

**Patlama ve Balistik Tehditlere Karşı Koruyucu Çok  
Katmanlı Malzeme Sistemlerinin Yüksek  
Deformasyon Hızlarında Mekanik ve Nümerik test  
Metotlarının Geliştirilmesi ve Optimizasyonu**

**Proje No: 106M353**

Doç.Dr. Alper TAŞDEMİRCİ

MART 2011  
İZMİR

## **Önsöz**

Bu projede çok katmanlı zırh sistemlerinde kullanılacak olan malzemelerin yüksek deformasyon hızlarındaki mekanik davranışlarını ve gerilme dalgası ilerleyişi karakteristiklerini incelemek amacıyla mekanik ve nümerik test metotları geliştirilmiştir. Ayrıca ara yüzey malzemelerinin zırh sistemlerinin balistik performanslarına etkisi laboratuvar ve açık saha ortamında yapılan testler ve bu testlerin nümerik simülasyonları ile incelenmiştir. Proje TÜBİTAK tarafından desteklenmiş ve İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsünde yürütülmüştür.

# İÇİNDEKİLER

Önsöz.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
Tablolar Listesi.....	iv
Şekiller Listesi.....	iv
Özet.....	ix
Abstract.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	1
1.2. Organizasyon.....	4
2. SPLIT HOPKINSON BASINÇ BARI TASARIM VE ÜRETİMİ.....	6
3. ZIRH SİSTEMİNİ OLUŞTURAN MALZEMELERİN MEKANİK KARAKTERİZASYONU.....	26
3.1. Zırh sistemi malzemeleri.....	27
Numune hazırlanışı.....	31
3.2. Zırh sistemi malzemelerinin mekanik karakterizasyonu ve malzeme model parametrelerinin bulunuşu.....	34
3.2.1. Tek katmanlı malzemeler.....	34
3.2.2. Çok katmanlı malzemeler.....	68
4. ALTERNATİF ZIRH SİSTEMLERİNİN BALİSTİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ: DENEYSEL VE NÜMERİK ÇALIŞMA.....	91
4.1. Balistik çarpma testleri ve nümerik simülasyonları.....	93
4.2. Çarpma haznesi deneyleri.....	130
4.3. Ara yüzey katmanı kalınlığının balistik performansa etkisi.....	141
5. SONUÇLAR.....	154
Referanslar.....	157

## Tablolar Listesi

Tablo 2.1. SHBB çubuklarının mekanik özellikleri.....	9
Tablo 3.1 Alümina zırh seramiği mekanik özellikleri.....	27
Tablo 3.2 Ara yüzey malzemelerinin mekanik özellikleri .....	27
Tablo 4.1 Nümerik model detayları.....	97
Tablo 4.2 Malzeme modeli parametreleri.....	98
Tablo 4.3 Ara yüzey malzeme modeli parametreleri .....	99

## Şekiller Listesi

Şekil 2.1 SHBB şematiği.....	6
Şekil 2.2 Farklı çarpan çubuk uzunluklarında alan çubuk gerilmeleri. ....	7
Şekil 2.3 Farklı çarpma hızları için nümerik SHBB datası. ....	8
Şekil 2.4 SHBB ana sistem şeması. ....	10
Şekil 2.5 Gaz tabancası. ....	10
Şekil 2.6 Bar destek aparatları ve teflon yatak.....	11
Şekil 2.7 Destek ayak sistemi.....	11
Şekil 2.8 SHBB sistemi.....	12
Şekil 2.9 Şekil değişim ölçerler. ....	13
Şekil 2.10 Osiloskop ve şekil değişim ölçüm cihazı. ....	14
Şekil 2.11 Farklı basınçlarda gerilmenin değişimi.....	16
Şekil 2.12 Farklı basınçlarda tepe gerilme değerinin değişimi. ....	16
Şekil 2.13 Çarpan çubuk hızının iç hazne basıncına bağlı değişimi.....	18
Şekil 2.14 Balistik sarkaç nümerik modeli.....	19
Şekil 2.15 Balistik sarkaçta gerilmenin değişimi.....	19
Şekil 2.16 Farklı çarpma hızlarında sarkacın yer değiştirmesi. ....	20
Şekil 2.17 Büyük çaplı SHBB'ı nümerik modeli.....	21
Şekil 2.18 Farklı boylarda çarpan çubuklarla elde edilen gerilme değerleri.....	21
Şekil 2.19 Büyük çaplı SHBB. ....	22
Şekil 2.20 Matlab programı kullanıcı ara yüzü. ....	23
Şekil 2.21 Alan, yansıyan ve iletilen sinyaller.....	24
Şekil 2.22 Matlab programı sonuç eğrileri.....	25
Şekil 3.1 Zırh sistemi malzemeleri: a) Alümina, b) MHS ve c) EPDM ve Teflon. ....	28
Şekil 3.2 VARTM kompozit üretim istasyonu. ....	29



Şekil 3.3 Üretilmiş çeşitli kompozit plakalar. ....	30
Şekil 3.4 Alüminyum köpük. ....	31
Şekil 3.5 Alüminyum köpük üretim prosesi. ....	31
Şekil 3.6. Elmas uçlu kesici. ....	32
Şekil 3.7 Kompozit numuneler. ....	32
Şekil 3.8 SHBB numuneleri. ....	33
Şekil 3.9 0/90 E-Glass kompozit malzemenin gerilme şekil değiştirme eğrileri: a) katman düzleminde ve b) katman düzlemine dik. ....	35
Şekil 3.10 45/-45 E-Glass kompozit malzemenin gerilme şekil değiştirme eğrileri: a) katman düzleminde ve b) katman düzlemine dik. ....	36
Şekil 3.11 0/90/45/-45 E-Glass kompozit malzemenin gerilme şekil değiştirme eğrileri: a) katman düzleminde ve b) katman düzlemine dik. ....	37
Şekil 3.12 0/90 E-Glass kompozit malzemenin SHBB deney sonucu: a) katman düzleminde ve b) katman düzlemine dik. ....	38
Şekil 3.13 45/-45 E-Glass kompozit malzemenin SHBB deney sonucu: a) katman düzleminde ve b) katman düzlemine dik. ....	39
Şekil 3.14 0/90/45/-45 E-Glass kompozit malzemenin SHBB deney sonucu: a) katman düzleminde ve b) katman düzlemine dik. ....	40
Şekil 3.15 0/90 E-Glass kompozit malzemenin gerilme şekil değiştirme eğrileri: a) katman düzleminde ve b) katman düzlemine dik. ....	41
Şekil 3.16 45/-45 E-Glass kompozit malzemenin gerilme şekil değiştirme eğrileri: a) katman düzleminde ve b) katman düzlemine dik. ....	42
Şekil 3.17 0/90/45/-45 E-Glass kompozit malzemenin gerilme şekil değiştirme eğrileri: a) katman düzleminde ve b) katman düzlemine dik. ....	43
Şekil 3.18 Kompozit malzemenin gerilme şekil değiştirme eğrileri: (a-b) katman düzleminde deneysel ve nümerik, (c-d) katman düzlemine dik deneysel ve nümerik. ....	48
Şekil 3.19 Kompozit malzemenin şekil değiştirme hızına bağlı olarak basma hasar gerilmesinin değişimi: a) katman düzleminde ve b) katman düzlemine dik. ....	50
Şekil 3.20 Elastisite modülünün şekil değiştirme hızına bağlı değişimi. ....	51
Şekil 3.21 Katman düzlemine dik yönde SHBB sonuçları: a) deneysel ve b) nümerik. ....	52
Şekil 3.22 Deforme olmuş numune: a) deneysel ve b) nümerik. ....	54
Şekil 3.23 Seramik katmana ait SHBB sonuçları: a) deneysel ve b) nümerik. ....	55
Şekil 3.24 Seramik katmanda ilerleyen gerilmenin değişimi: a) deneysel ve b) nümerik. ....	57

Şekil 3.25 Kompozit katmana ait SHBB sonuçları: a) deneysel ve b) nümerik ...	58
Şekil 3.26 Kompozit katmanda ilerleyen gerilmenin değişimi: a) deneysel ve b) nümerik. ....	59
Şekil 3.27 Sinyal şekillendirme metodu. ....	60
Şekil 3.28 Sinyal şekillendirme metodu uygulanarak elde edilmiş SHBB datası.	61
Şekil 3.29 Farklı yoğunluklardaki köpüklerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri. ..	62
Şekil 3.30 Deneysel SHBB sonucu.....	63
Şekil 3.31 Deneysel ve nümerik gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	63
Şekil 3.32 İçi boş alüminyum metalik küre SHBB test görüntüleri. ....	64
Şekil 3.33 İçi boş metal küre SHBB modeli.....	65
Şekil 3.34 Metalik kürelerin nümerik ve deneysel SHBB sonucu. ....	66
Şekil 3.35 MHS yapının nümerik ve deneysel gerilme şekil değiştirme eğrileri. .	67
Şekil 3.36 MHS yapının dinamik deformasyon davranışı a) deneysel b) nümerik. ....	68
Şekil 3.37 Seramik+kompozit SHBB numunesi. ....	70
Şekil 3.38 Seramik+kompozit numuneye ait SHBB sonuçları: a) deneysel ve b) nümerik. ....	71
Şekil 3.39 Gerilmenin zamana bağlı değişimi: (a-b) seramik deneysel-nümerik ve (c-d) kompozit deneysel-nümerik.....	73
Şekil 3.40 Deforme olmuş kompozit katman: a) deneysel ve b) nümerik. ....	74
Şekil 3.41 Seramik+lastik+kompozit SHBB numunesi ve nümerik modeli.....	75
Şekil 3.42 Seramik+lastik+kompozit sisteme ait SHBB sonuçları: a) deneysel ve b) nümerik.....	76
Şekil 3.43 Gerilmenin zamana bağlı değişimi: (a-b) seramik deneysel-nümerik ve (c-d) kompozit deneysel-nümerik.....	78
Şekil 3.44 Seramik+teflon+kompozit SHBB numunesi ve nümerik modeli. ....	80
Şekil 3.45 Seramik+teflon+kompozit sisteme ait SHBB sonuçları: a) deneysel ve b) nümerik. ....	81
Şekil 3.46 Gerilmenin zamana bağlı değişimi: (a-b) seramik deneysel-nümerik ve (c-d) kompozit deneysel-nümerik.....	84
Şekil 3.47 DHBB nümerik modelleri: a) ara yüzeysiz, b) metalik köpük ve c) MHSi. ....	86
Şekil 3.48 İki katmanlı sistemde gerilme dalgası tarihçesi: a) seramik ve b) kompozit.....	87
Şekil 3.49 Alüminyum köpük ihtiva eden sistemde gerilme dalgası tarihçesi: a) seramik ve b) kompozit. ....	88

Şekil 3.50 Metalik küre ihtiva eden sistemde gerilme dalgası tarihçesi: a) seramik ve b) kompozit.....	88
Şekil 3.51 Alan çubuğa iletilen gerilme dalgası tarihçeleri.....	90
Şekil 4.1 7.62MM zırh delici mermi.....	92
Şekil 4.2 Çarpma haznesi.....	93
Şekil 4.3 Balistik test numunesi: a) üst ve b) yan görünüşler. ....	94
Şekil 4.4 Balistik test numuneleri: a) Ara yüzeysiz, b) EPDM lastik, c) Teflon ve d) köpük arayüzeyle. ....	95
Şekil 4.5 Balistik test nümerik modeli.....	96
Şekil 4.6 Seramik katmanda enerji bileşenlerinin değişimi.....	102
Şekil 4.7 Kompozit katmanda enerji bileşenlerinin değişimi. ....	103
Şekil 4.8 Kompozit katmanlarında toplam iç enerjinin değişimi. ....	104
Şekil 4.9 Seramik katmanda meydana gelen hasar. ....	105
Şekil 4.10 Kompozit katmanda meydana gelen hasar modları. ....	108
Şekil 4.11 Seramik katmanda enerji bileşenlerinin değişimi.....	109
Şekil 4.12 Kompozit katmanda enerji bileşenlerinin değişimi. ....	109
Şekil 4.13 Kompozit katmanlarda toplam iç enerjinin değişimi.....	110
Şekil 4.14 Seramik katmanda meydana gelen hasar. ....	111
Şekil 4.15 Kompozit katmanda meydana gelen hasar modları. ....	114
Şekil 4.16 Seramik katmanda enerji bileşenlerinin değişimi.....	115
Şekil 4.17 Kompozit katmanda enerji bileşenlerinin değişimi.....	115
Şekil 4.18 Kompozit katmanlarda toplam iç enerjinin değişimi.....	116
Şekil 4.19. Seramikte katmanda meydana gelen hasar .....	117
Şekil 4.20 Kompozit katmanda meydana gelen hasar modları. ....	120
Şekil 4.21 Seramik katmanda enerji bileşenlerinin değişimi.....	121
Şekil 4.22 Kompozit katmanda enerji bileşenlerinin değişimi.....	121
Şekil 4.23 Kompozit katmanlarda toplam iç enerjinin değişimi.....	122
Şekil 4.24 Seramik katmanda meydana gelen hasar. ....	123
Şekil 4.25 Kompozit katmanda meydana gelen hasar modları. ....	126
Şekil 4.26 Seramik katmanda toplam iç enerjinin zamana bağlı değişimi. ....	127
Şekil 4.27 Kompozit katmanda toplam iç enerjinin zamana bağlı değişimi.....	127
Şekil 4.28 Merminin zamana bağlı: a) kütle ve b) hız değişimi.....	128
Şekil 4.29 Kompozit katmandaki z-gerilmesinin değişimi.....	129
Şekil 4.30 Gaz tabancası ve numune sabitleme aparatı. ....	131
Şekil 4.31 Gaz tabancası için tasarlanmış hız ölçer.....	131
Şekil 4.32 Test plakaları. ....	132
Şekil 4.33 Yüksek hızlı kamera.....	133

Şekil 4.34 Hızlı kamera görüntüleri.....	133
Şekil 4.35 Seramik katmanlarda meydana gelen hasar: a) ara yüzeysiz, b) EPDM, c) Teflon ve d) alüminyum köpük arayüzeyle.....	134
Şekil 4.36 Kompozit plakada meydana gelen delaminasyon hasarı: a) ara yüzeysiz, b) EPDM, c) Teflon ve d) alüminyum köpük arayüzeyle.....	135
Şekil 4.37 Kompozit destek plakarı ve hasar miktarı.....	136
Şekil 4.38 Hasar bölgeleri kesitleri.....	137
Şekil 4.39 SEM görüntüleri: a) ara yüzeysiz, b) EPDM, c) Teflon ve d) alüminyum köpük.....	138
Şekil 4.40 Farklı hasar modları.....	139
Şekil 4.41 Fiber ezilmesi , fiber ve matris kırılmaları.....	140
Şekil 4.42 Nümerik modeller: (a-b) 2.3 - 4.6 mm teflon, (c-d) 4 - 8mm köpük. .	142
Şekil 4.43 Seramik katmanda enerji değişimleri: a) iç enerji, b) toplam iç enerji ve c) kinetik enerji.....	144
Şekil 4.44. Mermideki: a) hız ve b) kütle değişimleri.....	146
Şekil 4.45 Kompozit katmanda: a) iç enerji, b)toplam iç enerji ve c) kinetik enerji değişimleri.....	148
Şekil 4.46 Seramik katmanda oluşan hasar: (a-b) 2.3 ve 4.6 mm teflon ve (c-d) 4 ve 8 mm alüminyum metalik köpük.....	150
Şekil 4.47 Kompozit katmanda oluşan hasar: (a-b) 2.3 ve 4.6 mm teflon ve (c-d) 4 ve 8 mm alüminyum metalik köpük.....	152

## Özet

Bu çalışmada esas amaç, çok katmanlı malzemelerden oluşan bir zırh sisteminin geliştirilmesine olanak sağlayacak olan bir metodoloji geliştirmektir. Bu metodoloji, detaylı nümerik ve deneysel gerilme dalgası geçiş analizini içermektedir. Bu kapsamda testler ve nümerik simülasyonlar eş zamanlı olarak yürütülmüş ve her iki tekniğin avantajları bir arada kullanılmıştır.

Projeye ülkemiz savunma sanayi envanterine çok önemli bir katkıda bulunularak ülkemizde bir ilk olarak Hopkinson Basınç Barı test düzeneği başarıyla kurulmuş ve ülkemiz hizmetine sunulmuştur. Bu proje kapsamında entegre zırh sistemini oluşturacak malzemelerin tek katmanlı ve çok katmanlı kombinasyonlarının yüksek şekil değiştirme hızlarındaki mekanik özellikleri ve gerilme dalgası ilerleyiş karakteristikleri tespit edilmiş ve bu tespit edilen özellikler daha sonraki adımlarda nümerik modellerde kullanılmıştır. Aynı zamanda test edilen numunelerde meydana gelen hasar mekanizmaları tespit edilmiş ve bu mekanizmaların birbirine ve malzeme davranışına etkisi gösterilmiştir. Bu çalışmalara paralel olarak nümerik modellemeye geçilmiştir. Nümerik modellemede de deneysel çalışmada kullanılan metodoloji takip edilmiş ve ilk önce en basit hal olan tek katmanlı malzemelerde gerilme dalgası geçişi incelenmiş, daha sonra çalışma çok katmanlı hallerin incelenmesi ile sürdürülmüştür.

Entegre zırh sistemlerinin balistik performanslarının artırılmasında en önemli husus, sistemi oluşturan seramik ön yüzey ve kompozit destek plakası ana komponentleri arasında ara yüzey malzemesi kullanımınıdır. Bu amaçla üç farklı alternatif ara yüzey malzemesinin etkisi incelenmiştir. Bu malzemeler; EPDM lastik, Teflon ve alüminyum köpüktür. Bunlardan olumlu sonuç veren malzemeler, Teflon ve alüminyum köpük olarak tespit edilmiştir. Bu alternatif ara yüzey malzemelerinin etkinliği hem gerçek zırh delici mermiler kullanılarak saha testleri ile hem de gaz tabancası kullanılarak laboratuvar ortamında yapılan çarpma haznesi testleri ve nümerik simülasyonları ile doğrulanmıştır. Bu malzemelerin etkinlikleri doğrulandıktan sonra bu iki alternatif malzemenin eş alansal yoğunluk

seviyelerindeki performansları incelenmiştir. Alüminyum köpük malzemenin kompozit katmana iletilen gerilme değerlerini ve bu katmanda meydana gelen hasarı oldukça azalttığı gözlemlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Çok Katmanlı Zırhlar, Hopkinson Basınç Barı, Yüksek Hızda Deformasyon, Sonlu Elemanlar Metodu

## **Abstract**

The main purpose of the current study is to establish a new methodology which allows developing new armor system consisting multilayered materials. This methodology involves detailed stress wave propagation analyses, both experimentally and numerically. In this context, experiments and numerical simulations were conducted simultaneously and the advantages of both techniques were used together.

Within the scope of project a Split Hopkinson Pressure Bar Apparatus, being the very first example in Turkey and a highly valuable addition to our country's defense industry inventory, was successfully established and put into service. The high strain rate mechanical properties and stress wave propagation characteristics of composite integrated armor constituents were determined for single and multilayer configurations and these determined mechanical properties were further used in numerical simulations. The damage mechanisms occurred in the tested specimens was determined and the effect of these mechanisms on one another and on the behavior of the material was given also. Numerical modeling was also conducted in conjunction with the experimental study. In numerical modeling the methodology developed during the experimental study was followed, wave propagation in single layers was investigated first then study was extended to the multilayer configurations.

The most important point in the increase of the ballistic performance of composite integrated armor is the interlayer placed between the ceramic front layer and composite backing plate. For this purpose three different interlayer materials were tried. These materials are; EPDM rubber, Teflon and aluminum metallic foam and among those materials Teflon and metallic foam were presented better results. The effectiveness of those materials were validated with conducting ballistic tests by using armor piercing bullets, impact chamber tests by using gas gun and numerical simulations of those tests. After this validation the ballistic performance of those aforementioned materials were investigated at equal areal densities. Finally aluminum metallic foam was found to reduce the stress

values transmitted to the composite backing plate and decrease the damage imparted to this layer.

**Keywords:** Multilayered Armor, Split Hopkinson Pressure Bar, High Strain Rate Deformation, Finite Element Method.



# 1. GİRİŞ

## 1.1.Amaç ve Kapsam

Zırh sistemleri ve balistik korumanın tarihsel gelişimine bağlı olarak çok çeşitli malzeme grupları öncelikle tek başlarına ve daha sonra birbirleriyle kombine edilerek zırh sistemlerinde yaygın olarak kullanılmışlardır. Özellikle yüksek mukavemet ve sertlik değerine sahip çelikler ve nispeten yüksek mukavemetli ve çeliğe göre daha hafif alüminyum metal plakalar kullanılmıştır. Zamanın ilerleyişi ile birlikte zırh teknolojisinde meydana gelen gelişmelerle paralel olarak mermi teknolojisi de gelişmiştir. Burada unutulmaması gerekli en önemli husus, mükemmel zırh veya mükemmel mermi kavramının son derece göreceli olduğu ve her iki teknolojinin birbiriyle paralel olarak ilerleyişidir. Zırh teknolojisindeki en önemli adım, seramik ve kompozit malzemelerin bu sistemlere entegre edilmesiyle atılmıştır. Bu tip modern çok katmanlı zırhlarda genellikle zırhın ön yüzeyinde seramik bir plaka bulunmakta ve bu plaka başka bir kompozit destek plakası ile desteklenmektedir. Seramik plakanın esas görevi; merminin uç kısmını deforme etmek, ezmek, parçalamak ve merminin enerjisini kompozit plaka üzerinde daha geniş bir alana yaymaktır. Balistik çarpma anında oluşan kırılma konoidinin tepe noktasında meydana gelen pülverize seramik bölgesindeki yüksek sürtünme kuvvetleri de çarpma enerjisinin emilmesinde önemli rol oynamaktadır. Kompozit destek plakası merminin kalan kinetik enerjisini absorbe etmektedir. Bu işlem plaka eğilme deformasyon enerjisi, delaminasyon, fiber ve matris kırılması gibi çok çeşitli hasar modları vasıtasıyla gerçekleşmektedir.

Zırh sistemine merminin çarpması ile birlikte bir basma gerilme dalgası meydana gelir ve bu dalga yapıyı oluşturan malzemelerin akustik empedanslarına bağlı olarak katmanlar içerisinde ilerler. Bu gerilme dalgası, genellikle mekanik özellikleri birbirlerinden çok farklı olan zırh malzemelerinin birbirleriyle olan temas yüzeylerine ulaştığında detayları raporun ileriki bölümlerinde açıklandığı şekilde kısmen yansır, kısmen de iletilir. Bu iletilen ve yansıyan dalgaların şiddetleri ve işaretleri (çekme veya basma), zırhların balistik performansları

üzerinde etkili en önemli parametrelerdir. Konvansiyonel balistik testler yaparak gerilme dalgası ilerleyişi ile ilgili detaylı bilgi alınamayacağı aşikardır. Balistik test sonuçları, zırhın ancak mermi tarafından delinip delinmediği hakkında bilgi verebilmektedir. Bu sebeple zırh sistemlerinin geliştirilmesinde gerilme dalgası ilerleyişi hakkında detaylı bilgi verebilen deney düzeneklerinin geliştirilmesi ve kullanılması kaçınılmazdır. Aslında burada yapılan gerilme dalgası kontrolörlüğüdür (stress wave tailoring). Nitekim çok katmanlı zırh sistemlerini oluşturan ana katmanlar olan seramik ve kompozit katmanlar arasına ara yüzey malzemelerinin (mekanik özellikleri seramik ve kompozit katmanlardan oldukça farklı) yerleştirilmesiyle gerilme dalgası ilerleyişi kontrol edilebilir. Burada ara yüzey malzemelerinden beklenen özellikler, seramik katmandan kompozit katmana iletilen gerilme dalgasının şiddetini azaltmak ve iletilen dalganın iletim zamanını geciktirmektir. Gama ve arkadaşları (Gama, 2000, Gama, 2001, Gama ve diğ., 2001), lastik ve alüminyum köpük ara yüzey malzemeleri kullanarak bu malzemelerin gerilme dalgası geçişine etkilerini incelemişlerdir. Lastik katmanın seramik ve kompozit katman arasında bir geçiş tabakası oluşturarak zırhın çoklu çarpma kabiliyetini arttırdığı görülmüştür. Alüminyum köpük kullanımı ise seramik katmanda hasar artışına ve kompozit katmanda delaminasyon hasarının azalışına sebep olmuştur. Zaera ve arkadaşları (Zaera ve diğ., 2000) ise alümina/alüminyum zırh sistemlerinde bu iki katman arasına sürülen yapıştırıcı malzeme cinsinin ve kalınlığının gerilme dalgası geçişine etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında yapıştırıcı kalınlığının artışı ile birlikte metalik destek plakasında (alüminyum) plastik deformasyona uğrayan bölgenin arttığı ve seramik katmanın daha erken kırıldığı gözlemlenmiştir.

Zırh sistemlerinin balistik performanslarının daha iyi anlaşılabilmesi ve iyileştirilebilmesi için malzeme içerisinde gerilme dalgası ilerleyişinin detaylı bir şekilde irdelenmesi gerekmektedir. Klasik tek boyutlu gerilme dalga teorisi, bazı araştırmacılar tarafından zırhın davranışının incelenmesinde kullanılmıştır. Mines (Mines, 2004), klasik dalga teorisini kullanarak Gama ve arkadaşlarının (Gama, 1998, Gama, 2000, Gama, 2001, Gama ve diğ., 2001) elde ettiği deneysel sonuçları yorumlamaya çalışmıştır. Çalışmasında malzemelerin davranışı elastik olarak kabul edilmiş olduğundan bu yaklaşım, aslında gerçek durumdan bir hayli uzaktır. Çünkü gerçek durumda plastik deformasyon ve kırılma gibi hususlar oldukça etkilidir. Abrate (Abrate, 2003, Abrate, 2009) yine dalga teorisini çok

katmanlı malzemelere uyarlamaya çalışmıştır. Onun çalışmasında da analiz tek boyutludur ve analizde elastik malzeme davranışları kabul edilmiştir. Bahsi geçen çalışmalarda üç boyutlu gerilme dalgası ilerleyişi, plastik deformasyon ve hasar etkileri dikkate alındığında hata miktarı oldukça artmaktadır.

Çok katmanlı malzemelerin balistik performansının iyileştirilmesinde etkili bir diğer önemli husus ise bölgesel çarpma yükünün mümkün olduğu kadar hızlı ve geniş bir biçimde yayılabilmesini sağlamaktır. Nitekim Gupta ve arkadaşları (Gupta and Madhu, 1992, Gupta and Ding, 2002), çok katmanlı malzemelerde tabaka geometrisi ve mekanik özelliklerinin yük yayılımına etkisini incelemişlerdir.

Bahsi geçen hususlar dikkate alındığında yeni zırh sistemlerinin geliştirilmesinde balistik testlere geçilmeden evvel tamamlanması gereken gerilme dalgası analizi ve laboratuvar ortamında gerçekleştirilmesi mümkün olan detaylı bir metodolojinin geliştirilmesinin kaçınılmaz olduğu aşikardır. Split Hopkinson Basınç Barının bu amaçla kullanılabileceği, proje yürütücüsünün daha önceki çalışmalarından bilinmektedir. Hopkinson Basınç Barı kullanılarak, kontrollü bir gerilme dalgası çok katmanlı malzeme sistemlerine uygulanabilmekte ve numune üzerine yerleştirilen şekil değiştirme ölçerler vasıtasıyla bu gerilme dalgasının dağılımı incelenebilmektedir (Tasdemirci ve diğ., 2007, Tasdemirci and Hall, 2005, Tasdemirci and Hall, 2006, Tasdemirci and Hall, 2007, Tasdemirci and Hall, 2007, Tasdemirci and Hall, 2009, Tasdemirci ve diğ., 2004, Tasdemirci ve diğ., 2004, Tunusoglu ve diğ., 2010). Prosedür hakkında detaylı bilgi, bu raporun ilgili kısımlarında verileceğinden bu noktada sadece ana hususlara değinilecektir. Çok katmanlı malzeme sistemlerinde klasik Hopkinson Basınç Barı teorisi kullanılamayacağı için bu sistemlerin analizinde deneysel sonuçların nümerik modellerle desteklenmesi gerekmektedir. Burada uygulanan teknik kısaca şu şekildedir; Hopkinson Basınç Barı ile çok katmanlı zırh sistemi numunesine şiddeti ve genliği kontrol edilebilir bir basma gerilme dalgası uygulanmaktadır. Bu gerilme dalgası, numuneyi oluşturan katmanlar içerisinde kısmen yansıyor kısmen de iletildikten sonra şekil değişim ölçerler tarafından kaydedilmektedir. Sisteme verilen ve sistemden alınan gerilme dalgası tarihçeleri elde mevcuttur. Bu sonuçlar, nümerik model tarafından da tekrarlanabilirse modelin daha sonraki optimizasyon çalışmalarında güvenli şekilde kullanılabilmesi yolu açılacaktır. Hopkinson Basınç Barının bu metodolojiye dahil

edilmesinin en büyük avantajı, zırh sistemini oluşturan birbirinden çok farklı malzeme grubunun yüksek hız mekanik özelliklerinin de bu test düzeneğinde tespit edilebilmesidir. Zırh sistemini oluşturan ve sisteme entegre edilmesi muhtemel olan seramikler, polimerik kompozitler, ara yüzey malzemesi olarak kullanımı düşünülen hafif gözenekli yapılar vs.nin dinamik mekanik özellikleri quasi-statik mekanik özelliklerinden oldukça farklıdır ve zırh sistemi geliştirilmesi prosedüründe bu özelliklerin dikkate alınması zorunludur. Yine prosedürün bir parçası olan nümerik modellerde kullanılan malzeme modellerinde de dinamik mekanik özelliklerinin kullanılması gerekliliği kaçınılmazdır.

Bu projede esas amaçlanan husus, yeni çok katmanlı sistemlerin (seramik, kompozit, metal, metalik köpük ve bal peteği vb. tabakalardan oluşan) gelişmesine olanak sağlayacak yeni test ve nümerik metotlar geliştirmektir. Bu metotlar kullanılarak zırh sistemlerinde kullanılan farklı ara yüzey malzemelerinin zırhın balistik performansına ve gerilme dalgası ilerleyişi karakteristiğine etkisi incelenmiştir. Projenin sonuçlar kısmında daha detaylı olarak açıklandığı gibi, bu proje sonucunda ülkemiz savunma sanayi envanterine ilk defa bir basma Hopkinson Basınç Barı kazandırılmıştır.

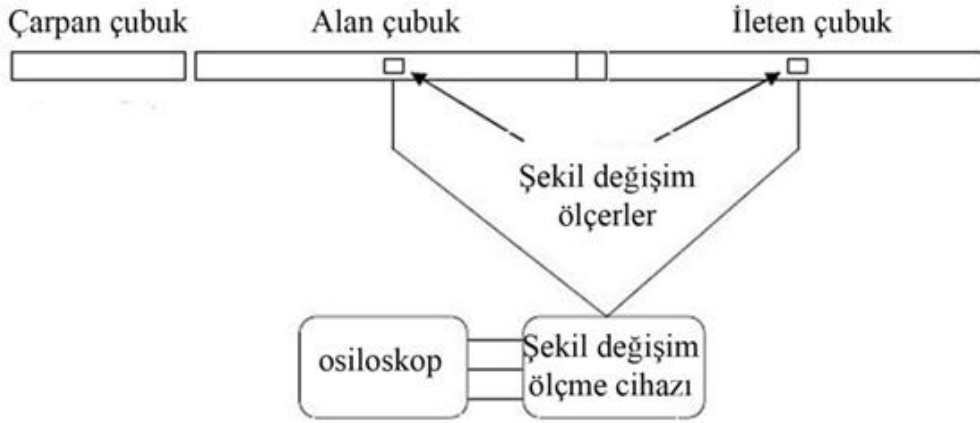
## **1.2.Organizasyon**

Sonuç raporu beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde çalışmanın amaç ve kapsamı verilip, mevcut çalışmalara değinilmiş ve sunuş organizasyonu anlatılmıştır. İkinci bölümde Split Hopkinson Basınç Barı (SHBB) tasarımı ve üretim süreci açıklanmıştır. Bu süreçte yapılan nümerik analizlere, parça temin ve üretim tekniklerine yer verilmiştir. Üçüncü bölümde SHBB testleri kullanılarak yapılan malzeme karakterizasyonları ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlar ışığında SHBB testlerinin nümerik simülasyonları yapılarak gerilme dalgası ilerleyişi çeşitli ara yüzey malzemeleri içeren konfigürasyonlarda incelenmiştir. Dördüncü bölümde ise alternatif zırh sistemlerinin hazırlanışı ve uygulanan testler (balistik testler ve gaz tabancası kullanılarak yapılan çarpma haznesi deneyleri) anlatılmaktadır. Balistik teste tabi tutulan zırh sistemlerinin nümerik modelleri hazırlanmıştır. Bu modeller vasıtasıyla gerilme dalgası ilerleyişi, katmanlarda bulunan enerji miktarları gibi önemli parametreler incelenmiştir. Ardından bu analizlerden en iyi sonucu veren iki ara yüzey malzemesi olan Teflon ve

alüminyum metalik köpük içeren konfigürasyonlar seçilmiş ve bu malzemelerin kalınlıklarının balistik performansa etkisi incelenmiştir. İki farklı ara yüzey malzemesi için iki eş alansal yoğunluk (areal density) değeri seçilerek (2.3 mm teflon ve 4mm alüminyum metalik köpük ile 4.6 mm teflon ve 8 mm alüminyum metalik köpük) nümerik modelleri hazırlanmıştır. Simülasyonlardan sistem içi enerji dağılımı ve katmanlara göre iç ve kinetik enerji dağılımı ortaya konmuştur. Beşinci bölüm ise sonuçlara ayrılmıştır.

## 2. SPLIT HOPKINSON BASINÇ BARI TASARIM VE ÜRETİMİ

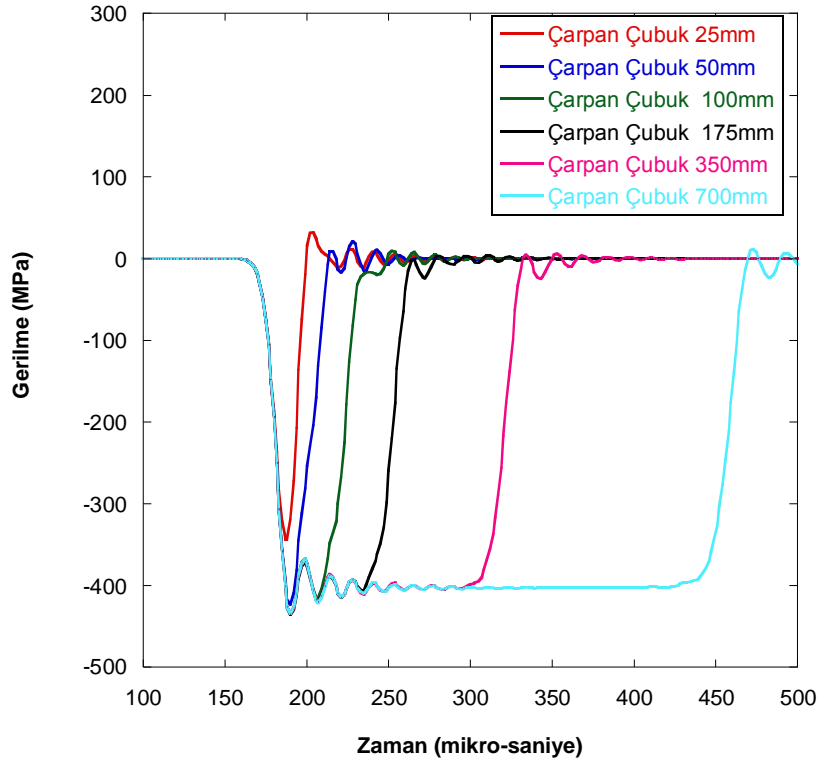
Önceki bölümde de anlatıldığı gibi bu proje kapsamında ilk olarak Split Hopkinson Basınç Barının (SHBB) tasarım ve üretimi gerçekleştirilmiştir. SHBB; gaz tabancası, çarpan, alan ve ileten çubuklar olmak üzere dört ana mekanik parça ve veri toplama ünitesinden oluşmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 SHBB şematığı.

SHBB'ni oluşturan ana elemanlar, sistemler arasında farklılık göstermemekle beraber piyasada komple kullanıma hazır bir SHBB test sistemi satılmamaktadır. Bu amaçla projenin amaçlarına uygun nitelikte bir sistem, proje ekibi tarafından tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu noktada SHBB çalışma prensibine kısaca değinilecek olmakla beraber, bu bölümün ilerleyen kısımlarında SHBB teorisi ile ilgili detaylar verilecektir. SHBB'da; gaz tabancası tarafından fırlatılan bir çubuk, alan çubuk alın yüzeyine çarpmakta ve bir basma gerilme dalgası oluşturmaktadır. Bu basma dalgası, alan ve ileten çubuklar arasında sıkıştırılmış numuneye ulaştığı anda bir kısmı numune üzerinden ileten çubuğa iletilmekte, diğer kısmı ise alan çubuğa yansımaktadır. Alan ve ileten çubuklar üzerinde bulunan şekil değişim ölçerler vasıtasıyla bu gerilme dalgaları kaydedilebilmektedir. Deney sisteminin tasarlanması sırasında katı modelleme programlarının kullanımı yanında aynı zamanda sonlu elemanlar modelleri de

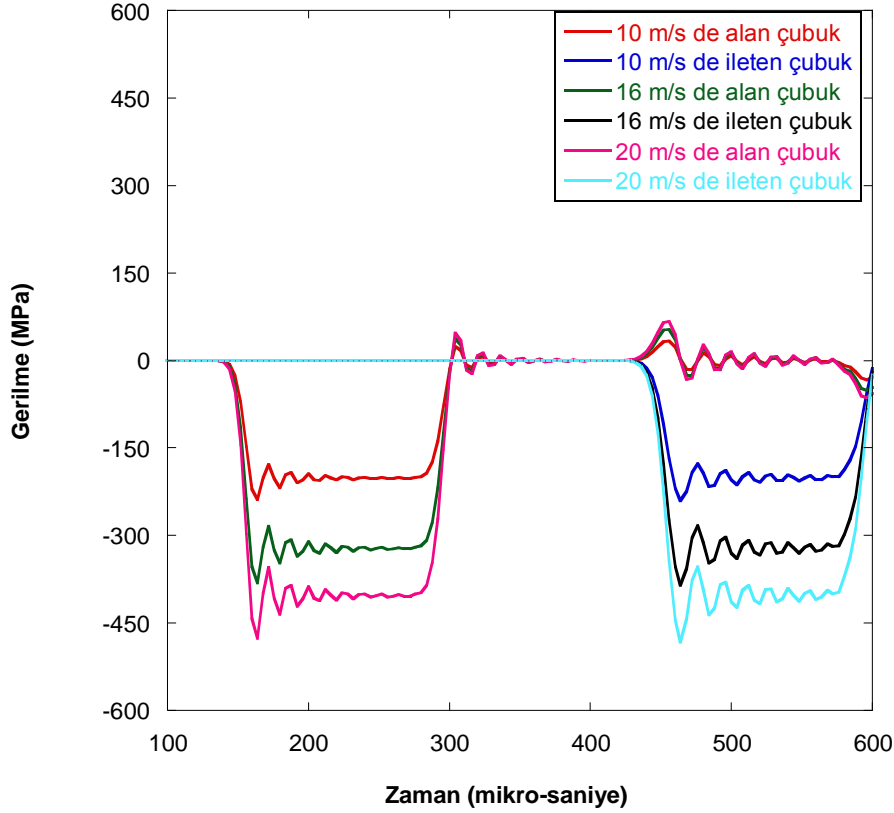
hazırlanarak yapımı planlanan SHBB'nı oluşturan elemanların boyut tayinleri yapılmıştır. Sonlu elemanlar çözümü için LS-DYNA 971 programı kullanılmıştır. Öncelikli olarak test sistemini oluşturan ana elemanlar olan çarpan, alan ve ileten çubukları ihtiva eden bir nümerik model hazırlanmıştır. Çeşitli boy ve çaptaki çubuklar için simülasyonlar ve analizler yapılmıştır. Bu analizler sonucunda çubuklar içerisinde tek eksenli gerilme dalgası ilerleyişini sağlayabilecek ve minimum gerilme dalgası dağılımı (dispersion) verecek çubuk boyutları tespit edilmiştir. Tasarım sırasında dikkate alınan bir diğer husus da alan ve ileten çubuk boylarının numunede tek seferlik yüklemeyi garanti altına alabilecek şekilde seçilmiş olmasıdır. Çarpan çubuk boyunun alan çubuk içerisinde ilerleyen gerilme dalgası uzunluğuna etkisi de analizler sırasında dikkate alınmıştır. Bu amaçla 20 mm çapında ve boyu 25, 50, 100, 175, 350, 700 mm aralığında değişen bir çarpan çubuğun alan çubuğa çarpması durumunda meydana gelen gerilme dalgasının zamana bağlı değişimi Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2 Farklı çarpan çubuk uzunluklarında alan çubuk gerilmeleri.

Yapılan analizlerin sonucunda 350 ve 700 mm boylarındaki çarpan çubukların istenilen şiddet ve uzunluklarda gerilme dalgası üretebildikleri tespit

edilmiş ve bu uzunluk değerleri imalat sırasında kullanılmıştır. Çubukların boyutlarının tespitinin ardından sistemin seramik bir numune testi sırasında davranışını görmek amacıyla üç farklı çarpma hızı için SHBB deneyi simüle edilmiş ve çubuklarda elde edilen gerilme değerlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3 Farklı çarpma hızları için nümerik SHBB datası.

Boyutların tespitinden sonra çubukların temini aşamasına geçilmiştir. SHBB'da test edilecek malzemelere bağlı olmak üzere farklı malzemelerden çubuklar kullanmak mümkündür. Burada esas olan çubukların deney esnasında sadece elastik deformasyona uğrayacak kadar yüksek mukavemete sahip olmalarıdır. Bu amaçla SHBB'da kullanılan çubuklar genel olarak yüksek mekanik özelliklere sahip çelik malzemelerden seçilmektedir. Gözenekli malzemeler gibi nispeten düşük mukavemetli malzemelerin testlerinde ise genellikle alüminyum çubuklar kullanılmaktadır.

Bu amaçla yüksek mukavemetli CPMRex76 ve Vascomax C-350 maraging çeliklerden çubuklar temin edilmiştir. Ayrıca yine zırh sistemlerindeki



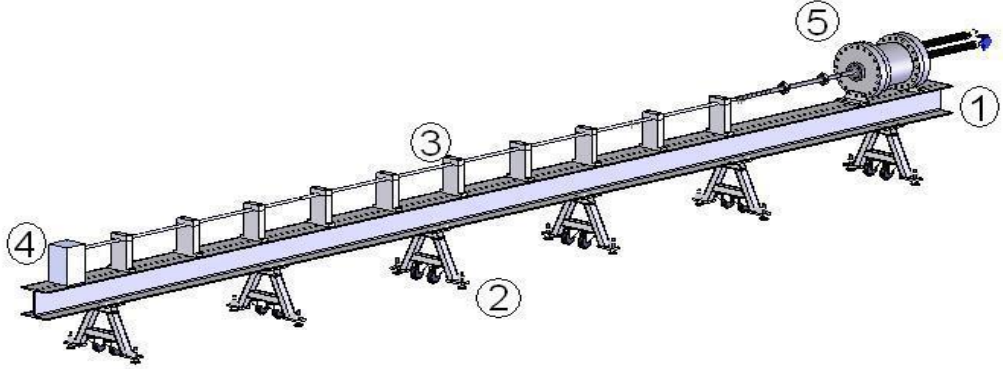
hafif ve gözenekli ara yüzey malzemelerinin testlerinde kullanılmak üzere alüminyum çubuklar da temin edilmiştir (Tablo 2.1).

**Tablo 2.1. SHBB çubuklarının mekanik özellikleri.**

Malzeme	Elastisite Modülü	Yoğunluk	Sertlik
CPM Rex76	214 GPa	8255 kg/m <sup>3</sup>	45-60 HRC
Maraging Çeliği Vascomax C- 350	200 GPa	8000 kg/m <sup>3</sup>	55-60 HRC
7075-T6	71.7	2810 kg/m <sup>3</sup>	53.5 HRC

Çubukların temininden sonra Split Hopkinson Basınç Bar temel inşaatı ve gaz tabancasının mekanik dizayn süreci başlatılmıştır. SHBB temel inşaatının ve gaz tabancasının dizaynı SolidWorks tasarım programında üç boyutlu olarak yapılmış ve üretim aşaması için gerekli olan teknik resimler oluşturulmuştur. SHBB temel inşaatı Şekil 2.4’de görüldüğü gibi kiriş, destek ayaklar, bar destek aparatları ve durdurucudan oluşmaktadır. Kiriş; destek ayaklarının, durdurucunun, gaz tabancasının ve bar destek aparatlarının bir arada tutulduğu ve yükü taşıyan kısımdır. Destek ayaklar ise kirişin ve diğer bütün aparatların yükünü taşıyan bölümdür. Ayrıca destek ayaklar üzerinde sistemin bir yerden başka bir yere taşınmasını sağlayan tekerlekleri de bulunmaktadır. Sabitleyici pedler ise destek ayaklarını ve kirişi havaya kaldırıp yere sabitlemektedirler. Yine sistemde kullanılan elemanlardan bar destek aparatları, çubukların yataklanmasını sağlayarak çubukları ve gaz tabancasını merkezlemektedirler. Durdurucu ise ileten çubuğun istenilenden fazla ilerleyişini önlemekte ve ayrıca çubuğun geri sekmesini önleyecek bir sistemle ileten çubuktaki artık enerjiyi absorbe etmektedir. SHBB’nın en önemli bileşenlerinden olan gaz tabancası (Şekil 2.5) 15 bar basınca dayanabilecek boyutlarda üretilmiş ve hidrostatik basınç testi yapıldıktan sonra SHBB sistemine entegre edilmiştir.

- 1-Kiriş
- 2-Destek Ayaklar
- 3-Bar Destek Aparatları
- 4-Durdurucu
- 5-Gaz Tabancası



Şekil 2.4 SHBB ana sistem şeması.



Şekil 2.5 Gaz tabancası.

İmalata daha önceden temin edilen çubuklara uygun bar destek aparatları işlenerek devam edilmiştir. Çubukları yataklamak ve gaz tabancasıyla merkezlemesini sağlamak için Teflon yataklar (Şekil 2.6) işlenmiştir. Teflonun düşük sürtünme katsayısı ve işlenebilme kolaylığı, yatak malzemesi olarak

seçiminde önemli rol oynamıştır. Kirişin temin edilmesi ve bar destek aparatlarının yapılmasının ardından, destek ayak sisteminin iskeleti kutu çelik profilden üretilmiştir (Şekil 2.7).



Şekil 2.6 Bar destek aparatları ve teflon yatak.



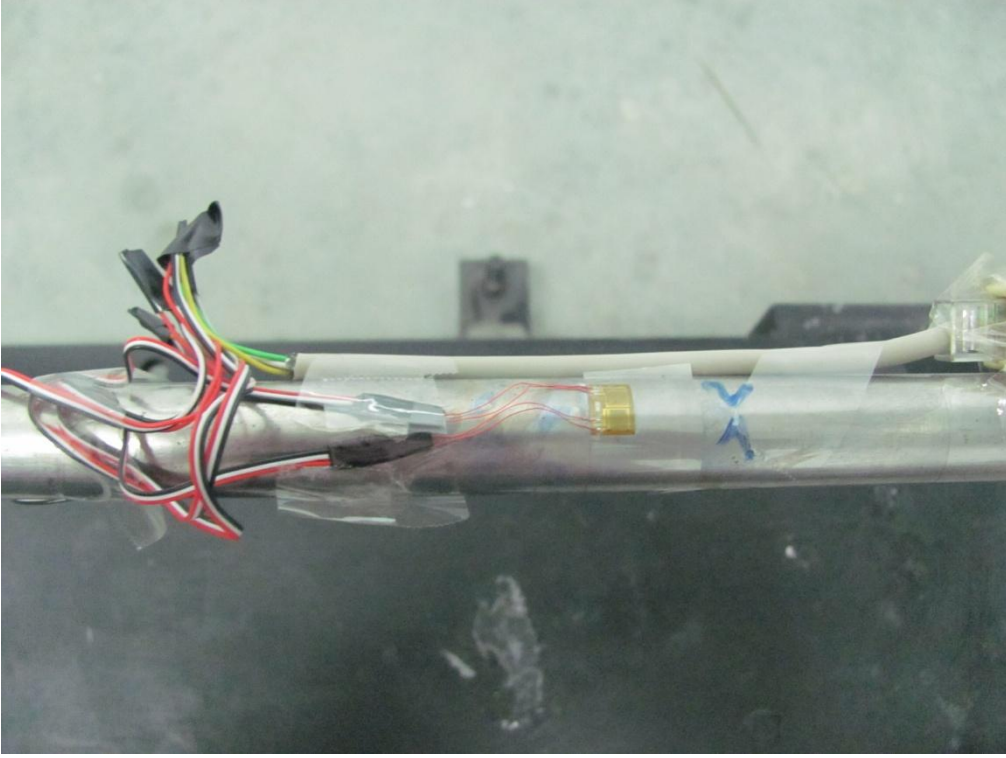
Şekil 2.7 Destek ayak sistemi.

SHBB test sistemi için gerekli olan tüm parçaların üretim ve temininin ardından montaj aşamasına geçilmiş, böylece sistem son haline getirilmiştir (Şekil 2.8).



**Şekil 2.8 SHBB sistemi.**

Testler sırasında çubuklarda meydana gelen gerilme dalgalarını kaydetmek amacıyla, çubuk çaplarına uygun şekil değiştirme ölçerler (strain-gage) temin edilmiştir (Şekil 2.9).



**Şekil 2.9 Şekil değişim ölçerler.**

Şekil değişim ölçerlerin voltaj beslemesi ve üzerlerinden sinyal alınması amacıyla şekil değişim ölçüm cihazı temin edilmiştir. Şekil değişim ölçerlerden gelen voltaj sinyalleri de yüksek hızlı bir osiloskop tarafından kaydedilmektedir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 Osiloskop ve şekil değişim ölçüm cihazı.

SHBB test sistemini oluşturan mekanik ve elektronik bileşenlerin bir araya getirilmesiyle sistem ön denemelere hazır hale getirilmiştir. Ön denemelerde; 70 cm uzunluğunda çarpan çubuk kullanılarak farklı iç hazne basınçlarında boş testler (alan ve ileten çubuklar arasında numune olmadan) yapılmıştır. Deneyler sırasında kaydedilen voltaj sinyalleri, voltaj-gerilme çevrim formülleri (Denklem 2.1) kullanılarak gerilme cinsinden ifade edilmiştir.

$$\sigma = 2 \cdot C_0 \cdot V \cdot 10^6 \cdot \frac{2}{G \cdot SGF \cdot (1+V) \cdot Exc} \cdot 1000 / l_0 \quad 2.1$$

Burada;

$\sigma$  = Gerilme

$C_0$  = Dalga hızı

$V$  = Çubuklar üzerindeki şekil değişim ölçerden gelen voltaj değerleri

$G$  (Gain) = Amplifikatör kazancı

$\nu$  = Poisson oranı

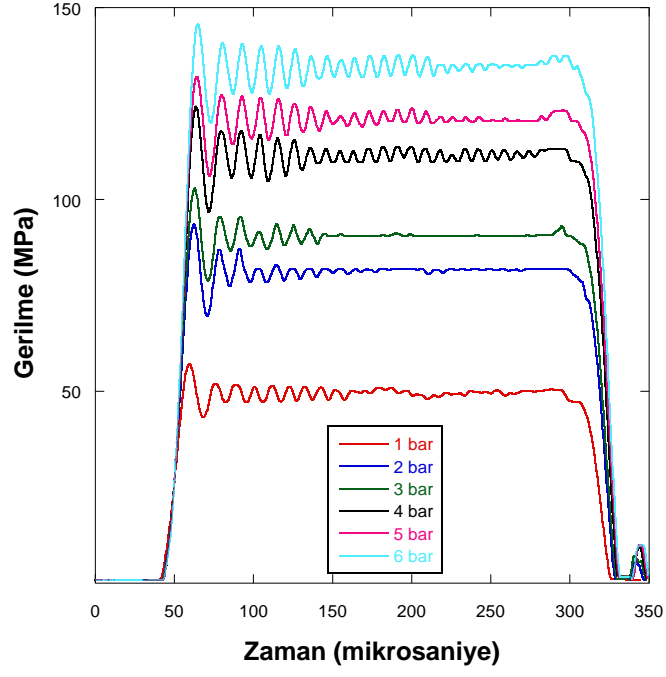
Exc (Excitation) = Gerilme köprü voltajı

$l_0$  = Numunenin ilk boyu'dur.

