaşması ile çekirdek malzemelerin kademeli deformasyonlarının gerçekleşecek olması sandviç yapının bu alanda kullanılabilirliğini göstermektedir.

Tüm bu çalışmaların sonucunda, çekirdek malzemelerin düşen ağırlık ve doğrudan basınç deney dalgası düzeneği test ve modellerinde görüldüğü gibi yarı küresel kısım içeri doğru katlanmakta ve bu esnada geometrik etkilerden dolayı şekil değiştirme hızı artmaktadır. Şekil değiştirme hızının malzemenin kopma şekil değiştirme değerine etkisi nümerik modelleme çalışmalarında dikkate alınmıştır. Çekirdek malzemelerin derin çekme metodu ile üretilmesinden dolayı sahip olduğu artık gerilme ve şekil değiştirme değerleri, şekil değiştirme hızı ile birlikte hasar oluşumunda etkili önemli parametrelerdir. Küresel kısmın deformasyonunun ardından şekil değiştirme hızı artışına bağlı olarak hasar gerçekleşmektedir. Yarı küresel kısım bir tetikleme elemanı olarak çalışarak, iletilen kuvvet değerlerini oldukça düşürmektedir. Hasarın ardından silindirik kısma kuvvetin iletimi ile burkulma gerçekleşmekte ve yüksek kuvvet değerleri taşınabilmektedir. Bu noktada seçilen malzeme, geometri ve üretim metodunun patlamaya karşı koruma yapıları için son derece uyumlu olduğu görülmektedir.

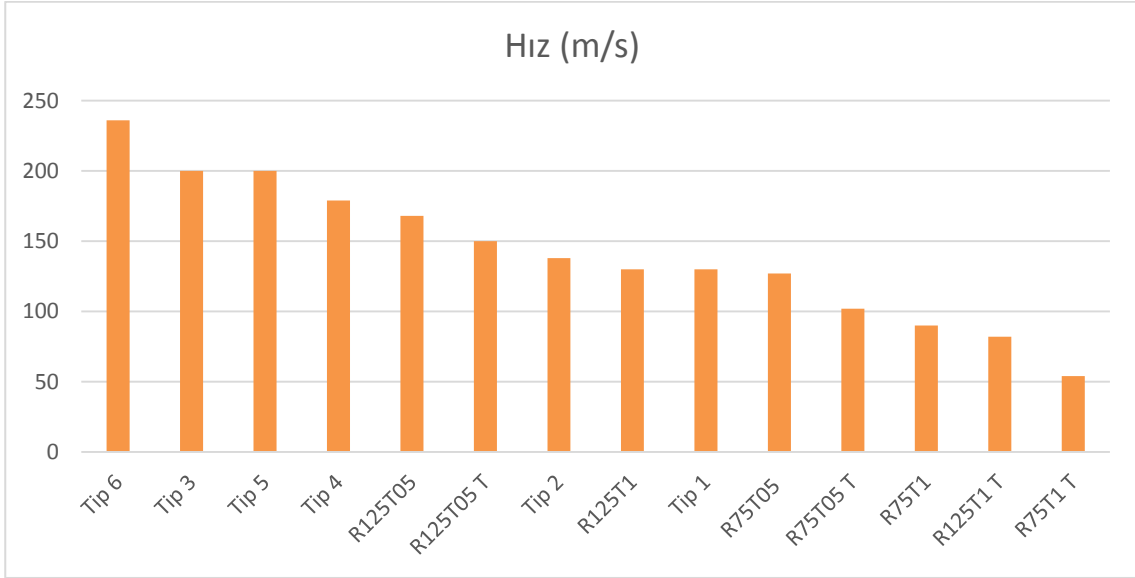
Şekil 156'da korunan yapıya iletilen maksimum kuvvet değerleri bütün konfigürasyonlar için verilmiştir. Tek çeşitli R75T1 çekirdek malzemesi ihtiva eden sandviç yapı en yüksek kuvvet iletimine sahiptir. En düşük kuvvet iletimi ise R125T05 çekirdek malzemesinin kullanıldığı tek çeşitli ters modeldir.