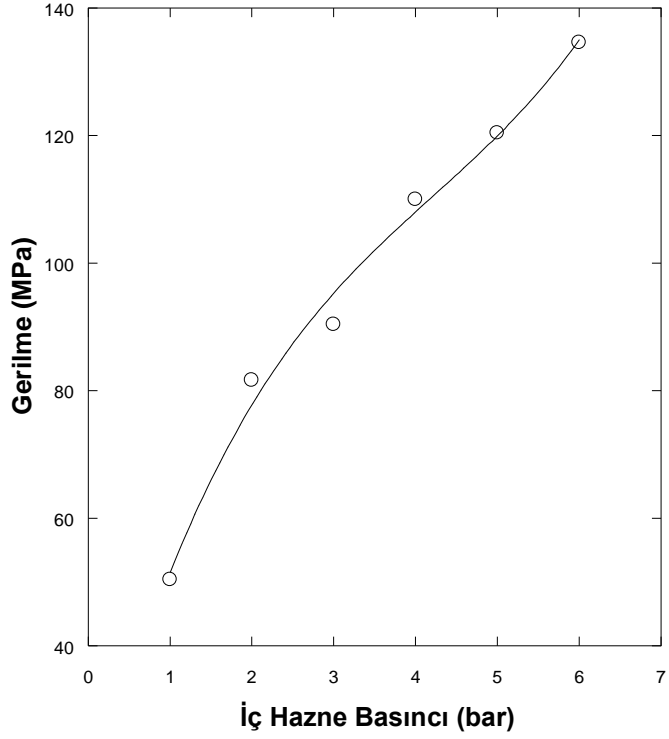


Gaz tabancasında 1-6 bar aralığında değişen iç hazne basınçları kullanılması durumunda alan çubukta elde edilen basma gerilme dalgasının zamana bağlı değişimi Şekil 2.11'de verilmiştir. İç hazne basıncının artışı ile birlikte alan çubukta elde edilen gerilme değerinin arttığı, şekilden açıkça görölmektedir. Ayrıca alan çubuk eksenini boyunca gerilme dalgasının ilerleyişi ile birlikte Pochhammer-Chree modlarının oluşumu ve bu modların osiloskop ve şekil değişim ölçer tarafından yakalanabilmiş olması; deney sırasında seçilen, kaydedilen data sayısı, kayıt hızı, kayıt zamanı, voltaj limitleri, kazanç faktörü gibi bazı önemli parametrelerin doğru şekilde tespit edilip uygulandığını göstermektedir.

Farklı iç hazne basınçlarında gerilmenin zamana bağlı değişim grafiğinden faydalanılarak farklı iç hazne basınçları ve 70 cm uzunluğunda çarpan çubuk kullanılması durumunda alan çubukta elde edilen ortalama tepe gerilme değeri değişimleri Şekil 2.12'de verilmiştir. Şayet bu tarz eğriler, mevcut çarpan çubuklar için tek seferlik olmak üzere üretilecek olursa numune içerisinde ilerlemesi istenilen azami gerilme değerini sağlayacak iç hazne basıncı kolaylıkla önceden tahmin edilebilmektedir. Elbette ki bu metot ancak yaklaşık sonuçlar vermektedir. Fakat en azından bir miktarda olsa zaman ve malzeme kaybını önlemesinden dolayı önem kazanmaktadır.



Şekil 2.11 Farklı basınçlarda gerilmenin değişimi.



Şekil 2.12 Farklı basınçlarda tepe gerilme değerinin değişimi.



Klasik çarpma mekaniği teorisine göre iki eş kesitli ve aynı malzemeden yapılmış silindirik çubuklardan birinin belirli bir ilk hız ile durağan halde bulunan diğerine çarpması durumunda çarpma hızı ile durağan haldeki çubukta meydana gelen gerilme arasında aşağıdaki ilişki mevcuttur. SHBB testi sırasında çarpan çubuğun alan çubuğa çarpması durumu bu hali temsil etmesinden dolayı burada ele alınacaktır. Bu bağıntı ;

$$\sigma_b = C_b \rho_b u \quad u = \frac{V_0}{2} \quad 2.2$$

$$\sigma_b = C_b \frac{E_b V_0}{c_b^2} = \frac{E_b V_0}{2 c_b} \quad 2.3$$

Burada,

$\sigma_b$  = Çubuktaki gerilme

$u$  = Partikül hızı

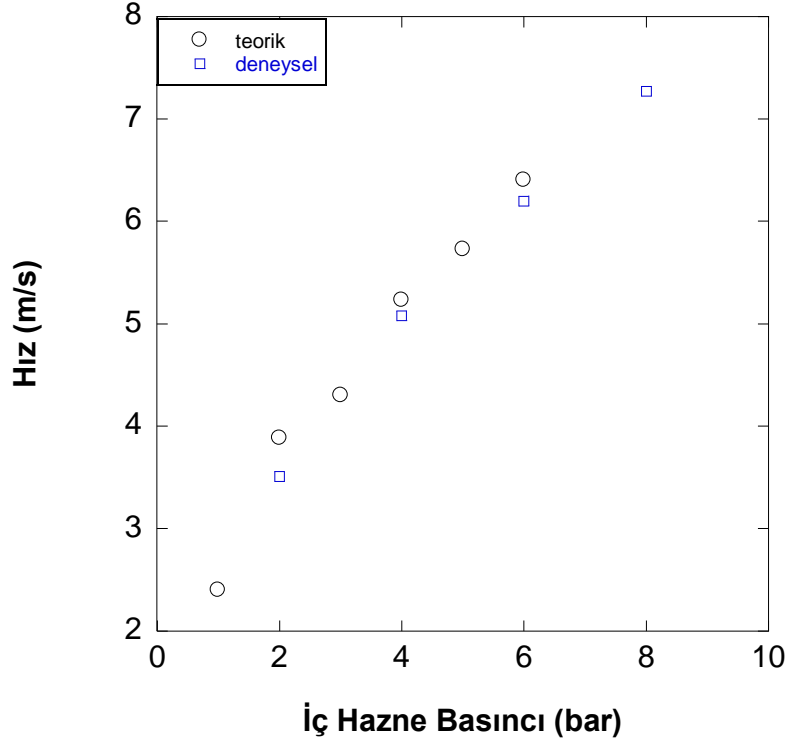
$v_0$  = Çubuk çarpma hızı

$C_b$  = Çubukta ilerleyen elastik dalganın hızı

$\rho$  = Çubuk malzemesi yoğunluğu

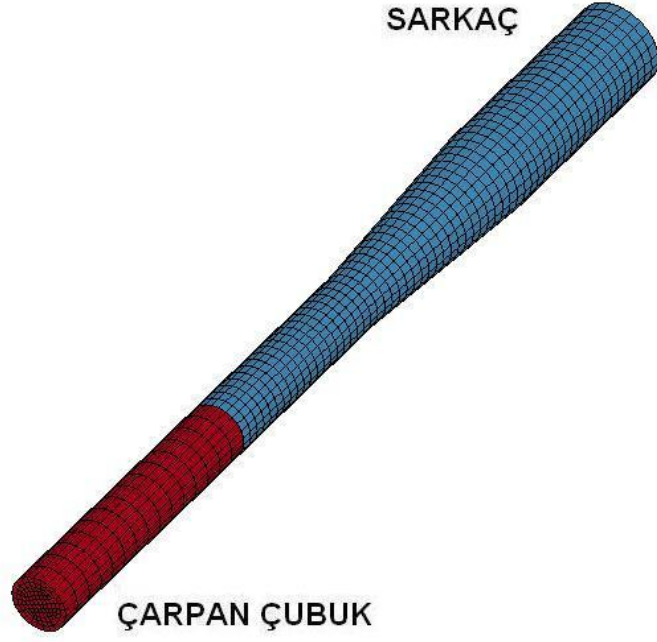
$E_b$  = Çubuk malzemesinin elastisite modülüdür.

Bu denklemler kullanılarak Şekil 2.13'deki gerilme değerlerine karşılık gelen çarpan çubuk hızları bulunmuş ve hız ölçer kullanılarak bu değerler doğrulanmıştır.

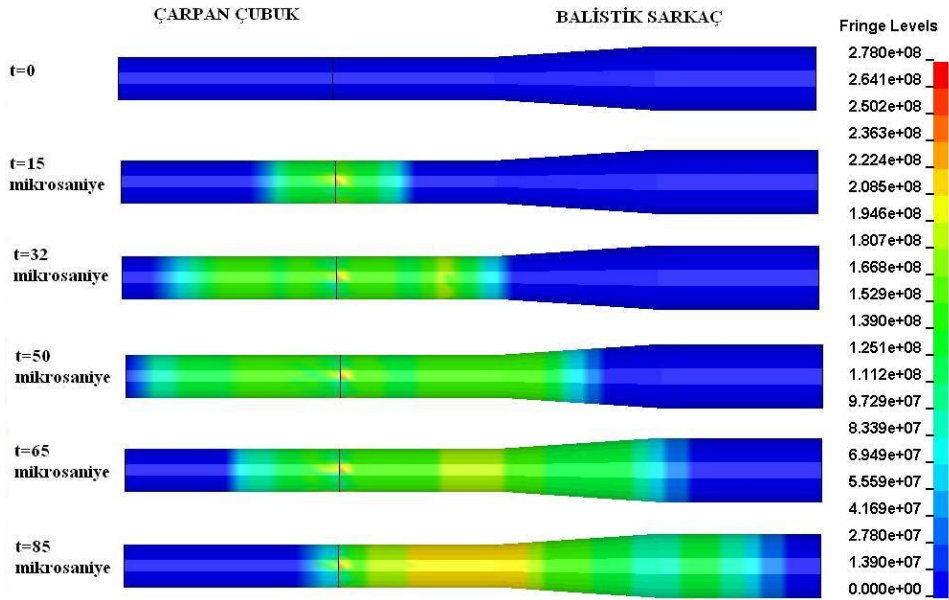


Şekil 2.13 Çarpan çubuk hızının iç hazne basıncına bağlı değişimi.

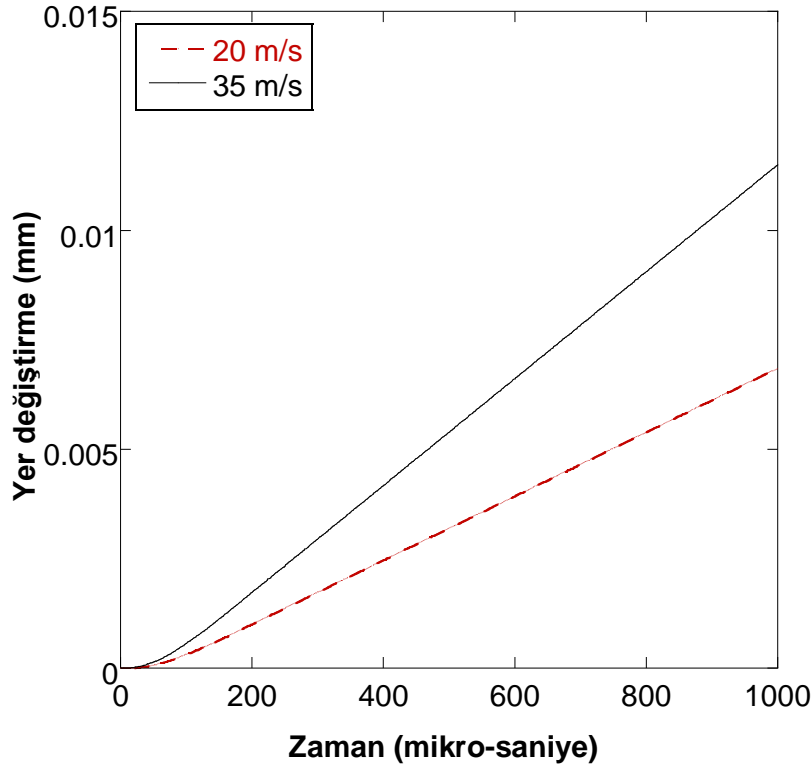
Proje başlangıcında Split Hopkinson Balistik Sarkacı (Şekil 2.14) dizaynı ve üretimi planlanmakla beraber LS-DYNA programı kullanılarak dizayn amaçlı yapılan oldukça detaylı ve parametrik nümerik simülasyon sonuçlarından bu tarz bir sistemin istenilen özelliklerde gerilme dalgası üretmeyeceği ve numunelerde ulaşılması istenilen yüksek şekil değiştirme miktarlarına en azından eldeki imkanlar kullanılarak ulaşılamayacağı tespit edilmiştir (Şekil 2.15 ve 2.16). Ayrıca sistemin istenilen deformasyon miktarlarını sağlayacak şekilde boyutlandırılması (oldukça büyük ve ağır çubuk boyutları ve doğal olarak bu büyük boyuttaki çubukları hızlandırabilecek çok daha büyük kapasiteli gaz tabancası imalatı ve bütün bunların kullanıcı can güvenliğini sağlayacak şekilde bir araya getirilmesi) düşünüldüğünde; tipik laboratuvar hacimlerinde güvenli olarak çalışabilecek hale getirilememesi en büyük sınırlamayı ortaya koymuştur. Bu tarz bir sistem ileride uygun zaman ve çalışma mekanlarının sağlanabilmesi ile birlikte başka bir proje kapsamında ülkemizdeki bilimsel çalışma envanterine dahil edilebilir.



Şekil 2.14 Balistik sarkaç nümerik modeli.



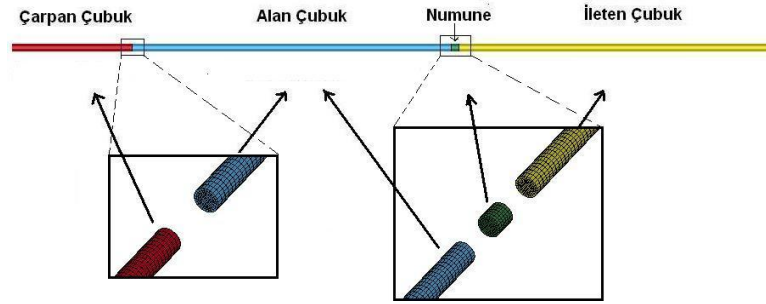
Şekil 2.15 Balistik sarkaça gerilmenin değişimi.



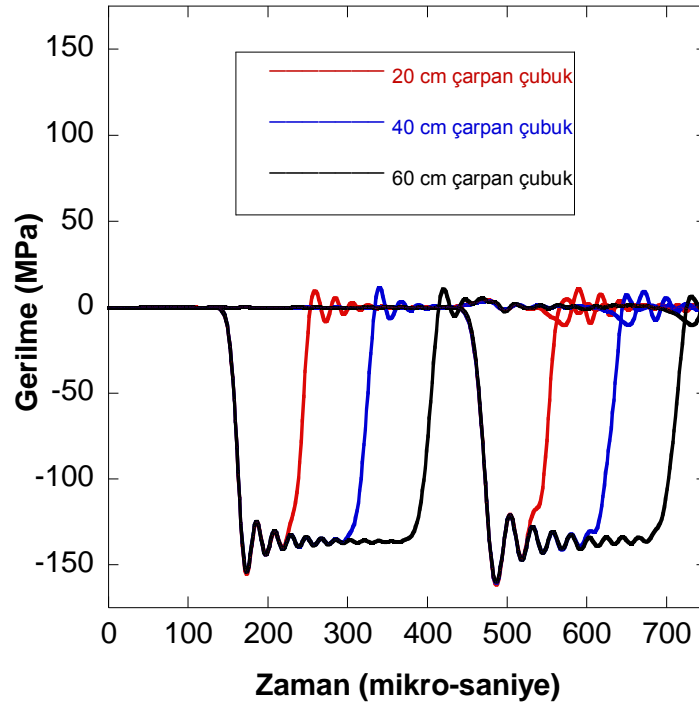
**Şekil 2.16** Farklı çarpma hızlarında sarkacın yer değiştirmesi.

Bu gelişmeler üzerine yine balistik sarkaç dizaynı ile benzerlikler taşıyan balistik sarkaç gibi büyük çarpma alanı kesitine sahip ve ayrıca tipik patlama yüklerine maruz kalan malzemelere etki eden gerilme ve Şekil değiştirme değerlerine ulaşabilen büyük çaplı bir SHBB'nın dizayn edilmesi ve geliştirilmesi uygun görülmüştür. Sistemin çalışabilirliği detaylı nümerik simülasyonlar ve analizler ile gösterilmiştir. Bu revize dizaynda (Şekil 2.17) kullanılan çubukların boyları ve çapları klasik SHBB'dan oldukça farklıdır. Dizayn sırasında LS-DYNA yazılımı kullanılarak tipik patlama olayları esnasında karşılaşılması muhtemel gerilme Şekil ve Őiddetlerini oluşturabilecek çarpan, alan ve ileten çubuk boyları tespit edilmiştir (Şekil 2.18). Bu tarz bir dizaynda hem eşit hem de farklı boylarda alan ve ileten çubukların kullanılması gerekmektedir. Eşit boyda alan ve ileten çubukların kullanılması durumunda numunede çoklu gerilme dalgası iletiminin gerçekteşebilmesi, bu dizaynın en büyük avantajını oluşurmaktadır. Büyük çaplı Split Hopkinson Basınç Barının imalatı sırasında enstitümüzde hali hazırda devam eden başka bir bilimsel araştırma projesi kapsamında üretimi gerçekteşirilmiş olan bir temel inşaatı ve gaz tabancasının kullanılmasına karar verilmiş olup, bu

sebeple sadece çapları 42 mm, boyları 2x155, 120, 60, 40, 30, 20, 10 cm olan 7075-T6 alüminyum çubuklar temin edilmiş ve bu çubuklar mevcut sisteme entegre edilmiştir. Bu sistemde de klasik SHBB teorisinin kullanılabilmesi deney sırasında sistemden elde edilebilecek kullanılabilir data miktarını oldukça arttırmakta ve ayrıca çubuk çaplarının büyük olması da deney sırasında gerilme dalgasının geniş alanlara yayılabilmesini sağlamaktadır. Bu sayede metalik köpük gibi gözenekli yapılar ve kompozitler gibi hücre yapılı malzemelerin deneyleri sırasında numune içerisindeki birim hücre sayısının artması sağlanmaktadır.



Şekil 2.17 Büyük çaplı SHBB'ı nümerik modeli.



Şekil 2.18 Farklı boylarda çarpan çubuklarla elde edilen gerilme değerleri.

Bahsi geçen dizayn prosesinin sonucunda elde edilen sonuçlarla uyumlu olarak büyük çaplı Split Hopkinson Basınç Barının üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.19). Belirli basınçlardaki tepe gerilme değerlerine karşılık gelen çarpan çubuk hızları Şekil 2.20'de verilmiştir.



Şekil 2.19 Büyük çaplı SHBB.

SHBB sisteminin mekanik ve elektriksel bileşenlerinin tamamlanmasının ardından, kalibrasyon amaçlı testlerle geçilmiştir. Deneyler sırasında kaydedilen voltaj-zaman sinyallerinin mühendislik açısından anlamlı hale gelmesi gerekmektedir. Bu amaçla SHBB teorisini oluşturan gerilme ve uzama formüllerinin kullanılmaktadır. Bu formüller;

$$\sigma(t) = E_0 \cdot \frac{A_0}{A} \cdot \epsilon_T(t) \quad 2.4$$

$$\epsilon(t) = -\frac{2C_0}{L} \int_0^t \epsilon_R d(t) \quad 2.5$$

Burada;

A = Numune kesit alanı

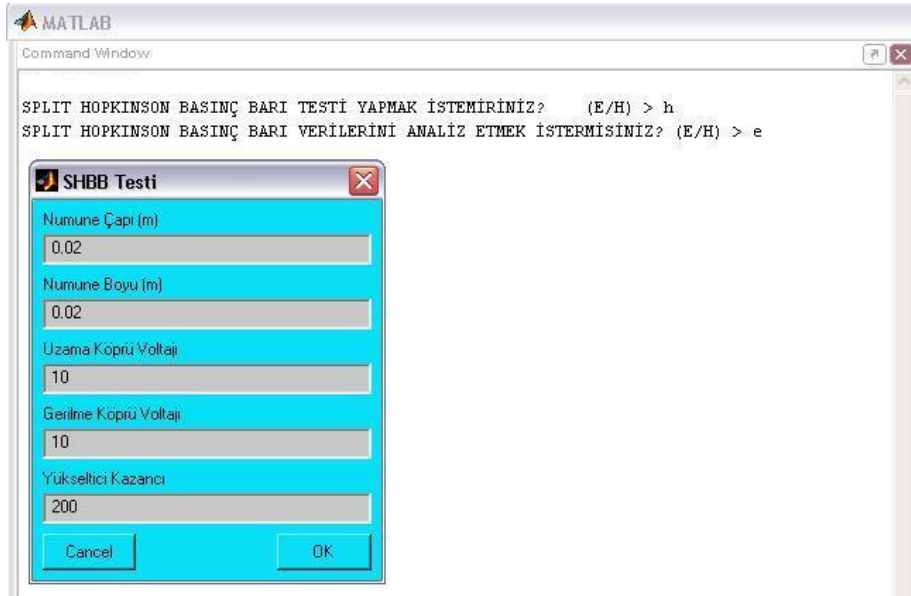
A<sub>0</sub> = Alan veya iletken çubukların kesit alanı

E<sub>0</sub> = Çubuk malzemesinin elastisite modülü

$C_0$  = Çubuk malzemesi içerisinde elastik dalga ilerleme hızı

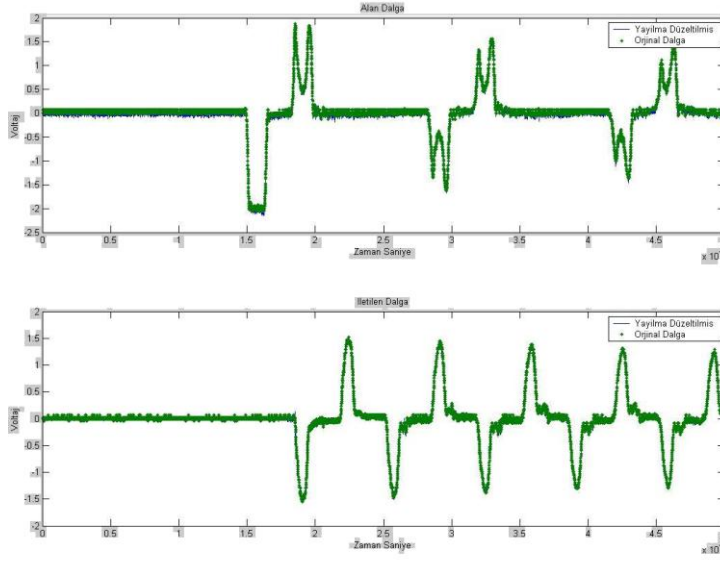
L = Numune boyu'dur.

Osiloskop tarafından kaydedilen voltaj-zaman dadasının her testin sonunda nispeten uzun ve matematiksel yoğun bir dizi işleminden geçmesi gerekmektedir. İşte bu işlemleri kolaylaştırmak, zaman kaybını önlemek ve kullanıcı hatalarını en aza indirmek amacı ile MATLAB kullanılarak bütün bu işlemleri hızlı ve güvenilir şekilde yapabilecek bir Matlab programı hazırlanmıştır. Bu program hesaplamalar esnasında gerekli olacak köprü voltaj değerleri, numune boyu ve çapı gibi bazı ek parametrelerin de bilgi olarak girilmesinin ardından, elde edilen dataları (voltaj-zaman) daha sonra anlamlı data (gerilme-şekil değiştirme, şekil değiştirme-şekil değiştirme hızı) haline getirmektedir. Osiloskoptan alınan sinyalin yayılma (dispersion) etkisini düzeltmek için bir dizi hızlı Fast Fourier dönüşümü gerçekleştirilmektedir. SHBB sisteminin işleyişini tanımak ve testler sırasında yazılıma gerekli giriş datalarını sağlamak amacıyla bazı ön testler yapılmış ve test dataları Şekil 2.20'de gösterilmiştir.



Şekil 2.20 Matlab programı kullanıcı ara yüzü.

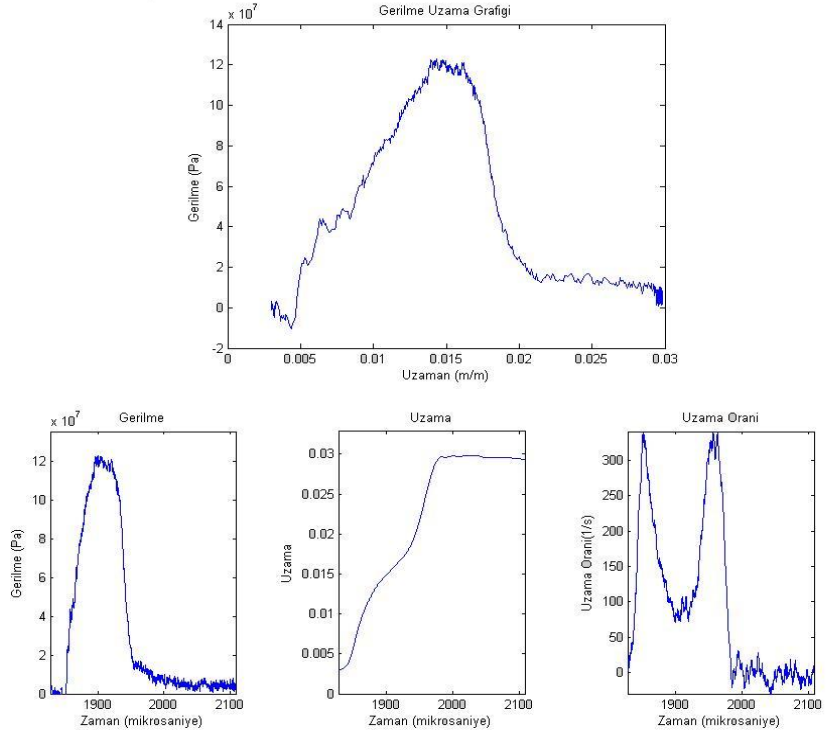
Dispersion etkisi özellikle köpük metal tarzı malzemelerin testi sırasındaki çoklu dalga geçişi esnasında oldukça önem kazanmaktadır. Program dispersion düzeltmesi yapılmış datayı ekrana gerçek zamanlı olarak çizmekte ve analiz edilmesi istenilen sinyalin başlangıç ve bitiş yerlerini kullanıcıya sormaktadır (Şekil 2.21).



Şekil 2.21 Alan, yansıyan ve iletilen sinyaller.

Program otomatik olarak Şekil 2.22’de görülen gerilme, şekil değiştirme ve şekil değiştirme hızı grafiklerini çizebilmektedir.





Şekil 2.22 Matlab programı sonuç eğrileri.

### **3. ZIRH SİSTEMİNİ OLUŞTURAN MALZEMELERİN MEKANİK KARAKTERİZASYONU**

Çok katmanlı malzemelerin gerilme dalgası ilerleyiş özellikleri; her bir katmanın kalınlığına, malzeme özelliklerine ve komşu katmanlara bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca katmanların arasına lastik, teflon, metalik köpük gibi lineer elastik olmayan malzemelerin yerleştirilmesi durumunda bu malzemelerin içerisindeki gerilme dalga ilerleyişi hızının malzemenin maruz kaldığı gerilme ve şekil değiştirme değerlerine bağlı olarak değişmesinden dolayı, akustik empedans ve iletim/yansıma katsayıları da zamana bağlı olarak değişmektedir. Bu durum, gerilme dalgası ilerleyişi analizini oldukça güçleştirmektedir.

Klasik Split Hopkinson Basınç Barı teorisinin bu analizde tek başına yetersiz kalmasından dolayı, bu tarz malzemelerdeki gerilme dalgası ilerleyişi, ancak deneysel ve nümerik metotlar bir arada kullanılarak yapılabilmektedir. Bu noktada Split Hopkinson Basınç Barı Testi malzemelerin dinamik mekanik özelliklerinin tespitini ve aynı zamanda malzemelerin içerisinde kontrollü bir gerilme dalgasının ilerleyişini sağlamaktadır. Elde edilen dinamik mekanik özellikler, nümerik simülasyonlardaki malzeme modellerinin sabitlerini bulmada kullanılırken; kontrollü gerilme dalgasının çok katmanlı malzeme sistemlerinin içerisine iletilebilmesi ise bu gerilme dalgasının sistem içerisinde nasıl ilerlediğinin anlaşılabilmesini sağlamaktadır.

Proje dahilinde öncelikle çok katmanlı malzeme sistemlerini oluşturan bileşenlerin (seramik, ara yüzey malzemeleri ve kompozit) tek katmanlı hallerinin deneyleri ve nümerik simülasyonları yapılmaya başlanmıştır. Tek katmanlı malzemelerde gerilme dalgası ilerleyişinin başarı ile simüle edilebilmesiyle: a) nümerik modellerin doğruluğu teyit edilmiş, b) test sırasında tespit edilmesi zor veya hatta imkansız olan bazı ek parametrelerin (numunenin her noktasındaki gerilme ve şekil değiştirme bileşenleri, ara yüzey kuvvetleri, yer değiştirme ve hız değerleri vs.) nümerik modelden alınabilmesi sağlanmıştır. Ardından daha komplike sistemler olan çok katmanlı malzemeler güven içerisinde simüle edilip deneysel olarak doğrulanmıştır. Bu noktadan sonra çalışmalar hem nümerik hem deneysel olmak üzere paralel şekilde yürütülmeye başlanmıştır.

### 3.1.Zırh sistemi malzemeleri

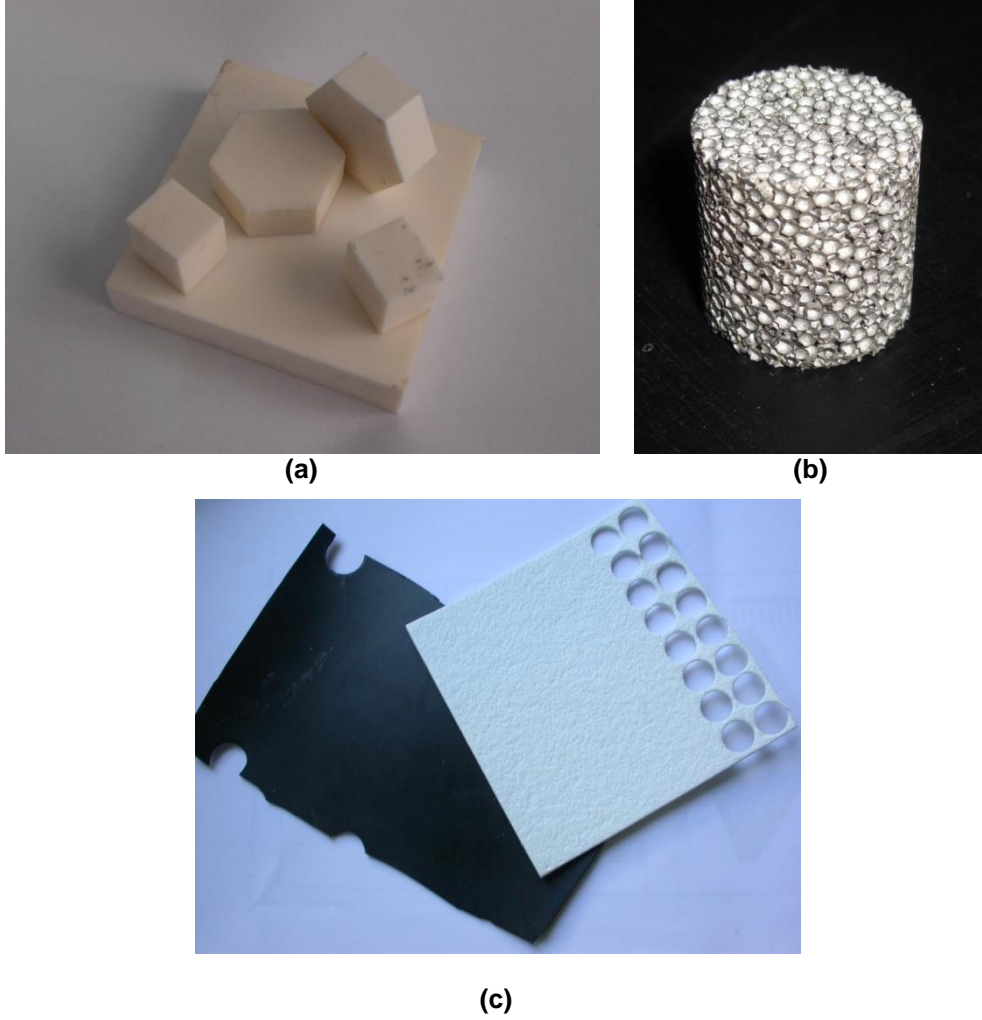
Split Hopkinson Basınç Barı test sistemlerinin imalatının tamamlanmasıyla birlikte test edilecek malzemelerin üretimi veya temini yoluna gidilmiştir. Zırh sisteminin ana bileşenlerinden olan Alümina seramik malzeme (CORBIT Square tiles (5x5cm) ve Corbit Hexagon) proje kapsamında temin edilmiştir. Kullanılan zırh seramiğinin mekanik özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Zırh sisteminin bir diğer ana bileşeni olan kompozit plakalar ise İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü imkanları kullanılarak üretilmiştir. Alternatif ara yüzey malzemelerinden olan 316L paslanmaz çeliğinden içi boş metal küre yapılar (Metallic Hollow Spheres, MHS), EPDM lastiği ve Teflon proje kapsamında temin edilirken, (Şekil 3.1) Alüminyum metalik köpük malzeme ise İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsündeki imkanlar kullanılarak üretilmiştir. Seramik dışında temin edilen malzemelerin mekanik özellikleri ise Tablo 3.2'de verilmiştir.

**Tablo 3.1 Alümina zırh seramiği mekanik özellikleri.**

Malzeme	Elastik Modülü (GPa)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson Oranı
%99.8 Alümina Seramik	70	3900	0.22

**Tablo 3.2 Ara yüzey malzemelerinin mekanik özellikleri**

Malzeme	Elastik Modülü (GPa)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson Oranı
EPDM lastik	-	1200	0.4995
Teflon	3.65	760	0.25
MHS	-	520	-

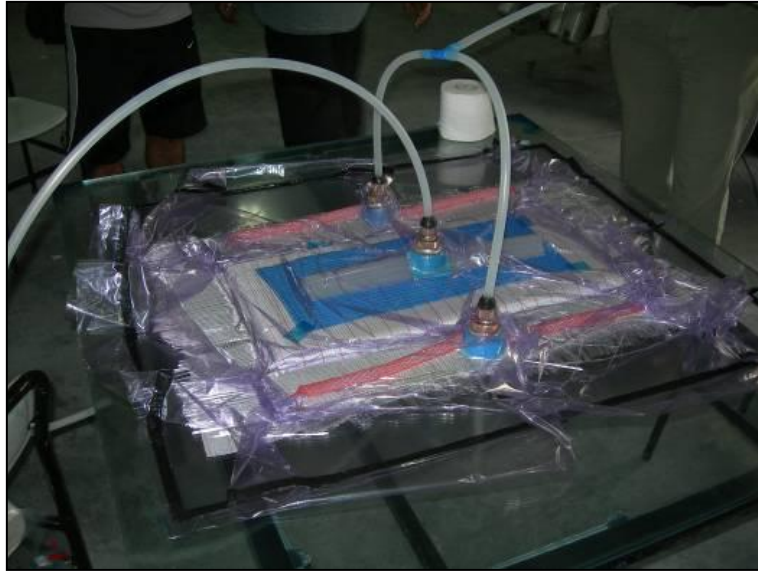


**Şekil 3.1 Zırh sistemi malzemeleri: a) Alümina, b) MHS ve c) EPDM ve Teflon.**

Kompozit malzemelerin üretiminde VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) tekniği kullanılmıştır. Bu amaçla proje kapsamında infüzyon sarf malzemeleri (E-Glass fiberler, CRYSTIC703PA polyester, ayırıcı film, dağıtıcı ortam vb.) tedarik edilmiştir (Şekil 3.2).



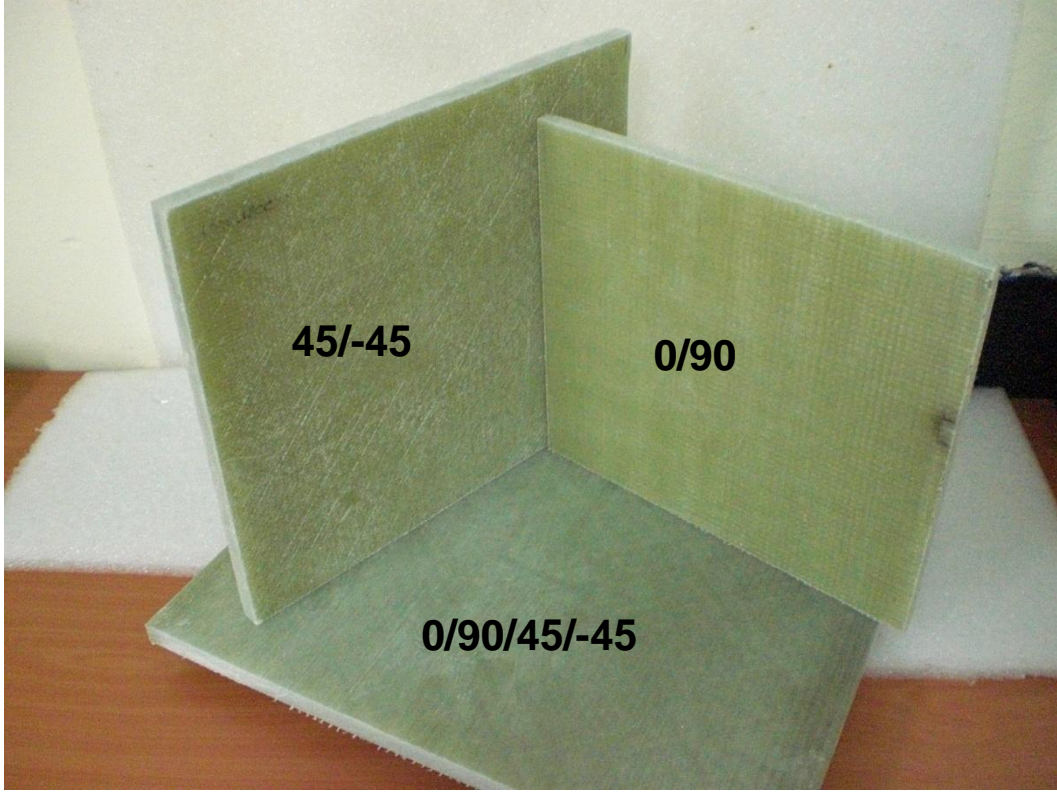
(a)



(b)

**Şekil 3.2 VARTM kompozit üretim istasyonu.**

Kompozit üretim istasyonunun başarıyla çalışır hale getirilmesinden sonra projede kullanılması planlanan kompozit konfigürasyonlarında (0/90, 45/-45, 0/90/45/-45 oryantasyonlarında ve sırasıyla 600 gr/m<sup>2</sup>, 600 gr/m<sup>2</sup>, 1200 gr/m<sup>2</sup> alansal yoğunluklarda) plakaların üretimine geçilmiştir. Şekil 3.3'de bu yöntemle üretilmiş çeşitli kompozit plakalar görülmektedir.

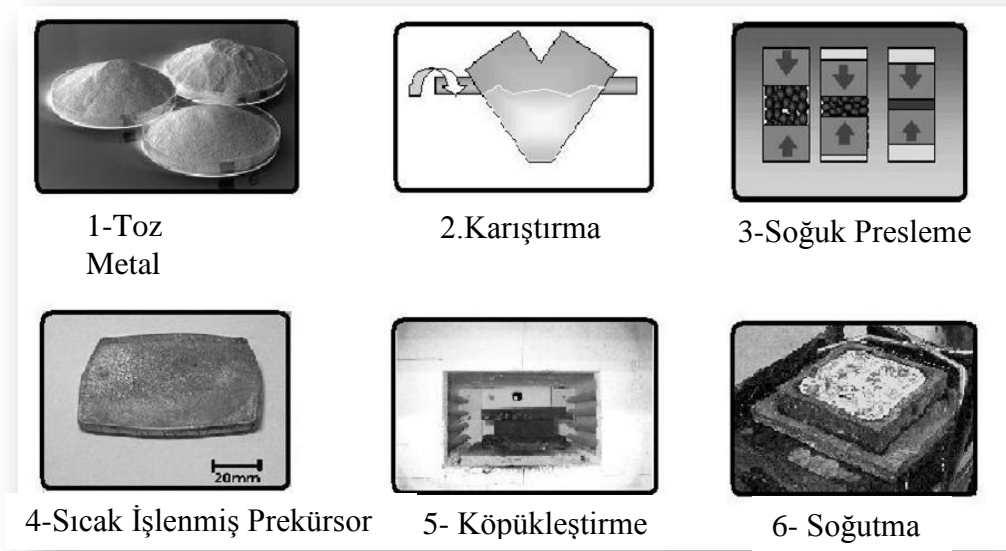


**Şekil 3.3 Üretilmiş çeşitli kompozit plakalar.**

Proje kapsamında kullanılan ara yüzey malzemelerinden alüminyum metalik köpük (Şekil 3.4), İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsünde üretilmiştir. Alüminyum köpük malzemenin üretim süreci şeması Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Bu noktada projenin ana amacı, köpük metal üretiminden ziyade bu malzemelerin yüksek hız mekanik davranışlarının incelenmesi olduğundan dolayı üretim prosesi ile ilgili özet bilginin verilmesi yeterli görülmüştür. Kısaca açıklanacak olursa öncelikle alüminyum toz malzeme belirli oranlarda homojen dağılım gösterene kadar karıştırılmaktadır. Daha sonra bu karışım soğuk kalıplama yöntemi ile bir kalıp içerisinde sıkıştırılarak kompakt bir yapı oluşturulmaktadır. Oluşturulan bu kompakt yapı fırın içerisine konularak fırın içerisinde köpükleşmenin gerçekleşmesi sağlanmaktadır. En son kademedeki fırın içerisindeki malzeme oda sıcaklığına soğutulmaktadır. Proje kapsamında üretime gerekli sarf malzemeler (alüminyum toz) temin edilmiş ve numuneler (Şekil 3.4) üretilmiştir.



Şekil 3.4 Alüminyum köpük.



Şekil 3.5 Alüminyum köpük üretim prosesi.

### Numune hazırlanışı

Zırh sistemlerinde kullanılması planlanan malzemelerin üretimi ve temininden sonra, bu malzemelerden SHBB test numuneleri hazırlanmaya başlanmıştır. Öncelikle üretilen kompozit levhalardan çeşitli malzeme yönlerinde (katman düzleminde veya katman düzlemine dik) numuneler kesilerek çıkartılmış ve numuneler hazırlanmıştır. Test sonuçlarına ve özellikle hasar analizine numune boyutları ve yüzey kalitesi önemli ölçüde etki etmektedir. Standart boyutlarda ve yüzey kalitesinde numune elde etmek amacıyla elmas uçlu kesiciler (core-drill) temin edilmiştir (Şekil 3.6). Böylece hem boyut bakımından eş numuneler elde



edilmiş hem de alümina seramik gibi çok sert malzemelerden düzgün yüzeyli numune çıkarabilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.6. Elmas uçlu kesici.

Şekil 3.7 (a) ve (b)'de kompozit malzemeden 9.7 mm çapında ve 10.8 mm boyunda, katman düzleminde (in-plane, x veya y) ve bu düzleme dik (transverse, z) olarak kesilmiş numuneler görülmektedir.



(a)

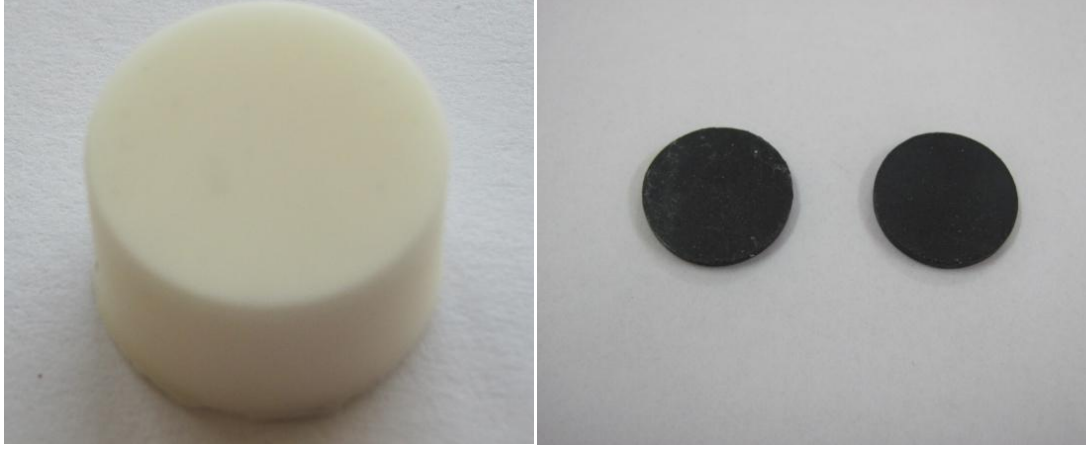


(b)

Şekil 3.7 Kompozit numuneler.

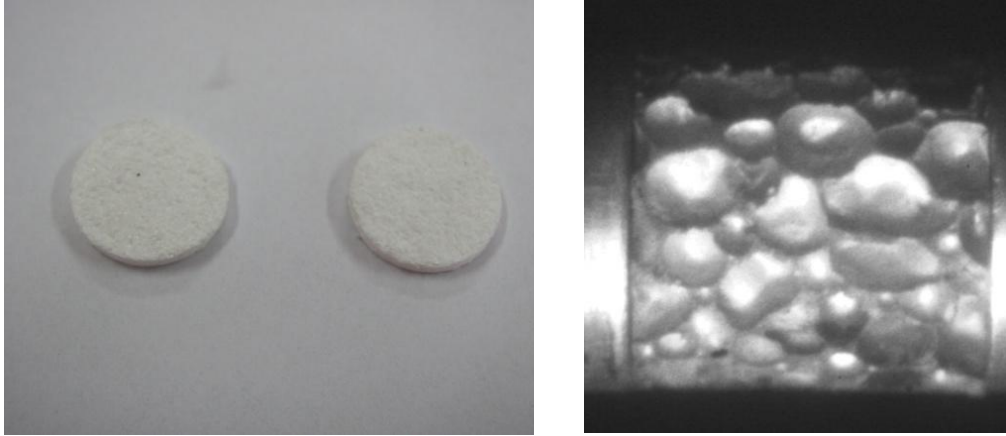


Core-drill kullanılarak alümina seramik, alüminyum köpük, EPDM lastik ve Teflon numuneler (Şekil 3.8) çıkartılmıştır. Bu noktada SHBB testi için gerekli numune hazırlıkları tamamlanmıştır.



(a)

(b)



(c)

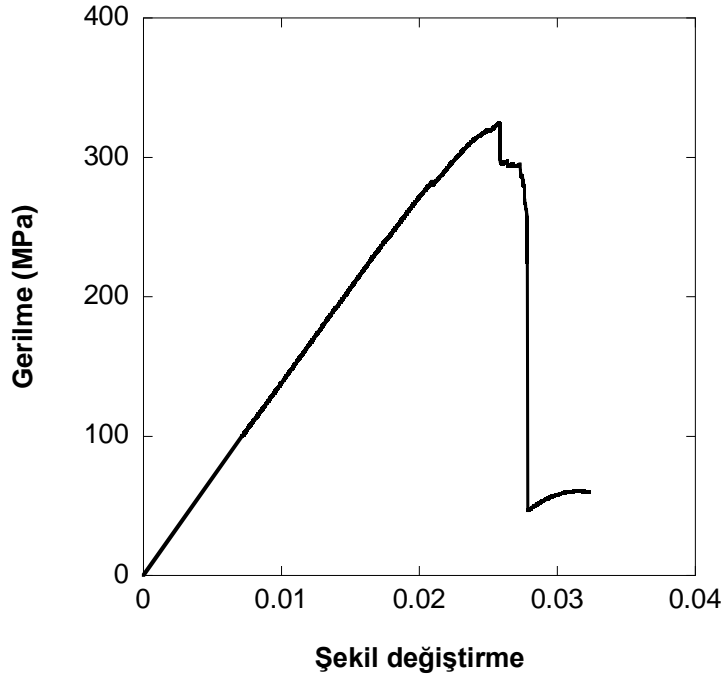
(d)

Şekil 3.8 SHBB numuneleri.

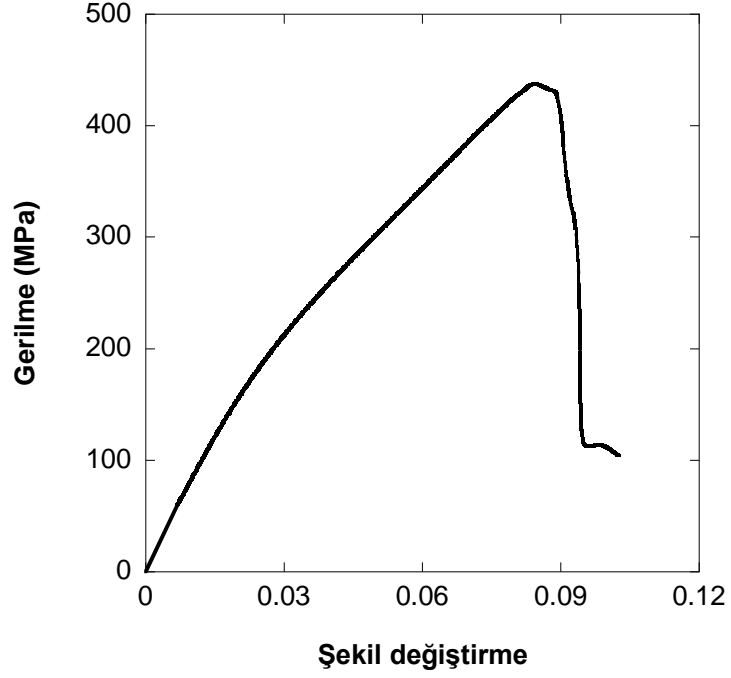
## 3.2.Zırh sistemi malzemelerinin mekanik karakterizasyonu ve malzeme model parametrelerinin bulunuşu

### 3.2.1. Tek katmanlı malzemeler

Zırh sistemini oluşturan malzemelerin karakterizasyonuna kompozit katmanla başlanmıştır. Bu amaçla aynı boyutlardaki numunelere hem düşük şekil değıştirme hem de yüksek şekil değıştirme hızlarında basma testleri yapılmıştır. Test matrisi oluşturulurken her test yönü (katman düzleminde ve bu düzleme dik) ve her şekil değıştirme hızı için en az üçer deney seçilmiş ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Şekil 3.9-11’de katman düzlemi ve katman düzlemine dik olarak yapılan quasi-statik basma testi (0.001 1/s) sonuçları farklı katman konfigürasyonları (0/90, +45/-45 ve 0/90/+45/-45) için verilmiştir.

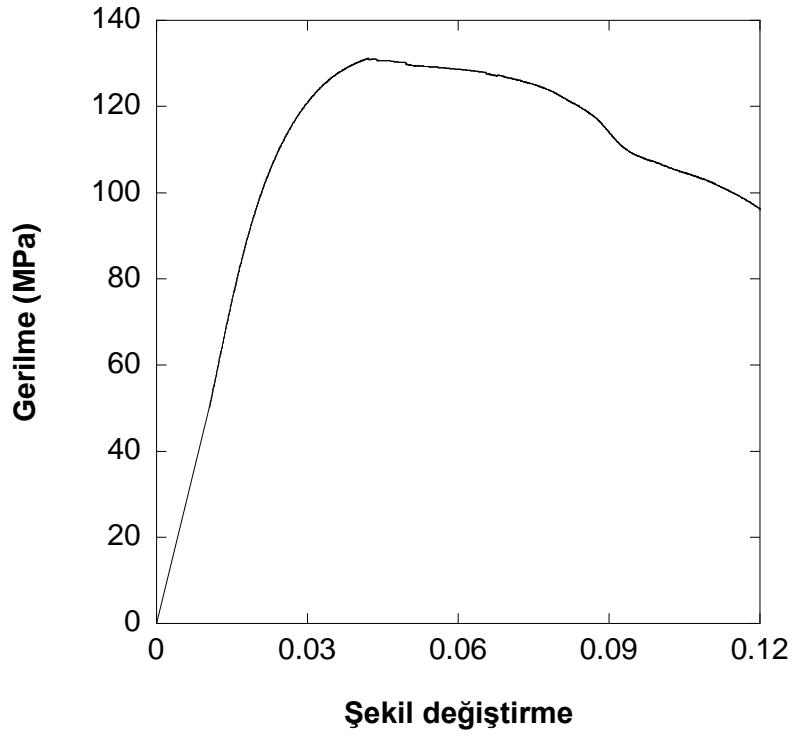


(a)

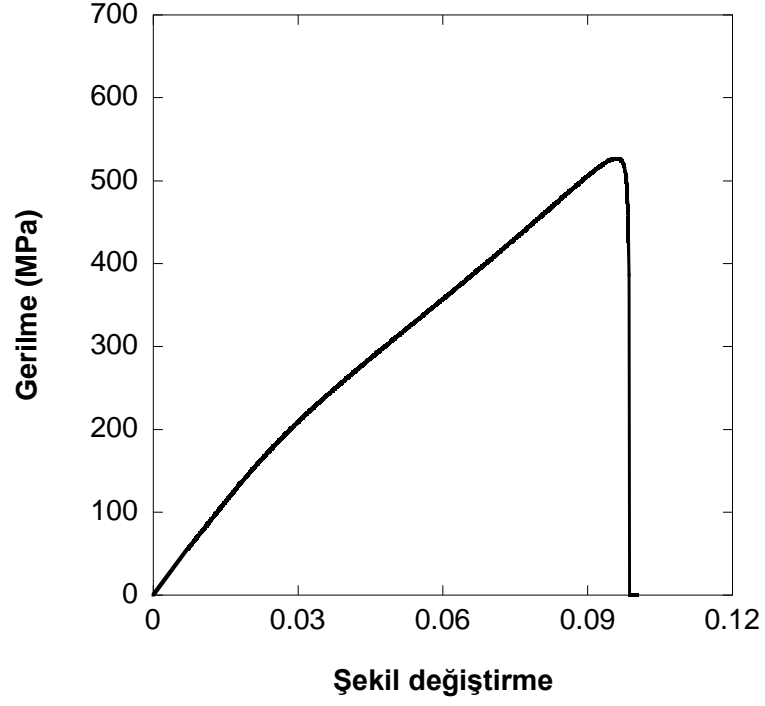


(b)

Şekil 3.9 0/90 E-Glass kompozit malzemenin gerilme şekil değiştirme eğrileri: a) katman düzleminde ve b) katman düzlemine dik.

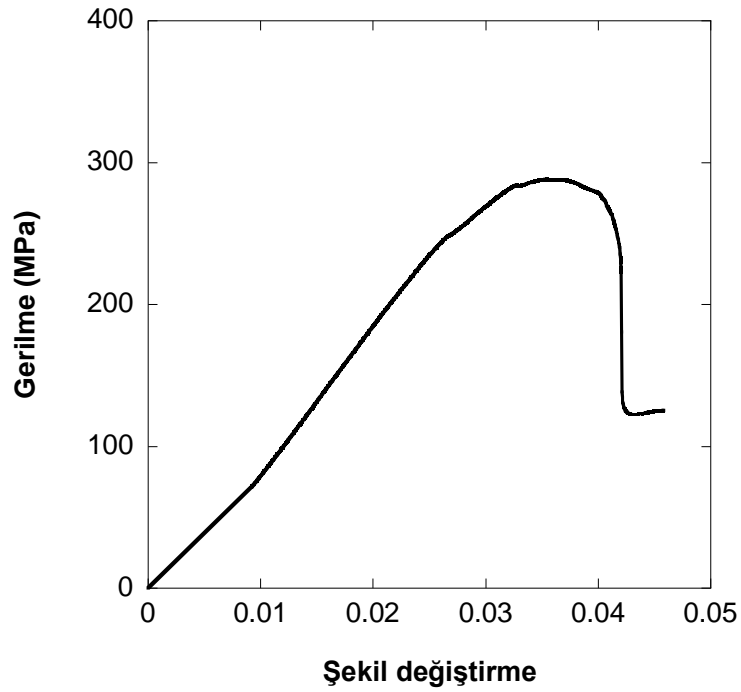


(a)

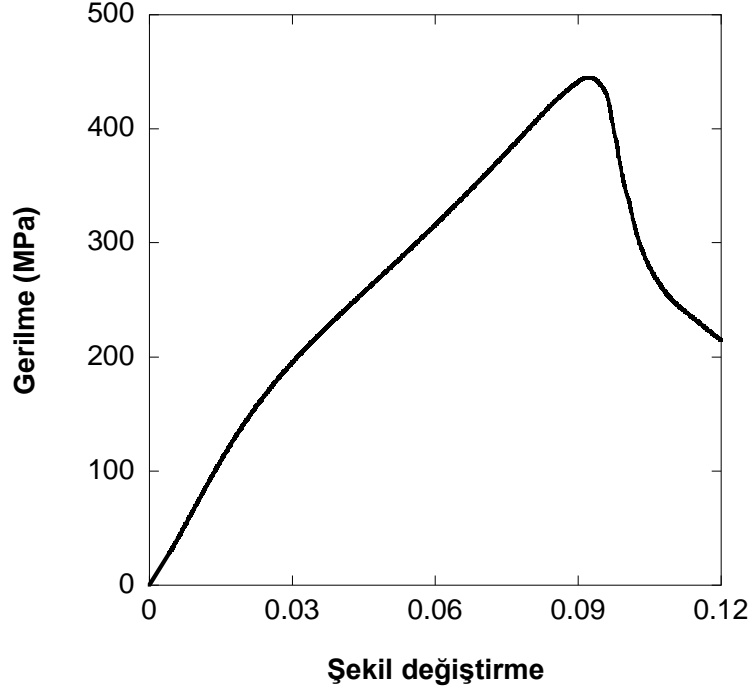


(b)

Şekil 3.10 45/-45 E-Glass kompozit malzemenin gerilme şekil değiştirme eğrileri: a)katman düzleminde ve b) katman düzleminde dik.



(a)

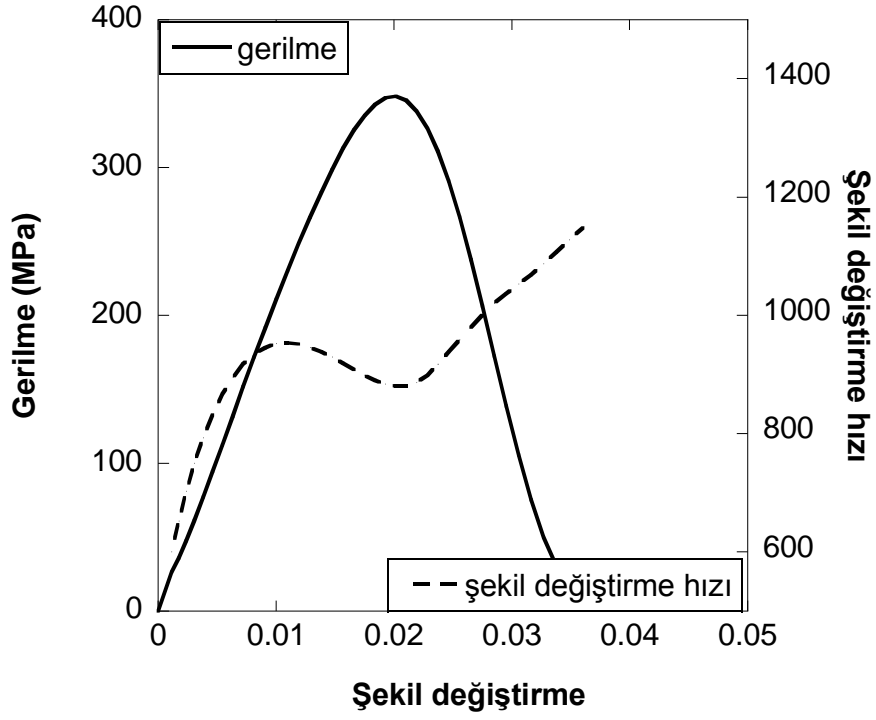


(b)

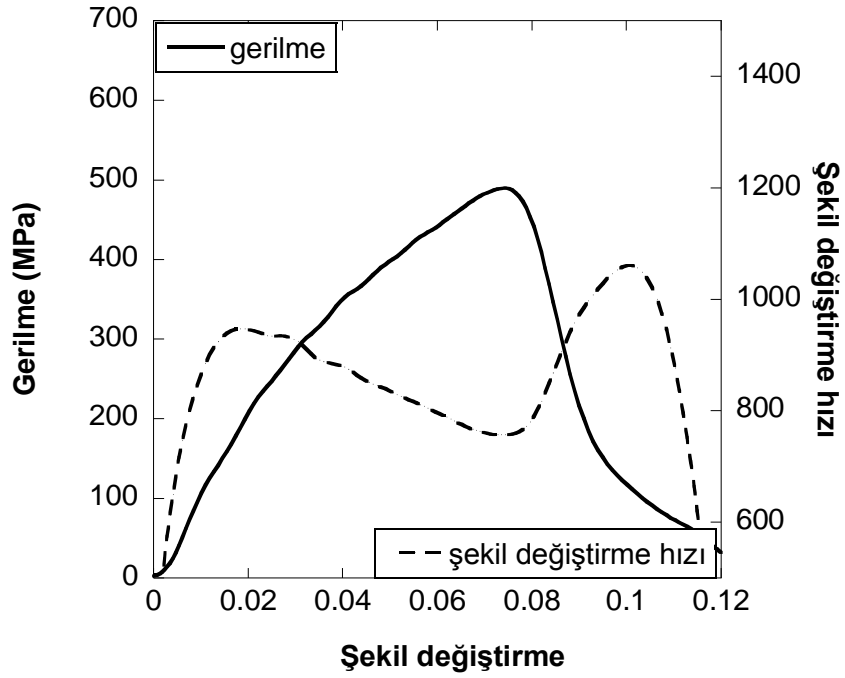
Şekil 3.11 0/90/45/-45 E-Glass kompozit malzemenin gerilme şekil değiştirme eğrileri:  
a) katman düzleminde ve b) katman düzlemine dik.

Şekil 3.12-14 (a) ve (b)'de ise sırasıyla katman düzlemi ve bu düzleme dik farklı konfigürasyonlardaki numunelere ait SHBB test sonuçları görülmektedir.

Yüksek şekil değiştirme hızlarında yapılan bu deneylerde ortalama şekil değiştirme hızı  $850 \pm 50 \text{ s}^{-1}$  olarak bulunmuştur. Farklı konfigürasyonlardaki kompozit numunelerin Split Hopkinson Basınç Barı ve quasi-statik basma deneylerinden elde edilmiş gerilme-şekil değiştirme diyagramları Şekil 3.15-17 (a) ve (b)'de karşılaştırılmıştır.

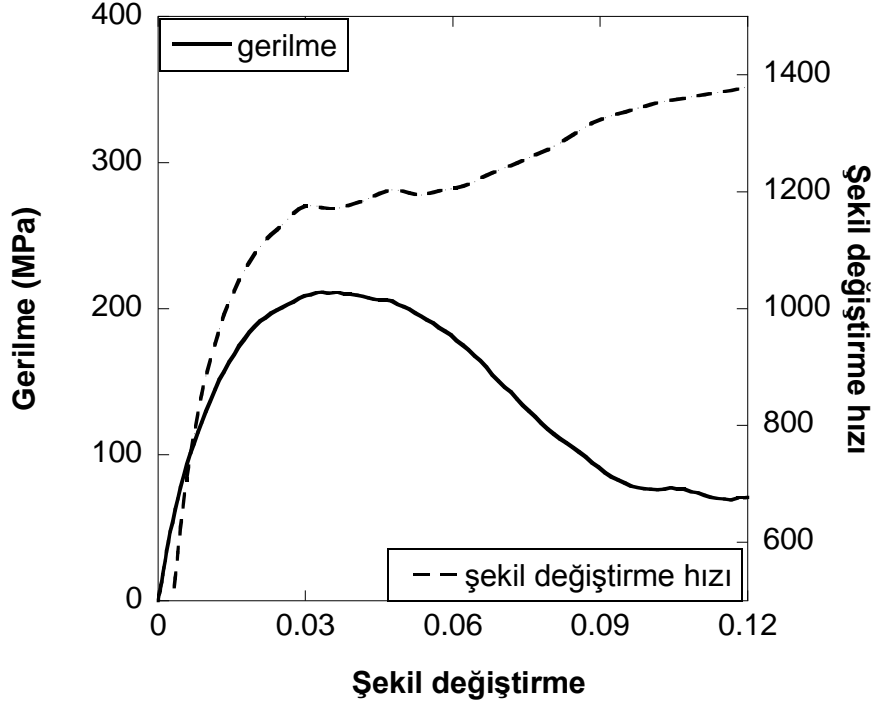


(a)

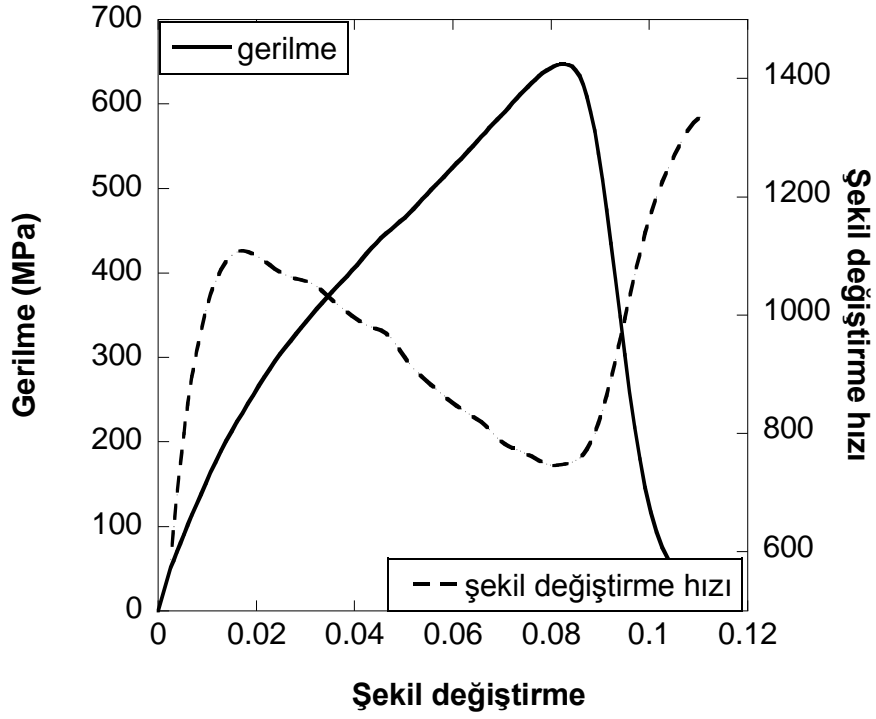


(b)

Şekil 3.12 0/90 E-Glass kompozit malzemenin SHBB deney sonucu: a) katman düzleminde ve b) katman düzlemine dik.

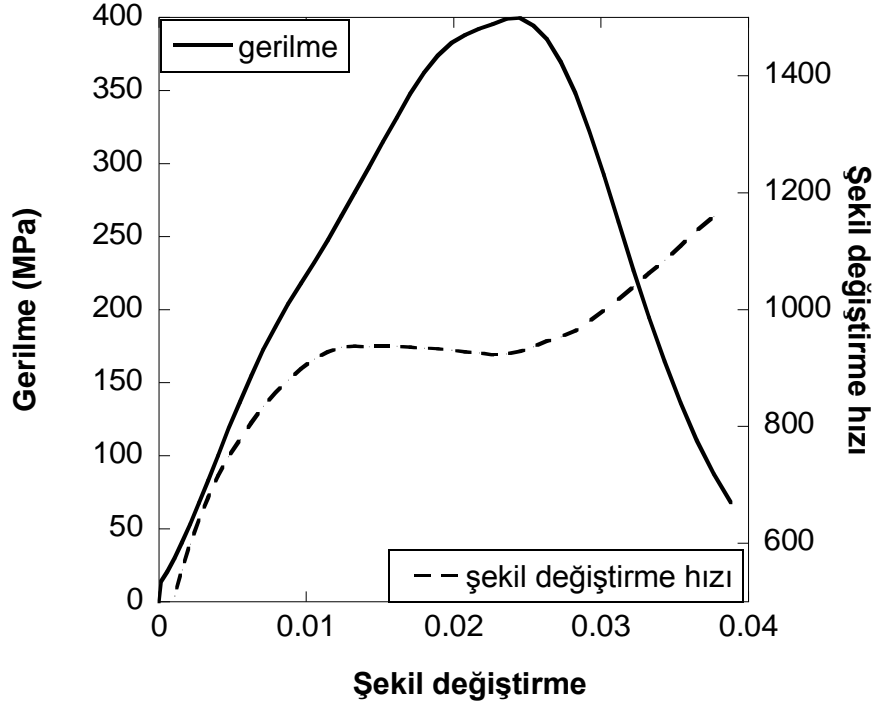


(a)

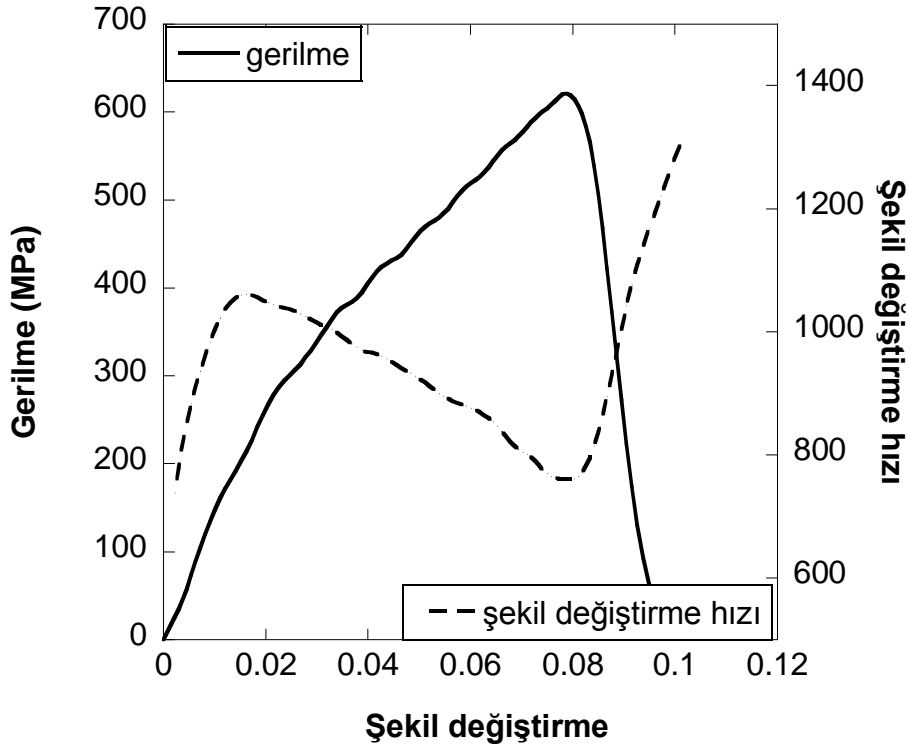


(b)

Şekil 3.13 45/-45 E-Glass kompozit malzemenin SHBB deney sonucu: a) katman düzleminde ve b) katman düzlemine dik.



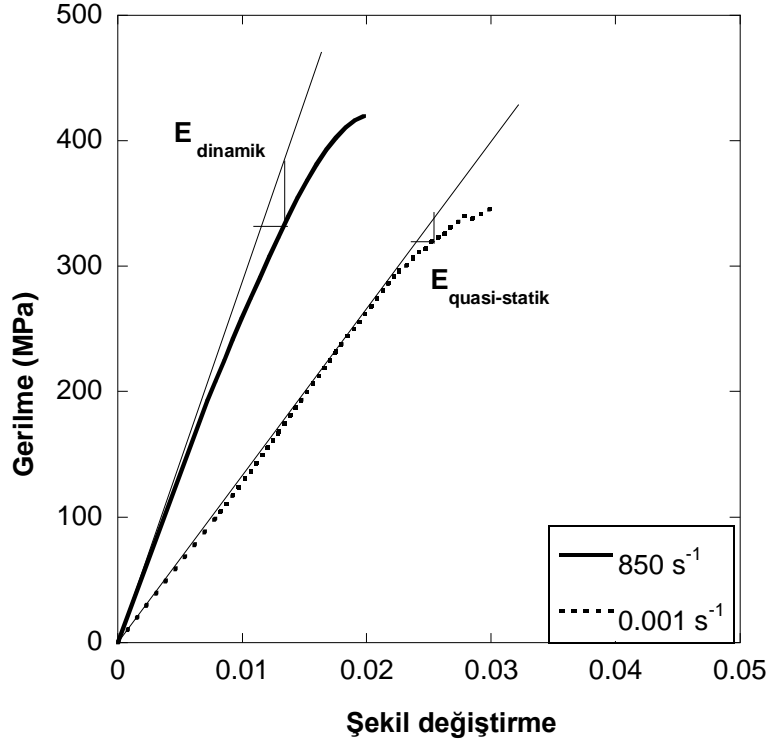
(a)



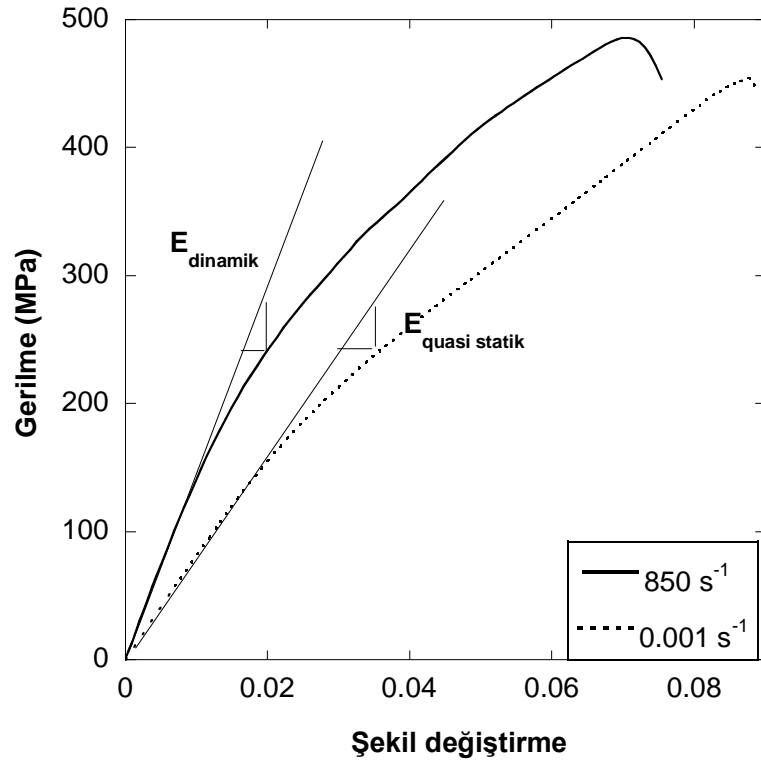
(b)

Şekil 3.14 0/90/45/-45 E-Glass kompozit malzemenin SHBB deney sonucu: a) katman düzleminde ve b) katman düzleminde dik.



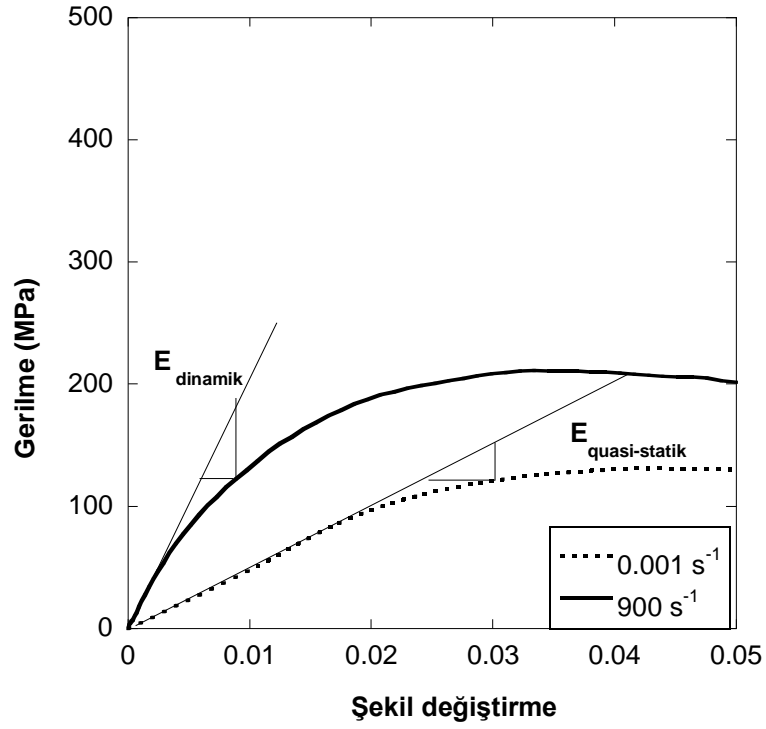


(a)

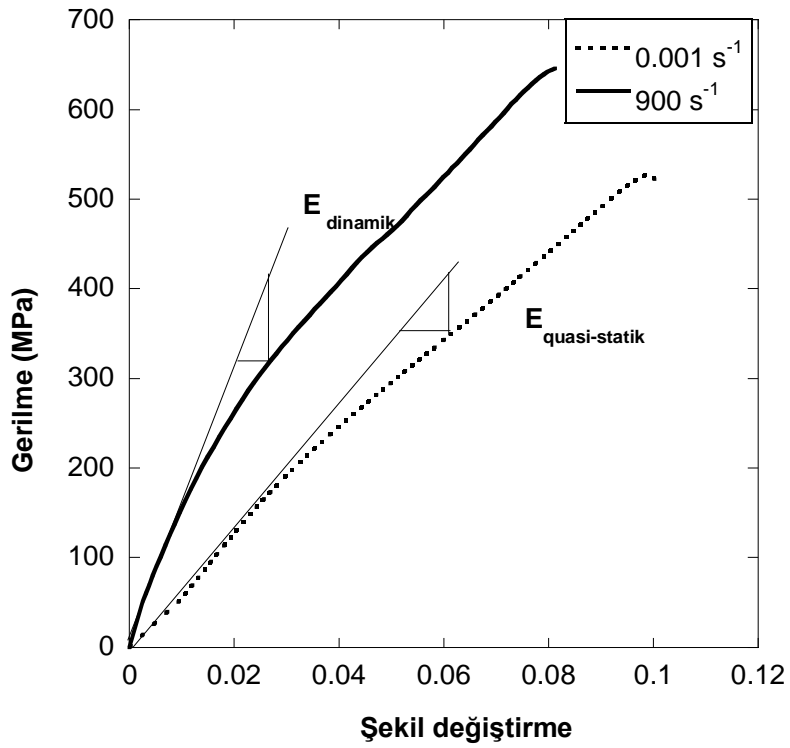


(b)

Şekil 3.15 0/90 E-Glass kompozit malzemenin gerilme şekil değıştirme eğrileri: a) katman düzleminde ve b) katman düzlemine dik.

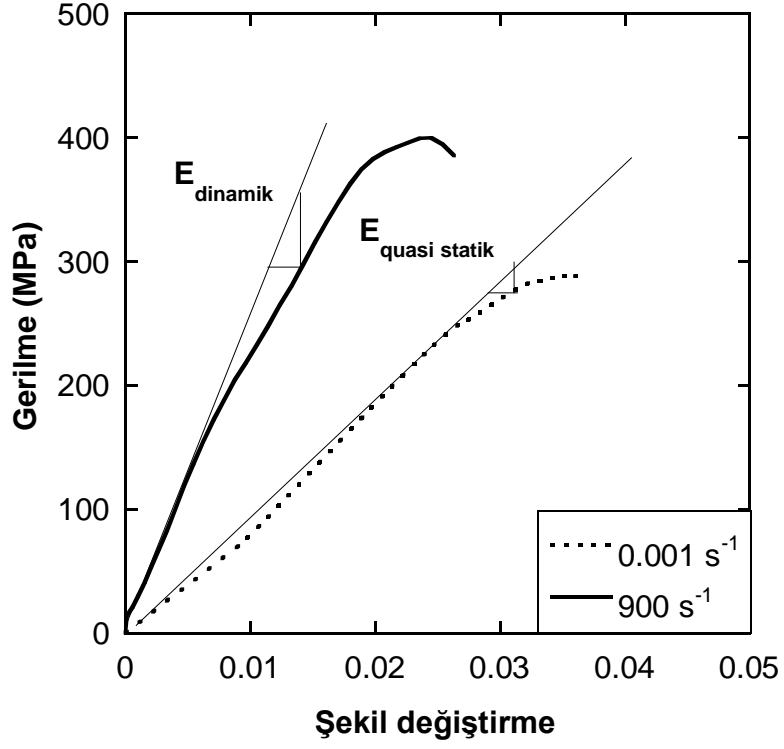


(a)

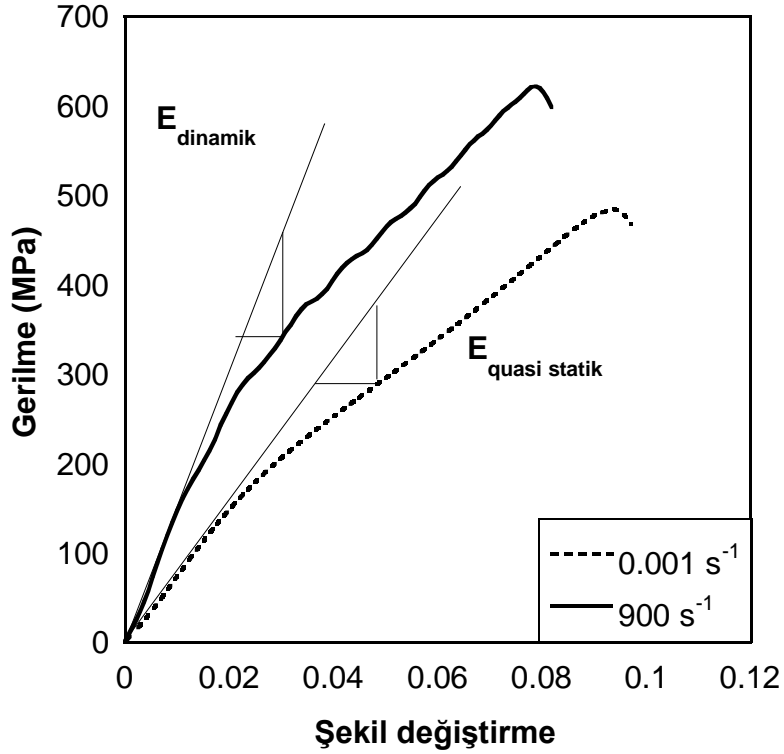


(b)

Şekil 3.16 45/-45 E-Glass kompozit malzemenin gerilme şekil değişirme eğrileri: a) katman düzleminde ve b) katman düzlemine dik.



(a)



(b)

Şekil 3.17 0/90/45/-45 E-Glass kompozit malzemenin gerilme şekil değıştirme eğrileri: a) katman düzleminde ve b) katman düzlemine dik.

Şekillerden de görülebileceği gibi katman düzlemine dik yönde yapılan testlerde düşük şekil değiştirme hızlarında malzemenin ortalama basma hasar gerilmesi 0/90, 45/-45, 0/90/45/-45 kompozit numunelerde sırasıyla ~ 430, 525, 438 MPa iken, bu değer ortalama şekil değiştirme hızının 850 ve üstü değerlere çıkması ile birlikte ~ 490, 645, 621 MPa yükselmektedir. Yine benzer şekilde elastisite modülü değeri, şekil değiştirme hızının artışı ile birlikte ~ 4.8, 7.2 ve 5 GPa'dan 7.1, 14.5 ve 8 GPa çıkmaktadır.

Katman düzleminde yapılan testlerde ise quasi-statik hızlarda ortalama basma hasar gerilmesi ~ 330, 130, 288 MPa iken, bu değer şekil değiştirme hızının 850 s<sup>-1</sup> ve üstü değerlere çıkması ile birlikte ~ 420, 212, 399 MPa yükselmektedir. Ortalama elastisite modülü değeri, şekil değiştirme hızının artışı ile birlikte ~ 13.0, 6 , 9.5 GPa'dan ~ 22.0, 16.2, 18 GPa artmaktadır. Katman düzleminde gerek basma hasar gerilmesinde, gerekse elastisite modülündeki artış katman düzlemi dışındaki artışa göre daha fazladır.

Farklı konfigürasyonlardaki kompozit numunelerin hem düşük hem de yüksek şekil değiştirme hızlarında basma testleri ile mekanik özelliklerinin karakterizasyonu tamamlanmıştır. Bu deney programı projeye paralel ilerleyen nümerik simülasyonların kompozit malzeme modellerinin sabitlerini bulmakta anahtar oluşturduğundan deneylerin akabinde nümerik simülasyon çalışmalarına başlanmıştır. Nümerik simülasyonlarda kullanılmak üzere kompozit malzeme modeli MAT 162 seçilmiştir. Bu malzeme modeli LS-DYNA malzeme modeli kütüphanesinde mevcut hali hazırdaki en komplike ve gerçek davranışa en yakın sonuçlar veren malzeme modelidir. Bu malzeme modelinin çok fazla malzeme sabitine sahip olması, en büyük handikabı olmakla beraber proje grubunun elinde yeterince deneysel datanın olması bu handikabın aşılmasını sağlamaktadır. Bu malzeme modeli, kullanıcıya kompozit plakayı oluşturan her bir katmanı doğrudan modelleyebilme imkanı sağlamaktadır. Yine her bir katmanın oryantasyon açısının (0<theta<90) modele değişken olarak doğrudan girilebilmesi, eksenler boyunca olan malzeme özelliklerinin tespitinden sonra farklı oryantasyonlardaki yapıların davranışlarının tahmin edilebilmesini sağlamaktadır. Kısaca her bir katın (a, b) katman düzleminde ve (c) katman düzlemine dik yönlerde mekanik özellikleri bilinirse sadece açı değerinin

değiştirilmesiyle diğer oryantasyonlara sahip katmanların da mekanik özelliklerinin modellenmesi mümkündür. Bu sebeple yalnızca 0/90 kompozitler üzerinde parametrik çalışmalar yapılarak tüm oryantasyonlara uygulanabilecek malzeme modeli sabitleri tespit edilebilmiştir.

Ayrıca MAT162 malzeme modeli, diğer kompozit malzeme modellerinden farklı olarak fiber hasarı, matris hasarı ve delaminasyon gibi hasar modlarını hesaplayabilmekte ve hasar mekaniği yaklaşımı kullanarak hasar oluşumundan sonraki malzeme davranışını da karakterize edebilmektedir. Şekil değiştirme hızının mekanik özellikler üzerindeki etkisi ve kırılma sonrasında malzemenin davranışına ait sabitler proje kapsamında belirlenmiştir.

MAT162 malzeme modeli, hasarı Matzenmiller'ın hasar mekaniği formülasyonuna göre tanımlamaktadır. Hasarın ilerleyişi malzemenin modülünün hasar başlangıcı ile birlikte azaltılmasıyla karakterize edilmektedir. Modüldeki azalma hasar parametresi vasıtasıyla ( $\omega_i$ ) hesaplanır.

$$\mathbf{E}_i = (1 - \omega_i)\mathbf{E}_i^0 \quad 3.1$$

$$\omega_i = 1 - \exp\left(\frac{-r_i m_j}{m_i}\right) \quad r_i \geq 1 \quad i=1,\dots,6 \quad j=1,\dots,4 \quad 3.2$$

Burada  $E_i^0$  başlangıçtaki elastisite modülü,  $E_i$  azaltılmış elastisite modülü,  $r_i$  altı farklı hasar kriterine bağlı hasar limitleri (fiber hasarı, matris hasarı, delaminasyon) ve  $m_i$  ise malzeme hasar parametreleridir.

Bu malzeme modelinde şekil değiştirme hızının mekanik özelliklere etkisi semi-logaritmik fonksiyonlar kullanılarak modellenir. Şekil değiştirme hızına bağlı mukavemet özellikleri:

$$\{\mathbf{S}_{rt}\} = \{\mathbf{S}_0\} \left(1 + C_1 \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0}\right) \quad 3.3$$

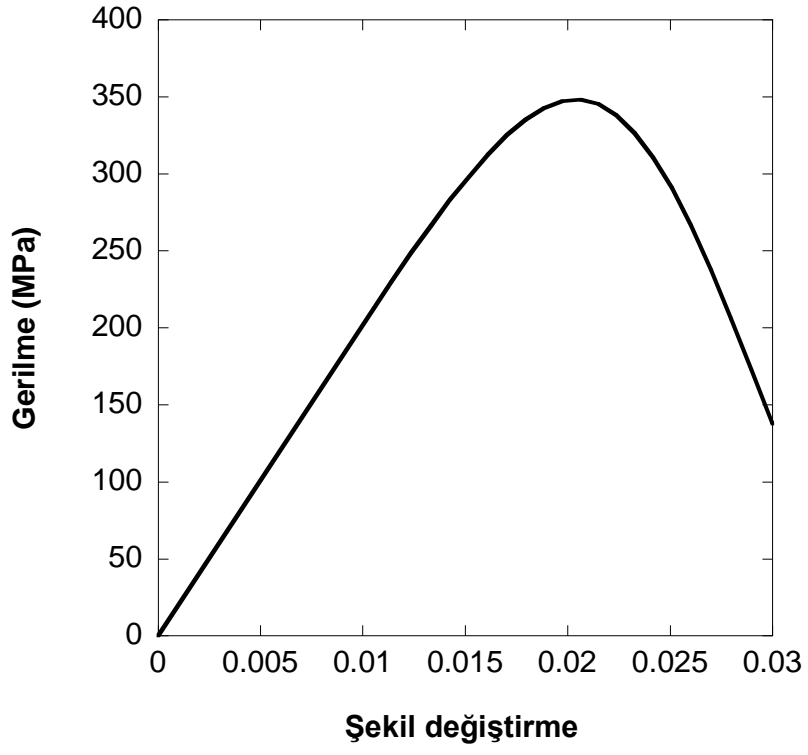
Burada  $C_1$ , mukavemet özellikleri için şekil değiştirme hızı sabiti,  $\{\mathbf{S}_{rt}\}$  yüksek şekil değiştirme hızındaki mukavemet değerleri,  $\{\mathbf{S}_0\}$  düşük şekil değiştirme hızındaki mukavemet değerleri,  $\epsilon_0$  referans şekil değiştirme hızı ve  $\dot{\epsilon}$  ise şekil değiştirme hızıdır.

Şekil değiştirme hızına bağlı modül özellikleri:

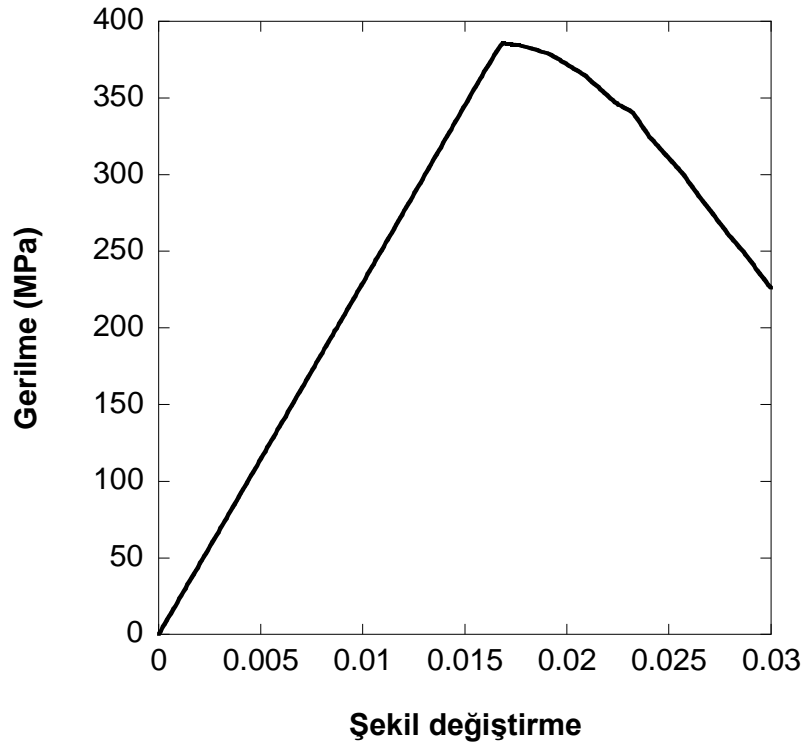
$$\{E_{rt}\} = \{E_0\} \left( 1 + C_i \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0} \right) \quad i = 2, \dots, 4 \quad 3.4$$

Burada  $\{E_{rt}\}$  yüksek Şekil değiştirme hızındaki modül değerleri,  $\{E_0\}$  düşük Şekil değiştirme hızındaki modül değerleri,  $C_2$  katman düzlemindeki elastisite modülü için Şekil değiştirme hızı sabiti,  $C_3$  kayma elastisite modülü için Şekil değiştirme hızı sabiti,  $C_4$  katman düzlemine dik yöndeki elastisite modülü için Şekil değiştirme hızı sabiti,  $\epsilon_0$  referans Şekil değiştirme hızı ve  $\dot{\epsilon}$  ise Şekil değiştirme hızıdır.

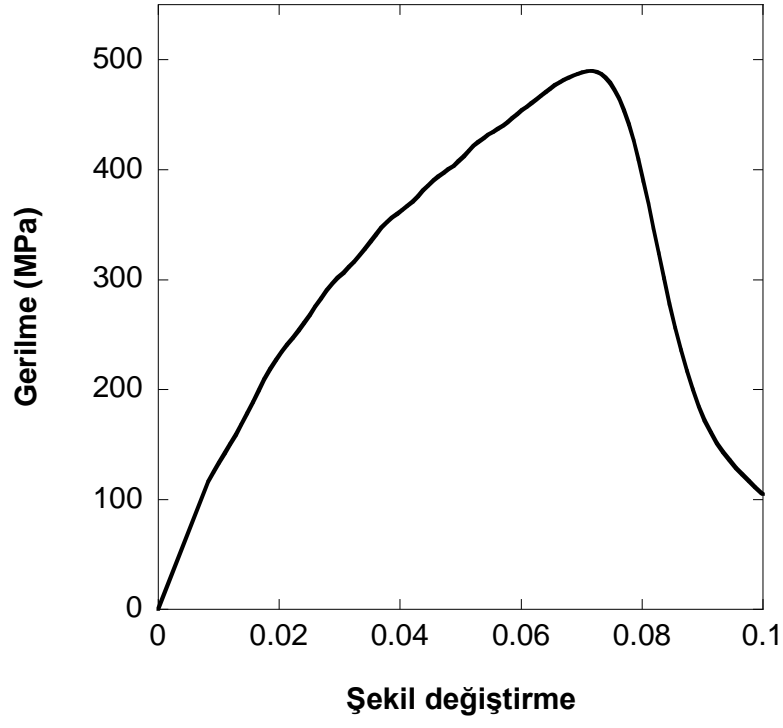
Malzemenin kırılmadan sonraki davranışını belirleyen hasar parametreleri olan  $m$  değerlerinin (denklem 3.2) tespiti için 0/90 oryantasyonlu kompozit malzemenin katman düzleminde ve katman düzlemine dik olarak yüklendiği tek elemanlı (single-element) modeller hazırlanmıştır. Şekil 3.18 (a)-(d)'de tek elemanlı nümerik modellerden elde edilmiş gerilme-Şekil değiştirme eğrileri ve bu değerlere karşılık gelen deneysel eşleri görölmektedir. Bu modellerde dikkat edilmesi gereken en önemli husus; tek eleman kullanılmış olmasından dolayı delaminasyonla ilgili olan hasar kriteri parametrelerinin bu nümerik simölasyonlardan elde edilemeyeceğidir.



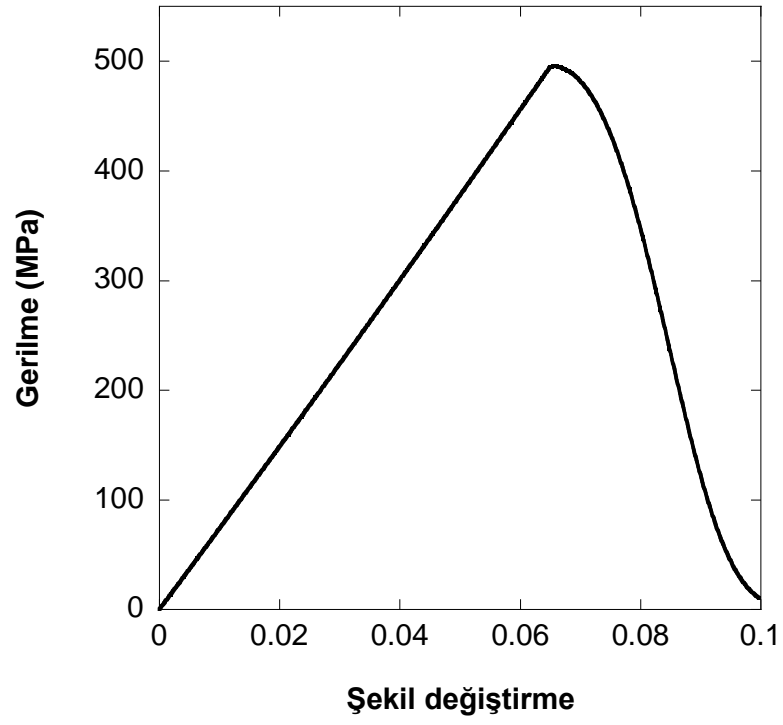
(a)



(b)



(c)



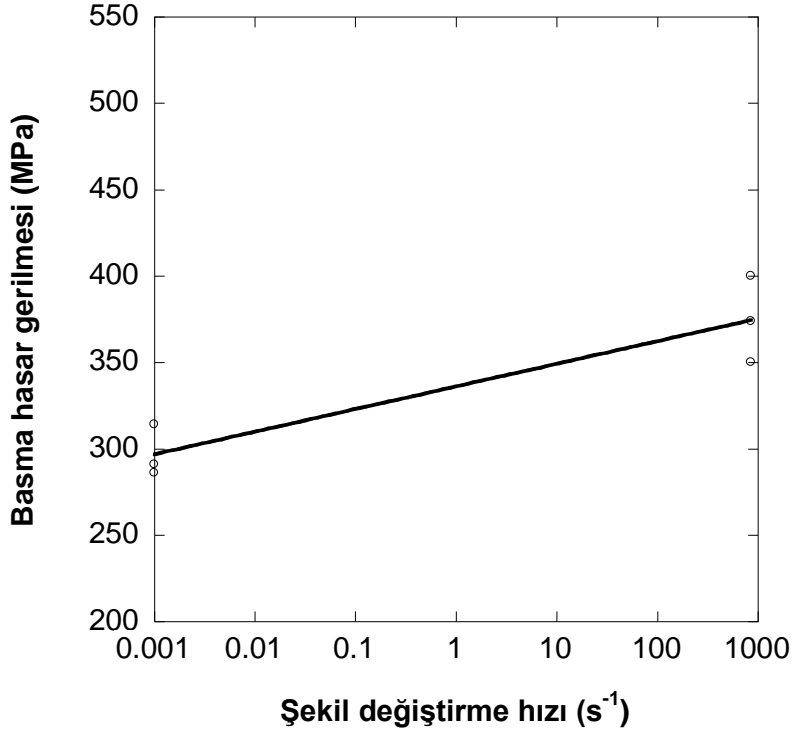
(d)

Şekil 3.18 Kompozit malzemenin gerilme şekil değıştirme eğrileri: (a-b) katman düzleminde deneysel ve nümerik, (c-d) katman düzlemine dik deneysel ve nümerik.

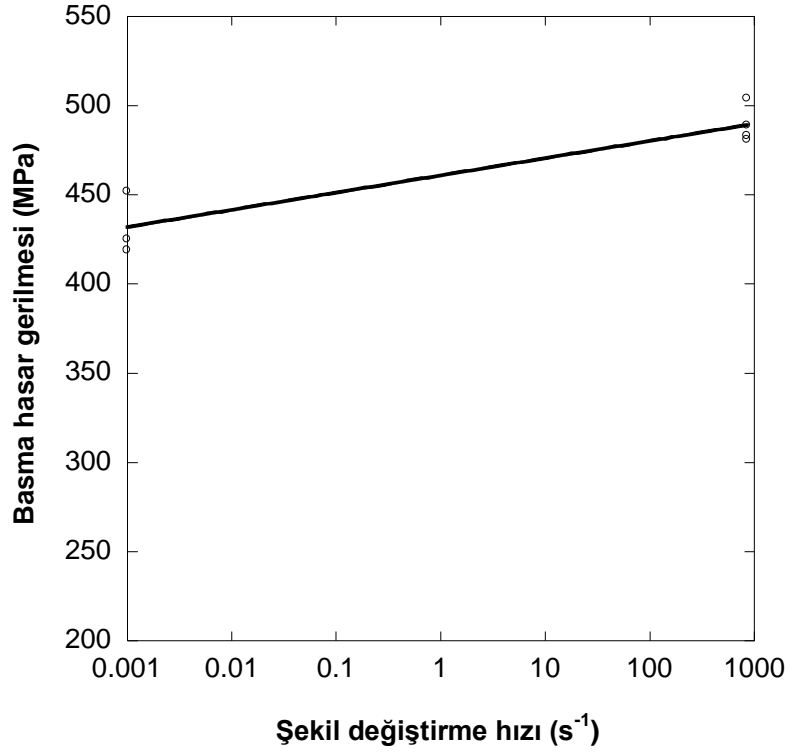


Kompozit malzemenin katman düzlemi ve katman düzlemine dik yönlerdeki basma hasar gerilmelerinin şekil değiştirme hızına bağlı değişimi Şekil 3.19 (a) ve (b)'de verilmiştir. MAT162 malzeme modelinde mukavemet değerlerinin şekil değiştirme hızına bağlı değişim sabiti (denklem 3.3)  $C_1$ 'dir ve bu değer 0.015 olarak hesap edilmiştir.

Şekil 3.20'de elastisite modülü değerlerinin şekil değiştirme hızına bağlı değişimi görülmektedir. Elastisite modülü değerlerinin şekil değiştirme hızına bağlı değişimi (denklem 3.4), katman düzlemi ve katman düzlemine dik yönler için sırasıyla 0.038 ( $C_2$ ) ve 0.03 ( $C_4$ ) olarak hesap edilmiştir. Kayma elastisite modülü şekil değiştirme hızına bağlı değişim sabiti ( $C_3$ ) ise yine E-Glass malzeme için (Naik and Kavala, 2008) tarafından yapılan çalışmanın sonuçları kullanılarak 0.024 olarak bulunmuştur.

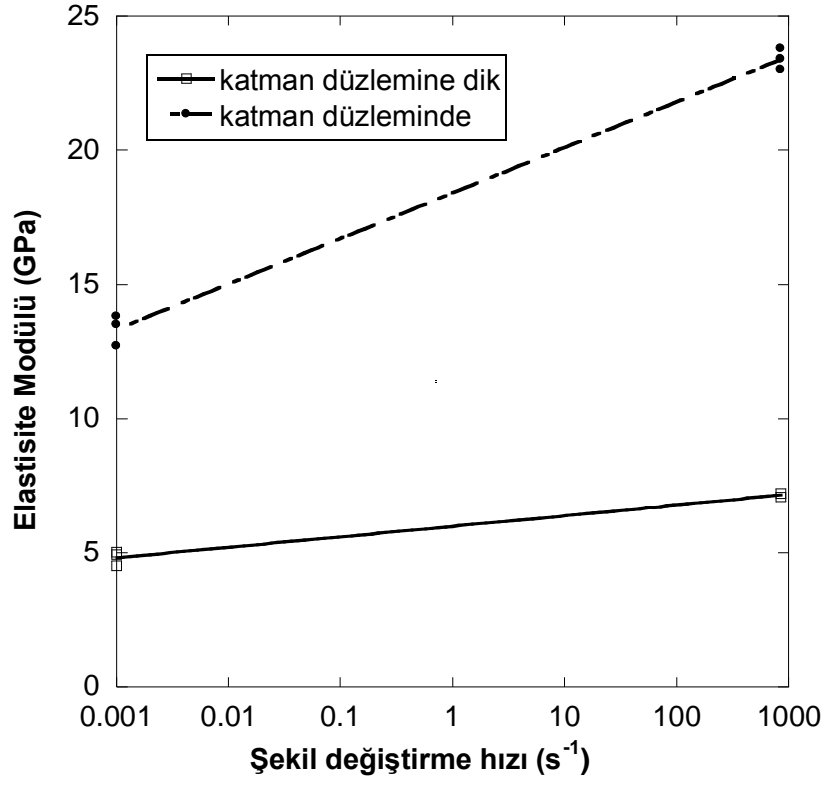


(a)



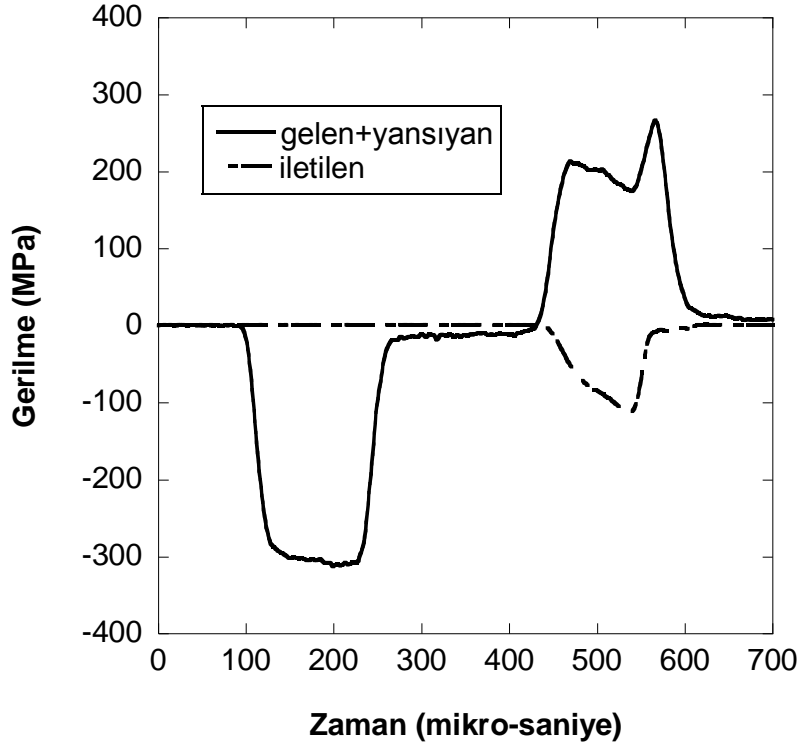
(b)

Şekil 3.19 Kompozit malzemenin şekil değiştirme hızına bağlı olarak basma hasar gerilmesinin değişimi: a) katman düzleminde ve b) katman düzlemine dik.