Şekil 156. Sandviç yapıların maksimum kuvvet değerleri

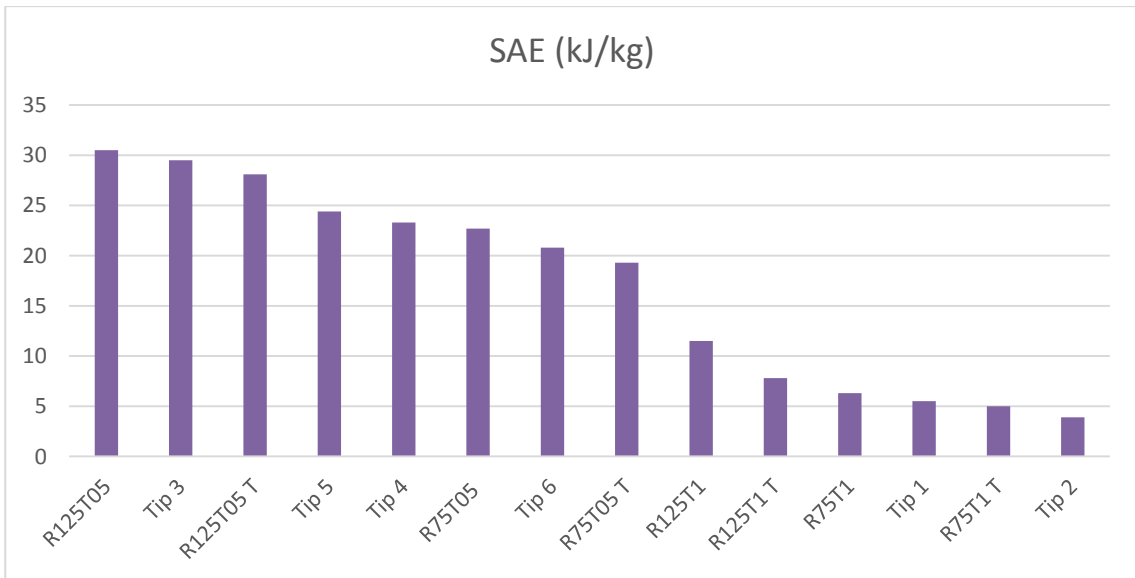
Şekil 157'de gerilim dalgasının ilk ulaştığı ön yüzey plakalarının maksimum hız değerleri görülmektedir. Yüksek hız değerleri dolayısı ile daha yüksek birim şekil değiştirme hızları oluşturacağından iletilen kuvvet ve hasar mekanizmalarında bu husus oldukça önem teşkil etmektedir. Yapılan konfigürasyonlar incelendiğinde maksimum deformasyon hızına

sahip yapı Tip 6 modelidir. En düşük hız değeri ise R75T1 çekirdek malzemesi içeren ters sandviç modelidir.



Şekil 157. Sandviç yapıların ön yüzey plakası maksimum hız değerleri

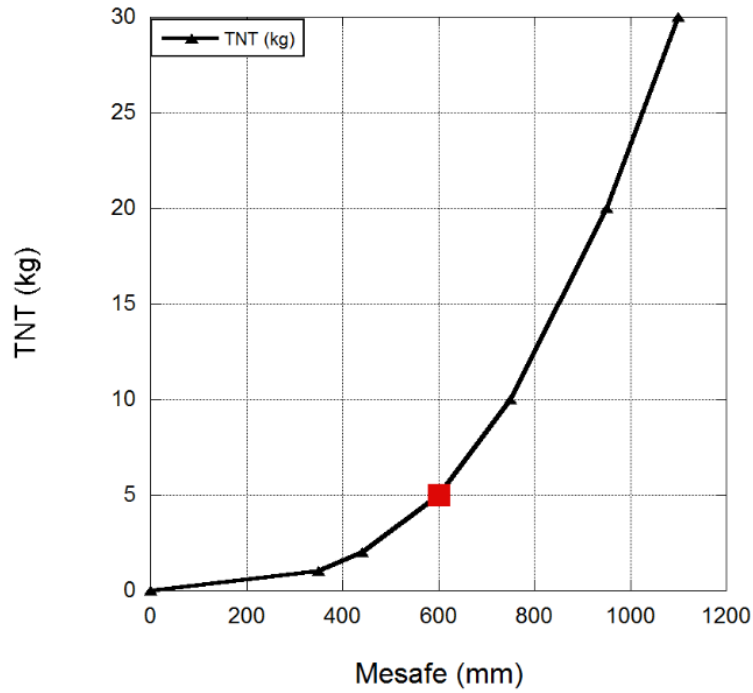
Şekil 158'de sandviç modellerin özgül enerji emme kapasiteleri ortaya konulmuştur. Emilen enerji ve sistemin ağırlığının belirlediği bu değer en yüksek R125T05 tek çeşitli çekirdek malzemesi içeren sandviç yapı olmakla birlikte en düşük Tip 2 modelidir. Şekil 158 incelendiğinde Tip 3 sandviç yapı R125T05'i takip etmektedir.



Şekil 158. Sandviç yapılarının SAE değerleri



Sonuç olarak özgül enerji emme kapasitesinin en yüksek ve iletilen kuvvetin minimum olduğu sandviç yapı düşünüldüğünde, en optimum yapıdan en kötü yapıya doğru sırası ile R125T05 T, Tip 3, Tip 6, R125T05, Tip 5, R75T05 T, R125T1 T, R75T05, Tip 4, Tip1, R125T1, R75T1 T, R75T1, Tip 2 sandviç yapılarıdır. Bu sandviç yapılar 5 kg TNT eş değerinde 60 cm (Şekil 159'da kırmızı nokta ile işaretli durum) mesafeden tehditlere karşı koruma sağlayabilmektedirler. Ölçekleme mesafesi denklemine göre söz konusu sandviç yapılar Şekil 159'da belirtilen eş değer patlamalara karşı koruma sağlayabilecek düzeydedir.



Şekil 159. Aynı etkiyi yaratacak patlama modellerinde eş değer TNT ve mesafe değerleri

## 8. SONUÇLAR

Bu çalışmada yarı küresel ve silindirik geometrilerin birleştirilmesi ile oluşturulan çekirdek malzemelerinin kullanıldığı sandviç yapılar tasarlanmış ve optimum konfigürasyonlar belirlenmiştir.

Çalışmanın başlangıcında derin çekme yöntemi ile dört farklı çekirdek malzemesi üretilmiştir. Üretim sonucunda elde edilen malzemelerin yöntem gereği plastik olarak deforme olmuş malzemeler oldukları açıktır. Çalışmada kullanılan malzemelerin karakterizasyon çalışmalarının tamamlanmasının ardından derin çekme işlemi modellenmiş ve plastik olarak deforme olmuş, ilgili kalınlık ve kalıcı gerilme tarihçesini içeren nümerik numuneler oluşturulmuştur. Malzeme model sabitlerinin doğrulanması amacıyla birinci olarak bu kalınlık tarihçesi ölçülen kalınlık tarihçesi ile karşılaştırılmış ve nümerik modelin uyumu kanıtlanmıştır.

Çalışmanın devamında yine malzeme model sabitlerinin doğrulanması hem de çekirdek yapılarının statik ve orta hızlarda ezilme ve enerji emme karakteristiklerinin incelenmesi amacıyla deneysel ve nümerik çalışmalar entegre bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlar ile de nümerik sonuçların deneysel sonuçlarla uyumu ve başarısı kanıtlanmıştır. İncelemenin devamında yarı küresel çekirdek malzemeleri üzerindeki deformasyon hızı hassasiyeti ve atalet etkileri gösterilmiştir.

Yarı küresel çekirdek malzemeleri ile ilgili incelemelerin tamamlanmasının ardından, hem sandviç yapının enerji emme karakteristiklerinin incelenebilmesi hem de sandviç yapı içinde çekirdek yapılarının birbirleri ile etkileşimlerinin ortaya konması açısından sınırlandırılmış ve serbest sandviç yapılar deneysel ve nümerik olarak kuasi-statik, orta ve dinamik hızlarda incelenmiştir. İlk olarak kompozit yüzey malzemeli yapılar incelenmiş ve hızdaki artış ile çekirdek malzemelerinin silindirik kısımlarının yüzey malzemelerine penetre olduğu dolayısıyla deformasyonlarının etkilendiği görülmüş ve çalışmaya metalik yüzey malzemeleri ile devam edilmiştir. Yine nümerik sonuçların deney sonuçları ile uyumu kanıtlanmış ve sandviç yapıların maruz kaldığı deformasyon hızı hassasiyeti ve atalet etkileri ortaya konmuştur.

İncelemeler kompozit ve metalik malzemeler üzerinde gerçekleştirilen DBDD testleri ile bu deney düzeneğinin nümerik yöntemin entegrasyonu ile kalibrasyon adımlarıyla devam edilmiş ve çarpma hızı ile patlama etkisi arasında bir ilişki ortaya konulmuştur.

Çalışmanın son kısmında ConWep hava patlama fonksiyonunun kullanıldığı nümerik simülasyonlar oluşturulmuş ve iletilen kuvvet, SAE ve yüzey malzemesi hız tarihçesi cinsinden incelenmiş ve optimum yapılar sunulmuştur. Aşağıda tüm bu yapılan incelemeler ile ilgili yapılan çıkarımlar liste halinde verilmiştir:

- Çekirdek malzemeleri üzerinde gerçekleştirilen kalınlık ölçümlerine göre, kalınlığın yarı küresel bölgeden silindirik bölgeye gidildikçe arttığı gözlemlenmiştir. Bu trend nümerik simülasyonlarda başarı ile yakalanmış ve malzeme model sabitleri doğrulanmıştır.
- Yarı küresel çekirdek malzemeleri üzerinde gerçekleştirilen deneyler modellenerek malzeme model sabitlerinin doğrulanması farklı hızlarda gerçekleştirilebilmiştir.
- R125T05 numunesi statik deformasyon hızında aksenal simetrik deformasyon modunda ezilirken, deformasyon hızının artışı ile deformasyon asimetric modda gerçekleşmiştir. Öte yandan daha kalın olan R125T1 numunesi ise deformasyon hızının artışı ile kırılmıştır.
- Aynı yarıçaplı yarı küresel çekirdek numunelerde, kalınlığın artışı ile  $P_m$  and  $SAE$  değerleri artmıştır. Öte yandan, aynı kalınlıktaki numunelerde, yarıçapın artışı ile  $SAE$  değeri azalmış ve  $P_m$  değeri artmıştır.
- Yarı küresel çekirdek yapıların kalınlıklarının artışı ile birlikte, kuasi-statik rejimde  $CFE$  değeri azalırken, bu değer dinamik rejimde artış göstermektedir. Aynı kalınlıktaki yapılar statik hızda  $CFE$  değerleri yarı çapın artışıyla artarken bu değerler dinamik hızda azalmaktadır.
- Yarı küresel kısmın emdiği enerji deformasyon hızının artışı ile birlikte artmaktadır ve bunun atalet etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Ortalama deformasyon hızı ve atalet etkilerinin silindirik kısımda yarı küresel kısımdan daha fazla oldukları görülmüştür. İki bileşen için de atalet etkisi deformasyon hızı etkisinden oldukça fazladır.
- Yüksek ezilme hızlarında atalet etkisinin deformasyon hızı etkisinden oldukça fazla olduğu görülmektedir. Yarı küresel kısımda deformasyon hızı etkisinin neredeyse ezilme hızından bağımsız olduğu tesbit edilmiştir. İki bileşen için de atalet etkilerinin deformasyon hızı etkilerinden daha fazla olmaya başladığı bir kritik hız olduğu tesbit edilmiştir.
- Yüksek ezilme hızları kat yarıçaplarını değiştirmiş ve bu atalet etkilerine daha hassas bir geometri oluşmasına sebep olmuştur. Bu durum ayrıca deformasyon hızı hassasiyetli ve deformasyon hızı hassasiyetsiz modellerin sonuçlarında neredeyse aynı deforme şekillerin görülmesi ile de kanıtlanmıştır.
- Sandviç yapıların ezilme davranışları incelenirken, kuasi-statik ve düşen kütle test sonuçlarında grafiklerde gözlenen tepe noktaları çekirdek malzemelerinin bileşenlerinin burkulma kuvvetlerine karşılık gelmekte bu tepelerin devamında bu kuvvetin aşılması ve büküm noktalarının yanal hareketi dolayısıyla kuvvet düşüşleri gözlemlenmektedir.