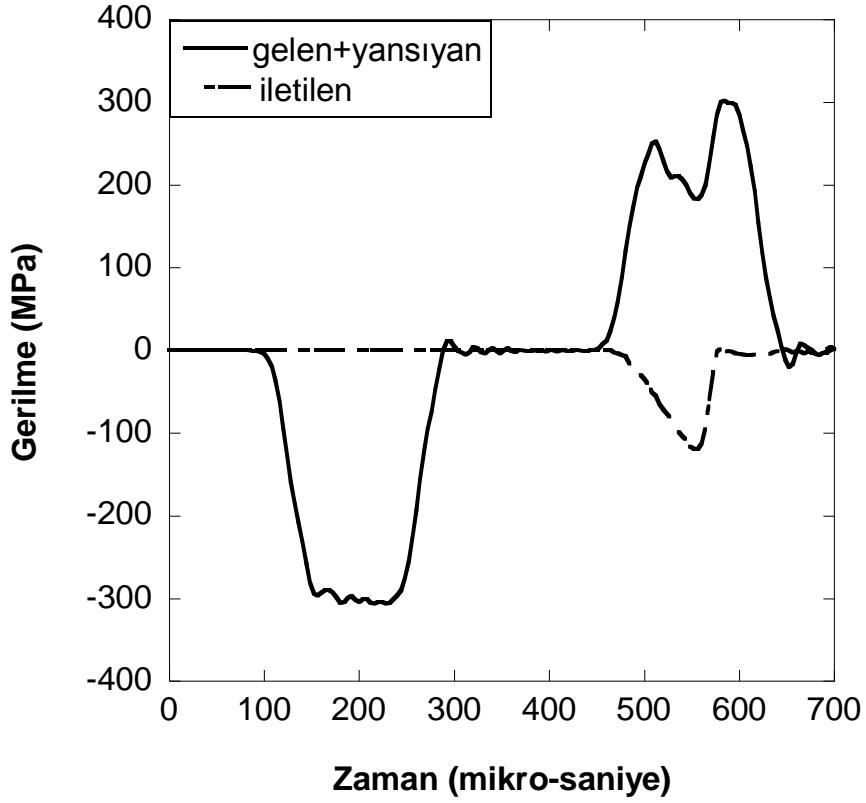


Şekil 3.20 Elastisite modülünün şekil değiştirme hızına bağlı değişimi.

Malzeme modeli için gerekli sabitlerin bulunmasından sonra katman düzlemine dik numunenin SHBB testi modellenmiştir. Bu numuneye ait SHBB sonucu (14.5 m/s çarpma hızı ve 850 s<sup>-1</sup> ortalama şekil değiştirme hızı) ve deneyin nümerik model sonucu Şekil 3.21 (a) ve (b)'de verilmiştir.



(a)



(b)

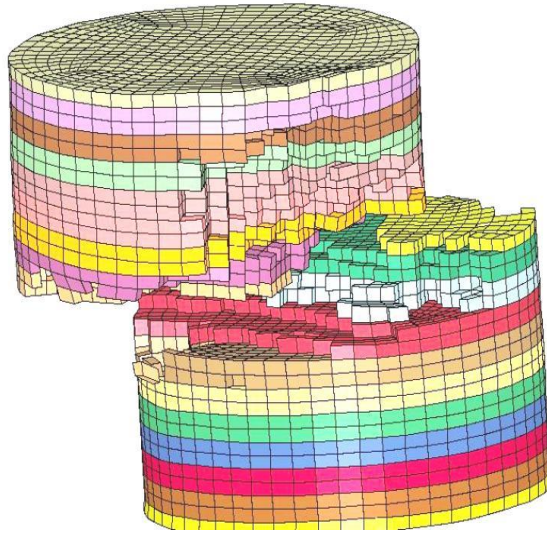
Şekil 3.21 Katman düzlemine dik yönde SHBB sonuçları: a) deneysel ve b) nümerik.

Şekil 3.21'den de görülebileceği gibi yansıyan dalganın şiddeti önce sıfırdan başlayarak bir lokal maksimum değere kadar artmakta ve sonra azalmaya başlamakta ve daha sonra tekrar aniden artarak maksimum değerini almaktadır. Bu maksimum değer malzemenin aşırı derecede hasara uğrayıp koptuğu anı göstermektedir. Nümerik model sonuçlarının deneysel sonuçlara oldukça yakın çıkması kompozit malzeme modeli sabitlerinin doğruluğunu göstermektedir. Kompozit malzemenin mekanik davranışının doğru olarak modellenmesi çok katmanlı malzeme sistemlerinin SHBB nümerik modellerinde hem de gerçek zırh sistemlerinin modellenmesinde hassas sonuçların alınmasında önemli rol oynamaktadır.

Şekil 3.22 (a) ve (b)'de deneysel ve nümerik olarak deforme edilmiş numuneler görülmektedir. Nümerik modelden de görülebileceği gibi numune deformasyon sırasında kalınlığı boyunca basma şekil değiştirmesine maruz kalmakta ve Poisson etkisiyle beraber yanal şekil değiştirme bileşenleri oluşmaktadır. Bu bileşenler tabakalar arası matris çatlamlarına sebep olmaktadır. Deformasyonun ilerleyişi ile birlikte fiber grupları numunenin yanal yüzeyinden dışarıya çıkmakta ve numunenin katastrofik olarak hasara uğrayıp parçalanmasına sebep olmaktadır. Şekillerden de görüldüğü üzere; kırılmış numunelerin son halleri nümerik model tarafından başarı ile tekrar edilebilmektedir.



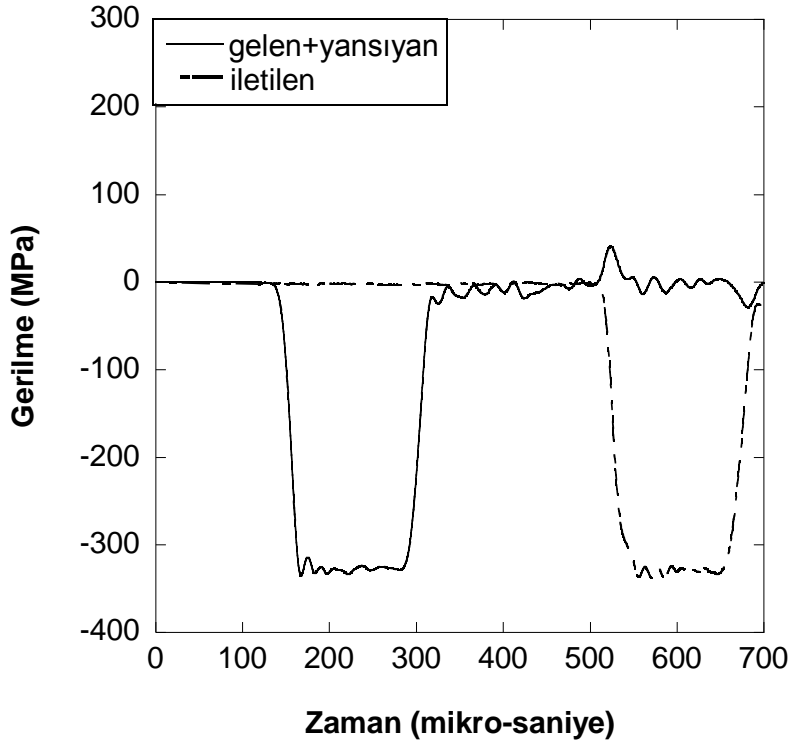
(a)



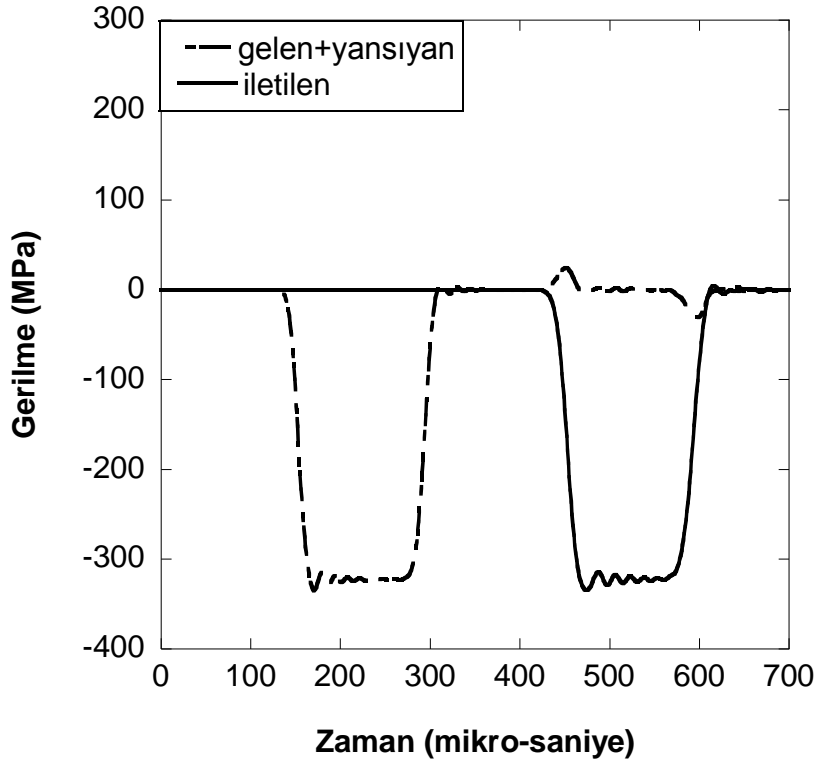
(b)

**Şekil 3.22 Deforme olmuş numune: a) deneysel ve b) nümerik.**

Kompozit malzeme modelinin sabitlerinin doğrulanmasının ardından zırh sistemini oluşturan ana elemanlardan olan seramik ve kompozit katmanlardaki gerilme dalgası ilerleyişi incelenmiştir. Şekil 3.23 (a) ve (b)'de seramik katmana ait SHBB deney ve nümerik simülasyon sonuçları verilmektedir. Nümerik simülasyon, seramik numune içerisinde gerilme dalgası ilerleyişini başarı ile yakalamaktadır.



(a)



(b)

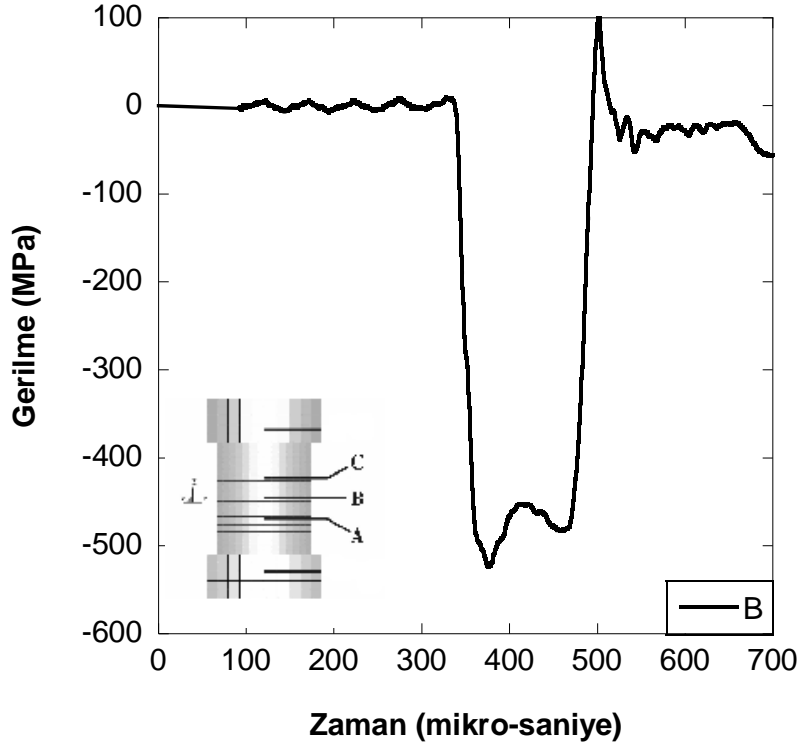
Şekil 3.23 Seramik katmana ait SHBB sonuçları: a) deneysel ve b) nümerik.

Deney sırasında seramik katmanın orta noktasına şekil değişim ölçer yerleştirilmiş ve numune içerisinde ilerleyen gerilme dalgası kaydedilmiştir (Şekil 3.24 (a)). Aynı deneyin nümerik simülasyonunda numune kalınlığı boyunca üç farklı nokta (tam orta nokta ve numunenin ön ve arka uçlarına yakın birer nokta) seçilerek gerilme dalgasının zamana bağlı değişimi tespit edilmiştir (Şekil 3.24 (b)). Seramik içerisinde kalınlık boyunca uniform olmayan gerilme dağılımı mevcuttur.

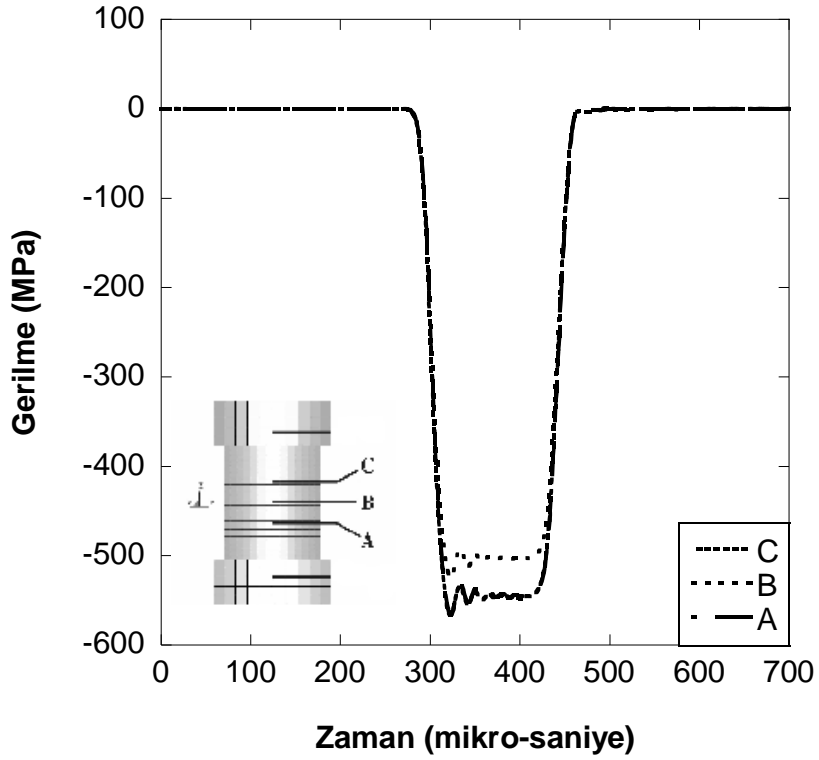
Şekil 3.25 (a) ve (b)'de kompozit katmana ait SHBB deney ve nümerik simülasyon sonuçları verilmektedir. Yine nümerik simülasyon kompozit numune içerisinde gerilme dalgası ilerleyişini başarı ile yakalamaktadır.

Şekil 3.26 (a)'da ise kompozit numunenin orta noktasına yerleştirilmiş şekil değişim ölçerin kaydettiği gerilmenin zamana bağlı değişimi görülmektedir. Nümerik modelde kompozit numunenin kalınlığı boyunca elemanlar seçilip gerilme değerlerinin değişimi incelenecek olursa; gerilmenin kompozit katman kalınlığı boyunca uniform olarak dağıldığı görülmektedir (Şekil 3.26 (b)).



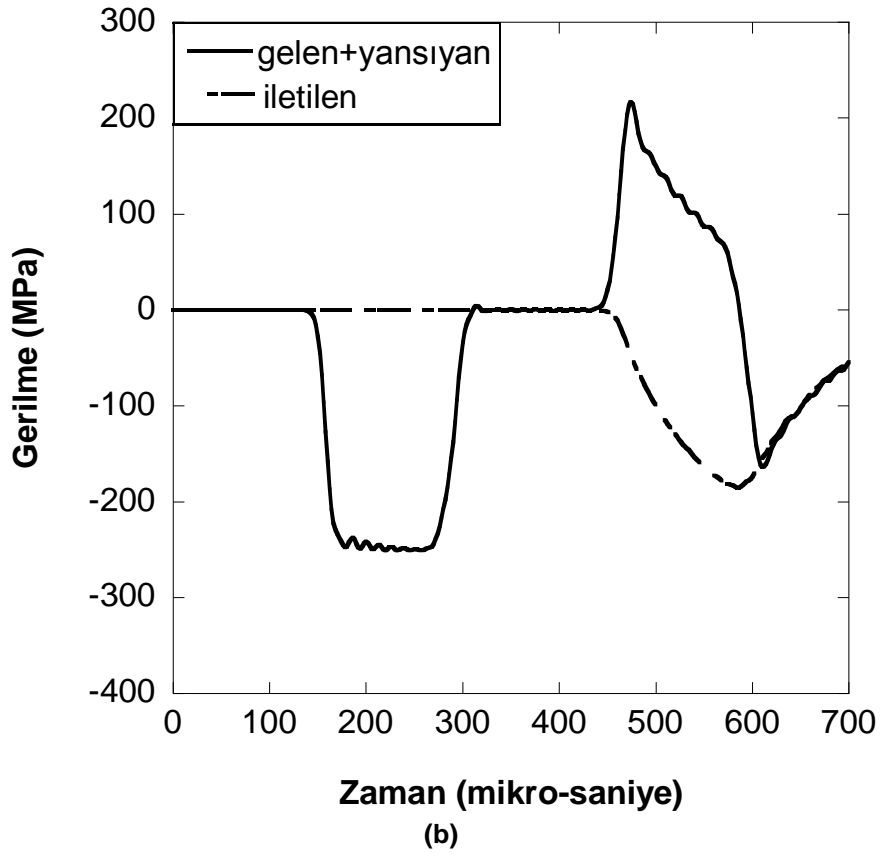
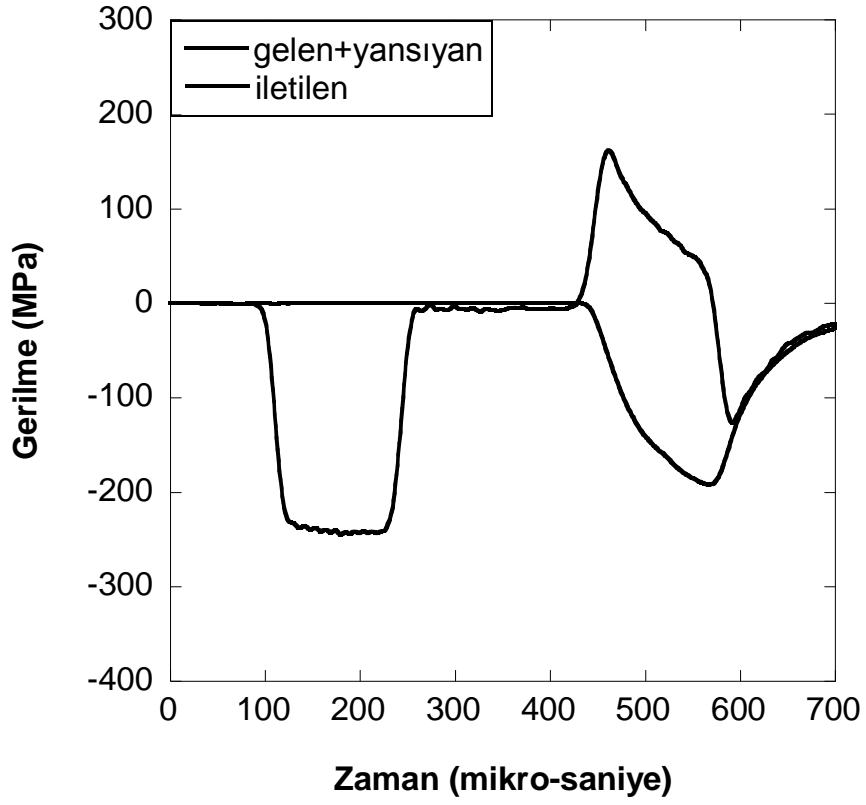


(a)

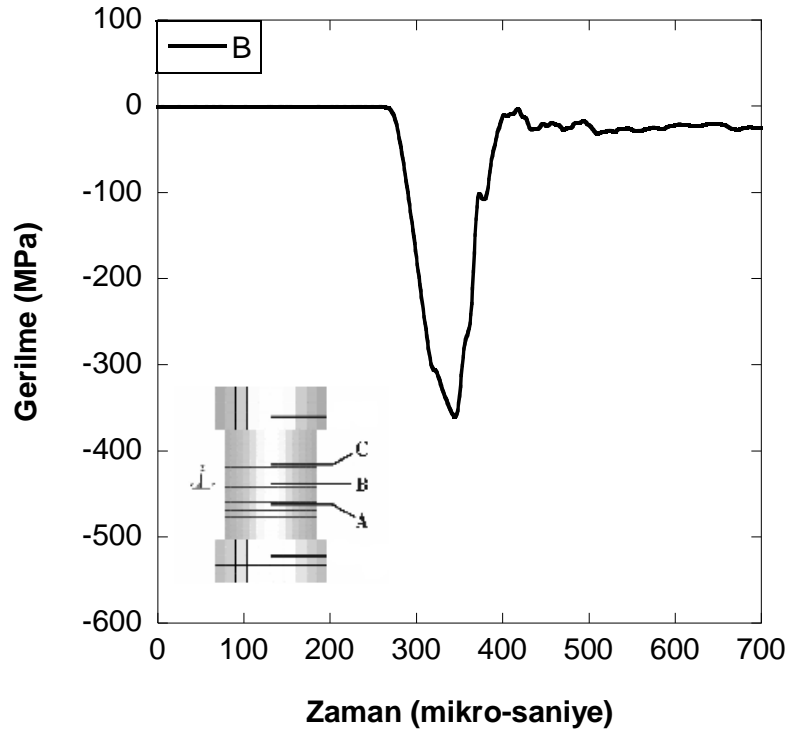


(b)

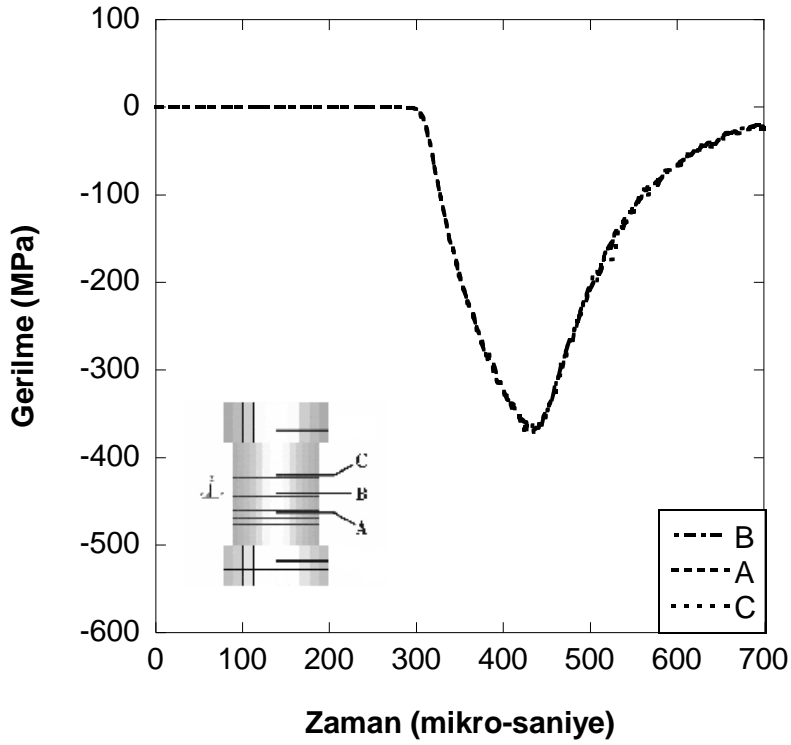
Şekil 3.24 Seramik katmanda ilerleyen gerilmenin değişimi: a) deneysel ve b) nümerik.



Şekil 3.25 Kompozit katmana ait SHBB sonuçları: a) deneysel ve b) nümerik.



(a)

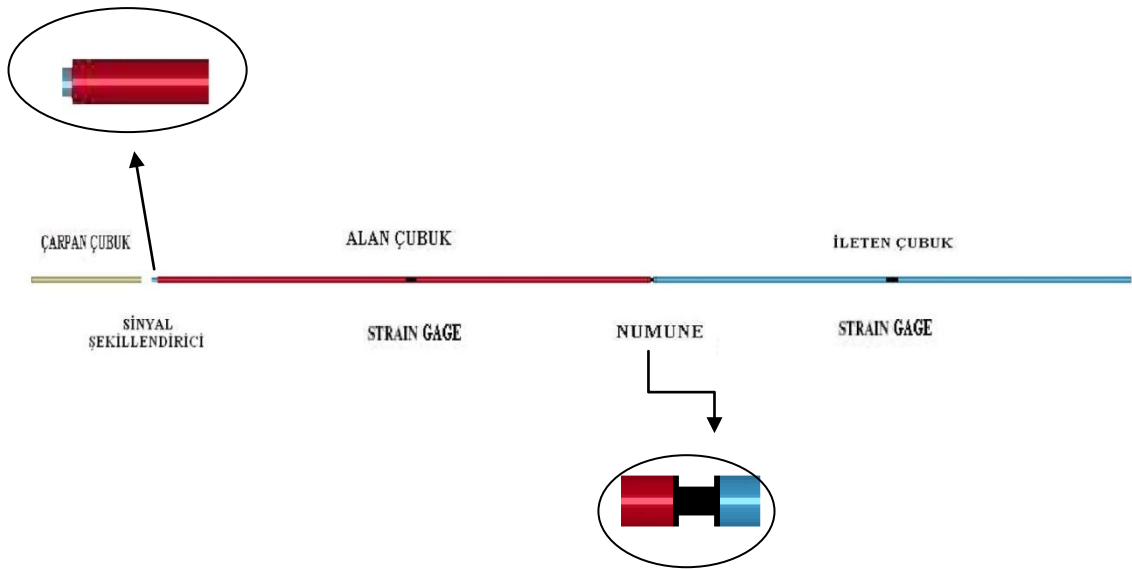


(b)

Şekil 3.26 Kompozit katmanda ilerleyen gerilmenin değişimi: a) deneysel ve b) nümerik.

Seramik ve kompozit katmanlarının tek katmanlı testlerindeki gerilme dalgası ilerleyişinin başarıyla modellenmesinin ardından ara yüzey malzemelerinin deney ve simülasyonlarına geçilmiştir. Proje yürütücüsü daha önceki çalışmaları sırasında Teflon ve EPDM lastik malzemelerin karakterizasyonu yapmıştır (Tasdemirci and Hall, 2005, Tasdemirci and Hall, 2007, Tasdemirci and Hall, 2007, Tasdemirci and Hall, 2009, Tasdemirci ve diğ., 2004). Bu çalışmalarda her iki malzemenin yüksek hız mekanik davranışını doğru şekilde temsil edebilen malzeme modelleri de belirlenmiştir. Teflon ve EPDM lastik için sırasıyla Crushable Foam ve Ogden malzeme modelleri kullanılmıştır. Mekanik karakterizasyona alüminyum köpük ve içi boş metalik küreler ile devam edilmiştir.

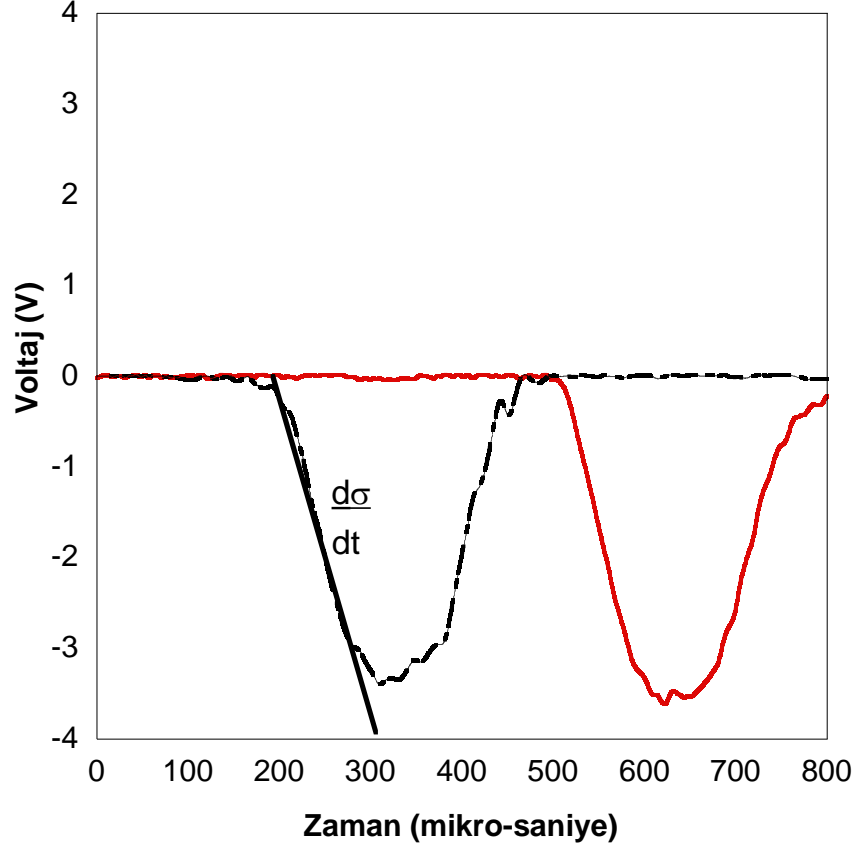
Düşük akustik empedansları nedeniyle alüminyum köpük numunelerin testi sırasında alüminyum çubuklar kullanılmıştır. Bu testler sırasında sinyal şekillendirme tekniği de uygulanmıştır. Bu teknikte alan çubuğun çarpma çubuğu ile olan ara yüzeyine plastik veya hiper elastik davranış gösteren bir malzeme yerleştirilerek alan çubuğa iletilen dalganın şekli değiştirilir.



**Şekil 3.27 Sinyal şekillendirme metodu.**

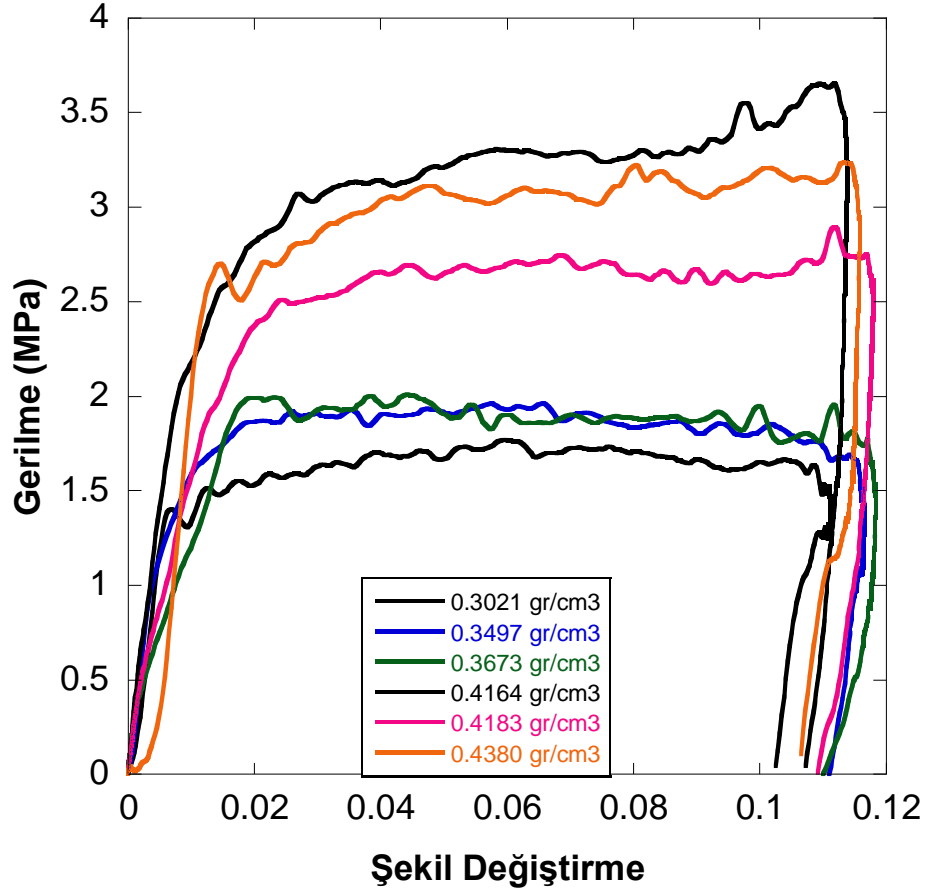
Ön testler yapılarak üçgen formulu gerilme dalgası üretebilen sinyal şekillendiricilerin boyutları tespit edilmiştir. Şekil 3.28'den de görülebileceği gibi alan çubukta elde edilen gerilme dalgası profili trapezoid şekilden üçgen formulu

dalgaya dönüşmektedir. Üçgen formlu dalgada gerilme artış hızı (gerilme eğrisinin eğimi) yaklaşık olarak sabit kalmaktadır.



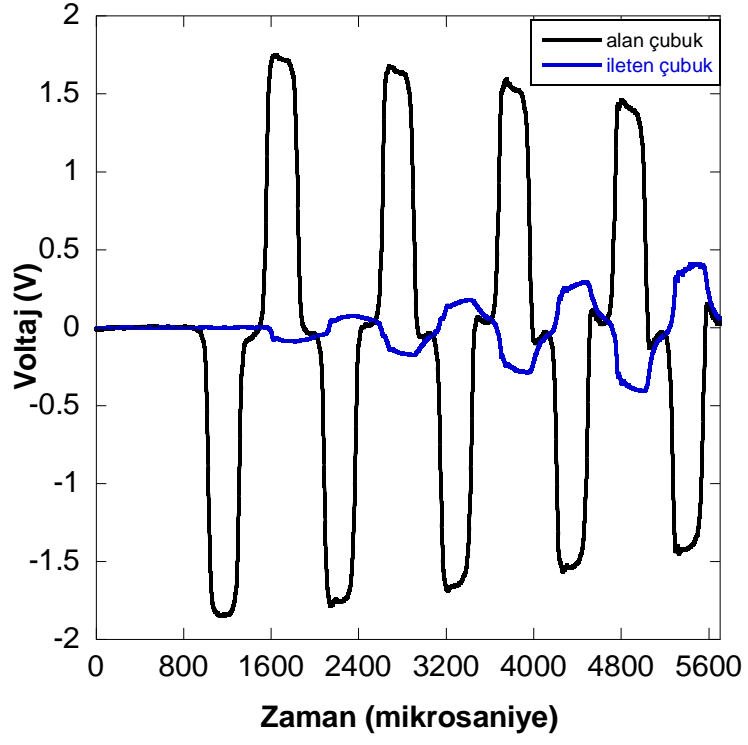
Şekil 3.28 Sinyal şekillendirme metodu uygulanarak elde edilmiş SHBB datası.

SHBB testleri yoğunlukları 0.3 ile 0.43 gr/cm<sup>3</sup> arasında değişen alüminyum köpüklere uygulanmış ve elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 3.29'da verilmiştir. Köpük malzemenin yoğunluğu arttıkça plato gerilmesi de artmaktadır. Yoğunluğu 0.3 ile 0.36 gr/cm<sup>3</sup> arasında değişen alüminyum köpük numunelerin plato gerilmeleri 1.75 ile 2 MPa arasında değişirken, yoğunlukları 0.41-0.43 gr/cm<sup>3</sup> arasında değişen köpük numunelerde ise plato gerilmesi 2.75 ile 3.25 MPa arasında kalmaktadır.

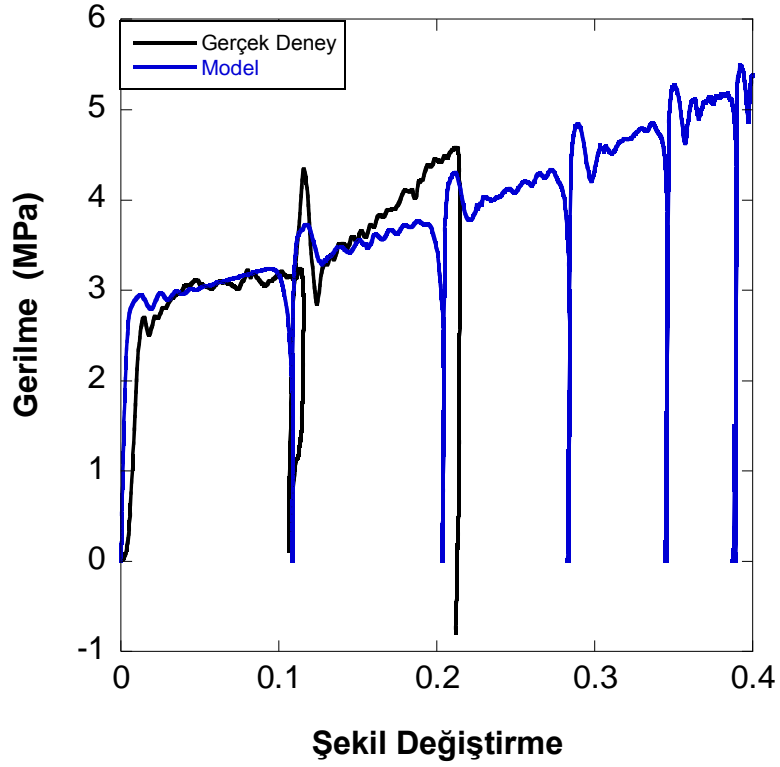


Şekil 3.29 Farklı yoğunluklardaki köpüklerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

Alüminyum köpük malzemenin dinamik deformasyon davranışının nümerik modellenmesinde \*MAT\_HONEYCOMB malzeme modeli kullanılmıştır. Bal peteği ve metalik köpük malzemelerin davranışlarının modellenmesinde başarı ile kullanılan bu malzeme modelinde nümerik yazılıma (LS-DYNA), malzemenin gerilme-hacimsel şekil değiştirme eğrileri doğrudan input olarak girilebilmektedir. Bu model, anizotropik davranış ve şekil değiştirme hızının etkisini de hesaplamalara katabilmektedir. Şekil 3.30 ve 3.31’de sırasıyla deneysel SHBB datası ve gerilme şekil değiştirme eğrileri görülmektedir.

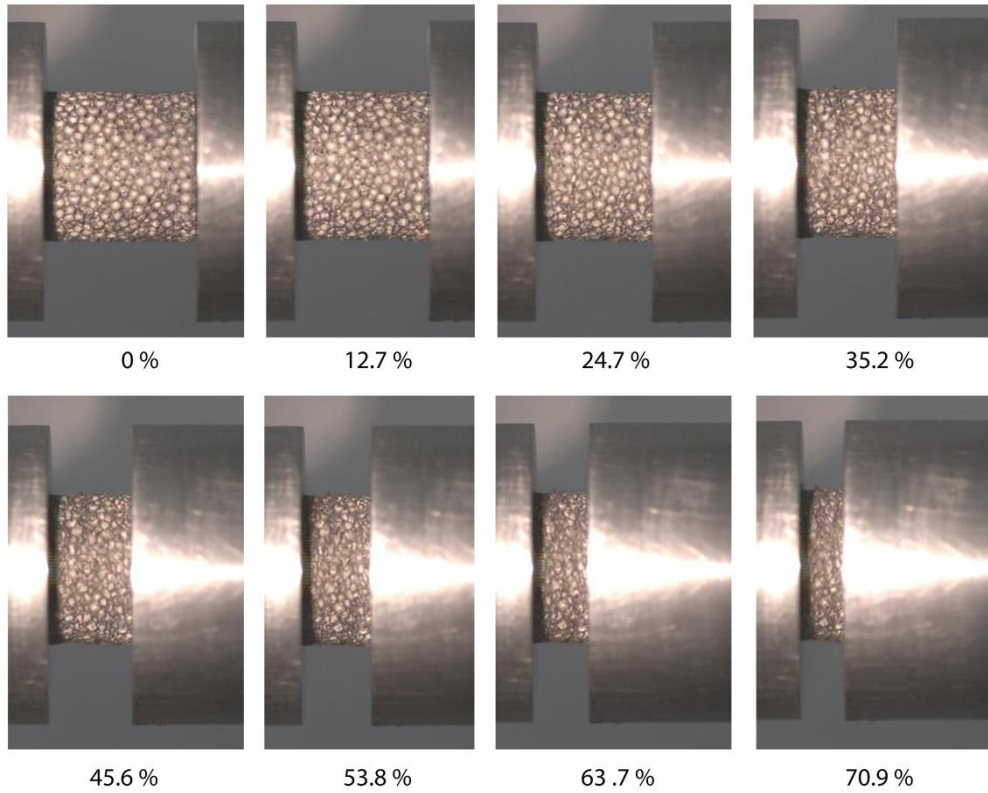


Şekil 3.30 Deneysel SHBB sonucu.



Şekil 3.31 Deneysel ve nümerik gerilme-şekil değiştirme eğrisi.

Metalik köpüklerin dinamik deformasyonu başarı ile simüle edilebilmiştir. Böylece diğer ara yüzey malzemesi olan içi boş metalik küreler ile ilgili çalışmalara başlanmıştır. İçi boş metal küreler yüksek enerji sönümleme kabiliyetine sahip oldukları için ara yüzey malzemesi olarak kullanıma çok uygundurlar. Literatürde içi boş metal kürelerin deformasyon davranışları, genellikle yapıyı oluşturan ve tekrarlayan birim hücreyi tespit edip, bu hücreye uygun simetri sınır şartlarını uygulayarak incelenmektedir. Bu tarz bir yaklaşım hesaplama zamanı açısından avantajlı olmakla beraber, dinamik deformasyon olaylarındaki uniform olmayan deformasyon davranışını gösterememesinden dolayı yüksek hızlı deformasyon olaylarının incelenmesinde yetersiz kalmaktadır. Proje kapsamında içi boş metal küreler hem düşük şekil değiştirme hızlarında hem de yüksek şekil değiştirme hızlarında test edilmiş ve yapının davranışının şekil değiştirme hızına oldukça bağlı olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.32).



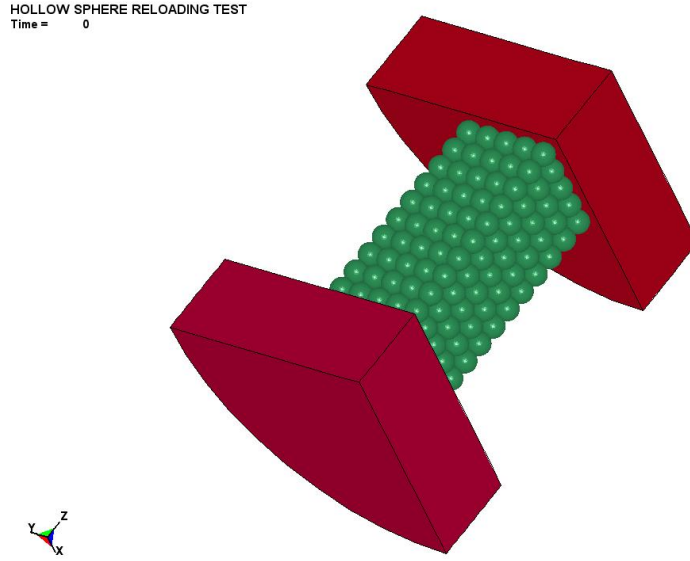
**Şekil 3.32 İçi boş alüminyum metalik küre SHBB test görüntüleri.**

Nümerik modelleme sırasında birim hücre kullanmak yerine yapıyı oluşturan küreler tek tek modellenmiştir. Bu tarz bir modelleme çalışması metalik



küreler için daha önceden yapılmamış olup, bu bölümde bahsi geçen çalışma proje ekibi tarafından International Journal of Impact Engineering'de yayınlanmıştır. Öncelikli olarak içi boş metal küre numuneler mikroskop altında incelenmiş ve çeşitli karakteristik boyutları belirlenmiştir. Bunlar öncelikli olarak, kürelerin dış çapları, cidar kalınlıkları, sinterleme sonucunda iki küre arasında oluşan temas açısı gibi mekanik davranışa oldukça etki eden parametrelerdir. Bu parametreler tespit edildikten sonra yapının katı modeli Solidworks yazılımında çizildikten sonra model LS-DYNA'ya aktarılmıştır.

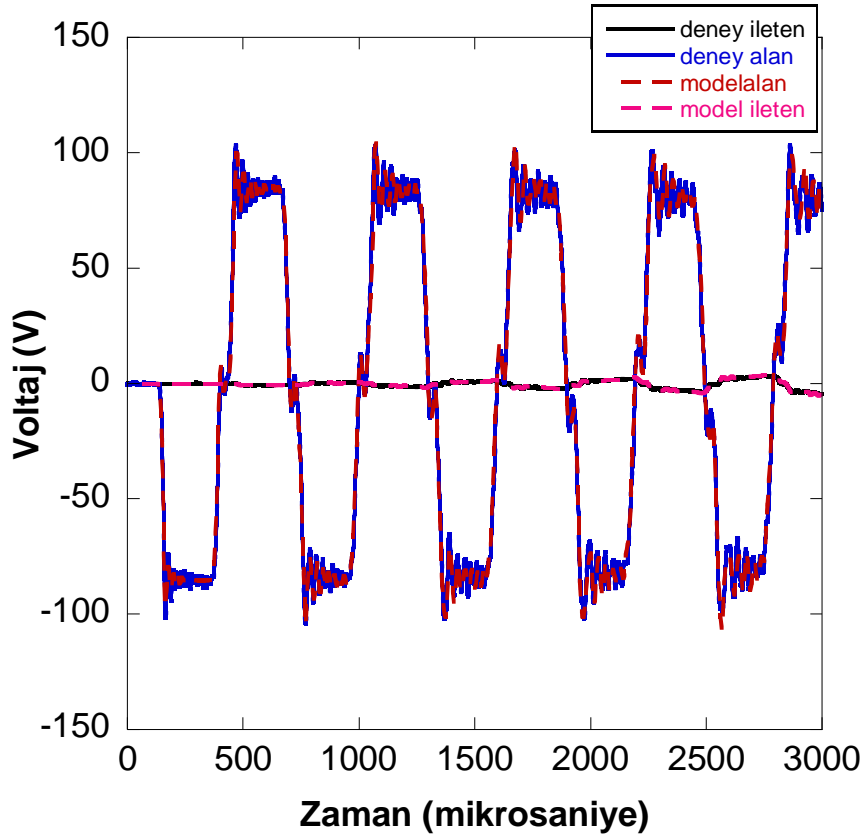
Şekil 3.33'de bu amaçla kullanılan SHBB nümerik modeli görülmektedir. Bu nümerik modelde içi boş metal kürelerden oluşan nümerik test numunesi 162642 adet shell eleman kullanılarak modellenmiştir.



**Şekil 3.33 İçi boş metal küre SHBB modeli.**

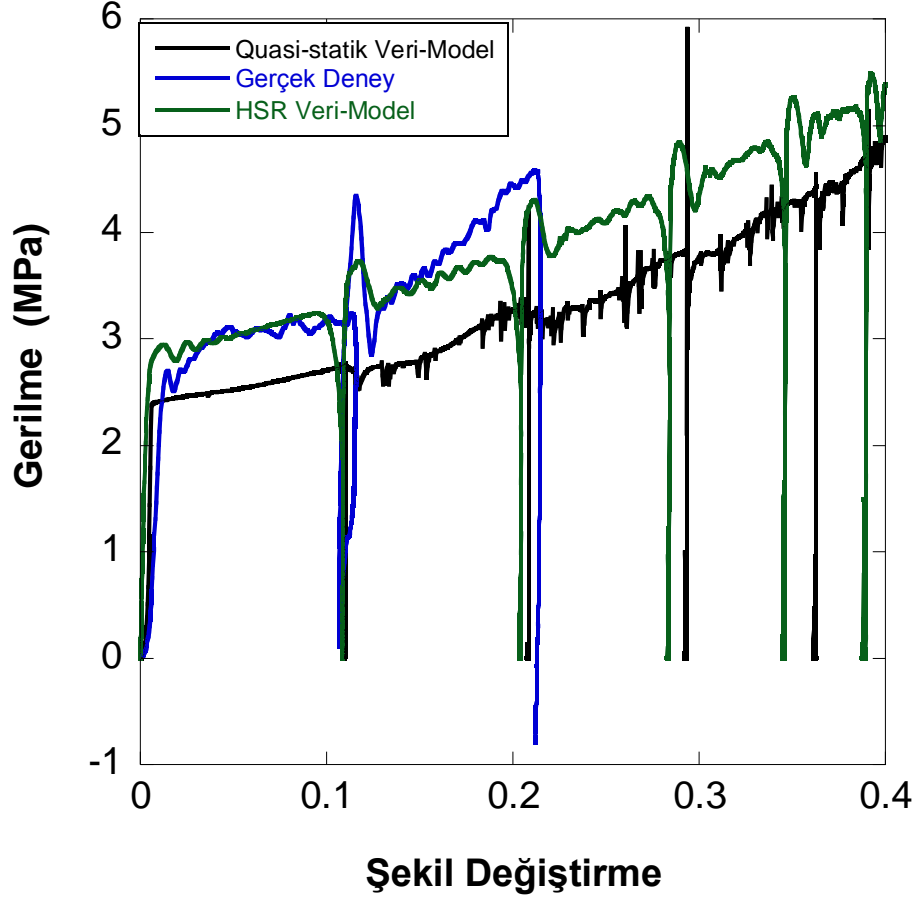
Şekil 3.34'de görülebileceği gibi nümerik simülasyon ve deneysel sonuç birbirlerine oldukça yakındır. Bu kadar komplike bir sistemde bu tarz bir sonucun alınabilmesi oldukça sevindiricidir. Deney ve nümerik simülasyon sırasında eşit boyda, büyük çaplı (40.5 mm) alüminyum çubuklar kullanılmış olup, bu sayede gerilme dalgasının numune içerisinden çoklu defa geçmesi sağlanmış ve böylelikle % 85-90'a yakın basma şekil değiştirme değerleri elde edilebilmiştir. Şekil 3.35'de ise içi boş metal kürelerin quasi-statik deney, SHBB deney sonucu

ve nümerik simülasyon sonucu elde edilmiş gerilme-şekil değiştirme eğrileri görülmektedir.



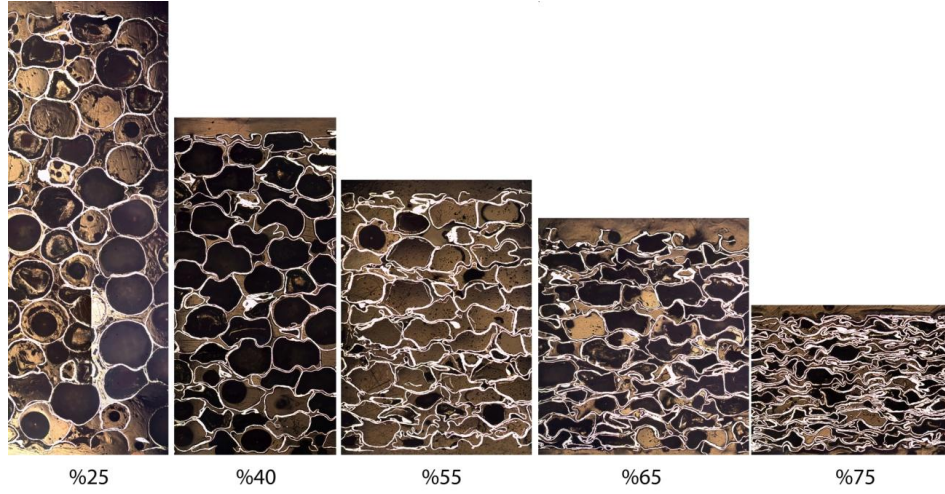
Şekil 3.34 Metalik kürelerin nümerik ve deneysel SHBB sonucu.

Şekil 3.35'den de görülebileceği gibi içi boş metal kürelerin mekanik davranışı şekil değiştirme hızına oldukça bağlıdır. İçi boş metal kürelerin 316L paslanmaz çelik malzemenin üretilmiş olması ve bu malzemenin şekil değiştirme hassasiyetinin çok yüksek olması eğriler arasında çıkan bu büyük farkın başlıca sebebidir. Nümerik modelin de bu davranışı oldukça başarılı bir şekilde yakaladığı şekilden de görülmektedir. Şekil değiştirme hızının gerilme değerleri üzerine etkisi özellikle yüksek şekil değiştirme hızlarında artmaktadır.

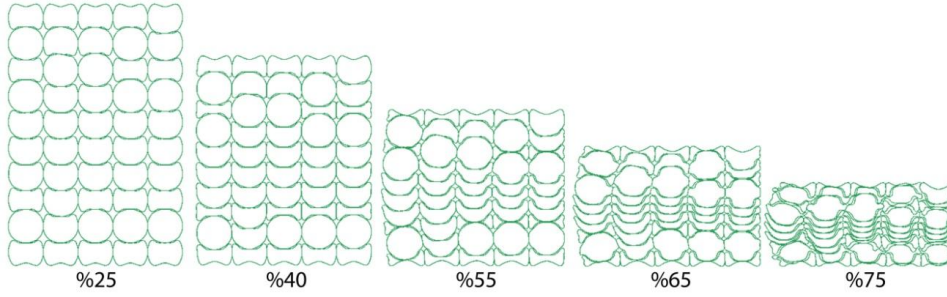


Şekil 3.35 MHS yapının nümerik ve deneysel gerilme şekil değiştirme eğrileri.

Şekil 3.36 (a) ve (b)'de ise farklı şekil değiştirme miktarlarında içi boş metal yapıda meydana gelen deformasyon görölmektedir. Model şekilde de göröldüğü gibi, deneyde gözlemlenen deformasyon modlarına oldukça benzer modlar sergilemektedir. Öncelikle bütün şekil değiştirme seviyelerinde gözlemlenen uniform olmayan deformasyon dağılımını dikkat çekmektedir. Bu durum sadece bir birim hücre kullanılarak bu tarz yapıların dinamik deformasyonlarının modellenemeyeceğine açık bir kanıttır.



(a)



(b)

Şekil 3.36 MHS yapının dinamik deformasyon davranışı a) deneysel b) nümerik.