- Sandviç numunelerin ortasındaki yarı küresel çekirdek yapıları yanlardaki çekirdek yapılar tarafından sıkıştırılmış ve yanal hareketleri engellenmiştir.
- Sandviçler üzerinde gerçekleştirilen sınırlandırılmış testlerde serbest testlere oranla daha yüksek burkulma kuvvetleri daha düşük deformasyon seviyelerinde görülmüştür.
- Sandviçler üzerinde gerçekleştirilen düşen kütle sonuçlarına neredeyse kuasi-statik sonuçlar ile aynıdır.
- Hem serbest hem de sınırlandırılmış modifiye-DBDD test sonuçları benzer karakterdedir. Sadece sınırlandırılmış testte çarpan çubuğun ilk hızı numuneyi densifikasyon noktasına kadar ezememiş ve bir sekme aşaması gözlemlenmiştir.
- Sandviçler üzerinde gerçekleştirilen modifiye-DBDD testlerinde elde edilen ortalama kuvvet değerleri artan hızla birlikte atalet etkilerinin artışından dolayı statik değerlerden yüksektir.
- Hem serbest hem de sınırlı test sonuçlarında atalet etkisinin deformasyon hızı etkisinden daha fazla olduğu görülmüştür. Deformasyon hızı etkisi neredeyse ezme hızından bağımsızdır.
- Sandviç yapılar çok katmanlı olarak düzenlendiğinde, en düşük ortalama ezilme kuvveti tek katmanlı sandviçte ve en yüksek kuvveti sıralı iki katmanlı yapıda hesap edilmiştir.
- Bütün çok katmanlı konfigürasyonlar tek katmanlı konfigürasyondan daha yüksek SAE seviyesine sahiptir.
- Tüm sıralı konfigürasyonların SAE değeri ters konfigürasyonlardan yüksektir.
- İki katmanlı durumda üst katman ile alt katmanın birbirlerine göre eksenel olarak açısal değişiklikleri sonucunda açının artışı ile SAE değerinin düştüğü gözlemlenmiştir.
- Patlama etkileri altında sandviç yapıların korunan yapıya iletilen kuvvet tarihçeleri incelendiğinde maksimum tepe noktası R125T05 ve R75T05 çekirdek malzemelerinin kullanıldığı ters sandviç yapılarında daha düşük olduğu görülmektedir. Kuvvet iletiminde, R125T05 ve R75T05 çekirdek malzemeleri, küresel ve silindirik bölgelerinde kademeli ezilme gerçekleştirerek et kalınlığı 1 mm olan R125T1 ve R75T1 çekirdek malzemelerine göre daha düşük seviyeler göstermişlerdir.
- R125T05 çekirdek malzemesinde deformasyon hızından dolayı kırılmanın gerçekleşmesi ile birlikte R125T05, Tip 3, Tip 5 sandviç yapılarının kuvvet tarihçelerinde momentum iletiminden dolayı ikinci bir tepe noktası meydana gelmektedir. Tip 4 sandviç yapısında aynı çekirdek malzemeleri kullanılmasına rağmen, geometrilerin birbirleri ile etkileşimlerinden dolayı bu tepe noktasına

rastlanmamaktadır. Tip 4 modelinde R75T05 geometrisinin R125T05 çekirdek malzemesinin içerisine yerleştirilmesi kırılmanın olumsuz etkisini bu şekilde sönmölemektedir.

- Patlama simölasyonlarında sandviç yapıların ön yüzey plakası hız tarihçeleri deformasyon hızını belirlemektedir. Birim şekil değıştirme hızı hassasiyeti ve atalet etkisinin tartışıldığı yarı küresel çekirdek malzemelerinde deformasyon hızı oldukça önem arz etmektedir. Bu bağlamda Tip 6 sandviç yapısının ön yüzey plakası diğer çalışmalara nazaran sahip olduğu maksimum hız değeri ile yarı küresel çekirdek malzemelerinin yüksek deformasyon hızı ile ezilmesine sebep olmuştur. Ancak Tip 6 modeli diziliminden dolayı farklı bir deformasyon ile ezilmiş kuvvet iletimine bunu yansıtmamıştır.
- Bunun yanı sıra, Tip 3 ve Tip 5 sandviç modellerinin ön yüzey plakası hız tarihçeleri incelendiğinde, küresel kısmın ezilmesinin ardından silindirik kısımda R75T05 ve R75T1 çekirdek malzemelerinin de ezilmeye başlaması ile deformasyon hızının R125T05 sandviç yapısına nazaran daha düşük seviyelerde olduğu görölmektedir. Bu da deformasyon hızının farklı konfigürasyonlarda kademeli olarak değıştirilebileceğini göstermektedir.
- Sandviç yapıların özgül enerji emme kapasiteleri incelendiğinde R125T05 çekirdek malzemesi ihtiva eden sandviç yapısının diğerlerine göre daha yüksek olduğu görölmektedir. Söz konusu tehdit karşısında çekirdek malzemenin ezilmesinin tamamlanması ve ağırlığının düşük olması SAE değeri yüksek olmasına sebep olmuştur. R75T05 çekirdek malzemesi ihtiva eden sandviç yapının da ağırlığı baz alındığında SAE değeri düşük çıkması beklenir. Ancak R75T05 yarı küresel çekirdek malzemesinin ilk burkulma kuvveti daha düşük olduğundan birim kütle başına emdiği enerji daha düşük seviyelerde kalmaktadır.