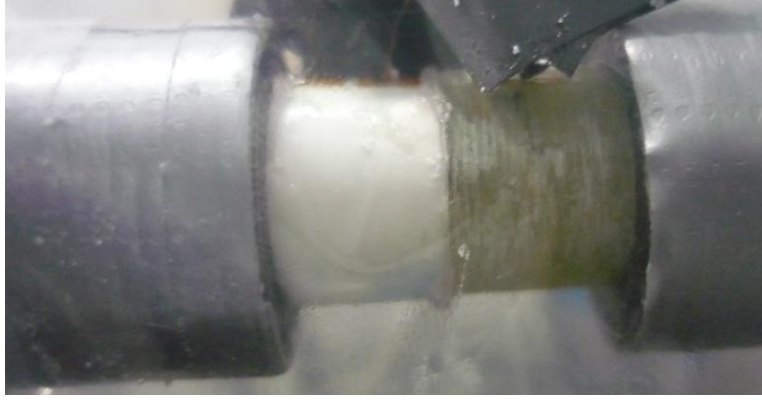
### 3.2.2. Çok katmanlı malzemeler

Zırh sistemi komponentlerinin malzeme karakterizasyonlarının (tek katmanlı testler) tamamlanmasının ardından iki ve üç katman ihtiva eden sistemlerin SHBB testleri ve nümerik simülasyonlarına geçilmiştir. İki katmanlı sistem aslında konvansiyonel zırh sistemi olan seramik ön yüzey plakası ve kompozit destek plakası haline karşılık gelmektedir. Zırhlarda seramik sert tabaka, mermi ucunun çarpma anından başlayarak körelmesine sebep olmakta ve bu sırada kırılmaya başlamakta, hatta tam mermi altındaki bölgelerde pülverize olmaktadır. Bu pülverize seramik ile mermi arasında yüksek sürtünme sonucu çarpma enerjisinin önemli bir kısmı sönmelenmektedir. Bu esnada kompozit destek plakası, seramik plakanın mermi ile temasının devam etmesini sağlamakta ve merminin enerjisinin önemli bir bölümünü hem deformasyon enerjisi hem de kompozit plakanın kendi yapısında oluşan hasar modları vasıtasıyla

sönümlenmektedir. İki katmanlı yapılarda bu mekanizmanın işleyişi bilinmektedir. Burada önemli olan husus, bu iki katman arasına bazı ara yüzey malzemeleri yerleştirilerek gerilme dalgasının kompozit destek plakasına geçişini geciktirmek ve mümkün olan en fazla enerjinin sönümlenmesini zırh sistemi üzerinde gerçekleştirilerek zırhın balistik performansını iyileştirmektir. SHBB testleri kullanılarak merminin zırha ilk çarptığı andaki gerilme dalgası oluşumu ve bu dalganın ilerleyişi oldukça başarılı şekilde laboratuvar ortamında simüle edilebilmektedir.

SHBB, şiddeti ve zaman aralığı kontrollü bir gerilme dalgasının üretilebildiği ve test edilen zırh konfigürasyonlarına iletilebildiği bir testtir. Çok katmanlı malzemelerde bireysel katmanlar içerisinde gerilme dalgasının nasıl iletildiği veya yansıdığı, ancak bu bireysel katmanlar üzerine şekil değişim ölçerler yerleştirilerek görülebilmektedir. Deneylere paralel olarak çok katmanlı sistemlerin SHBB testleri de modellenmiştir. Nümerik modeli hazırlanan her deney için hem çubuk üzerindeki gelen ve iletilen dalgalar hem de numuneyi oluşturan katmanlar üzerindeki gerilme dalgaları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Çok katmanlı zırh sistemlerinin deneylerine iki katmanlı seramik+kompozit sistemle başlanmıştır. Bu deneyler sırasında seramik ve kompozit katmanlar üzerine şekil değişim ölçerler (Şekil 3.37) yerleştirilip, gerilme dalgasının katmanlar içerisinde ilerleyişi kaydedilmiştir.

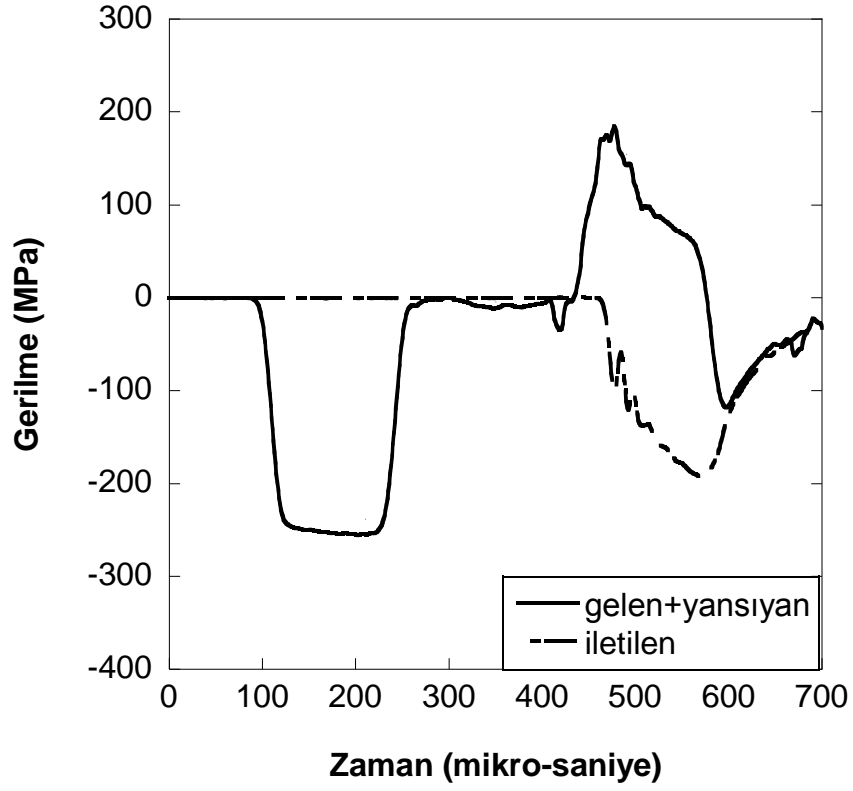


**Şekil 3.37 Seramik+kompozit SHBB numunesi.**

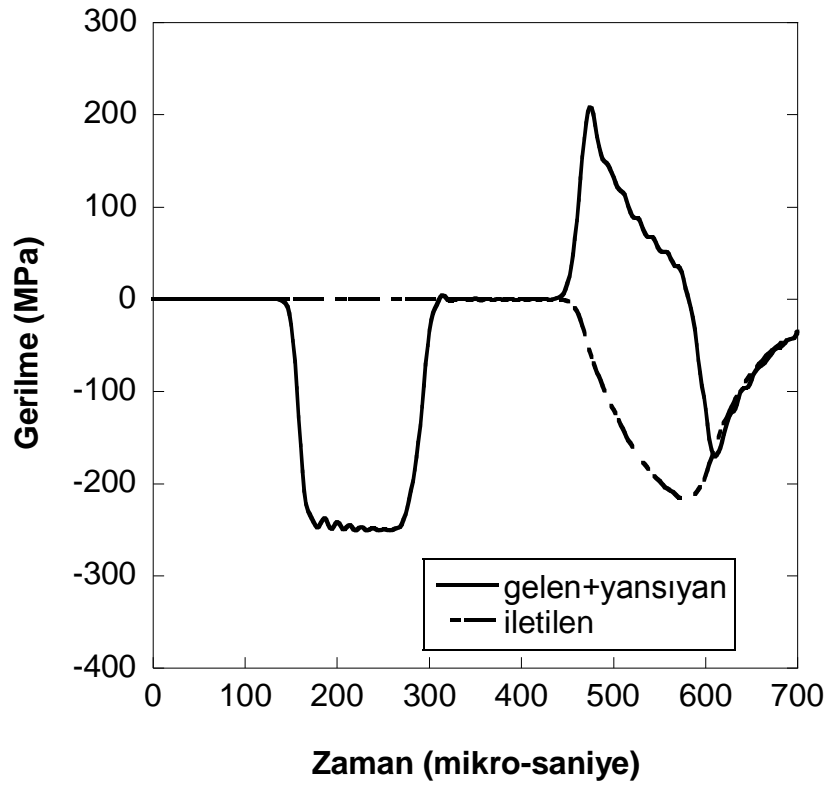
Seramik+kompozit numuneye ait deneysel ve nümerik SHBB sonuçları Şekil 3.38 (a) ve (b)'de verilmiştir.

Nümerik model deney sonuçları oldukça başarılı şekilde yakalamaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken husus, iletilen ve yansıyan sinyallerin genel formunun tek katmanlı kompozit haline oldukça benzemesidir. Seramik katman, kompozit katman için sert bir yükleme elemanı olarak davranmaktadır.

Şekil 3.39 (a)-(d)'de seramik ve kompozit katmanlardaki gerilme dalgası (deney ve nümerik model sonucu) ilerleyişi görülmektedir. Seramik katman içerisinde ilerleyen gerilme dalgasının şeklinin seramik katmanın tek başına olduğu deney sonucuyla karşılaştırıldığında oldukça farklı olduğu ve kompozit tabakanın davranışına benzemeye başladığı görülmektedir.

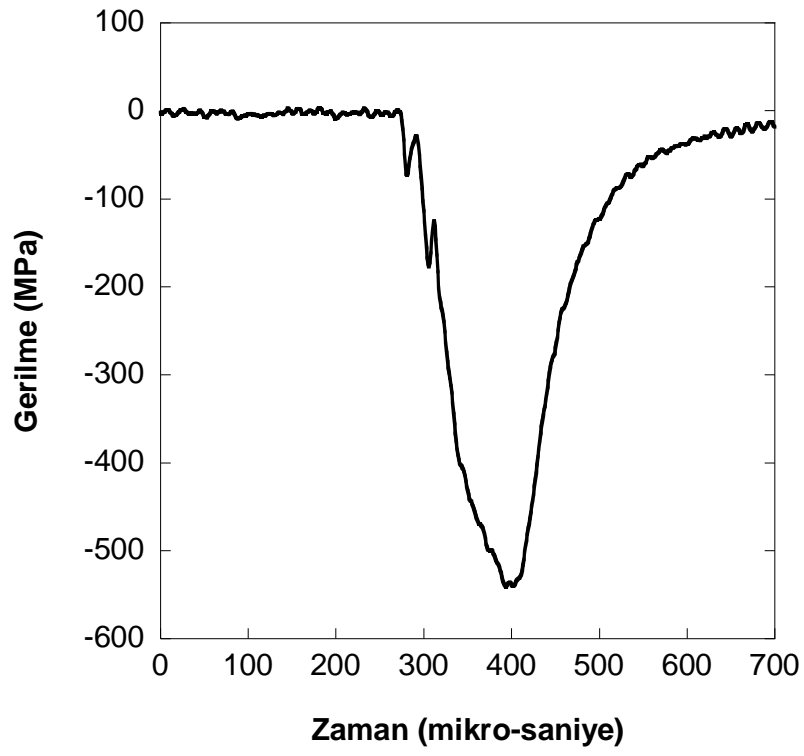


(a)

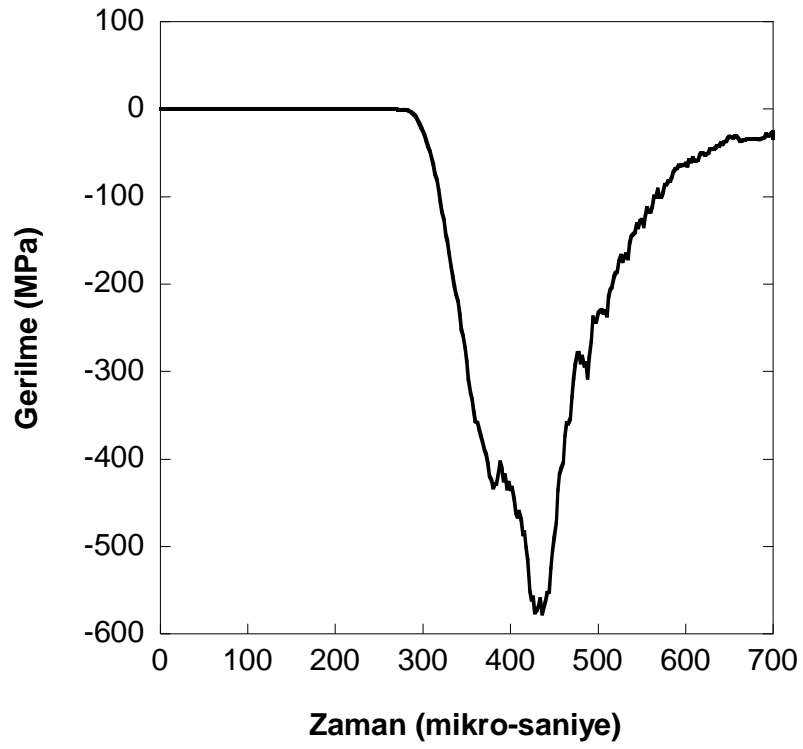


(b)

Şekil 3.38 Seramik+kompozit numuneye ait SHBB sonuçları: a) deneysel ve b) nümerik.

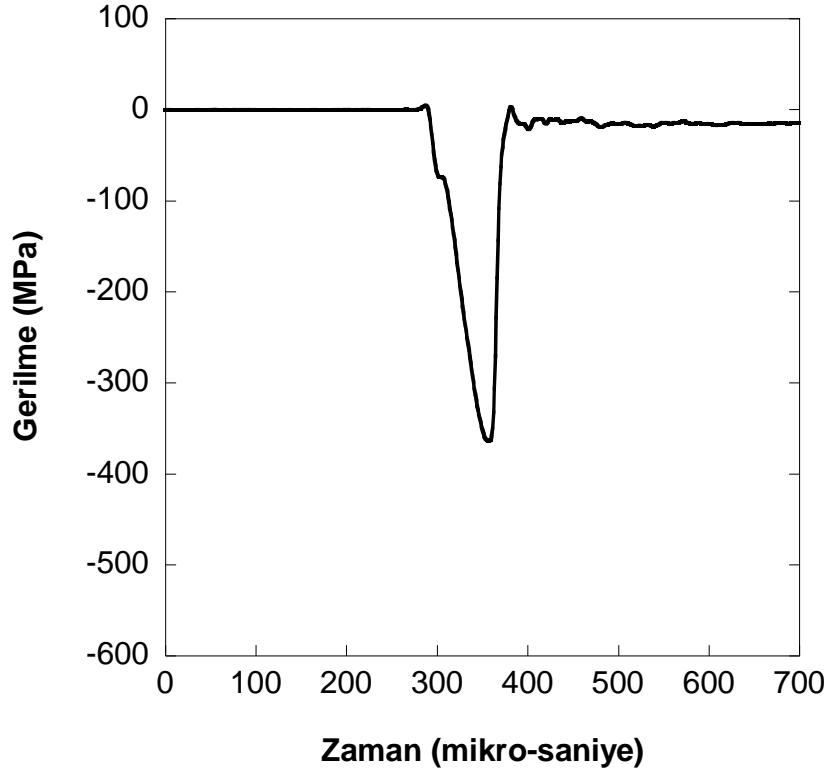


(a)

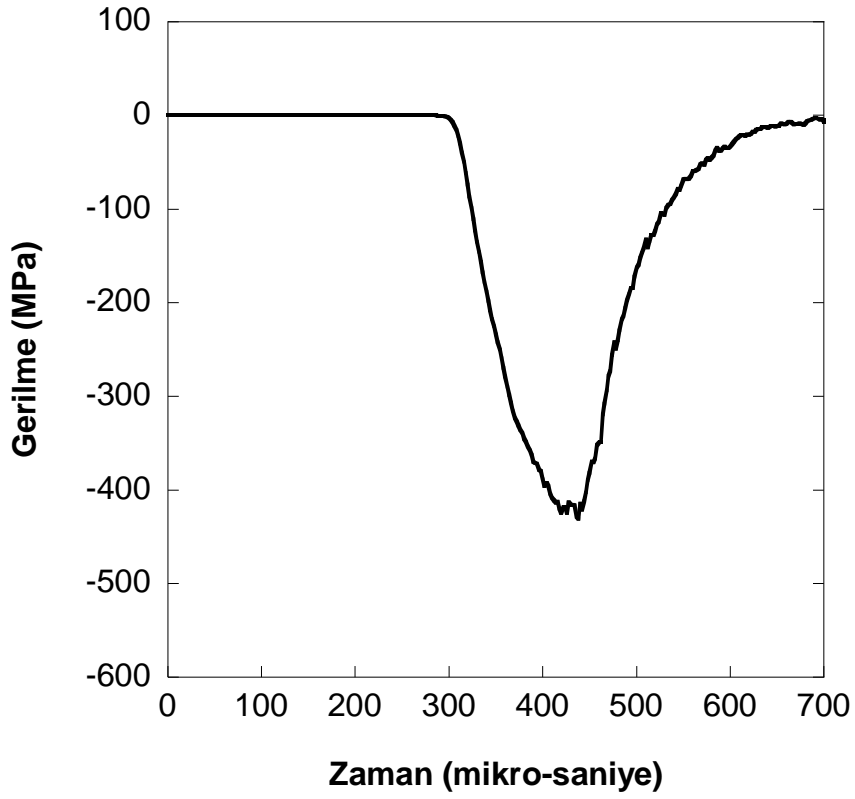


(b)





(c)



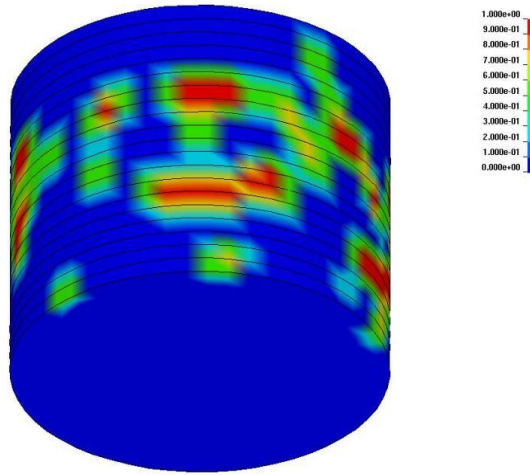
(d)

Şekil 3.39 Gerilmenin zamana bağlı değişimi: (a-b) seramik deneysel-nümerik ve (c-d) kompozit deneysel-nümerik.

SHBB nümerik modelinde herhangi bir simetri ekseni tanımı kullanılmamıştır. Hasarın incelendiği simülasyonlarda bu hususa dikkat edilmelidir. Ayrıca MAT162 malzeme modelinin kullanılmış olması, iki katmanlı sistemin kompozit katmanında meydana gelen hasarın gözlenebilmesine olanak sağlamıştır. Şekil 3.40 (a) ve (b)'de deneysel ve nümerik olarak deforme edilmiş kompozit katmanı görülmektedir.



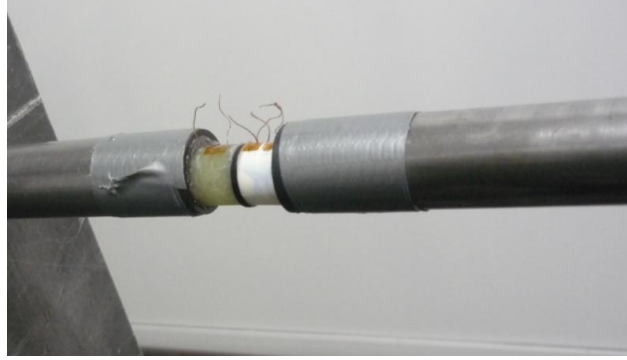
(a)



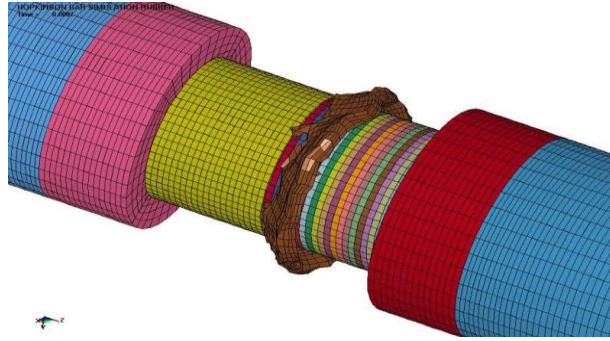
(b)

Şekil 3.40 Deforme olmuş kompozit katman: a) deneysel ve b) nümerik.

Gerilme dalgası ilerleyişi deneyleri ve nümerik simülasyonları üç katmanlı konfigürasyonlar için de tekrar edilmiştir. Üç katmanlı sistemlerin testlerine ilk olarak seramik ve kompozit katmanlar arasında EPDM lastik tabaka konulmasıyla (Şekil 3.41 (a) ve (b)) başlanmıştır.



(a)

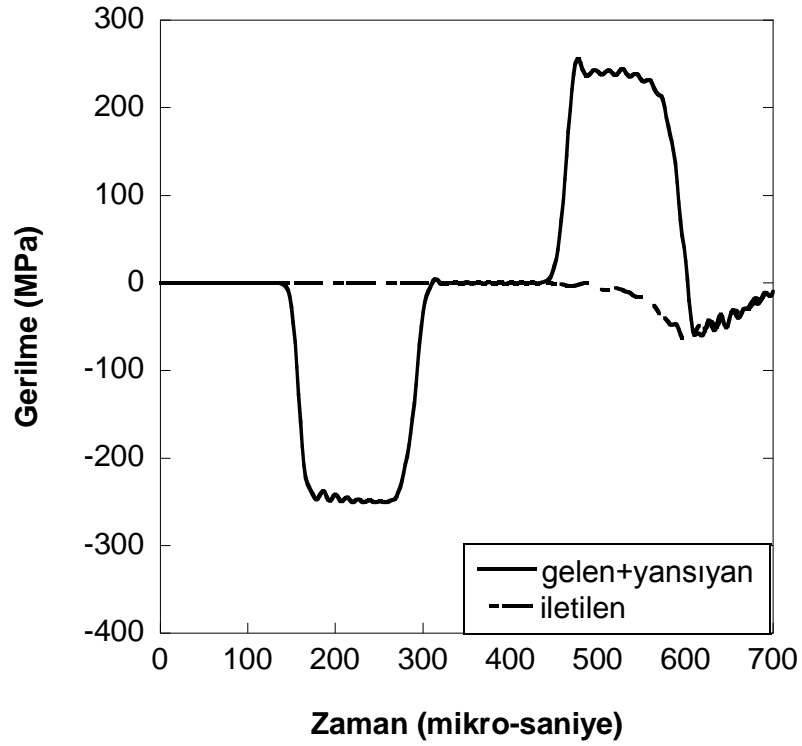
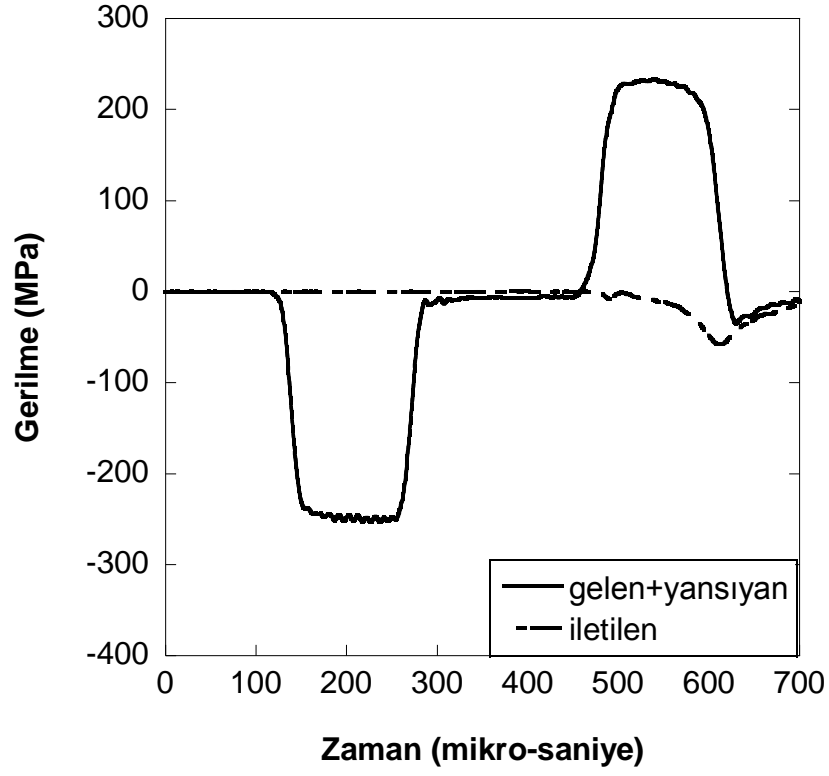


(b)

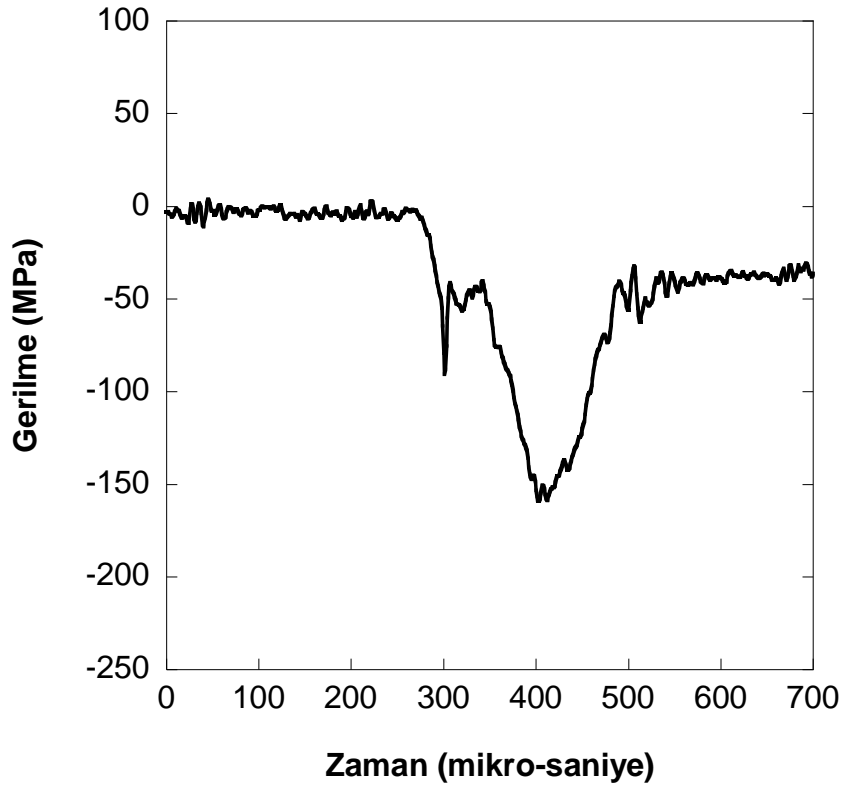
Şekil 3.41 Seramik+lastik+kompozit SHBB numunesi ve nümerik modeli.

Lastik tabakanın ara yüzeye yerleştirilmesi, dalga ilerleme karakteristiğini tamamen değiştirmektedir. Şekil 3.42 (a) ve (b)'de deneysel ve nümerik SHBB sonuçları görülmektedir.

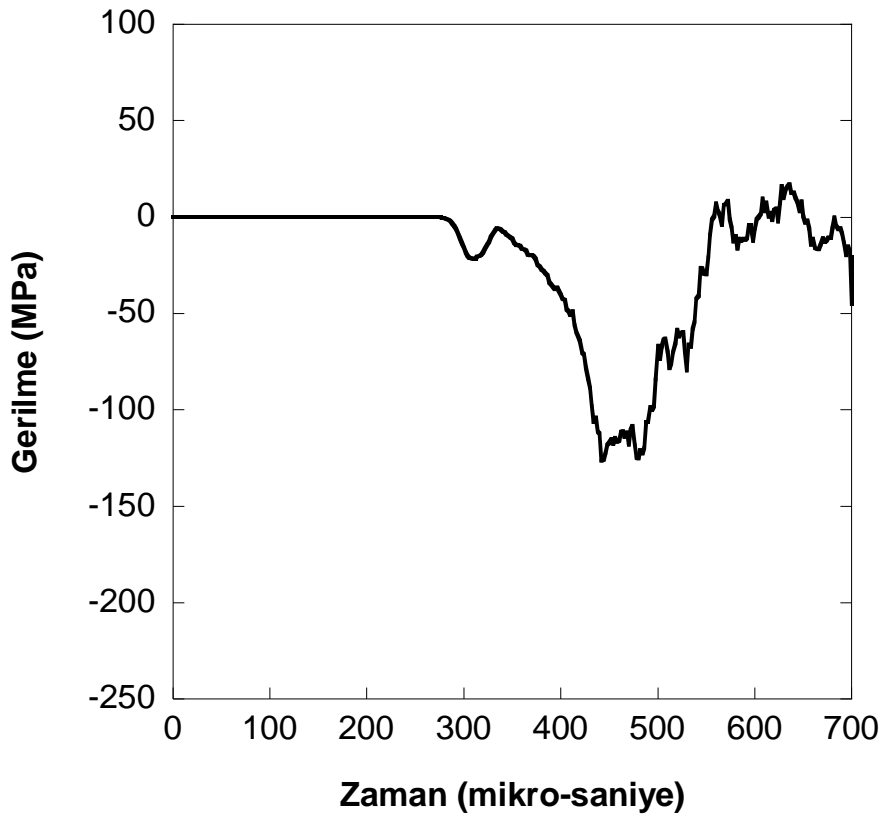
Gelen dalganın önemli bir kısmı alan çubuğa geri yansımakta ve çok az bir kısmı ise kompozit katmana iletilmektedir. Şekil 3.43 (a)-(d)'de seramik ve kompozit katmanlar yüzeyine yerleştirilmiş şekil değişim ölçerden (her bir katmanın kalınlığı boyunca orta noktasına) kaydedilen gerilme tarihçeleri ile aynı deneyin nümerik simülasyonundan elde edilmiş gerilme tarihçeleri görülmektedir.



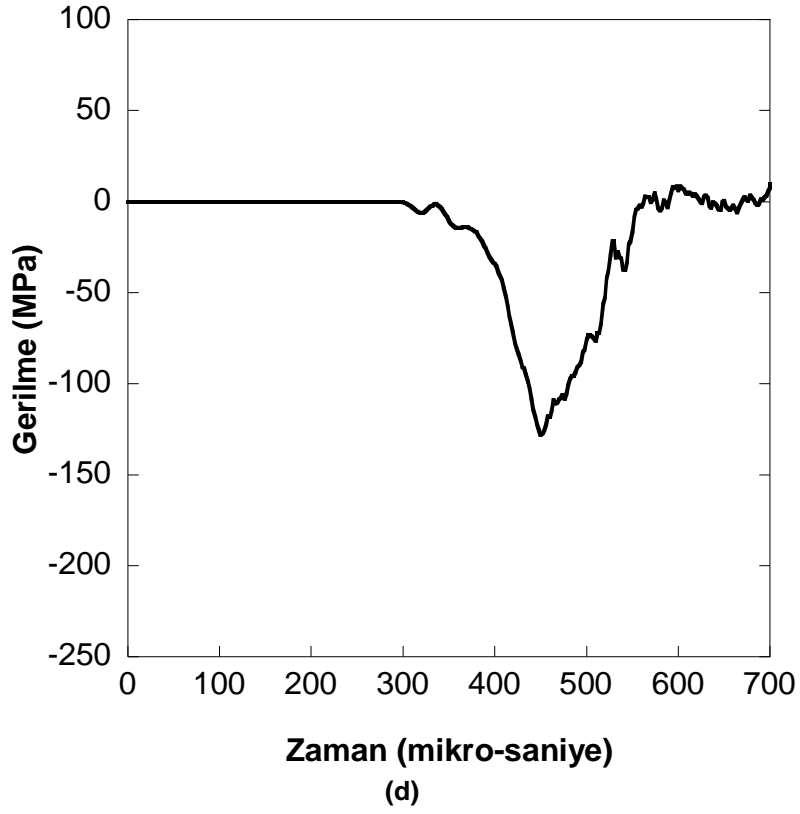
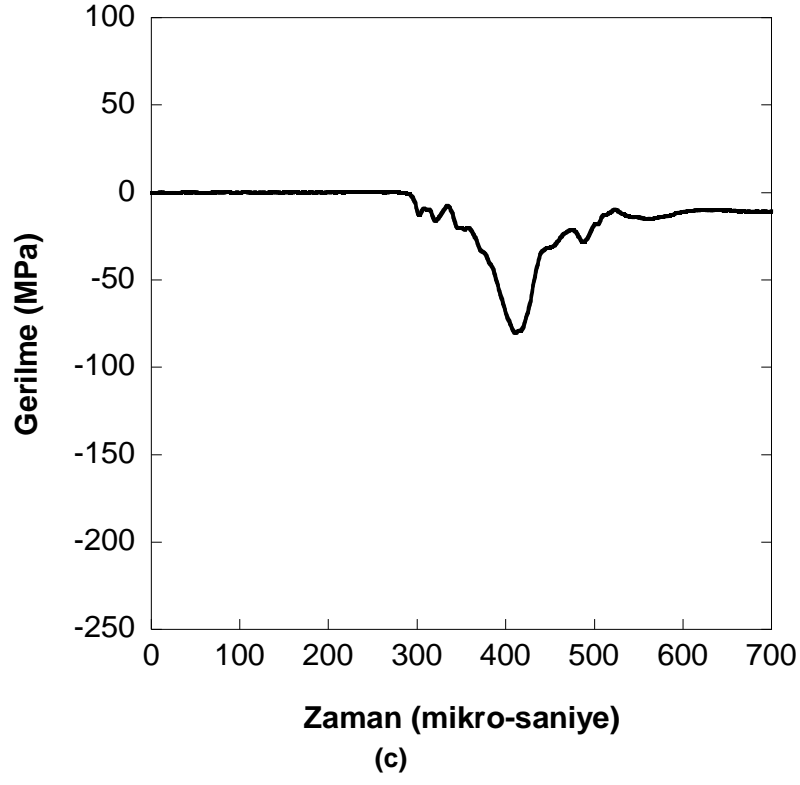
Şekil 3.42 Seramik+lastik+kompozit sisteme ait SHBB sonuçları: a) deneysel ve b) nümerik.



(a)



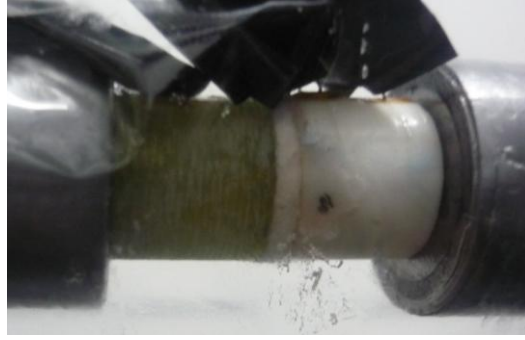
(b)



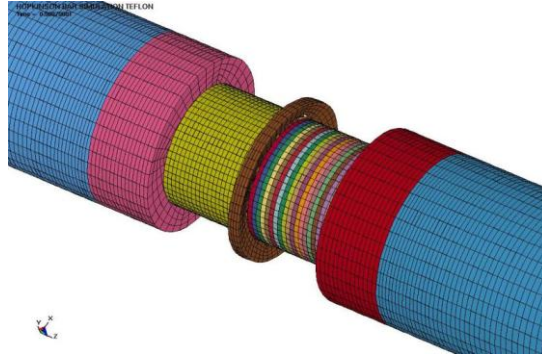
Şekil 3.43 Gerilmenin zamana bağlı değişimi: (a-b) seramik deneysel-nümerik ve (c-d) kompozit deneysel-nümerik.

Seramik ve kompozit katmanlar içerisinde ilerleyen dalganın hem şiddeti hem de genliği nümerik model tarafından başarıyla yakalanabilmiştir. Seramik ve kompozit katmanlar içerisinde ilerleyen gerilme dalgası tek ve iki katmanlı konfigürasyonlara göre oldukça farklılaşmıştır. Gerilme dalgası ilerleyişi sırasında her bir katmanın davranışı; katmanın kalınlığına, malzemesine ve katmana komşu malzemelerin özelliklerine bağlıdır. Lastik lineer davranış göstermeyen ve içerisinde dalga ilerleme hızının sabit olmadığı, aksine gerilme-şekil değiştirme değerlerine bağlı olduğu bir malzemedir. Lastik katmanı ile komşu katmanlar arasındaki akustik iletim ve yansıma katsayıları da sabit değildir ve bu katsayılar gerilme-şekil değiştirme değerlerine bağlıdır. Basma dalgası, seramik katmana ulaştıktan sonra katman içerisinde ilerlemekte ve seramik-lastik ara yüzeyine ulaşmaktadır. Lastiğin başlangıçta çok düşük akustik empedansa sahip olmasından dolayı gelen dalganın hemen hemen tamamı seramik katmana yeniden yansımaktadır. Çekme dalgası şeklinde yansıyan bu dalga, gelen basma dalgası ile karşılaşmakta ve gerilme şiddetinin azalmasına sebep olmaktadır. Lastik katman sıkıştıkça akustik empedansı artmakta ve buna bağlı olarak kompozit katmana iletilen gerilme miktarı da artmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde lastik katmanının tabakalar içerisinde ilerleyen gerilme dalgası şiddetinin azalmasına sebep olduğu görülmüştür. İki katmanlı durumla karşılaştırıldığında kompozit katmana iletilen gerilmenin maksimum değerinin % 80 oranında azalmış olduğu görülmektedir. Nümerik modelde, seramik ve kompozit katmanlar üzerinde kalınlık boyunca çeşitli elemanlar seçilerek gerilme değerlerinin değişimi incelendiğinde lastik katmanın hem kompozit katmanda hem de seramik katmanda gerilme gradyanlarına sebep olduğu görülmüştür.

Alternatif ara yüzey malzemelerinden teflon (Şekil 3.44 (a) ve (b)) için de gerilme dalgası ilerleyişi deneyleri ve simülasyonları tekrar edilmiştir.



(a)



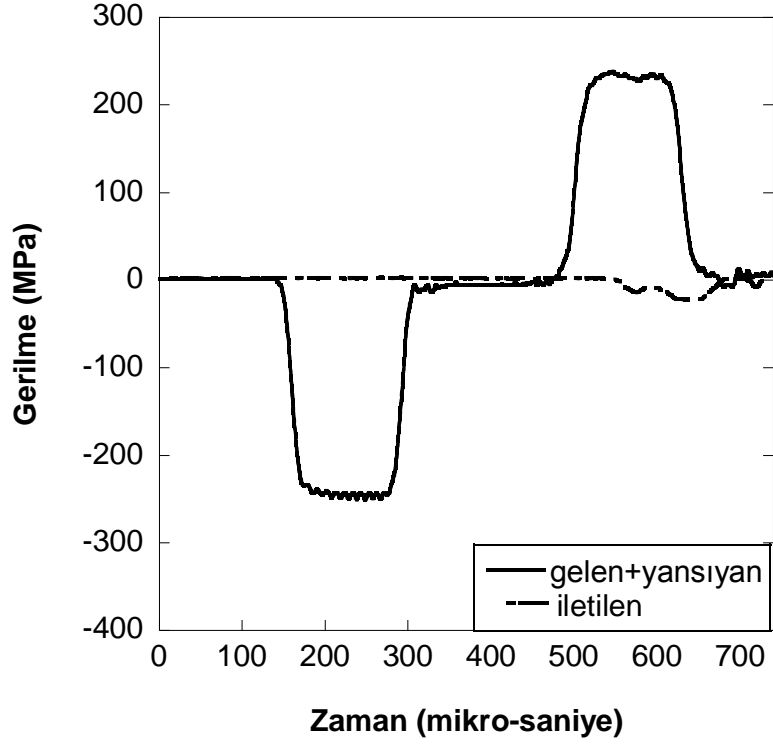
(b)

**Şekil 3.44 Seramik+teflon+kompozit SHBB numunesi ve nümerik modeli.**

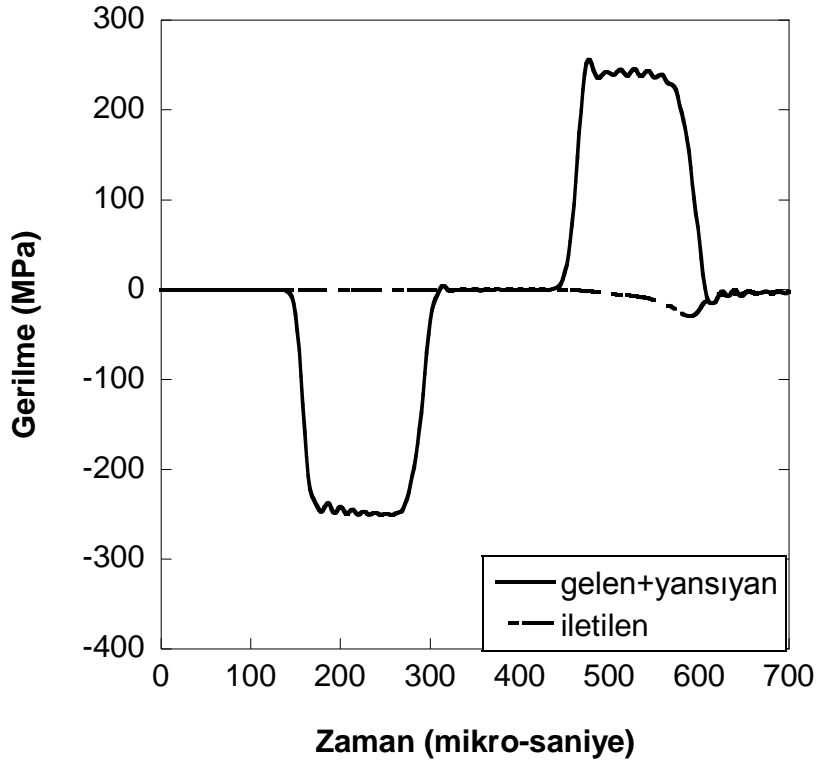
Bir önceki konfigürasyonda kullanılan EPDM lastik, poisson oranı yüksek (yaklaşık 0.5) bir malzemedir. Lastik, zırh sistemlerinde çoklu çarpma kabiliyetini arttırmak ve kompozit destek plakasına iletilen gerilme değerlerini azaltmak amacıyla kullanılmaktadır. Zırh sistemlerindeki ara yüzey katmanı, merminin çarptığı nokta çevresindeki malzeme tarafından sınırlandırılmaktadır. Lastik malzemenin neredeyse sıkıştırılmaz olmasından dolayı, başlangıçta düşük akustik empedansa sahip bu malzeme hızla sertleşmekte ve akustik empedansı hızlıca artarak üzerine gelen dalganın büyük çoğunluğunu kompozit katmana iletmektedir.

Teflon malzeme ise çok düşük poisson oranına sahiptir ve mekanik davranış bakımında lastiğe benzemekle birlikte, sıkışma sırasında düşük akustik empedans değerini hâla koruyabilmektedir. Bu davranışın etkisi detaylı olarak raporun ileriki bölümlerinde gerçek zırh sistemlerine mermi çarpışı simülasyonlarında incelenecektir. Teflon ara yüzey malzemesi kullanılması durumunda elde edilen deneysel ve nümerik SHBB sonuçları Şekil 3.45 (a) ve (b)'de verilmiştir.





(a)

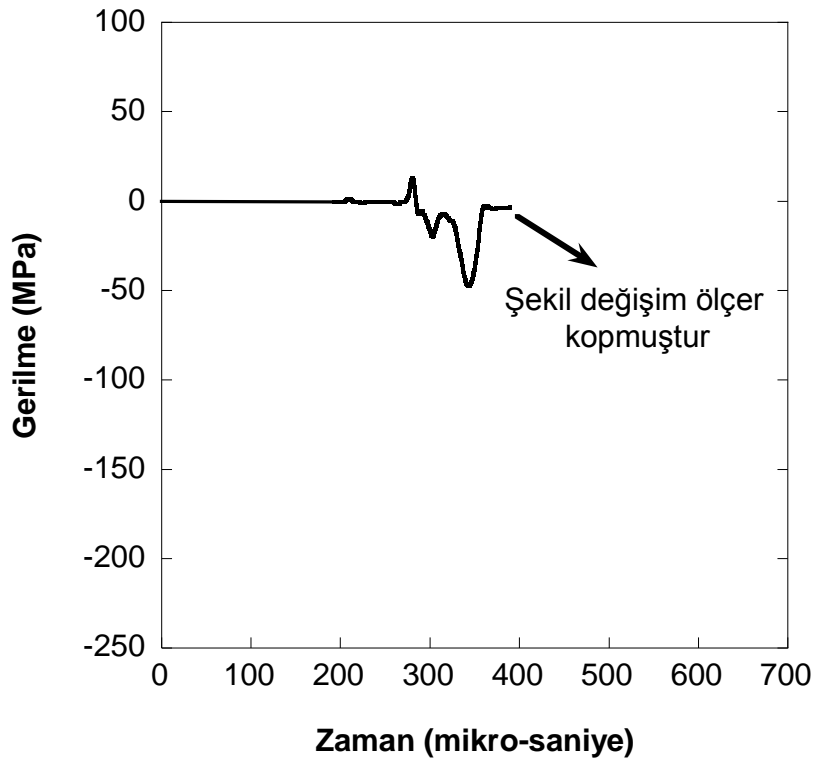


(b)

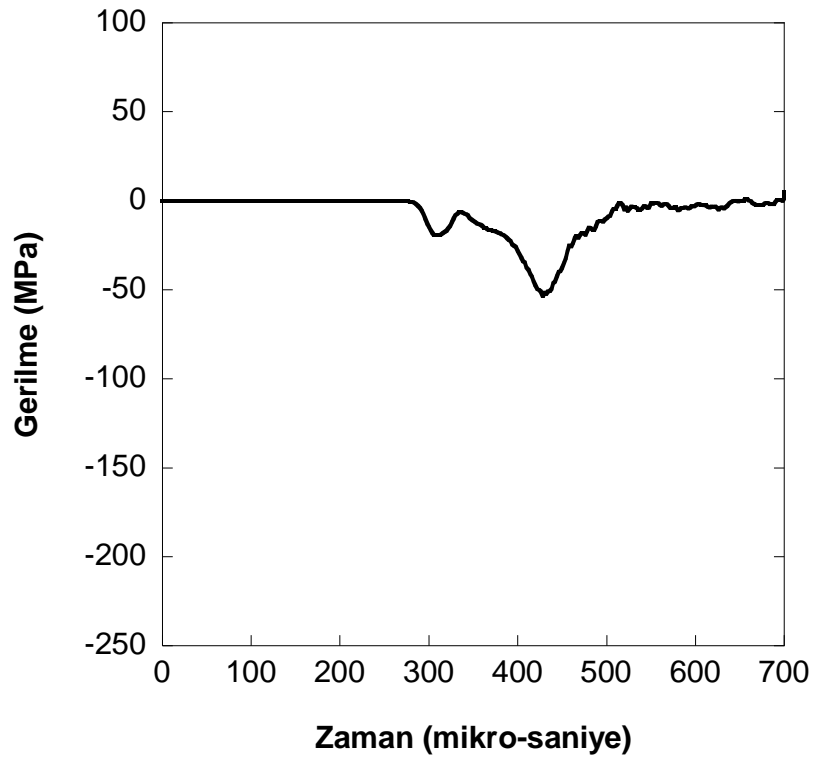
Şekil 3.45 Seramik+teflon+kompozit sisteme ait SHBB sonuçları: a) deneysel ve b) nümerik.

Nümerik sonuçlar, deneysel sonuçlar ile uyumludur. İletilen dalganın maksimum değeri, hem iki katmanlı hem de lastiğin ara yüzey malzemesi olarak kullanıldığı üç katmanlı hallerle kıyaslandığında oldukça düşüktür.

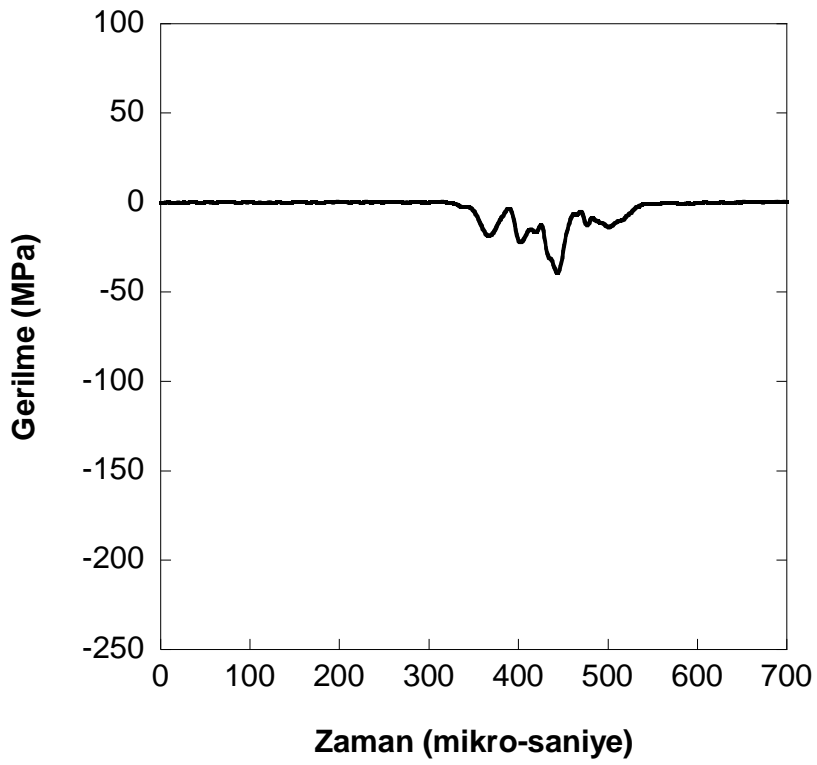
Şekil 3.46 (a)-(d)'de seramik ve kompozit katmanların yüzeyine (her bir katmanın kalınlığı boyunca orta noktasına) yerleştirilmiş olan şekil değişim ölçerlerin kaydetmiş olduğu ve nümerik modelden bunlara karşılık gelen elementlerden elde edilmiş gerilme tarihçeleri görülmektedir. Seramik katmanda ilerleyen gerilme dalgasının maksimum değeri, yaklaşık 50 MPa'dır ve bu değer iki katmanlı hal ile karşılaştırıldığında yaklaşık on kat, üç katmanlı lastik ara yüzeye sahip üç katmanlı hal ile karşılaştırıldığında yaklaşık olarak üç kat küçüktür. Kompozit malzemeye iletilen gerilme dalgasının maksimum değeri 60 MPa ile sınırlı kalmıştır. Bu değer, önceki iki sistemle kıyaslandığında sırasıyla yaklaşık sekiz ve iki kat daha düşüktür. Gerilme dalgasının iletilmesinde meydana gelen gecikme, zırh sisteminin balistik performansını arttırıcı bir husustur ve teflon malzeme kullanılması halinde gerilme dalgasının iletilmesindeki gecikmenin diğer iki halden daha fazla olduğu görülmektedir.



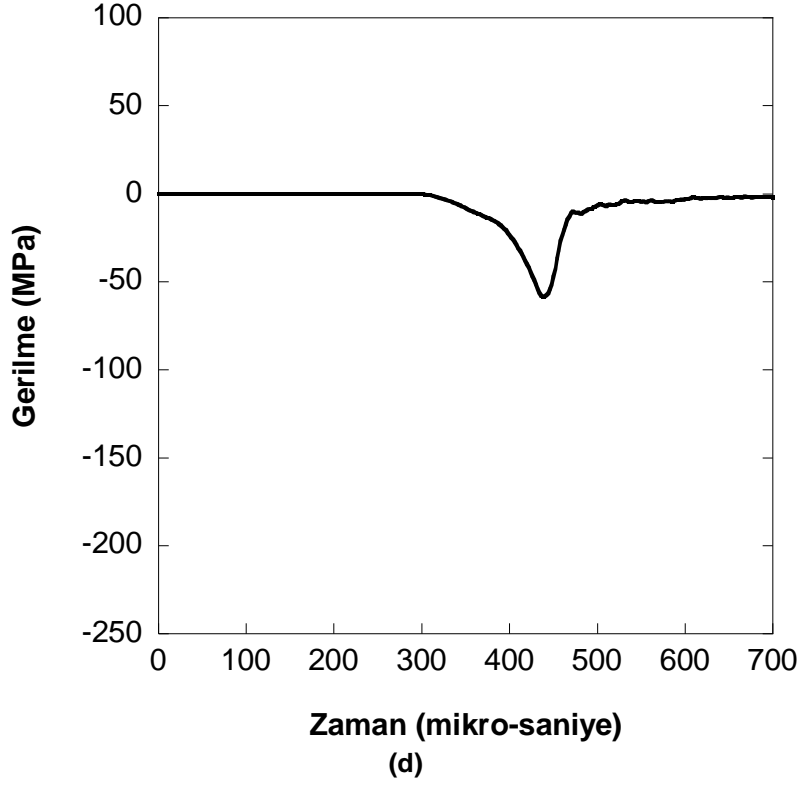
(a)



(b)



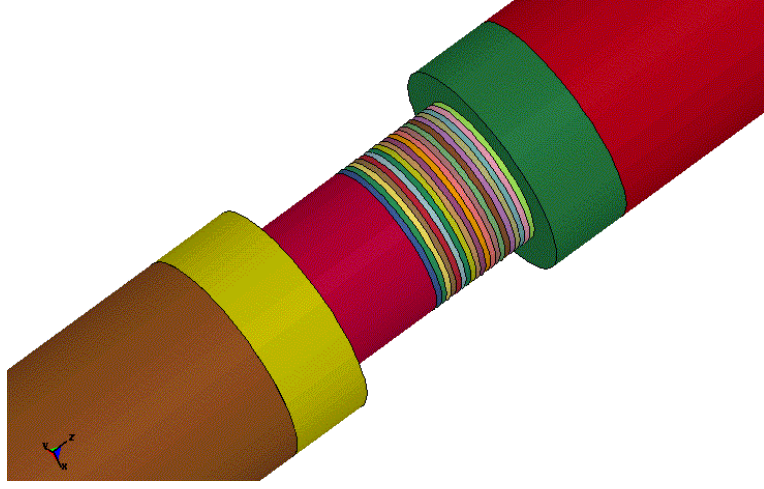
(c)



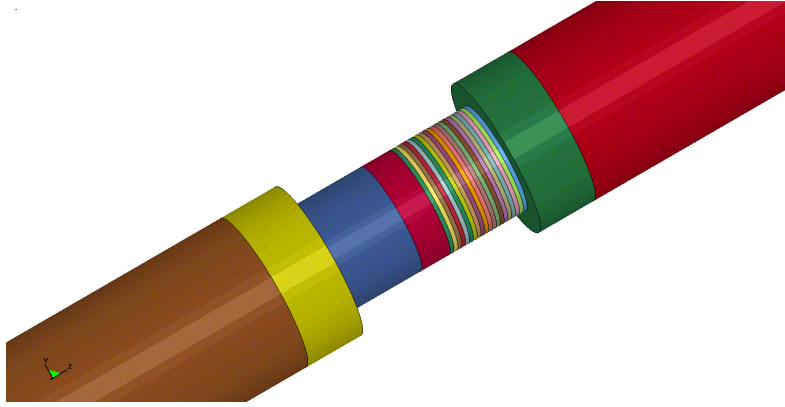
**Şekil 3.46 Gerilmenin zamana bağlı değişimi: (a-b) seramik deneysel-nümerik ve (c-d) kompozit deneysel-nümerik.**

Diğer alternatif ara yüzey malzemeleri olarak seçilen alüminyum metalik köpük ve içi boş metal küre ara yüzeylere sahip çok katmanlı sistemlerin Direkt Hopkinson Basınç Barı testi (bu deneyde numune çarpan ve alan çubukların arasına konularak sıkıştırılmaktadır) nümerik simülasyonları yapılmış ve bu iki konfigürasyonun dalga ilerleme karakteristikleri, ara yüzey malzemesi ihtiva etmeyen iki katmanlı seramik+kompozit malzemedan oluşan sistemle karşılaştırılmıştır. Direkt Hopkinson Basınç Barı testinin (DHBB) seçilmesinin ana nedeni metalik köpük ve içi boş metalik küreler gibi nispeten kalın ara yüzey malzemelerinin ancak bu deneyde tam olarak sıkıştırılabilesidir. Bu tarz gözenekli malzemelerde tipik gözenekli malzeme davranışı olan sabit plato gerilmeli deformasyonun elde edilebilmesi için numune kalınlığı boyunca belirli sayıda birim hücreye erişilecek şekilde kalınlıkların seçilmesi gerekmektedir. Nitekim bu sonuç raporunun ilerleyen kısımlarında detayları verilecek olan metalik köpük ara yüzey malzemesi ihtiva eden alternatif zırh sistemi konfigürasyonunda da diğer konfigürasyonlardan farklı olarak nispeten kalın ara yüzey malzemesi kullanılmıştır.

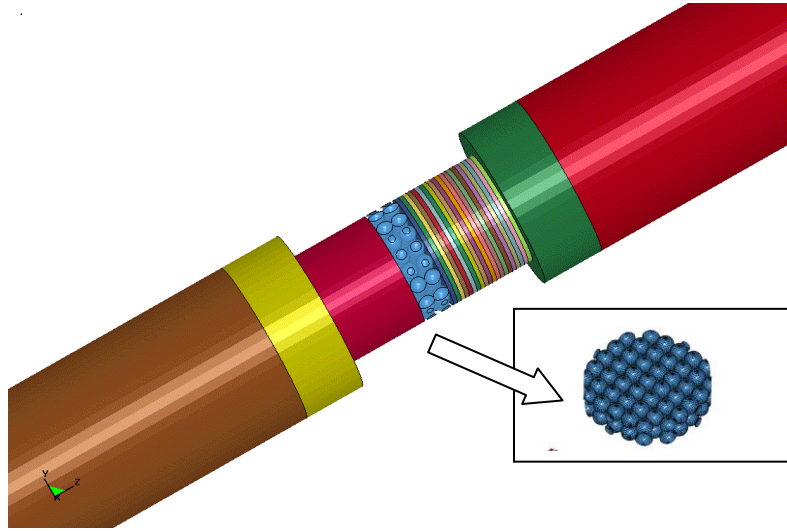
Direkt Hopkinson Basınç Barı deneyine ait iki katmanlı ve metalik köpük ve metalik küre ara yüzey malzemesi ihtiva eden nümerik modeller sırasıyla Şekil 3.47 (a-c)'de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

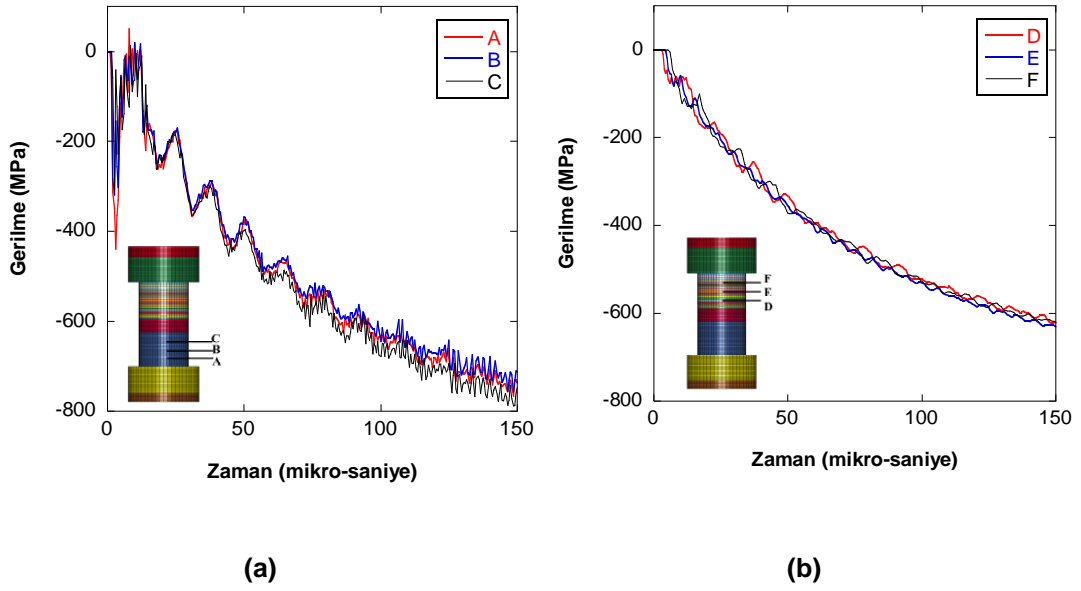
Şekil 3.47 DHBB nümerik modelleri: a) ara yüzsezsiz, b) metalik köpük ve c) MHSi.

Nümerik modelde çarpan çubuğun hızı 20 m/s olarak seçilmiştir. Hem alüminyum metalik köpük hem de içi boş metal küre ara yüzey malzemelerinin kullanıldığı numunelerin dalga ilerleme karakteristikleri, referans konfigürasyon olarak kabul edilen iki katmanlı seramik ve kompozit numuneye karşılaştırılmıştır. Her üç konfigürasyonda da seramik ve kompozit katmanlarının kalınlıkları sırasıyla 10.1 ve 10.7 mm olarak alınmıştır. Ara yüzey malzemelerinin kalınlığı ise 4 mm olarak seçilmiştir. Bu kalınlık değerinin daha önce alternatif ara yüzey malzemesi olarak davranışları incelenen teflon ve EPDM lastik katmanların kalınlıklarından daha büyük seçilmesinin sebebi, köpük ve içi boş metal küre tarzı yapıların tipik mekanik davranışları olan ilk deformasyonu takiben plato gerilmesi etrafında sabit gerilmeli deformasyon davranışını ancak belirli kalınlık değerlerinden sonra verebilmesindedir.

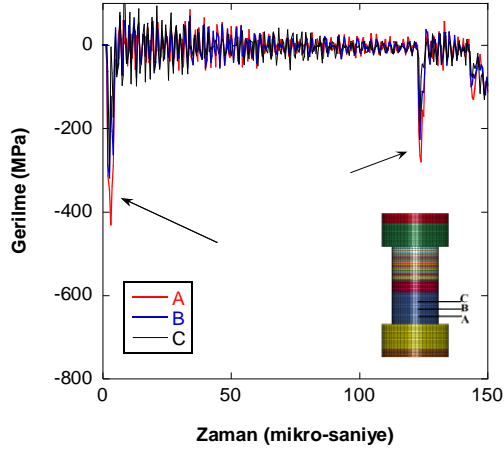
Çok katmanlı bu yapılarda gerilme dalgası ilerleyişini incelemek amacıyla seramik ve kompozit katmanların yüzeyleri üzerindeki belirli noktalarda gerilme tarihçeleri kaydedilmiştir. Bu sayede hem numuneyi oluşturan katmanlarda gerilme dalgası dağılımının incelenmesi mümkün olmakta hem de alternatif konfigürasyonlar birbirleriyle kıyaslanabilmektedir. Ayrıca alan çubuk üzerinde bulunan bir eleman üzerinden çok katmanlı sistemin tamamından iletilen dalga

izlenmiştir. İncelenen bütün konfigürasyonlarda aynı konumlarda bulunan elemanlar seçilmiştir.

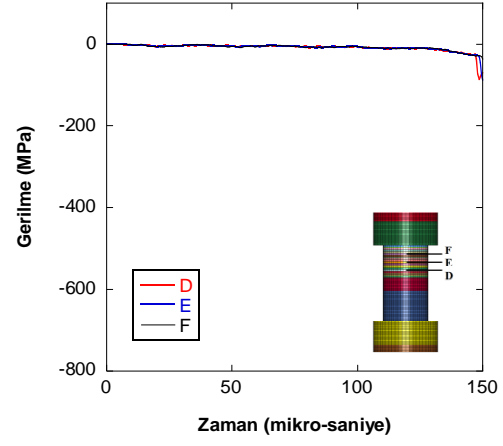
Öncelikle seramik ve kompozit katmanlarda gerilme dağılımı incelenmiştir. Şekil 3.48 (a) ve (b)'de iki katmanlı, Şekil 3.49 (a) ve (b)'de alüminyum köpük ara yüzey malzemesi ihtiva eden üç katmanlı ve Şekil 3.50 (a) ve (b)'de ise metalik küre ara yüzey malzemesi ihtiva eden üç katmanlı konfigürasyonlar için seramik ve kompozit katmanlarda gerilme dalgasının zamana bağlı değişimi verilmiştir.



Şekil 3.48 İki katmanlı sistemde gerilme dalgası tarihçesi: a) seramik ve b) kompozit.

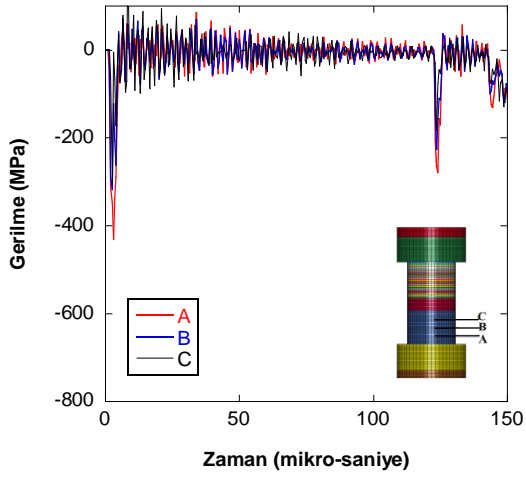


(a)

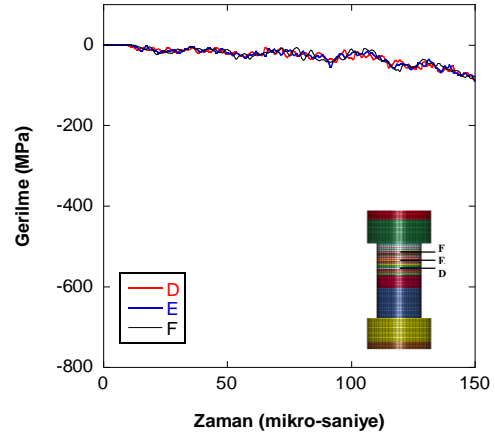


(b)

Şekil 3.49 Alüminyum köpük ihtiva eden sistemde gerilme dalgası tarihçesi: a) seramik ve b) kompozit.



(a)



(b)

Şekil 3.50 Metalik küre ihtiva eden sistemde gerilme dalgası tarihçesi: a) seramik ve b) kompozit.



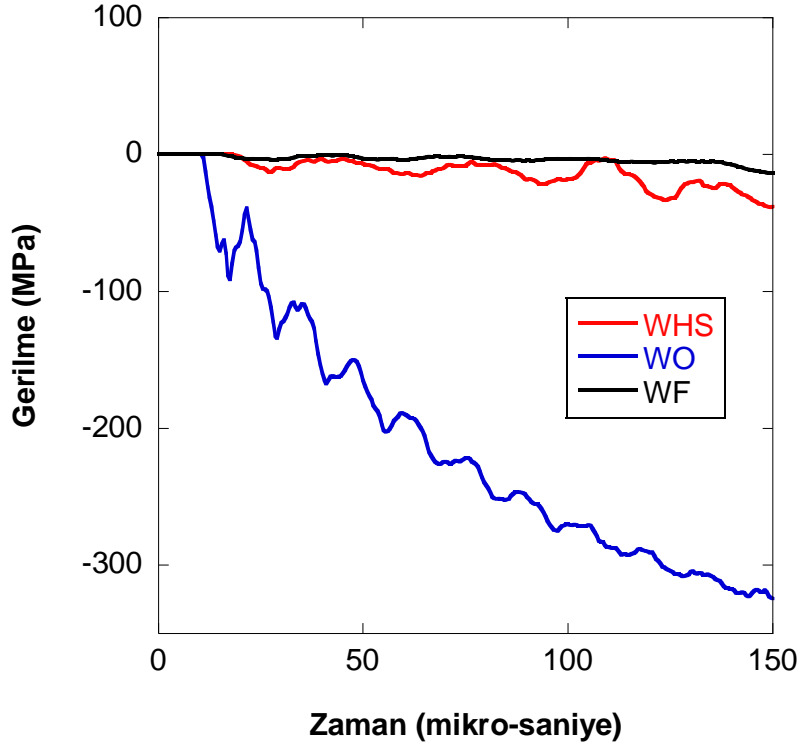
Her üç konfigürasyonda da çarpan çubuğun numuneye çarpması ile birlikte seramik katmanda bir ilk gerilme piki oluşmakta ve bu ilk pikin değeri, numunenin yüzeyindeki konuma bağlı olarak değişmektedir. Çarpan çubuğa en yakın elemanda elde edilen pik değerinin diğerlerinden daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Çarpan çubuk tarafından katmanlı sisteme iletilen basma dalgası, ara yüzeyden yansıyan çekme dalgası vasıtasıyla kısmi olarak sönümlenmektedir. Numune içerisinde farklı katmanlarda meydana gelen çoklu yansıma ve iletimlerden dolayı oldukça kompleks bir gerilme dalgası ilerleyişi söz konusudur. İki katmanlı konfigürasyonda kompozit katmana gerilme dalgasının iletimi, yaklaşık olarak 3 mikro saniye kadar gecikmeyle başlamakta ve seramikte görülen davranışa benzer şekilde gittikçe artarak ilerlemektedir.

Alüminyum köpük ara yüzey malzemesinin bulunduğu sistemde çarpan çubuk numuneye çarptığı anda seramik katmana basma gerilme dalgası iletilmektedir. Basma gerilme dalgası, metalik köpük ara yüzeye ulaştığı anda gelen dalga'nın önemli bir kısmı akustik empedans farkından dolayı yansımakta ve kalan kısmı ise metalik köpüğe iletilmektedir. Ara yüzeyden yansıyan ve seramik içerisinde ilerleyen gerilme dalgası seramik/çarpan çubuk ara yüzeyine ulaşmaktadır. Çubuk, seramik, kompozit ve ara yüzey malzemelerinin akustik empedans değerlerinin birbirlerinden farklı olması ve özellikle metalik köpük ara yüzey malzemesinin akustik empedans değerinin şekil değiştirme değeri ile birlikte değişmesinden dolayı gerilme dalgası ilerleyişi oldukça karmaşık bir durum almaktadır. Nitekim başlangıçta ara yüzey malzemesinin düşük akustik empedans değerinden dolayı seramik ile çarpan çubuk ara yüzeyleri birbirleri ile temas halinden ayrılmakta ve daha sonra deformasyonun devamı ile birlikte tekrar temas sağlanmaktadır. Bu temas halinin bitişi ve tekrar başlangıcı Şekil 3.49 (a)'da oklarla gösterilmiştir.

Benzer yorumlar, içi boş metal küre ara yüzey malzemesinin kullanılması durumunda da yapılabilmektedir. Alüminyum köpük ara yüzey malzemesi ile karşılaştırıldığında içi boş küreler kullanılması durumunda kompozit katmana iletilen gerilme değerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Referans hal ile kıyaslandığında ise kompozit katmana iletilen gerilme değerinin şiddeti azalmakta ve iletim zamanı gecikmesi gözlemlenmektedir. Bu iki husus da dikkate alındığında her iki ara yüzey malzemesinin de görevini başarı ile gerçekleştirdiği

görülmekle beraber, iki ara yüzey malzemesi birbiriyle kıyaslandığında metalik köpük malzemenin daha etkin çalışmakta olduğu görülmüştür.

Şekil 3.51’de ise alan çubuk üzerindeki bir elemandan kaydedilen gerilme tarihçeleri üç farklı konfigürasyon için çizilmiştir.



Şekil 3.51 Alan çubuğa iletilen gerilme dalgası tarihçeleri.

Bu ana kadar yapılan çalışmalarda Hopkinson Basınç Barı testleri ve nümerik simülasyonları kullanılarak çok katmanlı malzeme sistemlerindeki gerilme dalgası ilerleyişi hakkında çok değerli bilgiler elde edilmiştir. Bu bilgiler sayesinde hem alternatif sistemleri birbirleriyle karşılaştırma şansı bulunmuş, hem de detayları yine bu sonuç raporu kapsamında anlatılacak olan gerçek zırh simülasyonlarında kullanılacak malzeme modellerinin parametreleri tespit edilmiştir.

#### **4. ALTERNATİF ZIRH SİSTEMLERİNİN BALİSTİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ: DENEYSEL VE NÜMERİK ÇALIŞMA**

Zırh sistemlerindeki gerilme dalgası ilerleyişi, Hopkinson Basınç Bariyer testlerindeki tek eksenli gerilme dalgası ilerleyişi durumundan farklı olarak çok eksenlidir. Ayrıca zırh sistemlerinde balistik çarpma olayı sırasında mermi, zırh sistemini oluşturan katmanlara penetre olmakta ve hem zırh malzemesinde hem de mermi malzemesinde erozyon meydana gelmektedir. İşte bütün bu hususların dizayna dâhil edilerek ara yüzey malzemelerinin etkinliklerinin incelenebilmesi için zırh sistemlerine mermi çarpma deneylerinin ve nümerik simülasyonlarının yapılması gerekmektedir.

Bu amaçla iki farklı grup deneysel çalışma planlanmıştır. İlk grup deneyler AP 7.62MM mermi (Şekil 4.1) ile yapılan balistik testlerdir. İkinci grup deneyler ise İYTE Dinamik Test ve Modelleme Laboratuvarında (DTMLab) kurulu bulunan gaz tabancası kullanılarak (Şekil 4.2) yapılmış olan çarpma haznesi testleridir.

Gerçek zırh delici mermilerin kullanıldığı balistik testler, şüphesiz ki zırh sistemlerinin geliştirilmesinde ve denenmesinde son derece önemlidir. Bu testler sonucunda zırh sistemlerinin koruma etkinliklerini görebilmek mümkündür. Bu amaçla öncelikli olarak balistik testlerin sonuçları raporlanacaktır. Çok katmanlı zırh sistemlerinin balistik testleri sırasında seramik ve kompozit katmanlarda meydana gelen hasarlar ve ara yüzey malzemelerinin bu hasar modları üzerine etkileri gibi bazı çok önemli hususlar gözlenebilmektedir. Fakat bu testler sırasında gerilme dalgası ilerleyişi, zırh sistemi toplamı ve katmanlar içerisinde absorbe edilen enerji komponentleri gibi bazı çok önemli ek bilgileri görebilmek mümkün değildir. Bu sebeple SHBB analizlerinde izlenen metodoloji burada da takip edilmiş ve deneylerin nümerik simülasyonları yapılarak deneyler sırasında elde edilmesi zor veya imkansız olan ek bilgilerin de analizlerde hesaba katılması sağlanmıştır. Yine nümerik simülasyonların deneysel sonuçlarla uyumluluklarının gösterilmesi, nümerik simülasyonların daha sonraki optimizasyon çalışmalarında ve bazı parametrik çalışmalarda güvenle kullanılabilmesini sağlamıştır.

Balistik deneylerin yukarıda bahsi geçen büyük avantajları olduğu gibi tekrar edilebilirliklerinin (hedefi tam ortadan vurma, zırha merminin dik olarak çarpması ve yüksek hızlı kamera ile açık sahada kayıt zorluğu) sınırlı kalmaları ve pahalı olmaları gibi bazı dezavantajları da mevcuttur. Bu sebeple proje kapsamında sadece balistik testlerle sınırlı kalmayıp, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü bünyesinde kurulu bulunan çarpma haznesinde (Şekil 4.2) kontrollü ve tekrar edilebilir deneyler yapılarak gerçek balistik testlerde elde edilen bilgilere ek kazançlar sağlanmıştır. Ayrıca çarpma haznesinde yapılan deneyler yüksek hızlı kamera ile kaydedilmiş ve zırh sisteminde meydana gelen dinamik hasar gözlemlenmiştir.



**Şekil 4.1 7.62MM zırh delici mermi.**



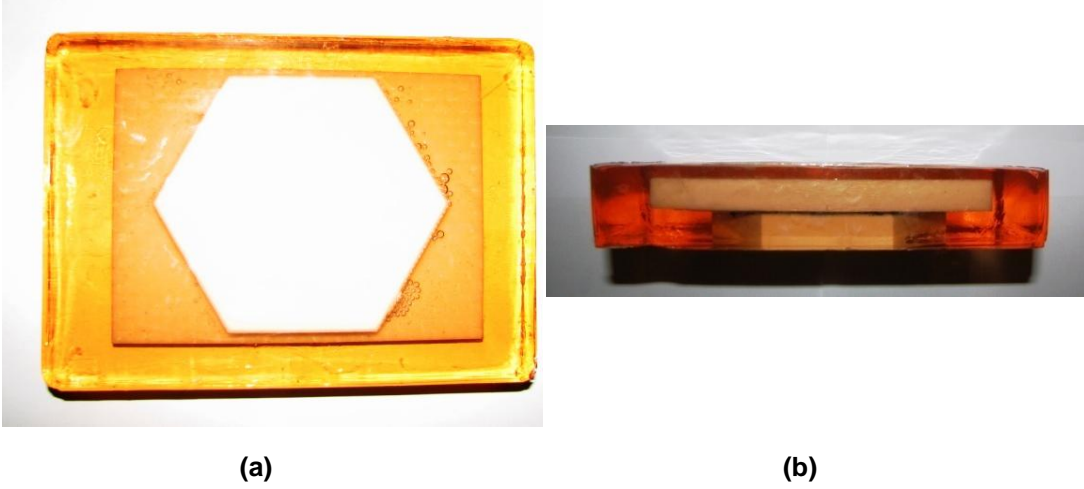
Şekil 4.2 Çarpma haznesi.

#### 4.1. Balistik çarpma testleri ve nümerik simülasyonları

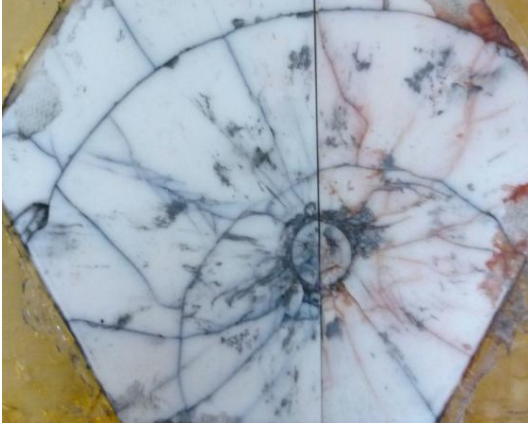
Balistik performansa ara yüzey malzemelerinin etkisini görmek amacıyla çeşitli ara yüzey malzemelerine sahip zırh sistemlerine AP 7.62MM zırh delici mermiler deneysel ve nümerik olarak çarptırılmıştır. Bu amaçla seçilen alternatif zırh sistemleri: a) ara yüzey ihtiva etmeyen seramik ve kompozit malzemeden oluşan iki katmanlı (WO), b) EPDM lastik ara yüzey tabakası ihtiva eden üç katmanlı (WR), c) Teflon ara yüzey malzemesi ihtiva eden üç katmanlı (WT) ve d) Alüminyum metalik köpük ara yüzey malzemesi ihtiva eden üç katmanlı sistemlerdir (WF). Balistik testlerde kullanılan numunelere örnek Şekil 4.3'de görülmektedir. Bu testlerde zırh delici mermi, 50 metre mesafede bulunan bir sabitleme çerçevesi vasıtasıyla sabitlenmiş zırh sistemine çarpmaktadır. Deneysel merminin çarpma hızı 800 m/s'dir. Balistik testler sonucunda merminin zırh sistemini delip delemediği ve katmanlarda meydana gelen hasarlara ara yüzey malzemesinin etkisi görülmüştür.

Yapılan balistik testler sonucunda zırh delici merminin bütün alternatif zırh sistemlerini tamamen delemediği ve balistik korumayı sağlayabildiği görülmüştür. Balistik test edilmiş numunelerin hasar bölgeleri Şekil 4.4'de görülmektedir. Şekillerden de görülebileceği gibi ara yüzey malzemesinin türü, seramik ve kompozit katmanlarda meydana gelen hasar üzerinde oldukça etkilidir.

Özellikle Teflon ve alüminyum metalik köpük ara yüzey malzemelerinin kullanılması durumunda seramik katmanda meydana gelen hasar miktarı atarken kompozit katmanda meydana gelen hasar miktarı azalmaktadır. Deneysel sonuçların daha iyi irdelenebilmesi ve deneylerle elde edilemeyen kompozit ve seramik katmanlardaki enerji değişimleri, katmanlar üzerindeki noktasal gerilme dağılımları, merminin hız ve erozyona bağlı kütle değişimi gibi bazı çok önemli ek bilgilerin elde edilebilmesi için deneylerin ışığı altında bu zırh sistemlerine zırh delici mermilerin çarpma hallerinin nümerik modelleri hazırlanmıştır. Nümerik modelleme sırasında katmanlarda hasar oluşumu inceleneceğinden dolayı tam simetrik model kullanılmıştır.



Şekil 4.3 Balistik test numunesi: a) üst ve b) yan görünüşler.



(a)



(b)



(c)

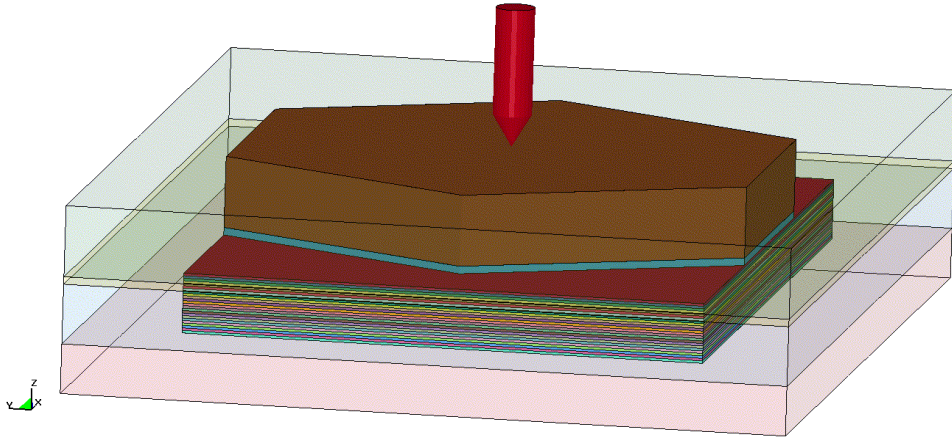


(d)

**Şekil 4.4 Balistik test numuneleri: a) Ara yüzeysiz, b) EPDM lastik, c) Teflon ve d) köpük arayüzeyle.**



Çok katmanlı zırh sistemi numuneleri polyester reçine içerisine gömülüdür. Bu polyester kalıp, zırh sistemini oluşturan katmanları bir arada tutmaktadır ve test düzeneğine numuneyi sabitlemeyi sağlamaktadır. Nümerik modele bu polyester katman da dâhil edilmiştir. Hazırlanan nümerik model Şekil 4.4’de görülmektedir.



**Şekil 4.5 Balistik test nümerik modeli.**

Nümerik modelde AP 7.62MM mermi 800 m/s hızla zırh sistemine dik doğrultuda çarptırılmıştır. Çözüm süresi olarak 250 mikro saniye seçilmiştir. Bu süre, merminin durdurulmasına ve sistemin absorbe ettiği enerji değerinin sabit kalmasına yetecek kadar uzundur. AP 7.62MM mermi gerçekte Şekil 4.1’de de görüldüğü gibi çelik çekirdek ve dış kılıftan oluşmaktadır. Bu çalışmada esas olan zırh sisteminin davranışını daha detaylı olarak incelemek olduğu için mermi konik uçlu bir silindir olarak kabul edilerek modellenmiştir. Nümerik modelle ilgili detaylar Tablo 4.1’de verilmiştir.



**Tablo 4.1 Nümerik model detayları.**

<b>Malzeme</b>	<b>En (mm)</b>	<b>Boy (mm)</b>	<b>Kalınlık (mm)</b>	<b>Eleman Sayısı</b>
Seramik	55.7	101.8	14.3	177840
Kompozit	145	101.8	12	464256
EPDM Lastik	55.7	101.8	1.5	23712
Teflon	55.7	101.8	2	23712
Alüminyum köpük	55.7	101.8	18	213407

Zırh sistemini oluşturan katmanlar için kullanılan malzeme modelleri ve model parametreleri Tablo 4.2 ve 4.3’de verilmiştir.

**Tablo 4.2 Malzeme modeli parametreleri**

<b>Seramik</b>		
<b>Sembol</b>	<b>Tanım</b>	<b>Değer</b>
$\rho$	Yoğunluk	3890 kg/m <sup>3</sup>
G	Kayma Modülü	123 GPa
A	Hasarsız Normalize Mukavemet Parametresi	0.949
B	Hasarlı Normalize Mukavemet Parametresi	0.1
C	Şekil Değiştirme Hızı Hassasiyeti Sabiti	0.007
M	Hasarlı Mukavemet Parametresi	0.2
N	Hasarsız Mukavemet Parametresi	0.2
EPSI	Referans Deformasyon Hızı	1.0 s <sup>-1</sup>
T	Maksimum Çekme Basınç Mukavemeti	0.262 GPa
SFMAX	Maksimum Normalize Edilmiş Kırılma Mukavemeti	1
HEL	Hugoniot Elastik Sınırı	8 GPa
PHEL	Hugoniot Elastik Sınırındaki Basınç Komponenti	3.51 GPa
D1	Hasar Parametresi	0.001
D2	Hasar Parametresi	1
K1	Basınç Katsayısı (EOS)	186 GPa
<b>Kompozit</b>		
$\rho$	Yoğunluk	1850 kg/m <sup>3</sup>
$E_a, E_b, E_c$	Elastisite Modülü	18.2, 18.2, 6.2 GPa
$\nu_{BA}, \nu_{CA}, \nu_{CB},$	Poisson Oranı	0.08, 0.14, 0.15
$G_{AB}, G_{BC}, G_{CA}$	Kayma Modülü	1.79,1.52,1.52GPa
$S_{AT}, S_{BT}$	Düzlem İçi Çekme Mukavemeti	400 MPa
$S_{CT}$	Düzleme Dik Çekme Mukavemeti	50 MPa
$S_{AC}, S_{BC}$	Basma Mukavemeti	330 MPa
$S_{FC}$	Fiber Ezilme Mukavemeti	500 MPa
$S_{AB}, S_{BC}, S_{CA}$	Matris Modu Kayma Mukavemeti	30 MPa
AM1,AM2,	Hasar Parametreleri	2.0, 2.0,
AM3,AM4		
$C_1, C_2,$	Deformasyon Hızı Parametreleri	0.014,0.040
$C_3, C_4$		

**Tablo 4.3 Ara yüzey malzeme modeli parametreleri**

<b>Alüminyum Metalik Köpük</b>		
<b>Sembol</b>	<b>Tanım</b>	<b>Değer</b>
$\rho$	Yoğunluk	438 kg/m <sup>3</sup>
E	Bulk Malzemenin Elastisite Modülü	69 GPa
SIGY	Bulk Malzemenin Akma Mukavemeti	104 MPa
VF	Malzemenin Tam Sıkıştırılmış Haldeki Relatif Hacmi	0.29
$E_{aa_u}$	Sıkıştırılmamış Haldeki Elastik Modül	17.7 MPa
$E_{bb_u}$	Sıkıştırılmamış Haldeki Elastik Modül	17.7 MPa
$E_{cc_u}$	Sıkıştırılmamış Haldeki Elastik Modül	17.7 MPa
$G_{abu}$	Basıncsız Haldeki Kayma Modülü	69 MPa
$G_{bc_u}$	Basıncsız Haldeki Kayma Modülü	69 MPa
$G_{ca_u}$	Basıncsız Haldeki Kayma Modülü	69 MPa
<b>EPDM Lastik</b>		
$\rho$	Yoğunluk	1200 kg/m <sup>3</sup>
$\nu$	Poisson Oranı	0.4995
N	Ogden Modeli Derecesi	3
<b>Teflon</b>		
$\rho$	Yoğunluk	760 kg/m <sup>3</sup>
E	Elastik Modül	3.65 GPa
$\nu$	Poisson Oranı	0.25

Nümerik modelde seramik katman için Johnson-Holmquist 2 (JH-2) ve kompozit katman için de MAT162 malzeme modellerinin kullanılması, her iki katmanda da hasarın izlenebilmesini sağlamıştır. MAT162 malzeme modeli ile ilgili detaylar, bu raporun önceki bölümünde ayrıntılı olarak sunulmuş ve malzeme modeli sabitlerinin bulunuşu detaylı olarak anlatılmıştır. Bu sebeple yalnızca seramik malzemedeki meydana gelecek olan dinamik hasarı modellemede kullanılan JH-2 malzeme modeli hakkında bu bölümde kısaca bilgi verilmiştir.

Seramik ve cam gibi malzemelerin modellenmesinde kullanılan Johnson-Holmquist malzeme modelinde eşdeğer gerilme aşağıdaki formüle göre hesaplanmaktadır:

$$\sigma^* = \sigma^i - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad 4.1$$

$\sigma_i^*$  hasar görmemiş davranışı belirtmektedir.

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad 4.2$$

Hasar görmüş malzemenin davranışı ise:

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad 4.3$$

Ayrıca “\*” indisi normalize edilmiş değerleri ifade etmekte ve gerilme değerleri Hugoniot elastik limitteki eşdeğer gerilme değerleriyle, basınç değeri  $P^*$  Hugoniot elastik limitteki eşdeğer basınç değeriyle “ $P_{HEL}$ ”, şekil değiştirme hızı  $\dot{\epsilon}^*$  ise referans olarak verilen şekil değiştirme hızı ile normalize edilmektedir. A, hasar görmemiş normalize mukavemet parametresi, C şekil değiştirme hızına bağlı mukavemet parametresidir.  $T^*$  normalize edilmiş çekme gerilmesi, T ise malzemenin çekme mukavemetidir.

$$T^* = \frac{T}{P_{HEL}} \quad 4.4$$

$$P^* = \frac{P}{P_{HEL}} \quad 4.5$$

D hasar parametresidir.

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon^P}{\epsilon_f^P} \quad 4.6$$

$$0 \leq D \leq 1$$

$$\epsilon_f^P = D_1(P^* + T^*)^{D_2} \quad 4.7$$

Hidrostatik basınç ise

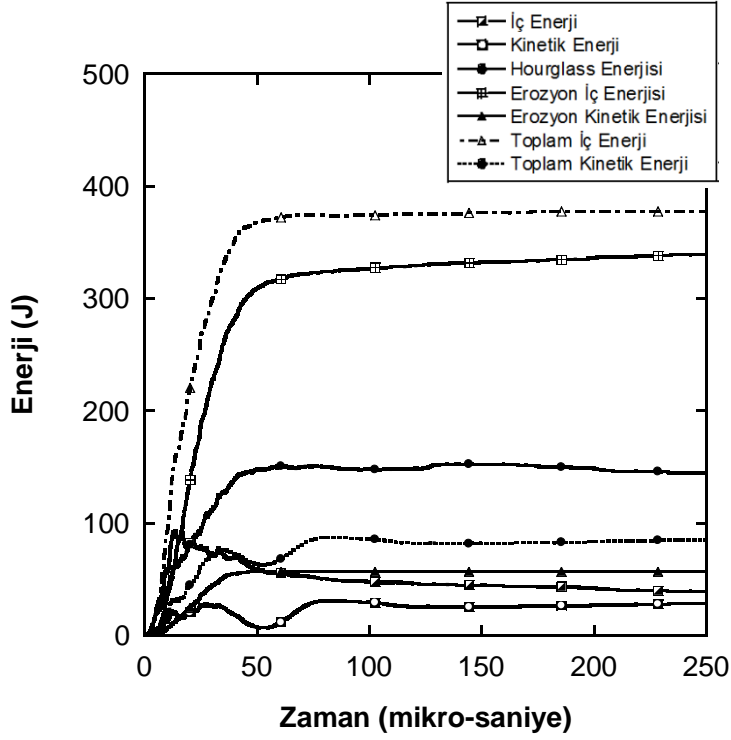
$$P = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 + \Delta P \quad 4.8$$

burada  $\mu$  hacimsel şekil değiştirmediir ve

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_i} - 1 \quad 4.9$$

formülünden hesaplanır.

Nümerik simülasyonlara iki katmanlı konfigürasyonun incelenmesiyle başlanmıştır. Bu konfigürasyon referans kabul edilerek sonuçları alternatif konfigürasyonlarla kıyaslanmıştır. Merminin çarpması ile birlikte seramik katmanda absorbe edilen enerji bileşenlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.6'da verilmiştir.

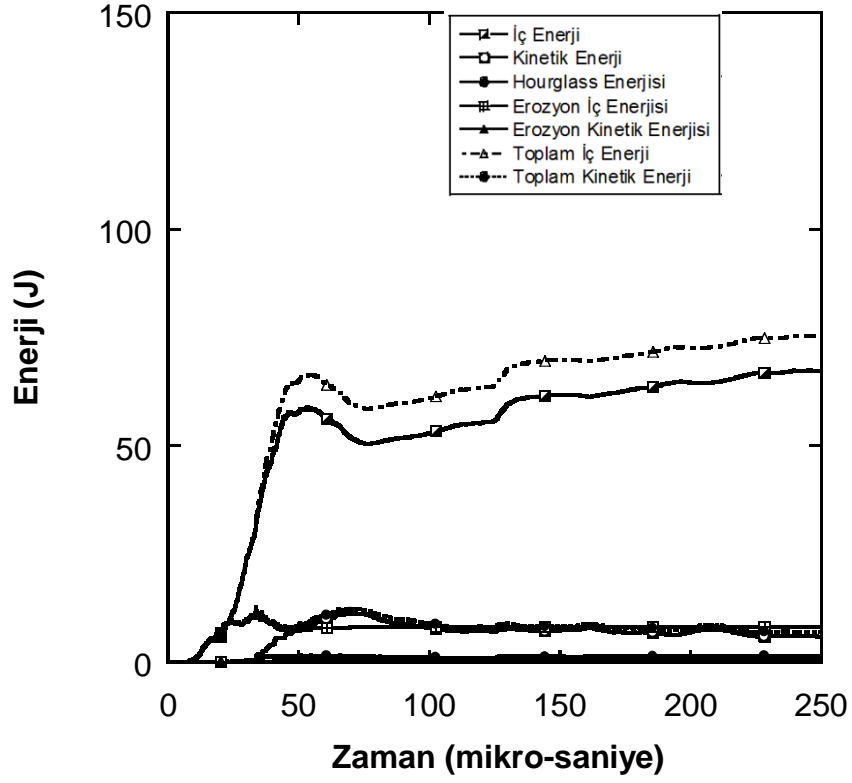


Şekil 4.6 Seramik katmanda enerji bileşenlerinin değişimi.

Zırh sistemlerinin etkinliğinin incelenmesinde en önemli parametrelerden biri enerji emilimidir. Nümerik model kullanılarak seramik ve kompozit katmanlar içerisinde emilen enerjilerin dağılımını görebilmek mümkündür. Merminin kinetik enerjisi zırha çarpma ile birlikte deformasyon iç enerjisi, erozyon enerjisi, zırhı oluşturan parçaların kinetik enerjisi ve ısı enerjisi gibi birçok farklı moda dönüşmektedir. Nümerik simülasyon kullanılarak yine kompozit malzemeyi oluşturan katmanların içerisindeki enerji emilim dağılımlarını da görmek mümkündür.

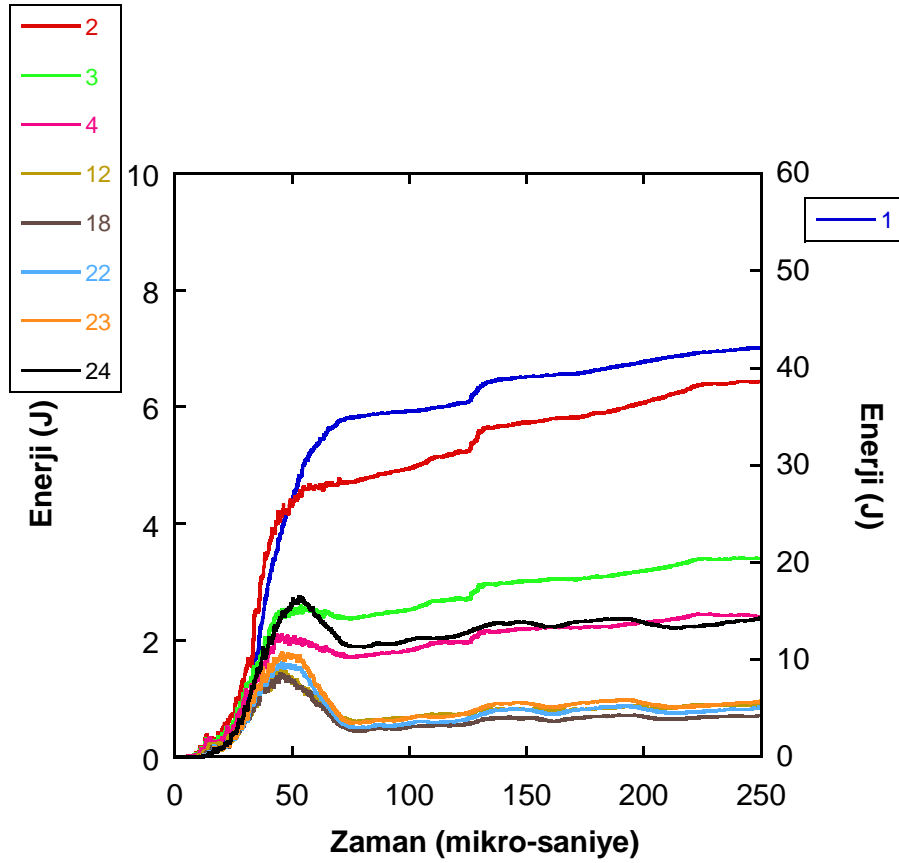
Seramik katman içerisinde emilen enerjinin önemli bir bölümü erozyon iç enerjisidir. Bu durum, merminin seramik katmana çarpmasından hemen sonra seramik katman içerisinde oluşan pülverize olmuş malzemenin merminin sivri ucunu deforme ederek erozyona sebep olmasıyla açıklanmaktadır. Raporun ileriki kısımlarında bu enerji değerleri alternatif zırh konfigürasyonları için karşılaştırılarak sistemler arasındaki bağıl farklar ortaya konmuştur.

Şekil 4.7' de ise kompozit katman içerisinde emilen enerjinin zamana bağlı değişimi görülmektedir.



Şekil 4.7 Kompozit katmanda enerji bileşenlerinin değişimi.

Kompozit katmanda emilen enerjinin ana bileşeni deformasyon iç enerjisidir. Kompozit yapıyı oluşturan 24 kat içerisindeki enerji emilim dağılımı ise Şekil 4.8'de verilmiştir.

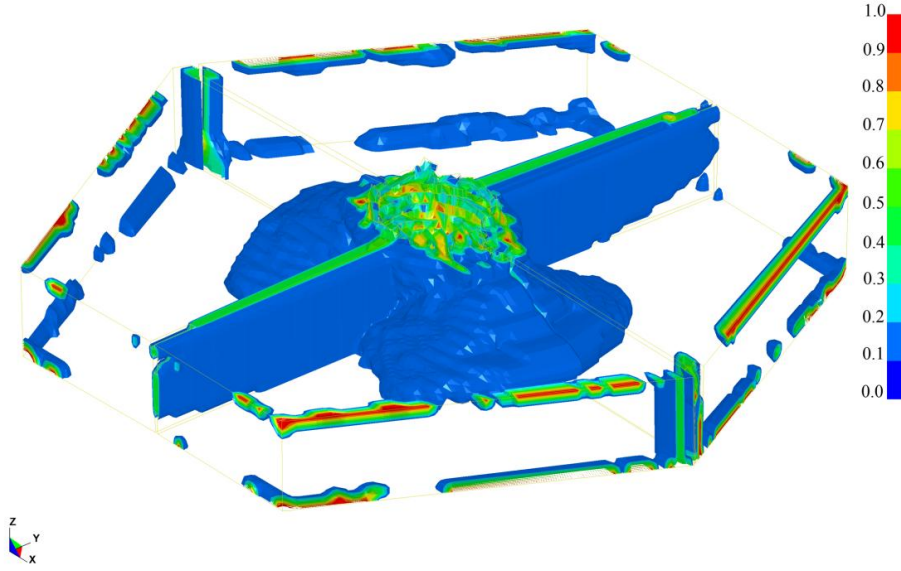


Şekil 4.8 Kompozit katmanlarında toplam iç enerjinin değişimi.

Kompozit yapı, seramiğe komşu en üst katmandan başlanarak numaralandırılmıştır. Kompozit katmanın seramikle komşu 1 numaralı en üst katı, en yüksek enerji değerine sahiptir. Daha sonra enerji değeri kademeli olarak 22. katmana kadar azalmaktadır. 22 numaralı katmandan 24 numaralı katmana kadar yine enerji değerleri artış göstermektedir. Buradan açıkça görülmektedir ki kompozit katmanın üst ve alt yüzeyleri, çarpma enerjisinin sönmülmesinde önemli rol oynamaktadır. Özellikle üst katmanların enerji seviyesindeki artış, seramik malzemenin kırılıp hasara uğramasından sonra seramik katmanın kompozitin üst yüzeyine penetre olmaya çalışmasından kaynaklanmaktadır. Yine alt yüzeydeki uç katmanlar da hem eğilme gerilmesi etkisinden hem de arka yüzeyden yansıyan çekme dalgalarının etkisinden dolayı deformasyona uğramaktadır.

İki katmanlı olan bu zırh sistemine zırh delici merminin çarpması durumunda seramik katmanda meydana gelen hasar Şekil 4.9'da verilmiştir.

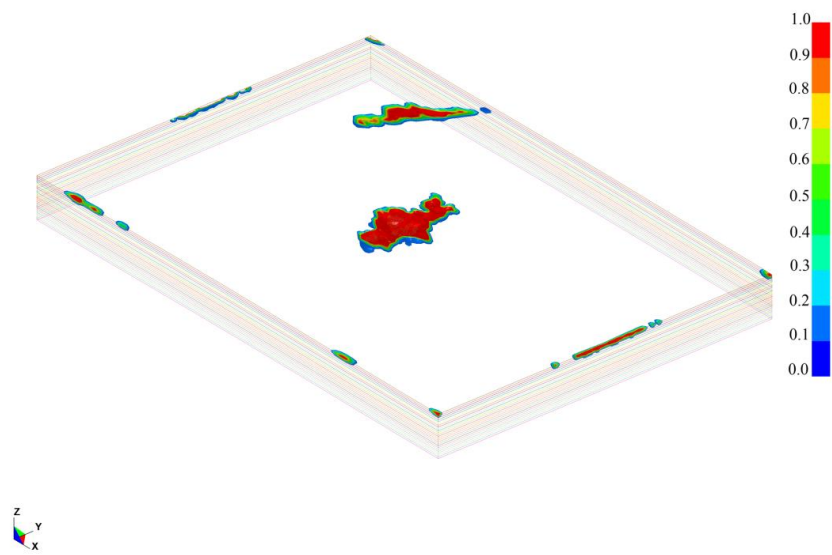




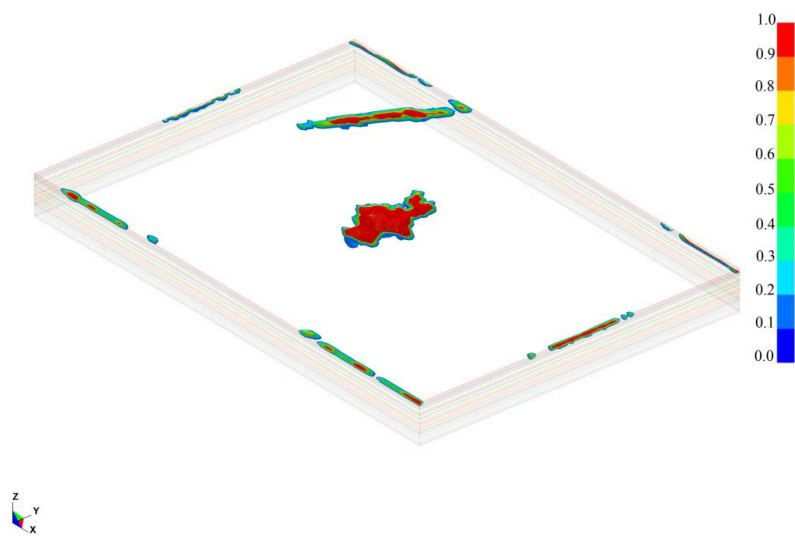
**Şekil 4.9** Seramik katmanda meydana gelen hasar.

Seramik malzeme için kullanılan malzeme modelinin tanımı dikkate alındığında Şekil 4.9'da hasar değişkeninin 0 değerini aldığı hasara uğramamış bölgeler ve 1 değerini aldığı tamamen hasara uğramış bölgeler görülmektedir. Ara yüzey malzemesinin kullanılmaması durumunda seramik katmanda hasar genellikle merminin çarptığı bölgede lokalize olmaktadır. Seramik katman, radyal yönde ilerleyen dört uzun kırık vasıtasıyla katastrofik hasara uğramaktadır.

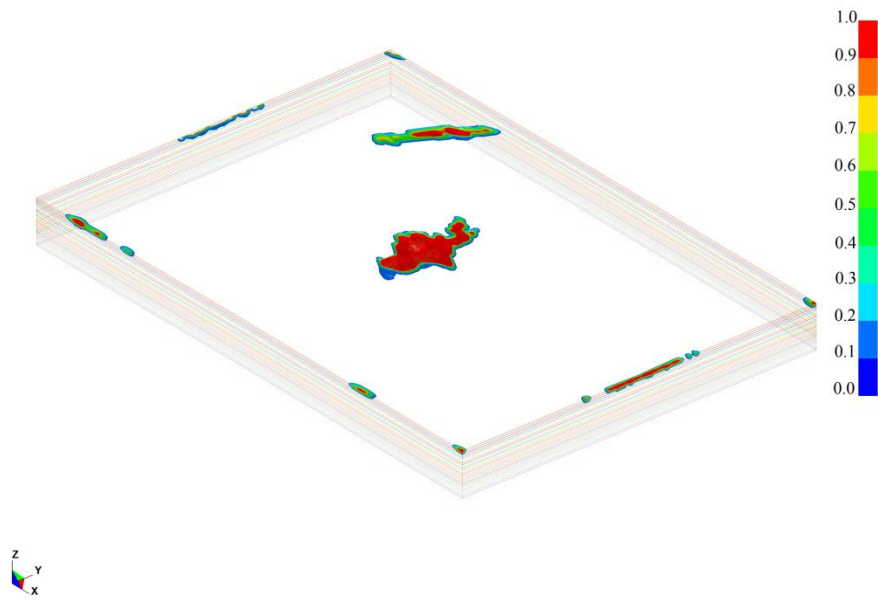
MAT162 malzeme modeli, kompozit katmanda meydana gelen hasar modlarını ayrı ayrı ortaya koyabilmektedir. Şekil 4.10 (a-e)'de sırasıyla fiberlerde x malzeme yönünde meydana gelen hasar, fiberlerde y malzeme yönünde meydana gelen hasar (x ve y kompozit katmanın düzlem içerisindeki yönleridir), fiberlerde z malzeme yönünde meydana gelen hasar (z yönü kompozit katmana dik yöndür ve bu hasar modu fiberlerdeki ezilmeyi gösterir), kompoziti oluşturan katlara dik yönde matriste meydana gelen hasar (polyester matrisin hasara uğraması) ve kompoziti oluşturan katlara paralel yönde meydana gelen hasar, yani delaminasyon hasarı görülmektedir.