## REFERANSLAR

- Abramowicz, W., Jones N. 1984. "Dynamic axial crushing of circular tubes", *International Journal of Impact Engineering*, 2 (3), 263-281.
- Alexander, J. M. 1960. "An Approximate Analysis of the Collapse of Thin Cylindrical Shells Under Axial Loading", *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 13 (1), 10-15.
- Amini, M. R., Isaacs J., Nemat-Nasser S. 2010. "Investigation of effect of polyurea on response of steel plates to impulsive loads in direct pressure-pulse experiments", *Mechanics of Materials*, 42 (6), 628-639.
- Amini, M. R., Simon J., Nemat-Nasser S. 2010. "Numerical modeling of effect of polyurea on response of steel plates to impulsive loads in direct pressure-pulse experiments", *Mechanics of Materials*, 42 (6), 615-627.
- Banhart, J. 2000. "Manufacturing routes for metallic foams", *Jom-Journal of the Minerals Metals & Materials Society*, 52 (12), 22-27.
- Bao, R. H., Yu T. X. 2013. "Impact Crushing and Rebound of Thin-walled Hollow Spheres", *Advances in Engineering Plasticity Xi*, 535-536, 40-43.
- Calladine, C. R., English R. W. 1984. "Strain-rate and inertia effects in the collapse of two types of energy-absorbing structure", *International Journal of Mechanical Sciences*, 26 (11-12), 689-701.
- Chen, A., Kim H., Asaro R. J., Bezares J. 2011. "Non-explosive simulated blast loading of balsa core sandwich composite beams", *Composite Structures*, 93 (11), 2768-2784.
- Chi, Y., Langdon G. S., Nurick G. N. 2010. "The influence of core height and face plate thickness on the response of honeycomb sandwich panels subjected to blast loading", *Materials & Design*, 31 (4), 1887-1899.
- Collings, T. A. 1974. "Transverse compressive behaviour of unidirectional carbon fibre reinforced plastics", *Composites*, 5 (3), 108-116.
- Deoliveira, J. G., Wierzbicki T. 1982. "Crushing Analysis of Rotationally Symmetric Plastic Shells", *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 17 (4), 229-236.
- Dharmasena, K., Queheillalt D., Wadley H., Chen Y., Dudt P., Knight D., Wei Z., Evans A. 2009. "Dynamic response of a multilayer prismatic structure to impulsive loads incident from water", *International Journal of Impact Engineering*, 36 (4), 632-643.
- Dharmasena, K. P., Queheillalt D. T., Wadley H. N. G., Dudt P., Chen Y., Knight D., Evans A. G., Deshpande V. S. 2010. "Dynamic compression of metallic sandwich structures during planar impulsive loading in water", *European Journal of Mechanics a-Solids*, 29 (1), 56-67.

- Dharmasena, K. P., Wadley H. N. G., Xue Z. Y., Hutchinson J. W. 2008. "Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading", *International Journal of Impact Engineering*, 35 (9), 1063-1074.
- Dong, X. L., Gao Z. Y., Yu T. 2008. "Dynamic crushing of thin-walled spheres: An experimental study", *International Journal of Impact Engineering*, 35 (8), 717-726.
- Ghamarian, A., Abadi M. T. 2011. "Axial crushing analysis of end-capped circular tubes", *Thin-Walled Structures*, 49 (6), 743-752.
- Ghamarian, A., Zarei H. 2012. "Crashworthiness investigation of conical and cylindrical end-capped tubes under quasi-static crash loading", *International Journal of Crashworthiness*, 17 (1), 19-28.
- Ghamarian, A., Zarei H. R., Abadi M. T. 2011. "Experimental and numerical crashworthiness investigation of empty and foam-filled end-capped conical tubes", *Thin-Walled Structures*, 49 (10), 1312-1319.
- Ghamarian, A., Zarei H. R., Farsi M. A., Ariaeifar N. 2013. "Experimental and Numerical Crashworthiness Investigation of the Empty and Foam-Filled Conical Tube with Shallow Spherical Caps", *Strain*, 49 (3), 199-211.
- Guden, M., Kavi H. 2006. "Quasi-static axial compression behavior of constraint hexagonal and square-packed empty and aluminum foam-filled aluminum multi-tubes", *Thin-Walled Structures*, 44 (7), 739-750.
- Gupta, N. K., Sheriff N. M., Velmurugan R. 2007. "Experimental and numerical investigations into collapse behaviour of thin spherical shells under drop hammer impact", *International Journal of Solids and Structures*, 44 (10), 3136-3155.
- Gupta, N. K., Sheriff N. M., Velmurugan R. 2008. "Experimental and theoretical studies on buckling of thin spherical shells under axial loads", *International Journal of Mechanical Sciences*, 50 (3), 422-432.
- Gupta, N. K., 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.
- Gupta, P. K. (2011). Axial Compression Of Tubular Metallic Shells having combined tube-frusta geometry. *International Conference on Structural Engineering, Construction and Management (ICSECM-2011)*, Sri Lanka.
- Gupta, P. K., Gupta N. K. 2006. "Computational and experimental studies of crushing of metallic hemispherical shells", *Archive of Applied Mechanics*, 76 (9-10), 511-524.
- Guruprasad, S., Mukherjee A. 2000. "Layered sacrificial claddings under blast loading Part II - experimental studies", *International Journal of Impact Engineering*, 24 (9), 975-984.