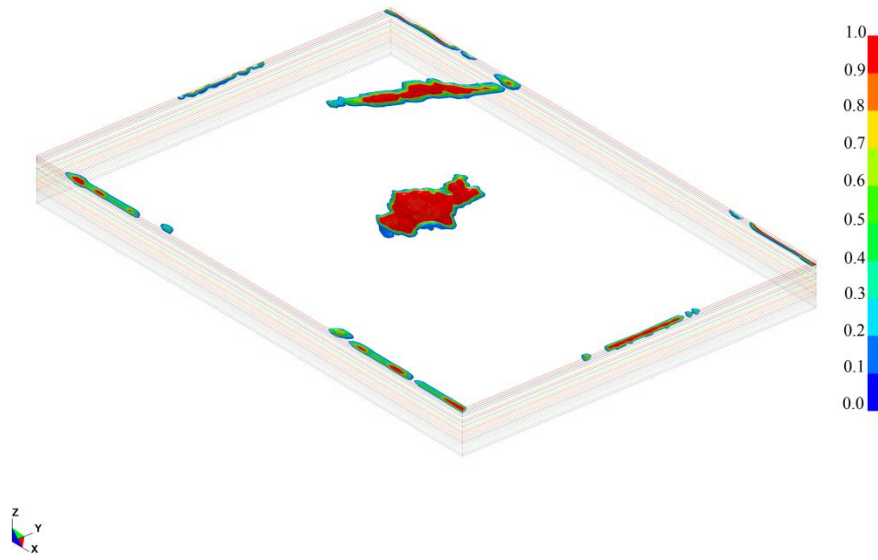
(a)



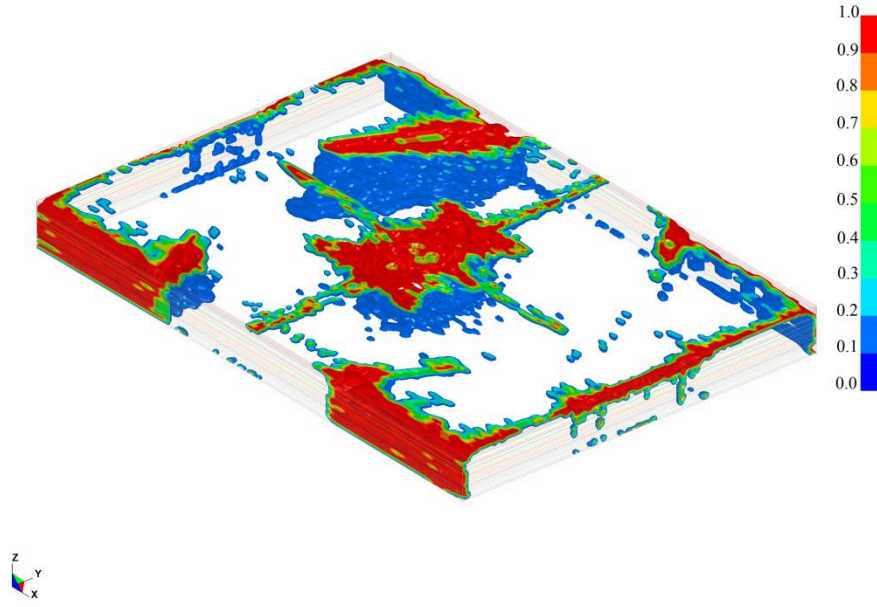
(b)



(c)



(d)

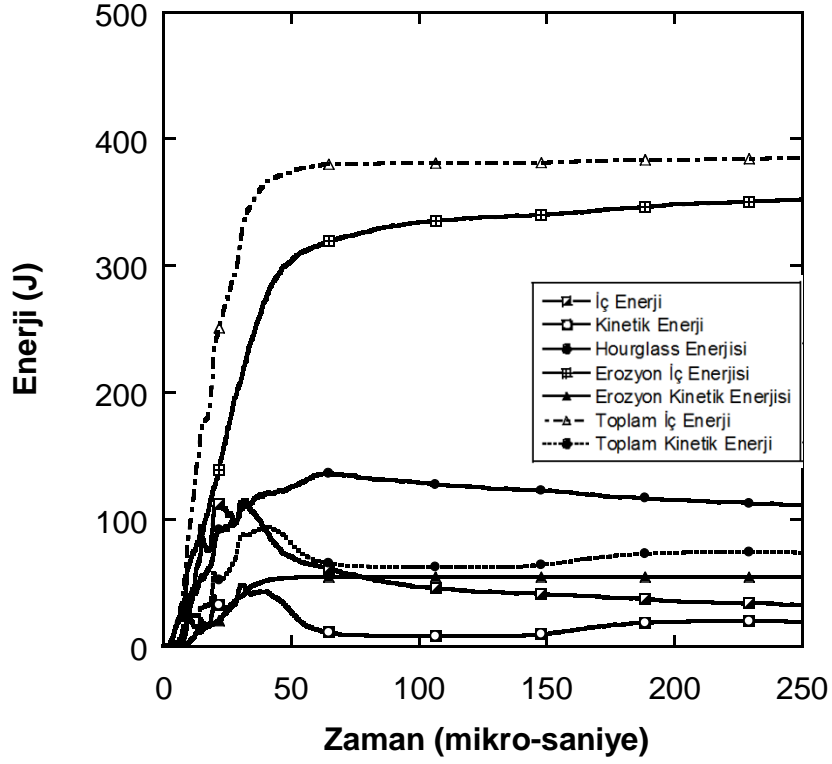


(e)

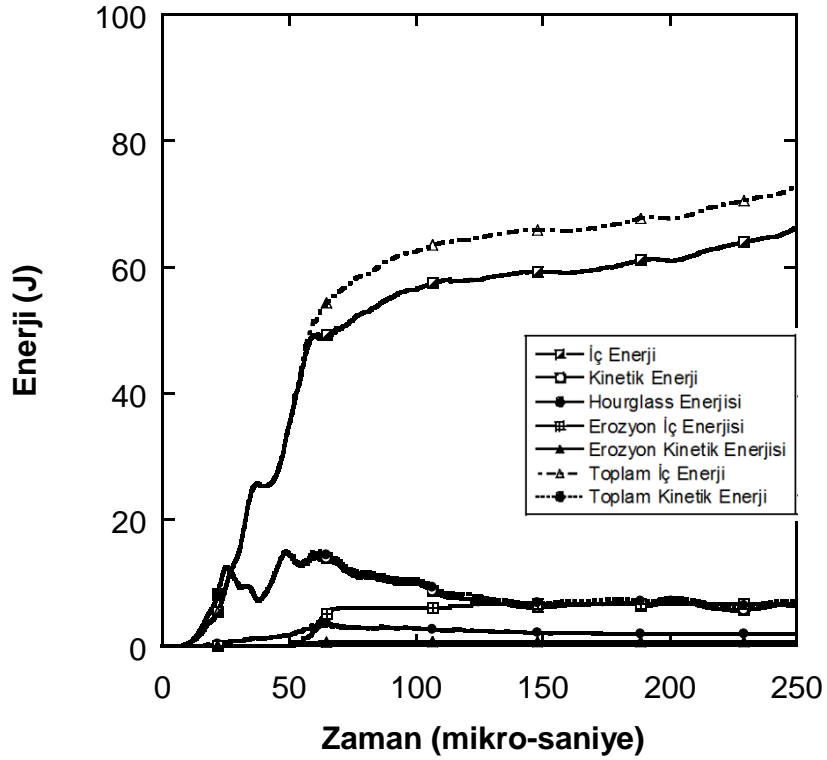
Şekil 4.10 Kompozit katmanda meydana gelen hasar modları.

Kompozit katmanda meydana gelen hasar modları incelendiğinde seramik katmanda meydana gelen hasarda olduğu gibi merminin çarpma noktasının altında yoğunlaşan fiber hasarları ve yine altıgen geometriye sahip seramik katmanın kırıldıktan sonraki sınırlarını izleyecek şekilde devam eden delaminasyon hasarı gözlemlenmektedir. Diğer alternatif zırh konfigürasyonlarında da benzer analizler yapılarak ara yüzey malzemesinin seramik ve kompozit katmanlarda meydana gelen hasara etkileri raporun ileriki kısımlarında irdelenecektir.

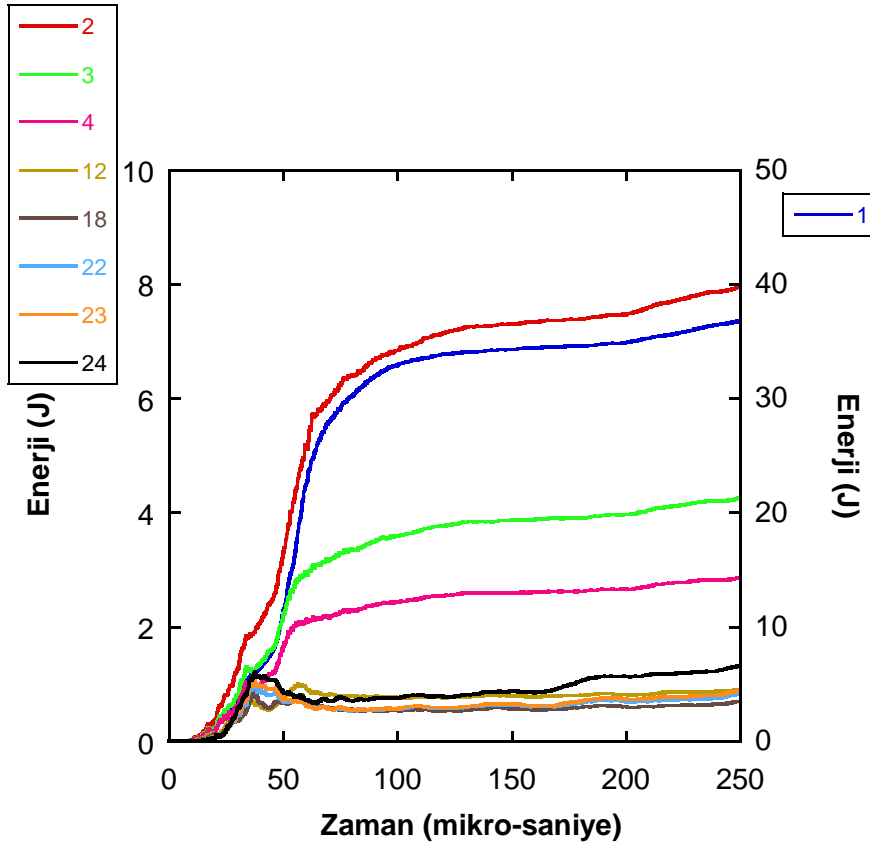
Alternatif zırh konfigürasyonlarından ilki olan EPDM lastik ihtiva eden zırh sistemine mermi çarpması durumunda seramik ve kompozit katmanlarda enerjilerin zamana bağlı değişimleri, sırasıyla Şekil 4.11 ve 4.12’de verilmiştir. Şekil 4.13’de ise kompozit katmanı oluşturan katmanların içerisinde toplam iç enerjinin değişimi verilmiştir.



Şekil 4.11 Seramik katmanda enerji bileşenlerinin değişimi.



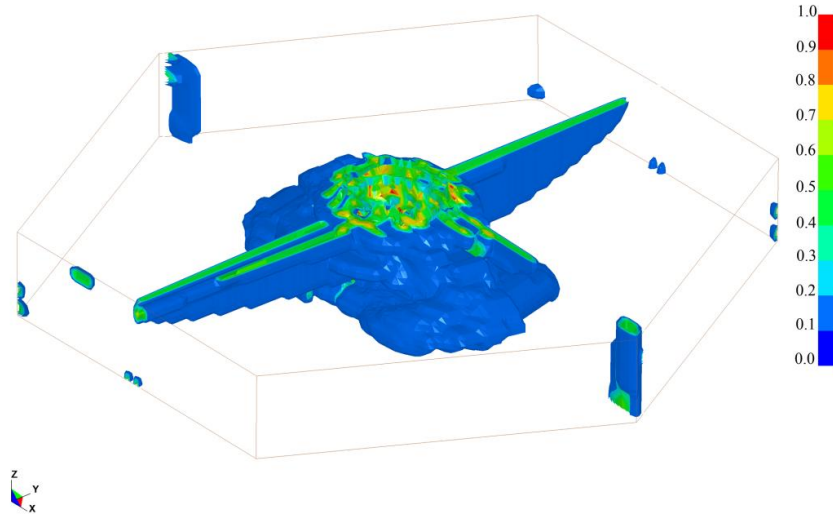
Şekil 4.12 Kompozit katmanda enerji bileşenlerinin değişimi.



Şekil 4.13 Kompozit katmanlarda toplam iç enerjinin değişimi.

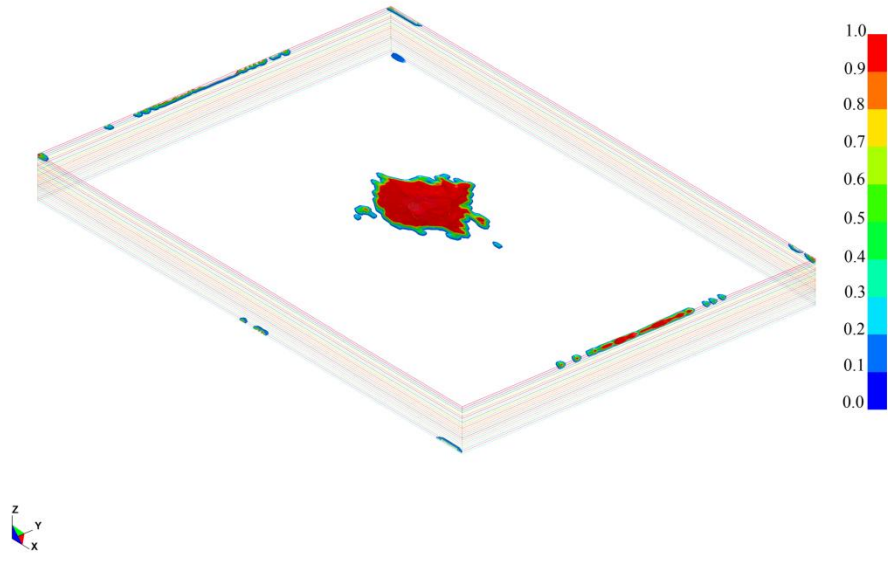
Referans hal ile karşılaştırıldığında EPDM lastik ara yüzey malzemesinin kullanılması durumunda seramik katmanda absorbe edilen toplam iç enerjinin hemen hemen aynı kaldığı, kompozit katmanda ise azaldığı görülmektedir. Kompozit içerisinde absorbe edilen enerjinin kompoziti oluşturan katlar arasındaki dağılımı incelendiğinde ise özellikle üst yüzeyde bulunan katların enerji emilimine katkısının daha büyük olduğu görülmektedir.

Şekil 4.14’de ise seramik katmanda meydana gelen hasar görülmektedir. Referans hal ile kıyaslandığında seramik katmanda hasara uğrayan bölge miktarının çok fazla değişmediği gözlemlenmektedir. EPDM ara yüzey malzemesi, seramik katmanda meydana gelen hasar miktarını fazla değiştirmemekle beraber akustik empedans farklılığından dolayı kompozit katmana iletilen gerilme değerleri önemli miktarda değişmiştir. Raporun ilerleyen kısımlarında kompozit katman içerisinde çeşitli noktalardaki gerilme tarihçeleri incelenerek ara yüzey malzemelerinin enerji emilim değerlerinin değişiminin yanında gerilme değerlerinin de nasıl değişimine sebep olduğu irdelenmiştir.

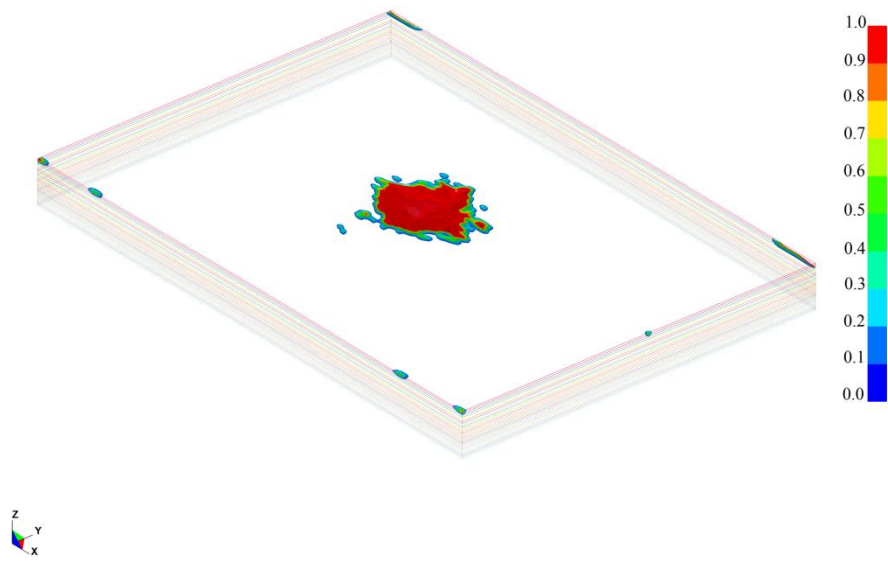


**Şekil 4.14 Seramik katmanda meydana gelen hasar.**

Şekil 4.15 (a-e)'de sırasıyla EPDM lastik ara yüzey malzemesi kullanılması durumunda kompozit katmanda fiberlerde x malzeme yönünde meydana gelen hasar, fiberlerde y malzeme yönünde meydana gelen hasar (x ve y kompozit katmanın düzlem içerisindeki yönleridir), fiberlerde z malzeme yönünde meydana gelen hasar (z yönü kompozit katmana dik yöndür ve bu hasar modu fiberlerdeki ezilmeyi gösterir), kompoziti oluşturan katlara dik yönde matriste meydana gelen hasar (polyester matrisin hasara uğraması) ve kompoziti oluşturan katlara paralel yönde meydana gelen hasar, yani delaminasyon hasarı görülmektedir.

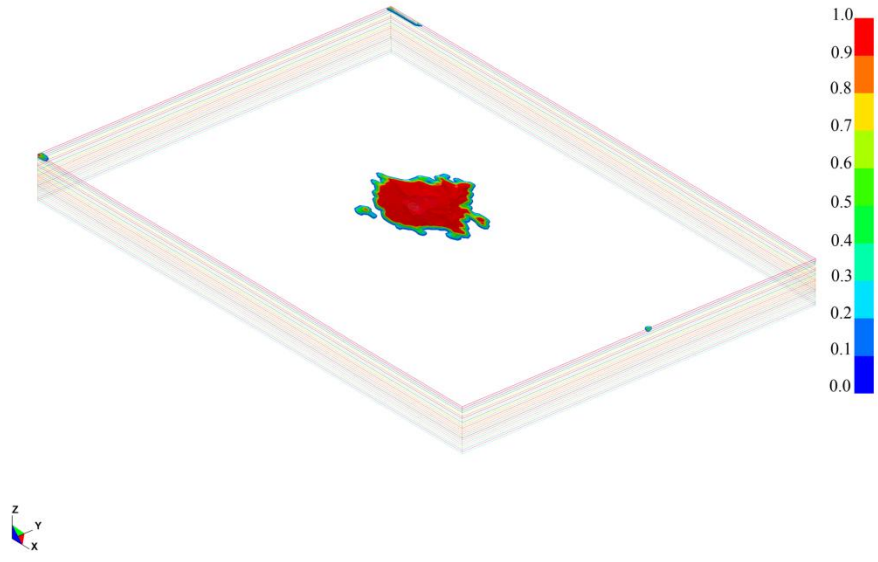


(a)

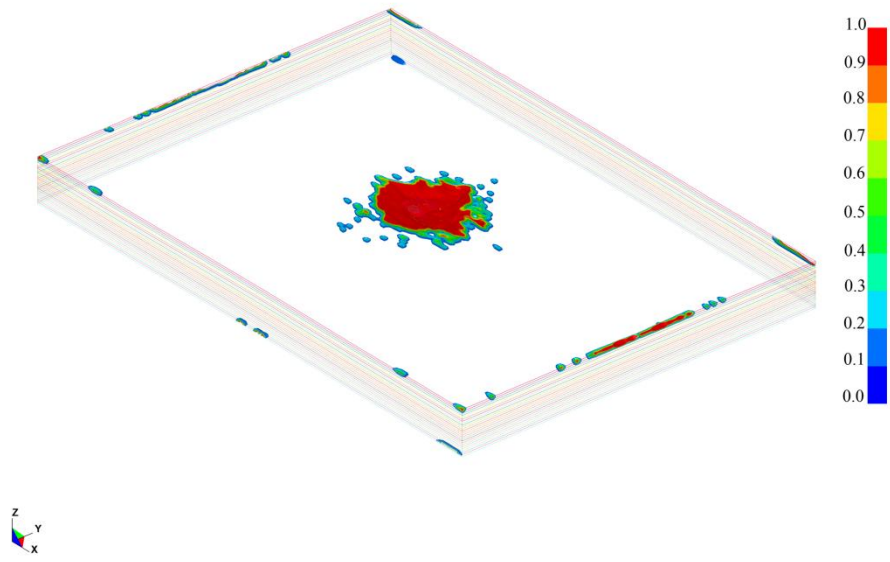


(b)

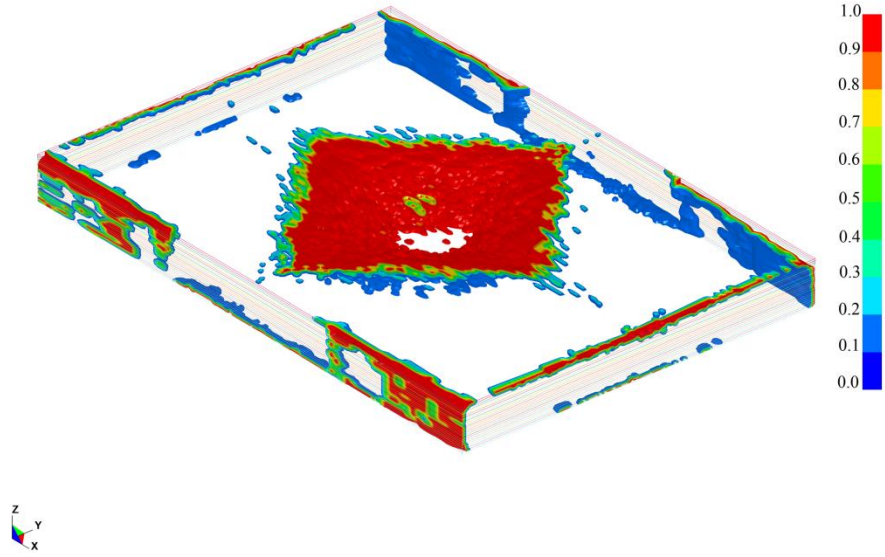




(c)



(d)

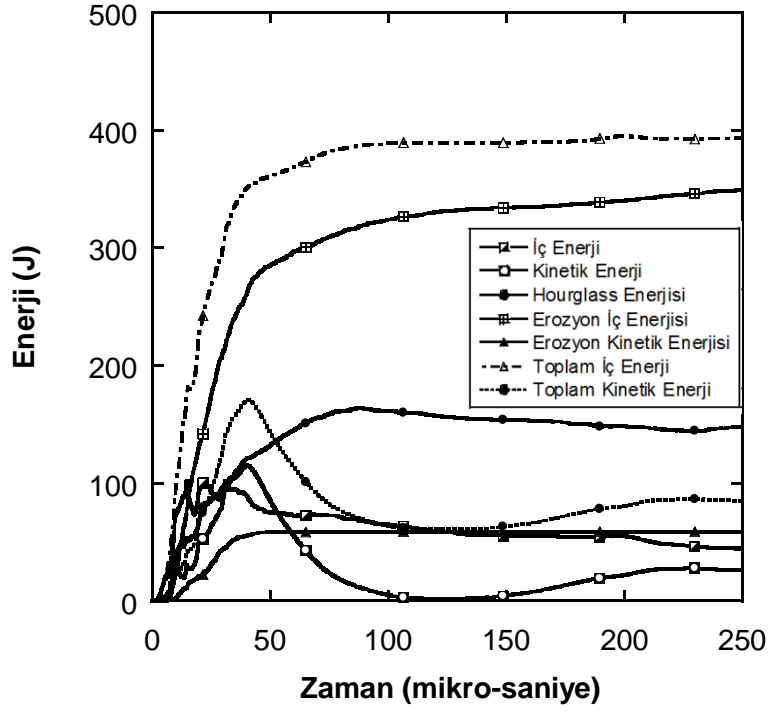


(e)

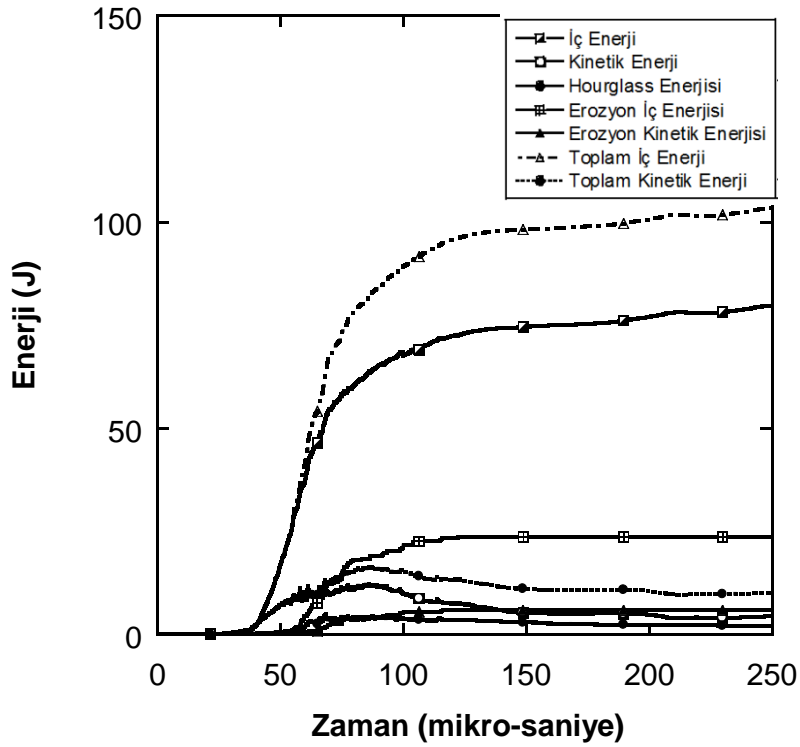
**Şekil 4.15 Kompozit katmanda meydana gelen hasar modları.**

Referans hal ile karşılaştırıldığında fiberlerde meydana gelen hasarların benzer seviyelerde oluştuğu, fakat delaminasyon hasarının dağılımının önemli miktarda değiştiği görülmektedir. EPDM lastik ara yüzey malzemesinin kullanılması durumunda seramik katmanın hemen altında bulunan kompozitin üst katmanlarında merkezde yoğunlaşan delaminasyon hasarı görülmektedir. Nitekim kompozitin katlarının enerji emilim değerlerinden de görüldüğü gibi (Şekil 4.13) üst katlarında emilen enerji miktarı, diğer katlarına göre daha yüksek seviyelerde gerçekleşmiştir.

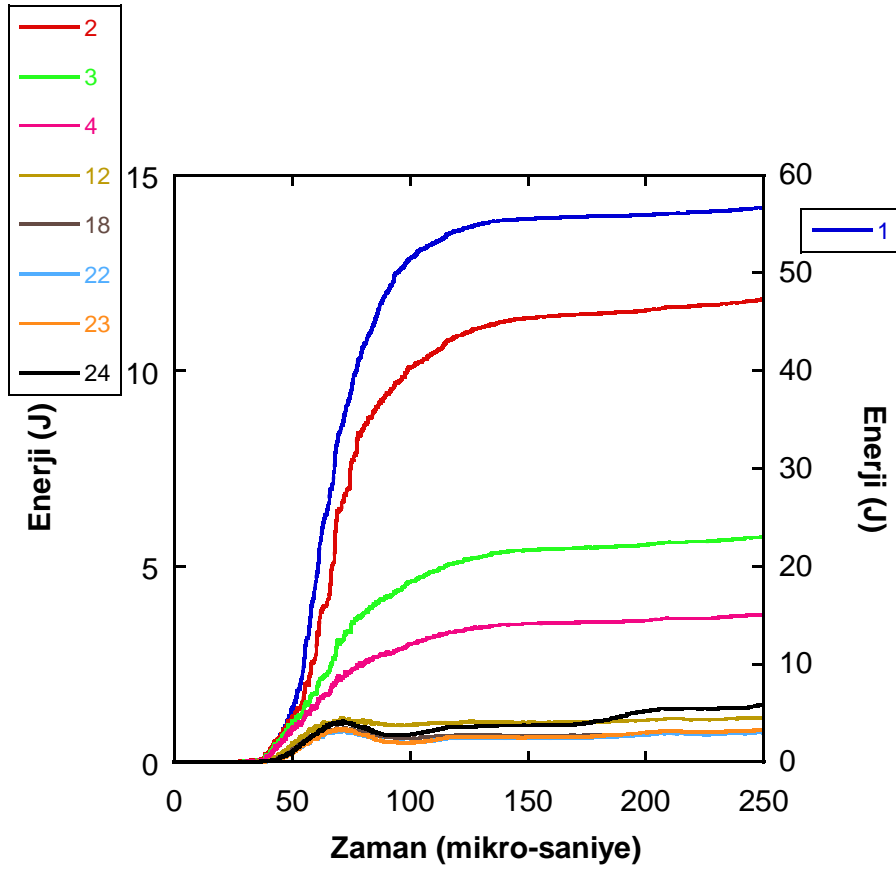
Alternatif zırh konfigürasyonlarından ikincisi olan Teflon ara yüzey malzemesi ihtiva eden zırh sistemine mermi çarpması durumunda seramik ve kompozit katmanlarda enerjilerin zamana bağlı değişimleri, sırasıyla Şekil 4.16 ve 4.17’de verilmiştir. Şekil 4.18’de ise kompozit katmanı oluşturan katmanların içerisinde toplam iç enerjinin değişimi verilmiştir.



Şekil 4.16 Seramik katmanda enerji bileşenlerinin değişimi.



Şekil 4.17 Kompozit katmanda enerji bileşenlerinin değişimi.

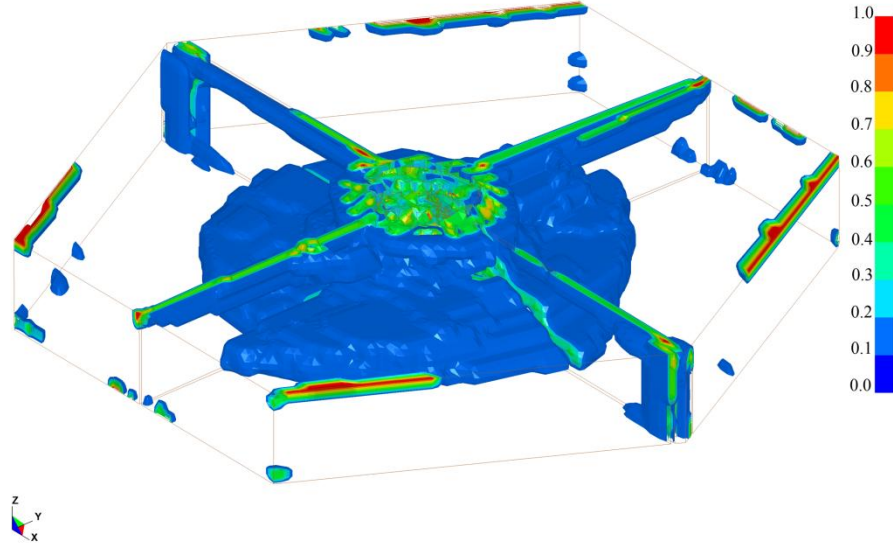


Şekil 4.18 Kompozit katmanlarda toplam iç enerjinin değişimi.

Referans hal ile karşılaştırıldığında Teflon ara yüzey malzemesi ihtiva eden sistemde seramik ve kompozit katmanlarda absorbe edilen enerji miktarı azalmıştır. Yine kompozit katmanda absorbe edilen enerjinin zamana bağlı değişimi incelendiğinde referans hale göre önemli miktarda iletim zamanı gecikmesi etkisi gözlemlenmektedir. Kompozit içerisinde absorbe edilen enerjinin katmanlar arasındaki dağılımı incelendiğinde EPDM lastik ara yüzey malzemesinin kullanıldığı zırh sistemine paralel şekilde özellikle üst yüzeyde bulunan katların enerji emiliminde katkısının daha büyük olduğu görülmektedir. EPDM lastik ara yüzeyle karşılaştırıldığında Teflon ara yüzey malzemesi, seramik katmanda daha az ve kompozit katmanda hemen hemen aynı miktarda enerji absorbe edilmesine sebep olmuştur.

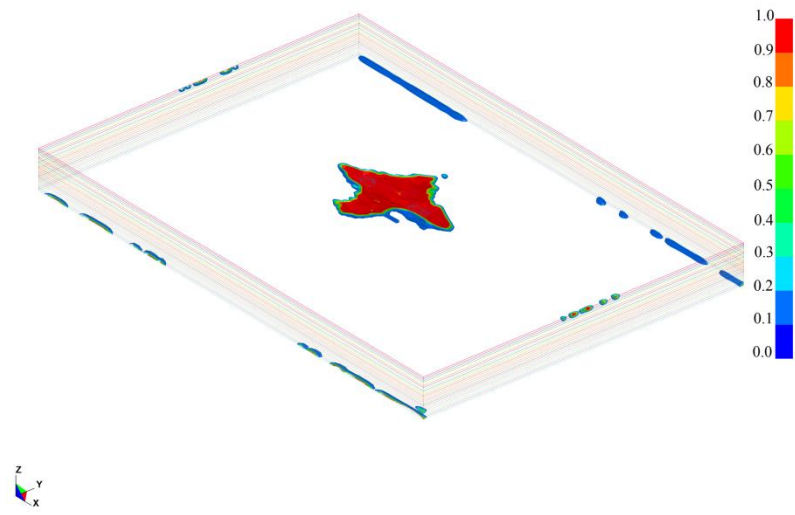
Şekil 4.19'da ise seramik katmanda meydana gelen hasar görülmektedir. Seramik katmanda meydana gelen hasarın hem referans hal ile kıyaslandığında, hem de EPDM lastik ara yüzey malzemesinin kullanıldığı sistemle kıyaslandığında arttığı ve daha çok seramik malzemenin mermi ile etkileşime

girdiği görülmektedir. Bu geniş bölge seramik katman üzerinden yükün kompozit katmana daha geniş bir alan üzerinde aktarıldığını ve gerilme değerlerinin azaldığını göstermektedir

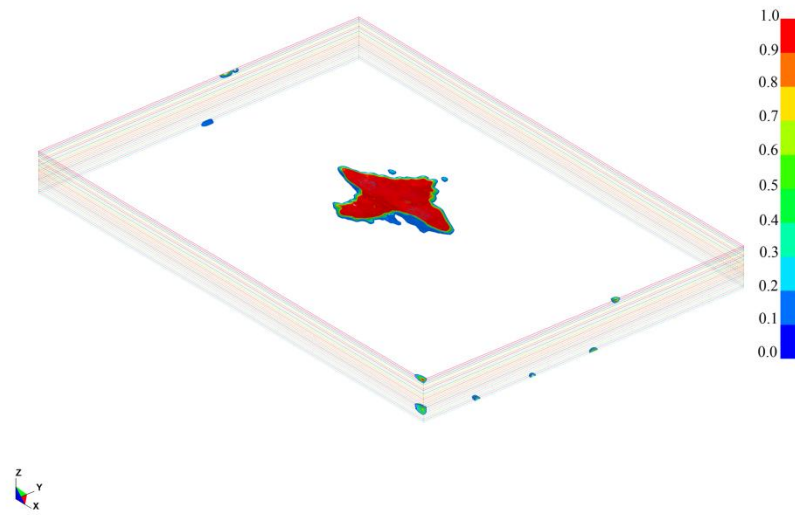


**Şekil 4.19. Seramikte katmanda meydana gelen hasar**

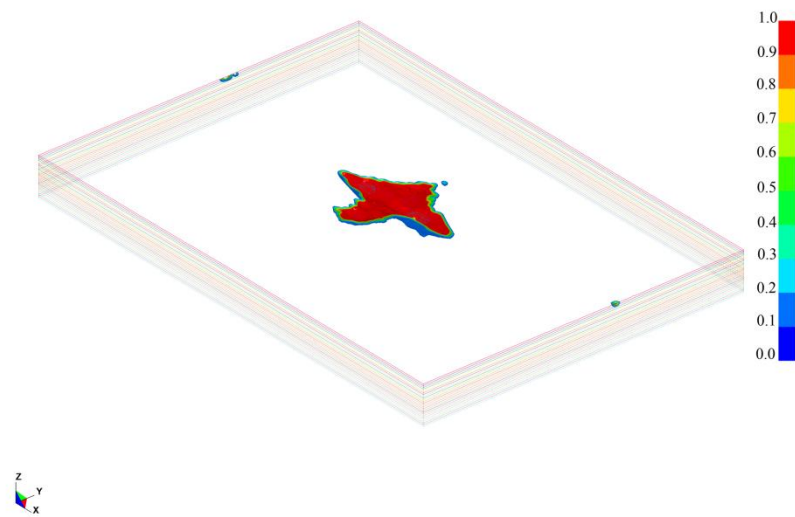
Şekil 4.20 (a-e)'de sırasıyla Teflon ara yüzey malzemesi kullanılması durumunda kompozit katmanda fiberlerde x malzeme yönünde meydana gelen hasar, fiberlerde y malzeme yönünde meydana gelen hasar (x ve y kompozit katmanın düzlem içerisindeki yönleridir), fiberlerde z malzeme yönünde meydana gelen hasar (z yönü kompozit katmana dik yöndür ve bu hasar modu fiberlerdeki ezilmeyi gösterir), kompoziti oluşturan katlara dik yönde matriste meydana gelen hasar (polyester matrisin hasara uğraması) ve kompoziti oluşturan katlara paralel yönde meydana gelen hasar, yani delaminasyon hasarı görülmektedir.



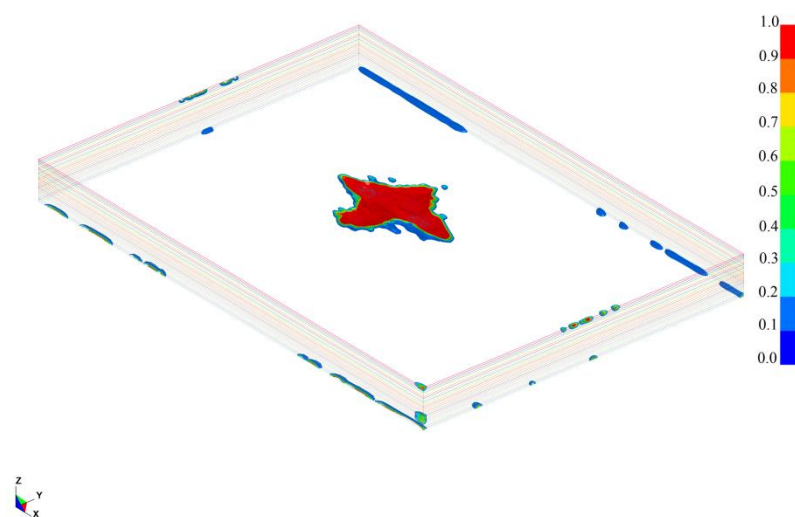
(a)



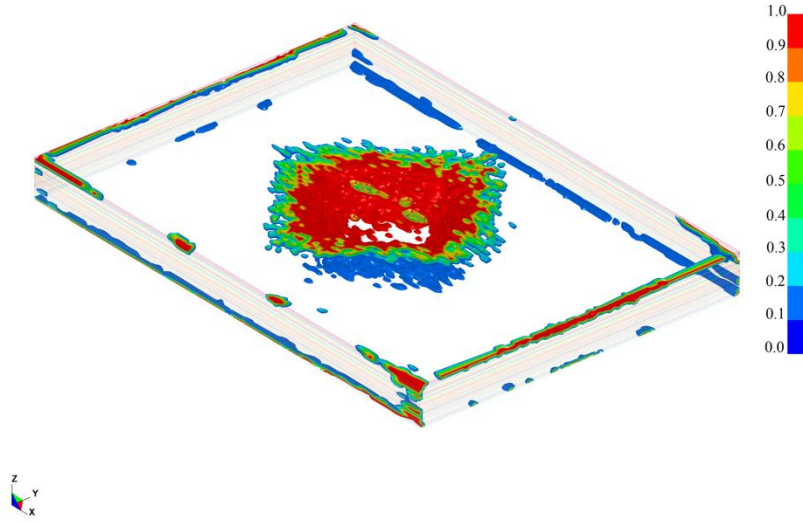
(b)



(c)



(d)



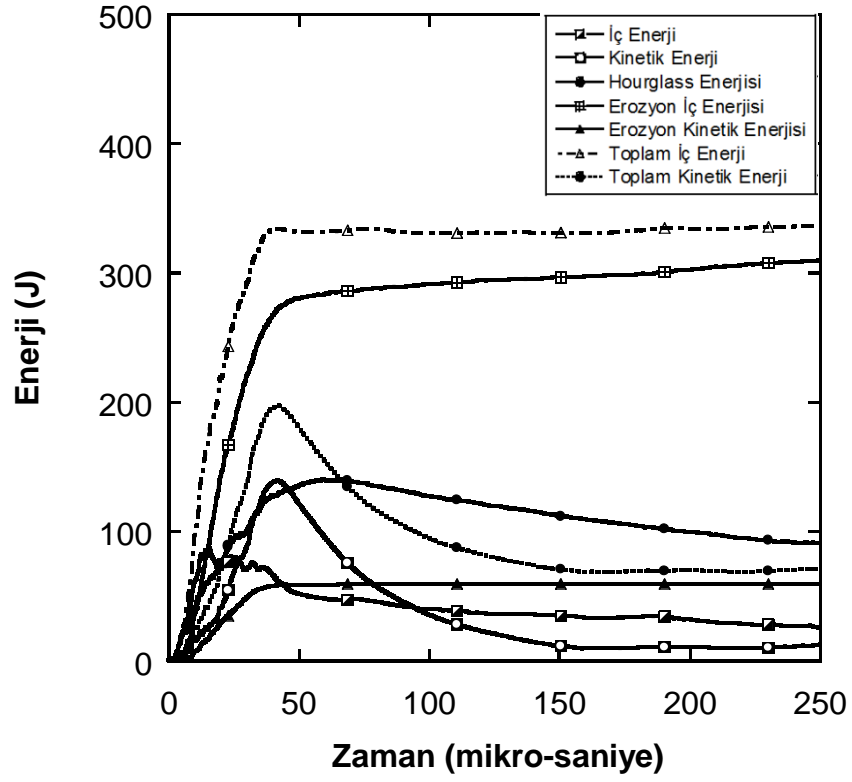
(e)

Şekil 4.20 Kompozit katmanda meydana gelen hasar modları.

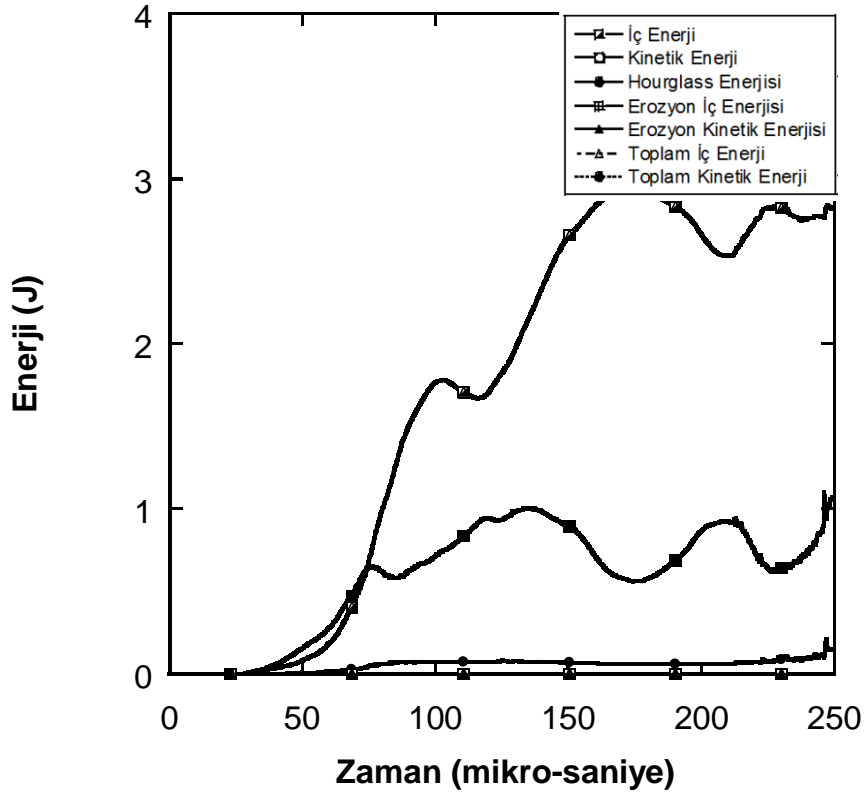
Kompozitin üst katmanlarında meydana gelen hasar dikkate alındığında özellikle delaminasyon hasarının EPDM lastikte olduğu gibi referans hale göre arttığı görülmektedir. Ancak EPDM lastikle kıyaslandığında Teflon, kompozitin üst katmanlarında daha az delaminasyon hasarına sebep olmuştur.

Alternatif zırh konfigürasyonlarından üçüncüsü olan alüminyum metalik köpük ara yüzey malzemesi ihtiva eden zırh sistemine mermi çarpması durumunda seramik ve kompozit katmanlarda enerjilerin zamana bağlı değişimleri sırasıyla Şekil 4.21 ve 22’de verilmiştir. Şekil 4.23’de ise kompozit katmanı oluşturan katmanların içerisinde toplam iç enerjinin değişimi verilmiştir.

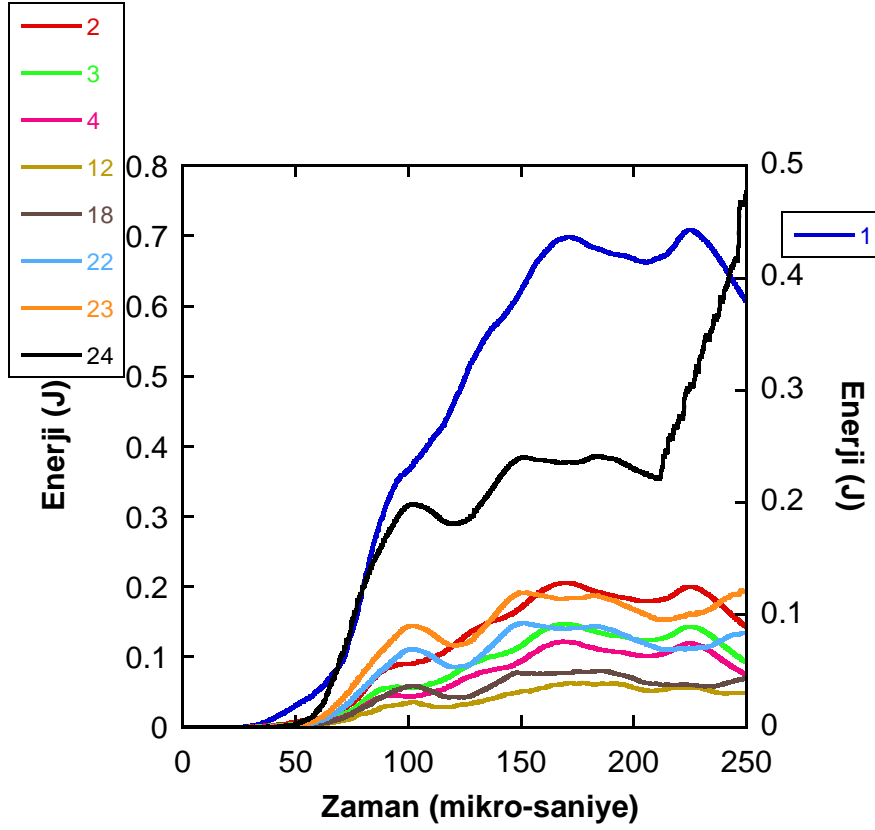




Şekil 4.21 Seramik katmanda enerji bileşenlerinin değişimi.



Şekil 4.22 Kompozit katmanda enerji bileşenlerinin değişimi.



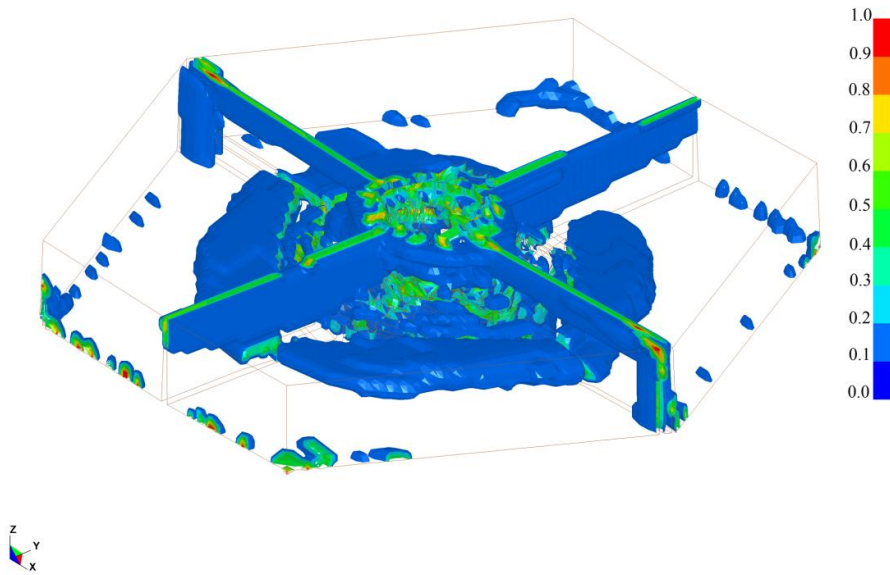
Şekil 4.23 Kompozit katmanlarda toplam iç enerjinin değişimi.

Alüminyum köpük ara yüzey malzemesinin kullanılması durumunda önceki iki alternatif zırh sisteminden farklı olarak referans hal ile karşılaştırıldığında seramik katmanda absorbe edilen enerji miktarının azaldığı gözlemlenmiştir. Kompozit katmanda ise en üst ve en alt yüzeylere yakın katmanlar enerji emiliminde daha çok katkıda bulunmuşlardır. Ayrıca Alüminyum köpük ara yüzey malzemesinin kalınlığının diğer iki ara yüzey malzemesinden daha kalın seçilmiş olması, arka yüzeye iletilen gerilme dalgasının şiddetinin de düşük olmasını sağlamıştır.

Metalik köpük malzemelerin ara yüzey malzemesi olarak kullanıldığı durumlarda etkin sonuç verebilmeleri için belirli kalınlık seviyelerinin üzerine çıkmak gerekmektedir. Nitekim proje ekibinin bu tarz malzemeler üzerine yapmış olduğu önceki çalışmaların da göstermiş olduğu gibi bu kalınlık değerleri, EPDM lastik ve Teflon malzemelere göre oldukça yüksek seviyelerde kalmaktadır. Ayrıca yine daha önceden de bahsedilmiş olduğu gibi bu tarz malzemeleri belirli kalınlık seviyelerinin altında homojen olarak üretme imkânı yoktur. Nümerik olarak çok daha ince alüminyum köpük katmanları modellenilebilmekle birlikte

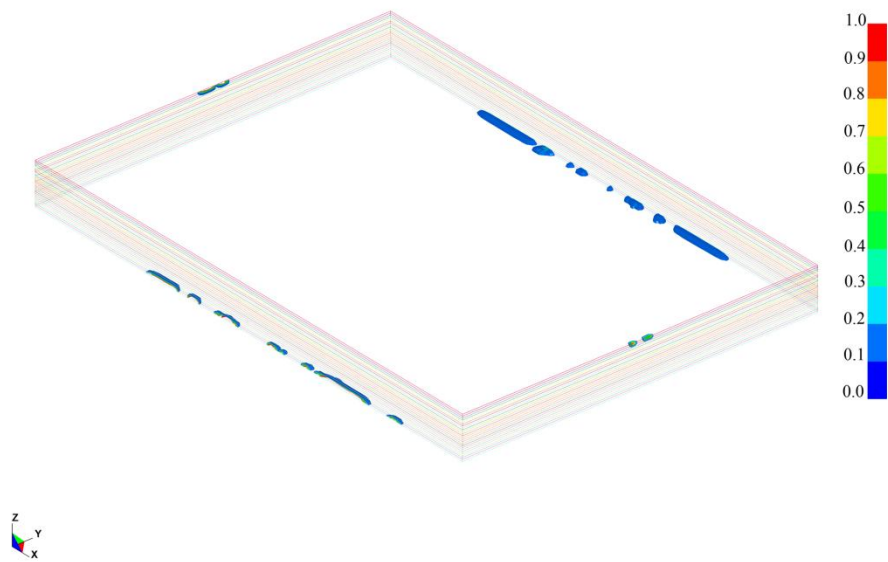
pratikte bu tarz yapıların kullanılmayacak olması, bu tarz bir seçimi zorunlu kılmıştır. Bütün bu hususlar da göz önünde bulundurularak alüminyum köpük ihtiva eden bu üçüncü alternatif konfigürasyon kendi içerisinde değerlendirilmelidir.