- Hanssen, A. G., Enstock L., Langseth M. 2002. "Close-range blast loading of aluminium foam panels", *International Journal of Impact Engineering*, 27 (6), 593-618.
- Hashin, Z. 1980. "Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites", *Journal of Applied Mechanics*, 47 (2), 329-334.
- Jackson, M., Shukla A. 2011. "Performance of sandwich composites subjected to sequential impact and air blast loading", *Composites Part B-Engineering*, 42 (2), 155-166.
- Karagiozova, D., Nurick G. N., Langdon G. S. 2009. "Behaviour of sandwich panels subject to intense air blasts - Part 2: Numerical simulation", *Composite Structures*, 91 (4), 442-450.
- Kılıçaslan, C., Güden M., Odacı İ. K., Taşdemirci A. 2014. "Experimental and numerical studies on the quasi-static and dynamic crushing responses of multi-layer trapezoidal aluminum corrugated sandwiches", *Thin-Walled Structures*, 78 (0), 70-78.
- Kılıçaslan, C., Odacı İ. K., Taşdemirci A., Güden M. 2014. "Experimental Testing and Full and Homogenized Numerical Models of the Low Velocity and Dynamic Deformation of the Trapezoidal Aluminium Corrugated Core Sandwich", *Strain*, 50 (3), 236-249.
- Lee, D. K., O'Toole B. J. (2004). Energy absorbing sandwich structures under blast loading. 8th International LS-DYNA Users Conference, Detroit-USA.
- Lee, W.-S., Lin C.-F. 2001. "Impact properties and microstructure evolution of 304L stainless steel", *Materials Science and Engineering: A*, 308 (1–2), 124-135.
- Liu, Y. D., Yu J. L., Zheng Z. J., Li J. R. 2009. "A numerical study on the rate sensitivity of cellular metals", *International Journal of Solids and Structures*, 46 (22–23), 3988-3998.
- LSTC (2007). *LS-DYNA: Keyword User's Manual*, Livermore Software Technology Corporation, LSTC.
- Matzenmiller, A., Lubliner J., Taylor R. L. 1995. "A constitutive model for anisotropic damage in fiber-composites", *Mechanics of Materials*, 20 (2), 125-152.
- McKown, S., Shen Y., Brookes W. K., Sutcliffe C. J., Cantwell W. J., Langdon G. S., Nurick G. N., Theobald M. D. 2008. "The quasi-static and blast loading response of lattice structures", *International Journal of Impact Engineering*, 35 (8), 795-810.
- Mori, L. F., Queheillalt D. T., Wadley H. N. G., Espinosa H. D. 2009. "Deformation and Failure Modes of I-Core Sandwich Structures Subjected to Underwater Impulsive Loads", *Experimental Mechanics*, 49 (2), 257-275.
- Mullin, M. J., O'Toole B. J. (2004). Simulation of energy absorbing materials in blast loaded structures. 8th International LS-DYNA Users Conference, Detroit-USA.

- Nurick, G. N., Langdon G. S., Chi Y., Jacob N. 2009. "Behaviour of sandwich panels subjected to intense air blast - Part 1: Experiments", *Composite Structures*, 91 (4), 433-441.
- Palanivelu, S., Van Paepegem W., Degrieck I., Reymen B., Ndambi J. M., Vantomme J., Kakogiannis D., Wastiels J., Van Hemelrijck D. 2011. "Close-range blast loading on empty recyclable metal beverage cans for use in sacrificial cladding structure", *Engineering Structures*, 33 (6), 1966-1987.
- Radford, D. D., Fleck N. A., Deshpande V. S. 2006. "The response of clamped sandwich beams subjected to shock loading", *International Journal of Impact Engineering*, 32 (6), 968-987.
- Radford, D. D., McShane G. J., Deshpande V. S., Fleck N. A. 2006. "The response of clamped sandwich plates with metallic foam cores to simulated blast loading", *International Journal of Solids and Structures*, 43 (7-8), 2243-2259.
- Rathbun, H. J., Radford D. D., Xue Z., He M. Y., Yang J., Deshpande V., Fleck N. A., Hutchinson J. W., Zok F. W., Evans A. G. 2006. "Performance of metallic honeycomb-core sandwich beams under shock loading", *International Journal of Solids and Structures*, 43 (6), 1746-1763.
- Ruan, H. H., Gao Z. Y., Yu T. X. 2006. "Crushing of thin-walled spheres and sphere arrays", *International Journal of Mechanical Sciences*, 48 (2), 117-133.
- Rubino, V., Deshpande V. S., 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., 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.
- Santosa, S. P., Wierzbicki T., Hanssen A. G., Langseth M. 2000. "Experimental and numerical studies of foam-filled sections", *International Journal of Impact Engineering*, 24 (5), 509-534.
- Shahi, V. J., Marzbanrad J. 2012. "Analytical and experimental studies on quasi-static axial crush behavior of thin-walled tailor-made aluminum tubes", *Thin-Walled Structures*, 60, 24-37.
- Shojaeefard, M. H., Najibi A., Anbarloei M., Yeganeh M. 2014. "Experimental and numerical crashworthiness investigation of combined circular and square sections", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28 (3), 999-1006.

- Singace, A. A., El-Sobky H. 2001. "Uniaxial crushing of constrained tubes", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science, 215 (3), 353-364.
- Song, B., Chen W., Ge Y., Weerasooriya T. 2007. "Dynamic and quasi-static compressive response of porcine muscle", Journal of Biomechanics, 40 (13), 2999-3005.
- Song, B., Chen W., Liu Z., Erhan S. 2006. "Compressive properties of epoxidized soybean oil/clay nanocomposites", International Journal of Plasticity, 22 (8), 1549-1568.
- Song, B., Chen W. W., Lu W. Y. 2007. "Mechanical characterization at intermediate strain rates for rate effects on an epoxy syntactic foam", International Journal of Mechanical Sciences, 49 (12), 1336-1343.
- Sriram, R., Vaidya U. K. (2004). Blast impact on aluminum foam composite sandwich panels. 8th International LS-DYNA Users Conference, Detroit-USA.
- Sriram, R., Vaidya U. K., Kim J. E. 2006. "Blast impact response of aluminum foam sandwich composites", Journal of Materials Science, 41 (13), 4023-4039.
- Tagarielli, V. L., Deshpande V. S., Fleck N. A. 2007. "The dynamic response of composite sandwich beams to transverse impact", International Journal of Solids and Structures, 44 (7-8), 2442-2457.
- Tam, L. L., Calladine C. R. 1991. "Inertia and strain-rate effects in a simple plate-structure under impact loading", International Journal of Impact Engineering, 11 (3), 349-377.
- Tasdemirci, A. 2008. "The effect of tube end constraining on the axial crushing behavior of an aluminum tube", Materials & Design, 29 (10), 1992-2001.
- Tasdemirci, A., Ergonenc C., Guden M. 2010. "Split Hopkinson pressure bar multiple reloading and modeling of a 316 L stainless steel metallic hollow sphere structure", International Journal of Impact Engineering, 37 (3), 250-259.
- Tasdemirci, A., Tunusoglu G., Guden M. 2012. "The effect of the interlayer on the ballistic performance of ceramic/composite armors: Experimental and numerical study", International Journal of Impact Engineering, 44, 1-9.
- Tasdemirci, A., Turan A. K., Guden M. 2012. "The effect of strain rate on the mechanical behavior of Teflon foam", Polymer Testing, 31 (6), 723-727.
- Taşdemirci, A., Güden M., Ergönenç Ç. (2010). Alüminyum metalik köpük sandviç yapıların mayın patlaması yüklerine karşı davranış simülasyonu. 5. Savunma Teknolojileri Kongresi, Ankara.
- Taşdemirci, A., Güden M., Hall I. W. (2007). High strain rate reloading compression testing of a closed-cell aluminum foam. 13th International Conference on Experimental Mechanics, Alexandroupolis-Greece.

- Tekalur, S. A., Shukla A., Shivakumar K. 2008. "Blast resistance of polyurea based layered composite materials", *Composite Structures*, 84 (3), 271-281.
- Turkmen, H. S., Mecitoglu Z. 1999. "Dynamic response of a stiffened laminated composite plate subjected to blast load", *Journal of Sound and Vibration*, 221 (3), 371-389.
- Updike, D. P. 1972. "On the Large Deformation of a Rigid-Plastic Spherical Shell Compressed by a Rigid Plate", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 94 (3), 949-955.
- Wadley, H., Dharmasena K., Chen Y. C., Dudt P., Knight D., Charette R., Kiddy K. 2008. "Compressive response of multilayered pyramidal lattices during underwater shock loading", *International Journal of Impact Engineering*, 35 (9), 1102-1114.
- Wang, E., Shukla A. 2012. "Blast Performance of Sandwich Composites with In-Plane Compressive Loading", *Experimental Mechanics*, 52 (1), 49-58.
- Wang, E. H., Gardner N., Shukla A. 2009. "The blast resistance of sandwich composites with stepwise graded cores", *International Journal of Solids and Structures*, 46 (18-19), 3492-3502.
- Xue, Z. Y., Hutchinson J. W. 2004. "A comparative study of impulse-resistant metal sandwich plates", *International Journal of Impact Engineering*, 30 (10), 1283-1305.
- Xue, Z. Y., Hutchinson J. W. 2004. "Constitutive model for quasi-static deformation of metallic sandwich cores", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 61 (13), 2205-2238.
- Yang, Y., Fallah A. S., Saunders M., Louca L. A. 2011. "On the dynamic response of sandwich panels with different core set-ups subject to global and local blast loads", *Engineering Structures*, 33 (10), 2781-2793.
- Zhang, T. G., Yu T. X. 1989. "A note on a 'velocity sensitive' energy-absorbing structure", *International Journal of Impact Engineering*, 8 (1), 43-51.
- Zhu, F., Lu G. 2007. "A Review of Blast and Impact of Metallic and Sandwich Structures", *Electronic Journal of Structural Engineering*, (Special Issue : Loading on Structures), 92-101.
- Zhu, F., Wang Z. H., Lu G. X., Zhao L. M. 2009. "Analytical investigation and optimal design of sandwich panels subjected to shock loading", *Materials & Design*, 30 (1), 91-100.
- Zhu, F., Zhao L. M., Lu G. X., Gad E. 2009. "A numerical simulation of the blast impact of square metallic sandwich panels", *International Journal of Impact Engineering*, 36 (5), 687-699.
- Zhu, F., Zhao L. M., Lu G. X., Wang Z. H. 2008. "Deformation and failure of blast-loaded metallic sandwich panels - Experimental investigations", *International Journal of Impact Engineering*, 35 (8), 937-951.

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

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. ALPER TAŞDEMİRCİ
Proje No:	112M141
Proje Başlığı:	Patlamaya Dayanıklı Yarı Küresel Tekrarlı Çekirdek Malzemesi İhtiva Eden Sandviç Yapıların Geliştirilmesi Ve Optimizasyonu.
Proje Türü:	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:	01/11/2012 - 01/11/2014
Onaylanan Bütçe:	268745.0
Harcanan Bütçe:	222101.44
Öz:	<p>Bu proje yarı küresel tekrarlı çekirdek malzemesi içeren sandviç yapıların geliştirilmesi ve bu yapıların patlama etkileri karşısındaki davranışlarının incelenmesini ve iyileştirilmesini amaçlamaktadır. Bu kapsamda deneysel ve nümerik teknikler bir arada kullanılmış ve hem deneysel tekniğin güvenilirliğinden hem de nümerik tekniğin sağladığı ek bilgilerden aynı anda faydalanılmıştır. Literatürde bir benzerine rastlanmamış olan yeni bir çekirdek malzemesinin geliştirilmesi ile üretilen sandviç yapı hem ülkemiz savunma sanayii envanterine önemli bir katkıda bulunmuş ve hem de ulusal ve uluslararası literatüre sunulmuştur.</p> <p>Bu proje kapsamında sandviç yapıyı oluşturacak malzemelerin statik ve yüksek şekil değiştirme hızlarındaki mekanik özellikleri tespit edilmiş ve bu tespit edilen özellikler daha sonraki adımlarda nümerik modellerde kullanılmıştır. Tasarlanan çekirdek malzemelerinin davranışları üzerine üretim yönteminin (derin çekme) etkisini de hesaba katmak amacıyla, kullanılan üretim yöntemi de modellenerek nümerik numuneler oluşturulmuş ve bunlar ileriki modelleme aşamalarında kullanılmıştır. Deney ve nümerik model sonuçları kullanılarak, sandviç yapıların ve çekirdek malzemelerinin düşük ve yüksek şekil değiştirme hızlarındaki ezilme davranışları ile bu yapıların atalet ve deformasyon hızı etkileri belirlenebilmiştir. Gerçekleştirilen patlama simülasyonları ile farklı konfigürasyon ve katman sayılarındaki sandviç yapıların patlama etkileri altındaki davranışları incelenmiş ve olumlu sonuç veren konfigürasyonlar tayin edilmiştir.</p> <p>Patlamaya karşı geliştirilen sandviç yapılardan beklenen en önemli özellikler koruma sağlanan yapıya iletilen kuvvetin minimize edilmesi ile birlikte enerji emiliminin maksimize edilmesidir. Bu amaçla tasarlanan konfigürasyonlar arasından en az kuvvet transfer eden ve en çok enerji emen konfigürasyonlar belirlenmiştir.</p>
Anahtar Kelimeler:	Yarı küresel çekirdek, Sandviç, Patlamaya karşı koruma, Doğrudan basınç dalgası deneyi, Optimizasyon
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- LOW VELOCITY IMPACT BEHAVIOR OF HEMISPHERICAL-CORE SANDWICH STRUCTURES (Bildiri), 2- Sandviç Yapılarda Kullanılan Tekrarlanabilir Çekirdek Geometrilerinin Enerji Emme Karakteristiklerinin İncelenmesi (Bildiri), 3- Numerical investigation of Quasi-Static Collapse Behavior of Combined Geometry AISI 304L Stainless Steel Shells (Bildiri)1- Low Velocity Impact Behavior of Hemispherical-Core Sandwich Structures (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 2- Sandviç Yapılarda Kullanılan Tekrarlanabilir Çekirdek Geometrilerinin Enerji Emme Karakteristiklerinin İncelenmesi (Bildiri - Ulusal Bildiri - Sözlü Sunum), 3- Numerical Investigation of Quasi-Static Collapse Behavior of Combined Geometry AISI 304L Stainless Steel Shells (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),