Şekil 4.24'de ise seramik katmanda meydana gelen hasar görülmektedir. Referans hal ile kıyaslandığında seramik katmanda hasara uğrayan bölge miktarının arttığı ve daha geniş bir bölgenin mermi ile etkileşime girdiği gözlemlenmektedir. Bu geniş bölge seramik katman üzerinden yükün kompozit katmana daha geniş bir alan üzerinde aktarıldığını ve gerilme değerlerinin azabileceğini göstermektedir.

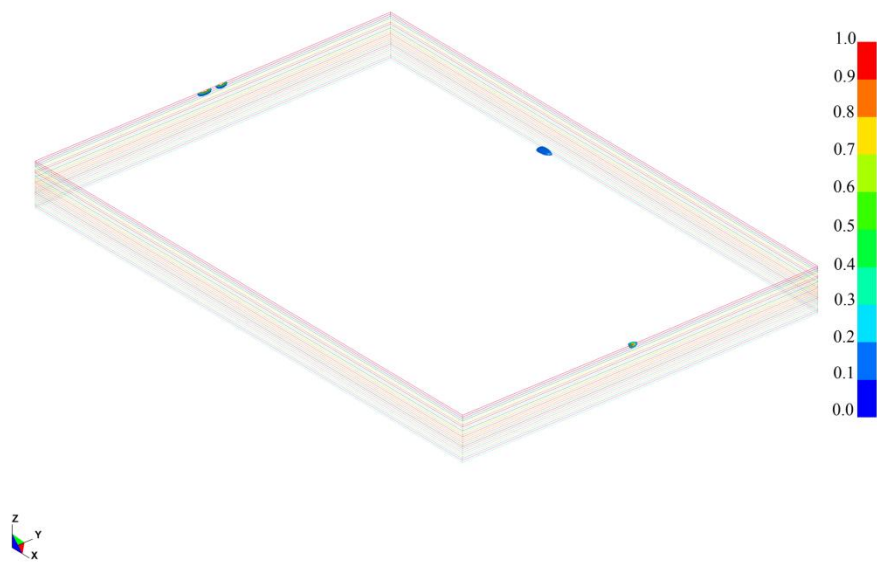


**Şekil 4.24 Seramik katmanda meydana gelen hasar.**

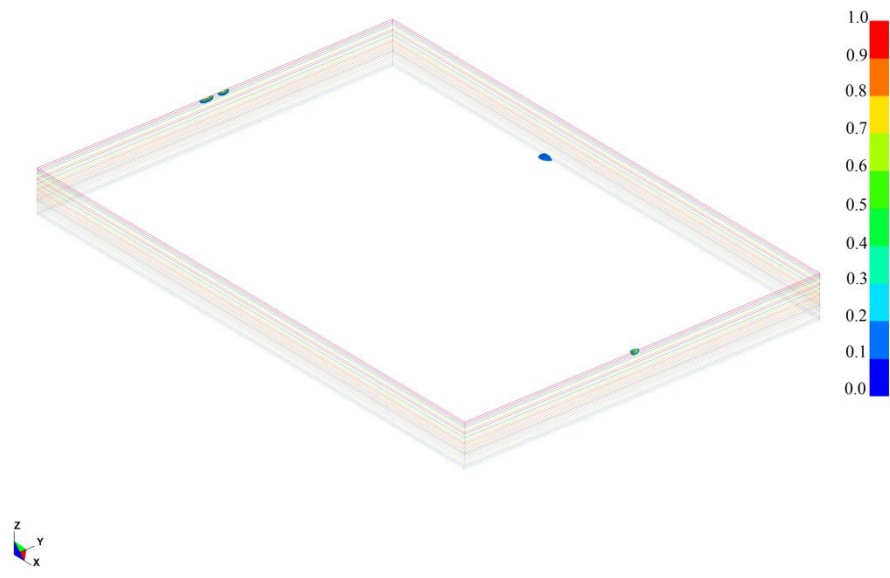
Şekil 4.25 (a-e)'de sırasıyla alüminyum köpük ara yüzey malzemesi kullanılması durumunda kompozit katmanda fiberlerde x malzeme yönünde meydana gelen hasar, fiberlerde y malzeme yönünde meydana gelen hasar (x ve y kompozit katmanın düzlem içerisindeki yönleridir), fiberlerde z malzeme yönünde meydana gelen hasar (z yönü kompozit katmana dik yöndür ve bu hasar modu fiberlerdeki ezilmeyi gösterir), kompoziti oluşturan katlara dik yönde matriste meydana gelen hasar (polyester matrisin hasara uğraması) ve kompoziti oluşturan katlara paralel yönde meydana gelen hasar, yani delaminasyon hasarı görülmektedir.



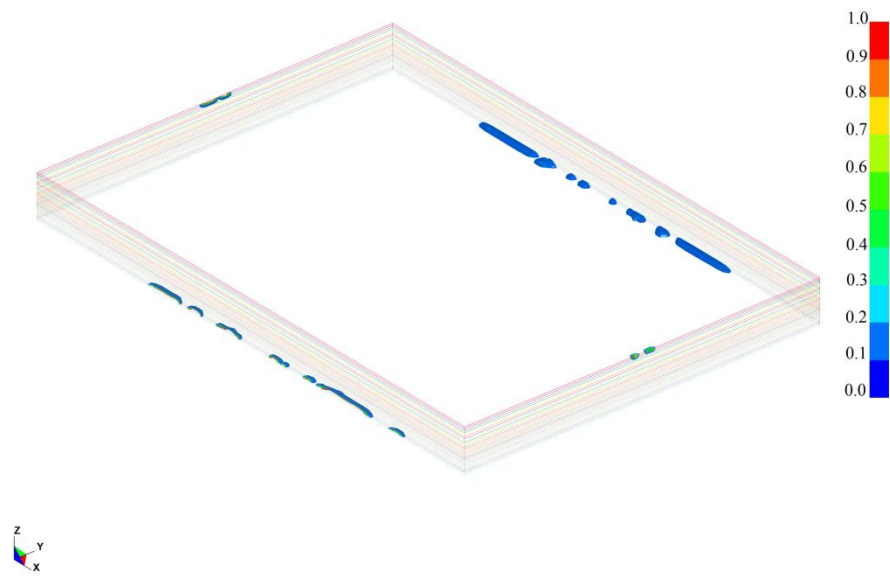
(a)



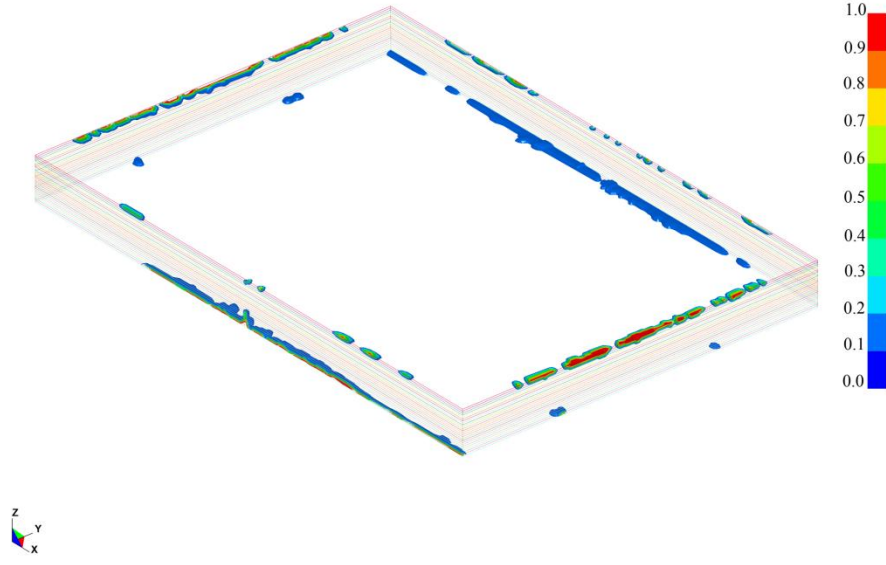
(b)



(c)



(d)

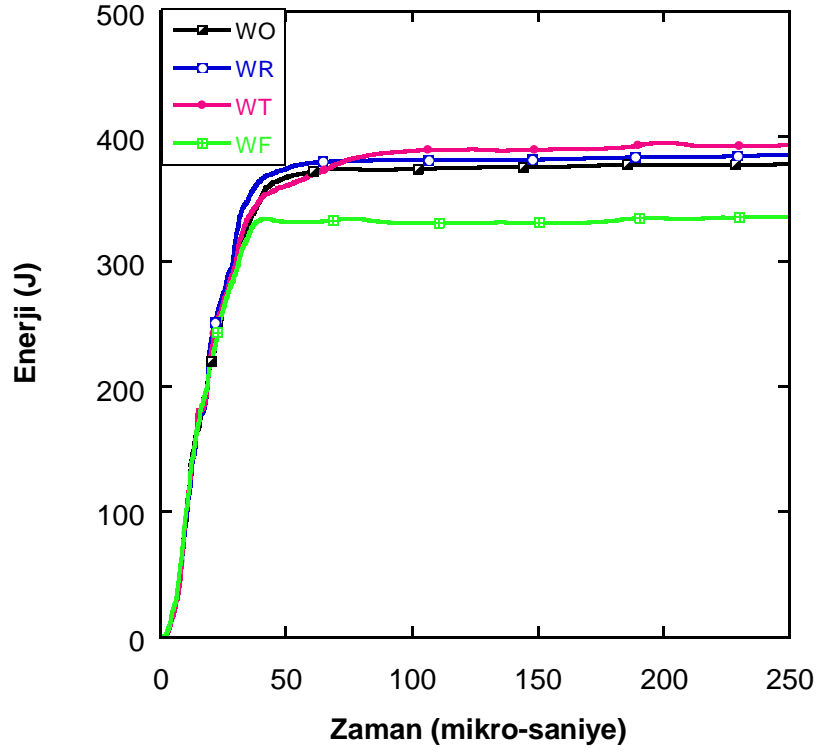


(e)

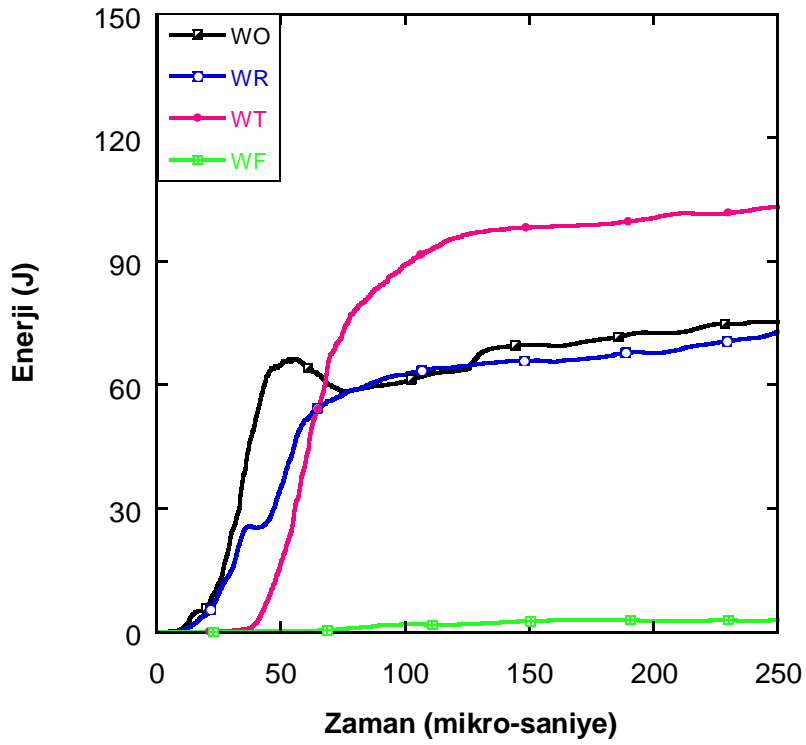
Şekil 4.25 Kompozit katmanda meydana gelen hasar modları.

Metalik köpük ara yüzey malzemesi kullanılması durumunda yapıda meydana gelen hasar diğer konfigürasyonlarla kıyaslandığında oldukça düşük seviyelerde kalmıştır.

Bütün alternatif konfigürasyonların karşılaştırılmasını kolaylaştırmak amacıyla seramik ve kompozit katmanlarda toplam iç enerjiler (iç enerjinin zamana bağlı değişiminin altında kalan alan) sırasıyla Şekil 4.26 ve 27’de verilmiştir.

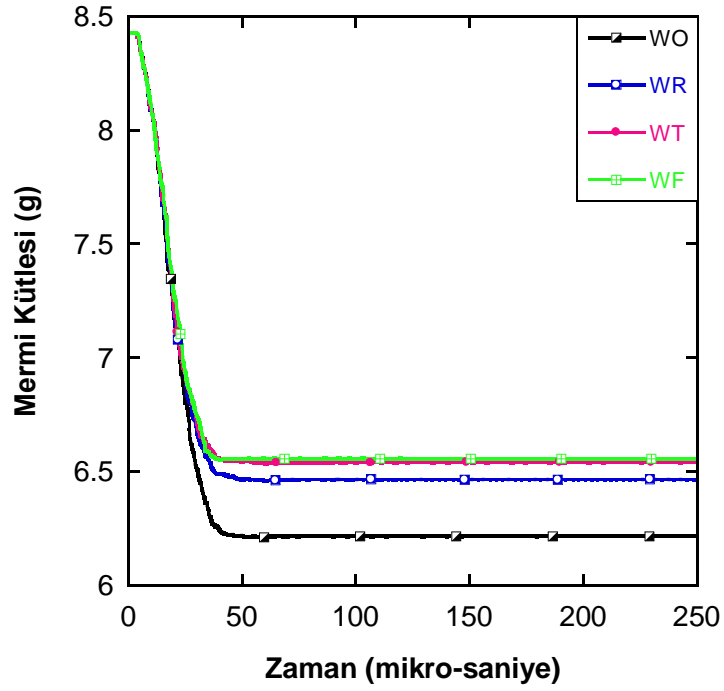


Şekil 4.26 Seramik katmanda toplam iç enerjinin zamana bağlı değişimi.

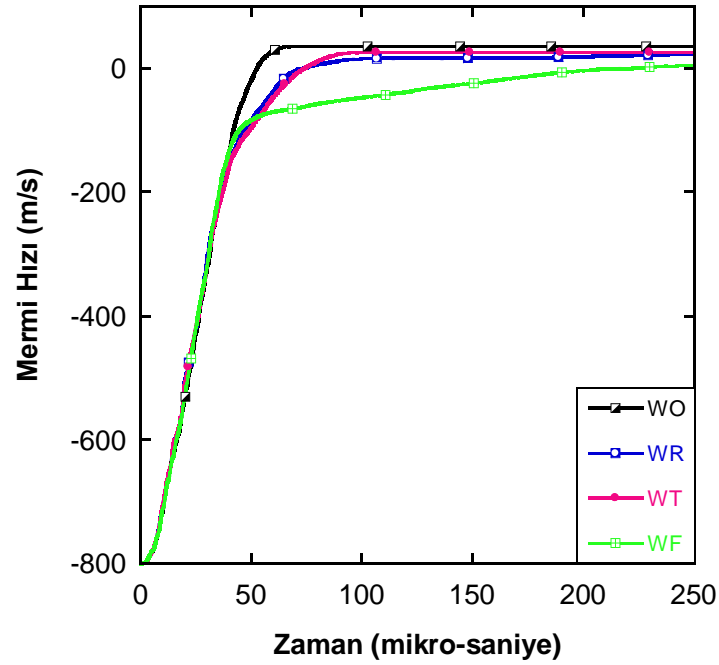


Şekil 4.27 Kompozit katmanda toplam iç enerjinin zamana bağlı değişimi.

Şekil 4.28 (a) ve (b) de ise sırasıyla mermideki kütle ve hız değişimleri gösterilmiştir.



(a)



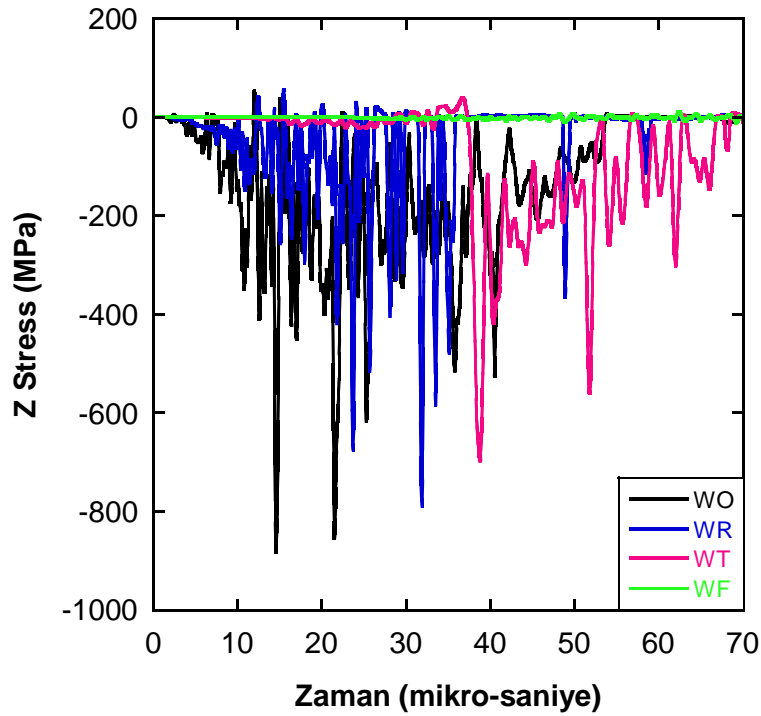
(b)

Şekil 4.28 Merminin zamana bağlı: a) kütle ve b) hız değişimi.

Mermi kütleindeki değişim, referans hal olan ara yüzeysiz hal için en fazla iken, teflon ve köpük ara yüzeyle hallerde en az olduğu görülmektedir. Ara yüzeysiz halde mermi hız düşümü en etkin iken, köpük ara yüzeyle halde etkinlik en azdır.



Nümerik simülasyon kullanılarak seramik ve kompozit katmanlar üzerinde herhangi bir noktadaki herhangi bir gerilme bileşeninin zamana bağlı değişimini görmek mümkündür. Ara yüzey malzemesinin kompozit katmana iletilen gerilmeye etkisinin incelenmesi özellikle balistik performansın iyileştirilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu amaçla en üst kompozit katman üzerinde ve merminin çarptığı nokta olan orta noktadaki gerilme tarihçesi her alternatif zırh sistemi için çizilmiş ve ara yüzey malzemesinin etkisi incelenmiştir. Zırh sistemlerinde gerilme dalgasının esas ilerleme yönü kalınlık boyunca olduğu için gerilmenin z bileşeni kıyaslamalarda kullanılmıştır. Şekil 4.29'da sırasıyla; ara yüzey ihtiva etmeyen, EPDM lastik, Teflon ve Alüminyum ara yüzey malzeme ihtiva eden sistemler için z gerilme değerinin değişimi verilmiştir.



Şekil 4.29 Kompozit katmandaki z-gerilmesinin değişimi.

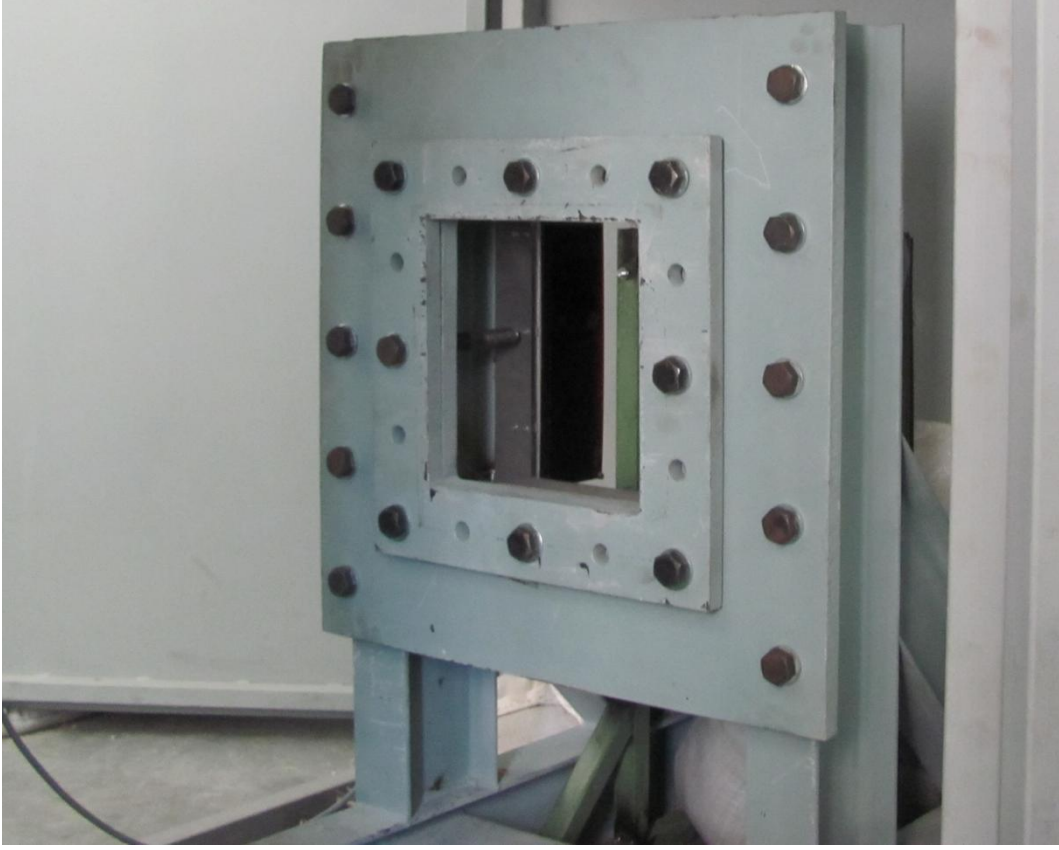
Ara yüzey malzemesi kullanımı, iletilen gerilme değerini önemli miktarda azaltmaktadır. Etkinlik derecesi olarak özellikle metalik köpük hem iletim zamanı gecikmesi hem şiddet azalışı, Teflon önemli miktarda iletim zamanı gecikmesi kısmi de olsa şiddet azalışı ve EPDM lastik ise şiddet azalışı açısından başarılı sonuçlar vermiştir.

## 4.2.Çarpma haznesi deneyleri

Balistik test ve nümerik simülasyonlarının tamamlanmasından sonra zırh sistemlerinin gaz tabancası kullanılarak çarpma haznesinde testlerinin yapılmasına geçilmiştir. Çarpma haznesinde yapılan testler, raporun önceki kısımlarında da belirtildiği gibi İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Dinamik Test ve Modelleme Laboratuvarında yapılmıştır. Deneylerde kullanılan gaz tabancası ve numune sabitleme aparatı Şekil 4.30 a ve b’de verilmiştir. Bu testlerin en büyük avantajı, laboratuvar ortamında kontrollü ve tekrar edilebilir olmalarıdır. Deneyler sırasında hem merminin zırha çarpma hızı hem de şayet hedef delinirse merminin terminal çıkış hızı ölçülebilmektedir (Şekil 4.31).

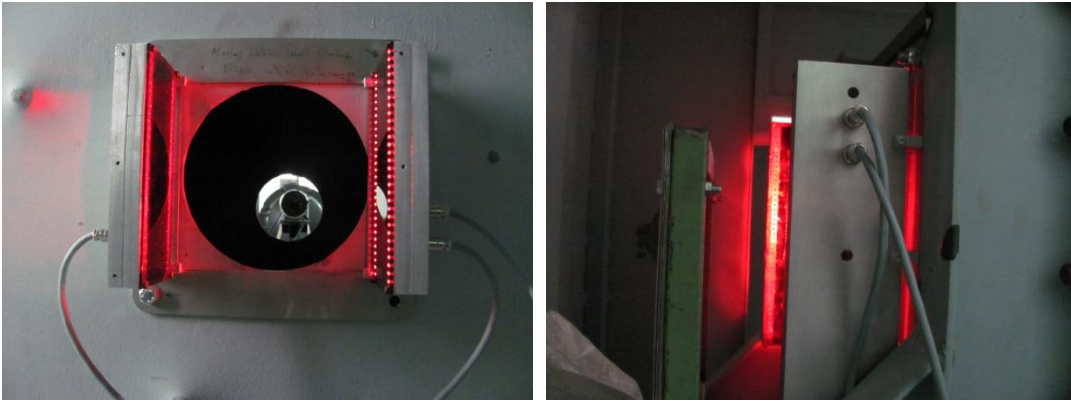


(a)



(b)

Şekil 4.30 Gaz tabancası ve numune sabitleme aparatı.



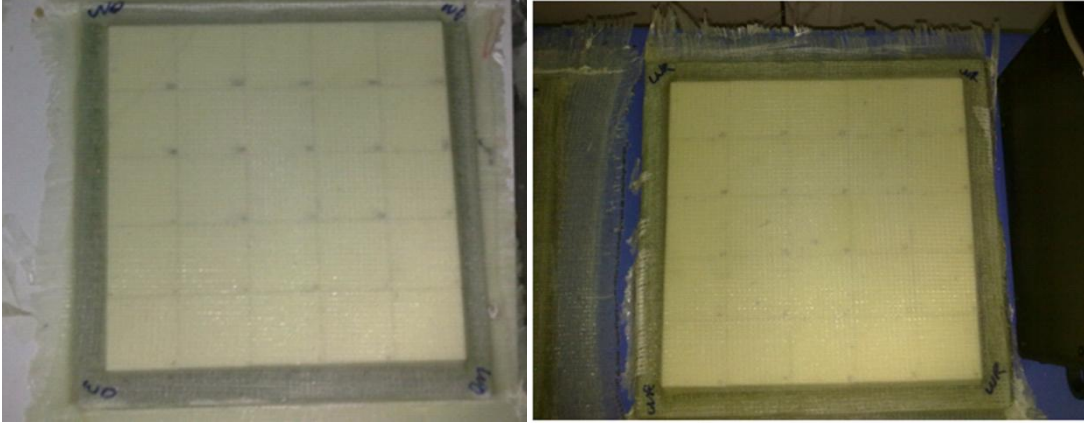
(a)

(b)

Şekil 4.31 Gaz tabancası için tasarlanmış hız ölçer.

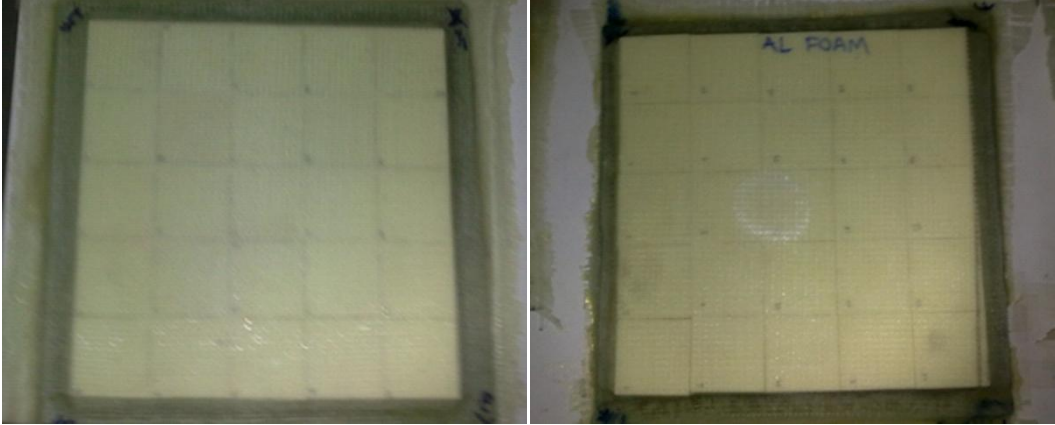
Bir önceki bölümde balistik test sonuçları ve nümerik simülasyonları verilmiş olan zırh sistemi konfigürasyonlarının (ara yüzey malzemesi ihtiva etmeyen, EPDM lastik, Teflon ve alüminyum metalik köpük ihtiva eden) çarpma haznesi test numuneleri hazırlanmıştır.

Zırh sistemi numunelerinin seramik ön yüzlerinin hazırlanmasında 5x5x1 cm boyutlarında 25 adet seramik plaka kullanılmıştır. Ayrıca seramik katmanların arkasına konulmak üzere 0/90 oryantasyonunda E-Glass / polyester kompozit destek plakaları üretilmiştir. Bu iki katman arasına EPDM lastik, Teflon ve alüminyum metalik köpük katmanlar yerleştirilerek farklı çok katmanlı zırh konfigürasyonlarına sahip test plakaları üretilmiştir (Şekil 4.32a-d).



(a)

(b)



(c)

(d)

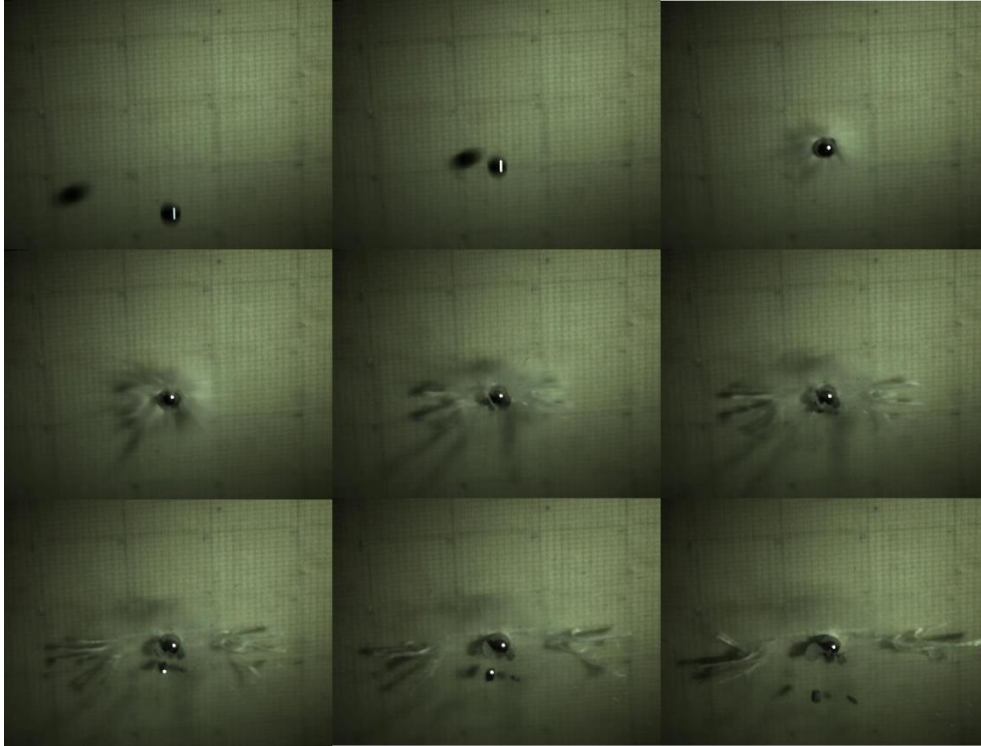
Şekil 4.32 Test plakaları.

Testler sırasında 12.7 mm çapında ve küre şeklindeki mermiler  $180 \pm 10$  m/s hızlarında zırh sistemlerine çarptırılmışlardır. Şekil 4.33'de de görülebileceği gibi testler sırasında yüksek hızlı kamera kullanılmıştır. Böylece zırh sisteminin dinamik deformasyonu Şekil 4.34'de görüldüğü gibi kaydedilebilmiştir.





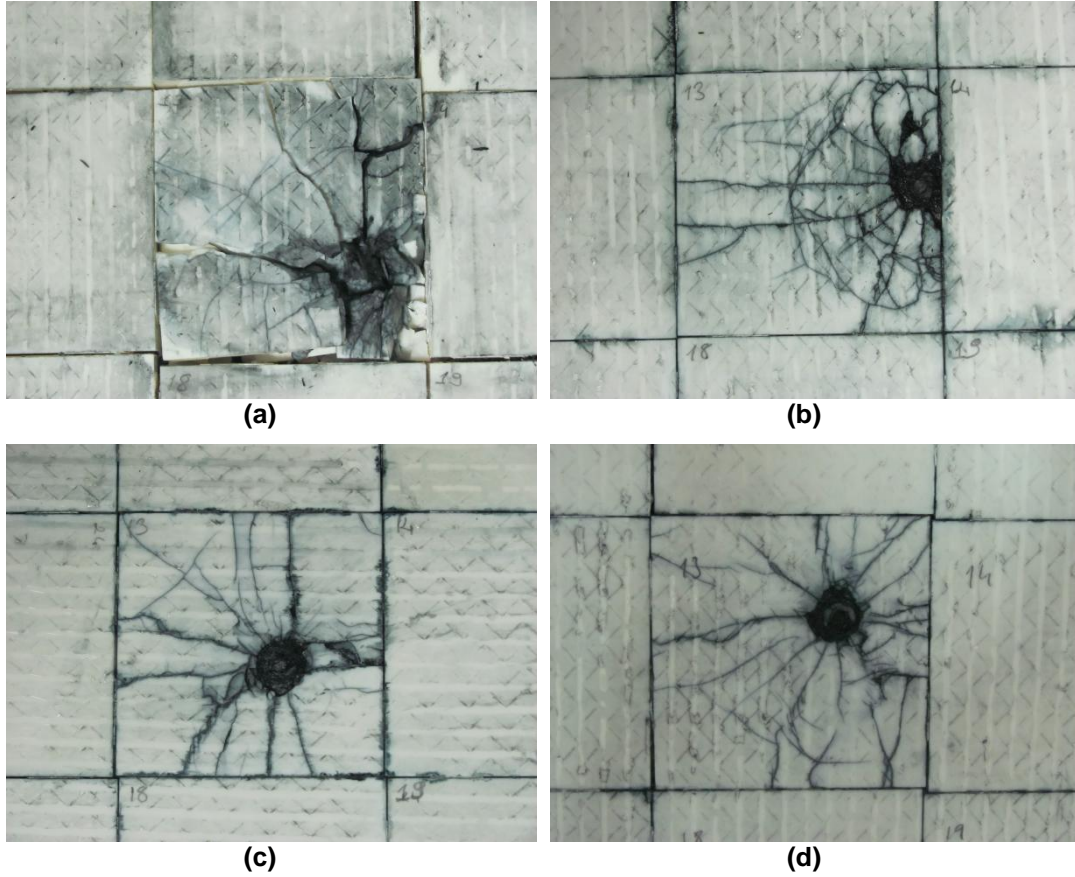
Şekil 4.33 Yüksek hızlı kamera.



Şekil 4.34 Hızlı kamera görüntüleri.

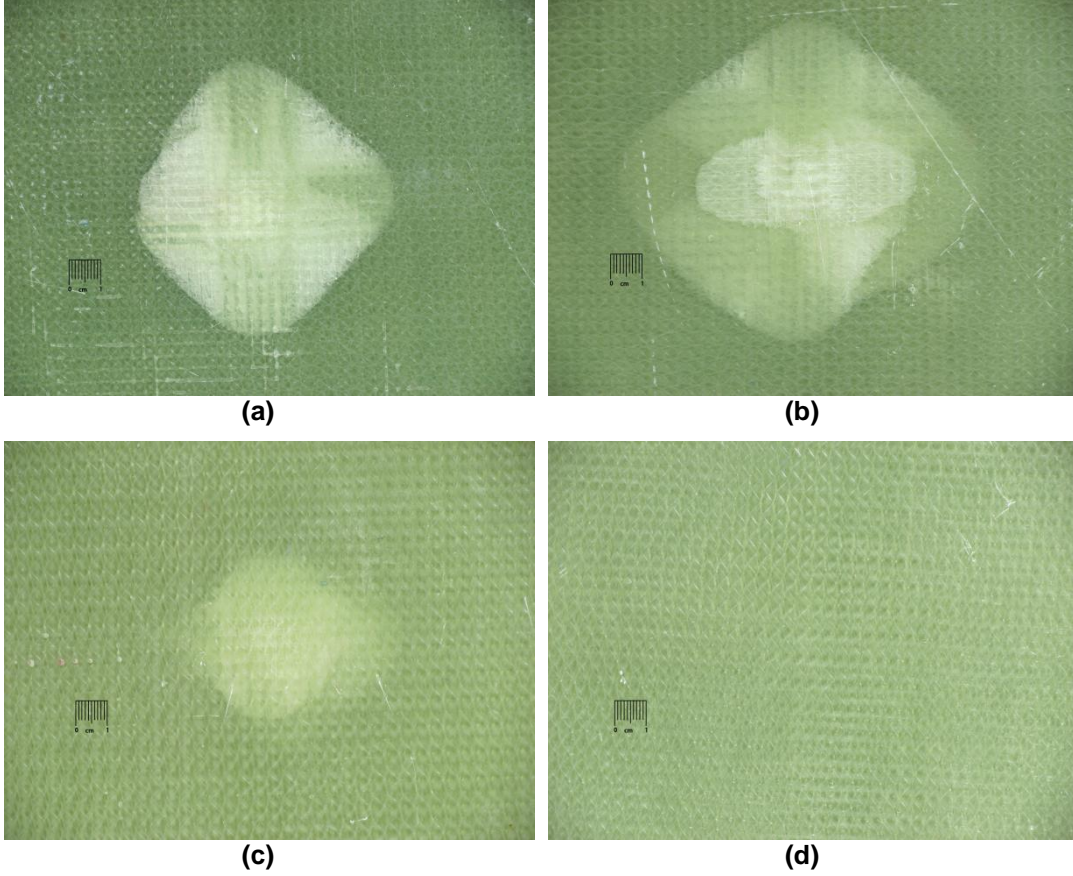
Testler sonucunda Şekil 4.35'den de görüleceği gibi zırh konfigürasyonları mermi tarafından tamamen delinememiştir. Gerilme dalgası ilerleyişinin incelenebilmesi için bu istenilen bir durumdur. Deneyler sonucunda yukarıda bahsi geçen 4 alternatif konfigürasyona ait seramik ön yüzeyde meydana gelen

hasar Şekil 4.36 a-d'de, kompozit destek plakalarında en alt yüzeyine kadar iletilen delaminasyon hasarı ise Şekil 4.37 a-d'de görülmektedir.



Şekil 4.35 Seramik katmanlarda meydana gelen hasar: a) ara yüzeyli, b) EPDM, c) Teflon ve d) alüminyum köpük arayüzeyli.

Seramik katmanda meydana gelen kırıkların görünürlüğünü arttırmak amacıyla, plakalara siyah boya enjekte edilmiştir. Seramik katmanı oluşturan plakalardan sadece merminin doğrudan çarptıklarında hasar oluşmakta ve bu hasar komşu plakalara ilerlememektedir. Bu da kırık ilerleyişinin durdurulması ve çoklu mermi çarpma hallerinde korumayı artırma bakımından önemli bir sonuçtur. Ayrıca hem balistik testlerde hem de gaz tabancası testlerinde seramik katmanda meydana gelen hasar, Teflon ve alüminyum köpük ara yüzey malzemelerinin kullanılması durumunda daha fazladır. Raporun önceki bölümlerinde bahsedildiği gibi daha çok seramik malzemenin mermi ile etkileşime girmekte olduğu anlaşılmıştır. Seramik kırıklarının merminin daha çok aşınmasını sağladığından dolayı, bu durum tercihlidir. Böylelikle seramik katman üzerindeki balistik yük, kompozit katmana daha geniş bir alan üzerinde aktarılmakta ve kompozit katmana iletilen gerilmenin azalması sağlanmaktadır.



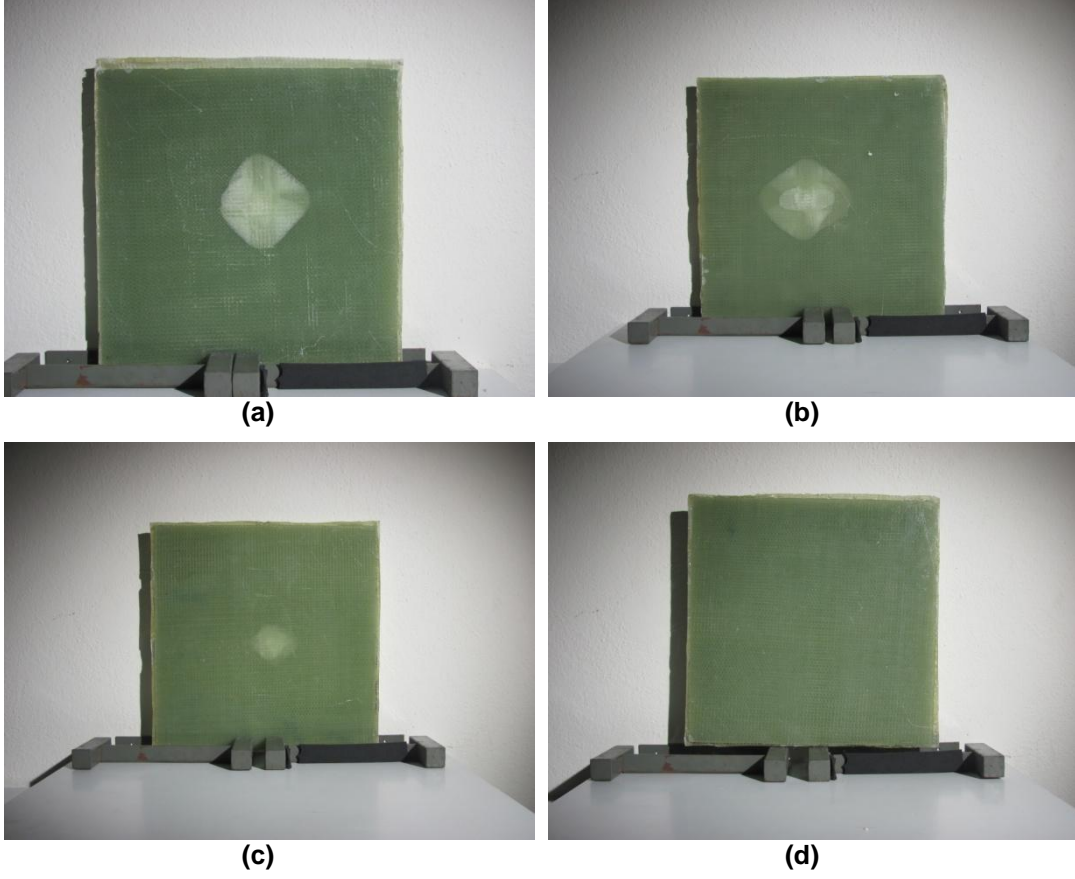
**Şekil 4.36 Kompozit plakada meydana gelen delaminasyon hasarı: a) ara yüzeyli, b) EPDM, c) Teflon ve d) alüminyum köpük arayüzeyli.**

Kompozit plakalarda meydana gelen hasarlar, balistik testlerle paralellik göstermektedir. Alüminyum metalik köpük ara yüzey ihtiva eden konfigürasyonda plaka arka yüzeyinde delaminasyon hasarı gözlemlenmezken, ara yüzey ihtiva etmeyen konfigürasyonda gözlemlenen hasar, bütün alternatif konfigürasyonlar arasında en yüksek seviyededir. Ara yüzey ihtiva eden konfigürasyonlarda referans konfigürasyona göre delaminasyon hasarı özellikle kompozit plakanın üst katmanlarında lokalize olmaktadır. EPDM lastik ara yüzey malzemesi ihtiva eden konfigürasyonda plaka arka yüzeyinde gözlemlenen hasar miktarı referans konfigürasyona yakın seviyelerde olmakla beraber, hasar bölgesinin renk farklılıklarından da anlaşılabilceği gibi bu hasar artışı koyu renkli görünen ve kompozit plakanın nispeten üst bölgelerine yakın noktalarda meydana gelmektedir.

Teflon ara yüzey malzemesi ihtiva eden sistemde, EPDM lastik ara yüzey ihtiva eden sisteme göre daha az hasar gözlemlenmektedir. Hasar seviyelerinin



plaka boyutları ile karşılaştırılmasını kolaylaştırmak için Şekil 4.37’de kompozit plakaların arkadan görünüşleri verilmiştir.



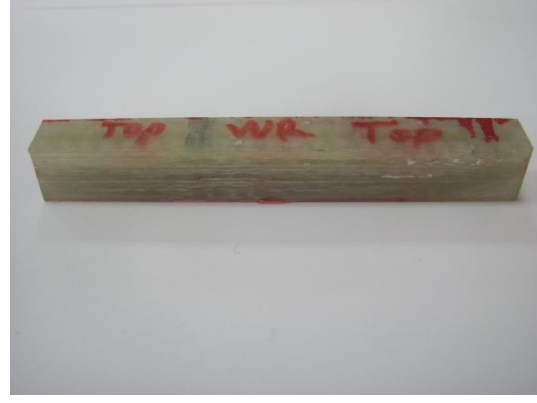
**Şekil 4.37 Kompozit destek plakarı ve hasar miktarı.**

Makro ölçekteki hasar incelemesinin ardından mikro ölçekte hasar incelemesine geçilmiş ve hasar görmüş plakalardan metalografik inceleme örnekleri (Şekil 4.38) hazırlanmıştır..





(a)



(b)



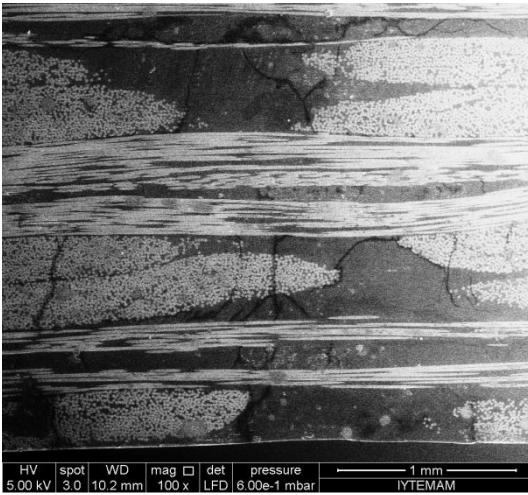
(c)



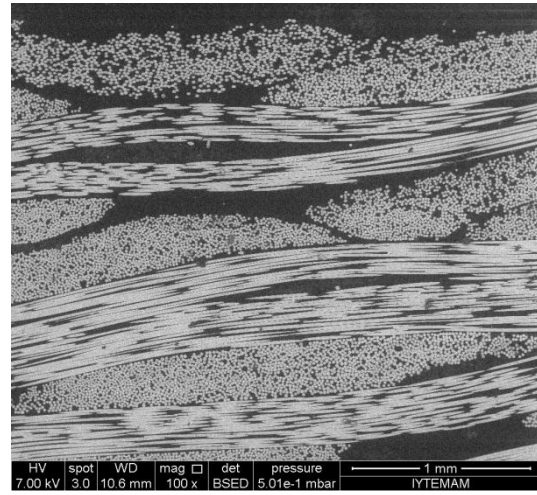
(d)

Şekil 4.38 Hasar bölgeleri kesitleri.

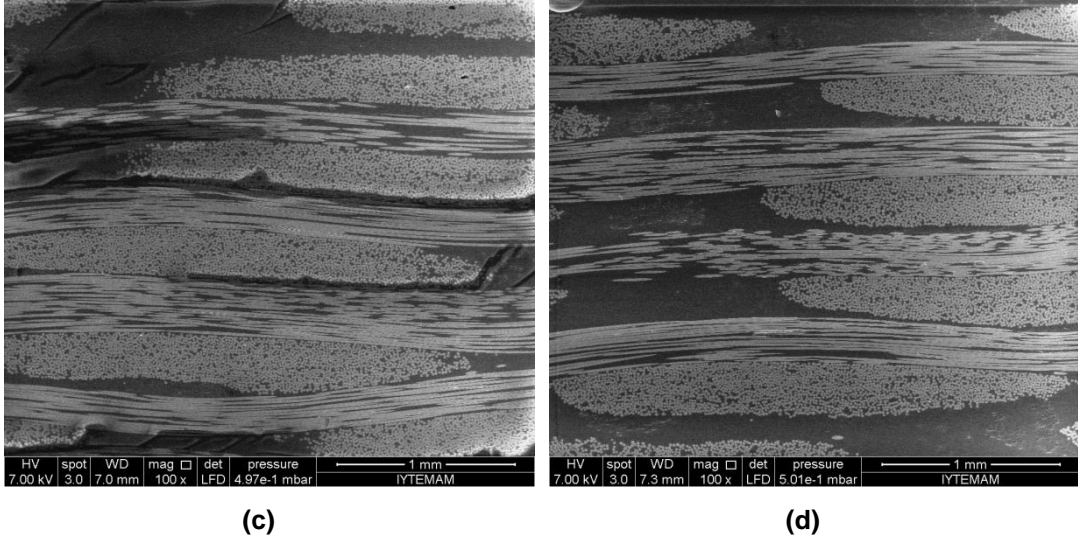
Şekil 4.39 'da incelenen konfigürasyonların hasar bölgesini gösteren SEM resimleri verilmiştir.



(a)

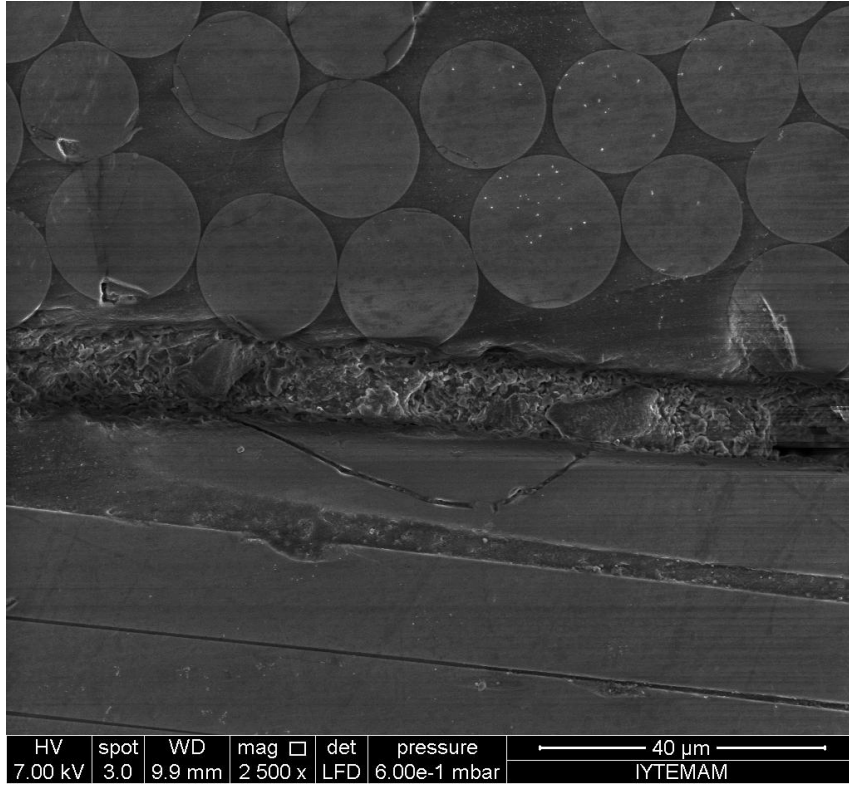


(b)

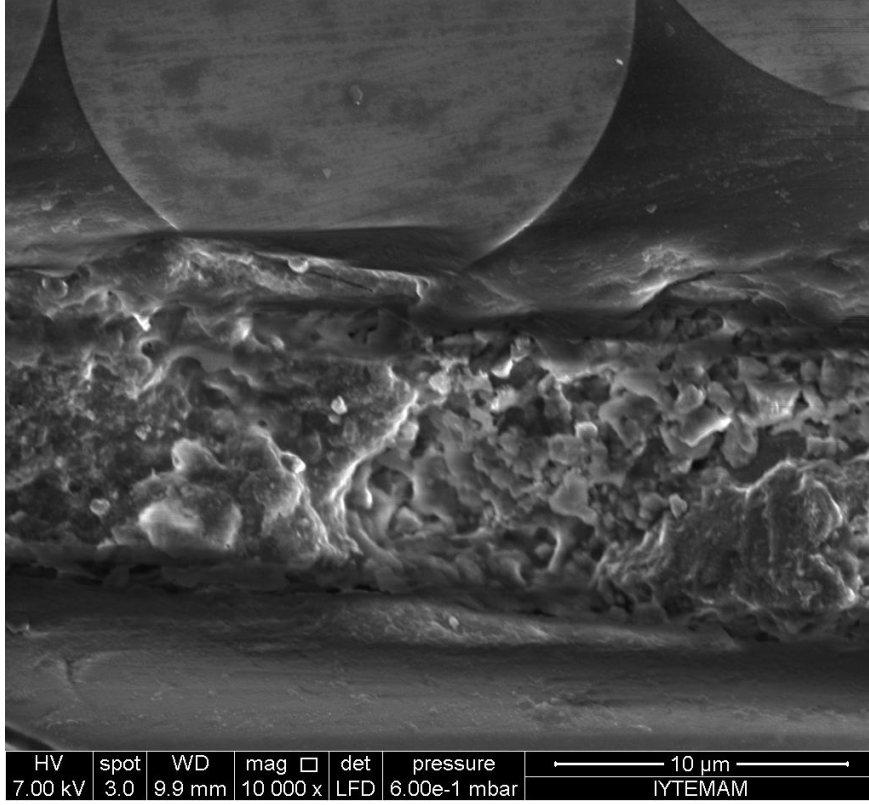


Şekil 4.39 SEM görüntüleri: a) ara yüzeysiz, b) EPDM, c) Teflon ve d) alüminyum köpük.

Alüminyum köpük numunesinde hasar, diğer konfigürasyonlara göre önemli oranda azken; diğer numunelerde gerek delaminasyon (matrisle fiberin birbirlerinden ayrılmaları) gerek de fiber ezilmeleri (fiber crushing) net şekilde gözlenmektedir. Şekil 4.40 ve 4.41’de verilen ayrıntılı SEM görüntüleri, fiber ezilmeleri ile fiber ve matris kırıklarını açıkça ortaya koymaktadır.



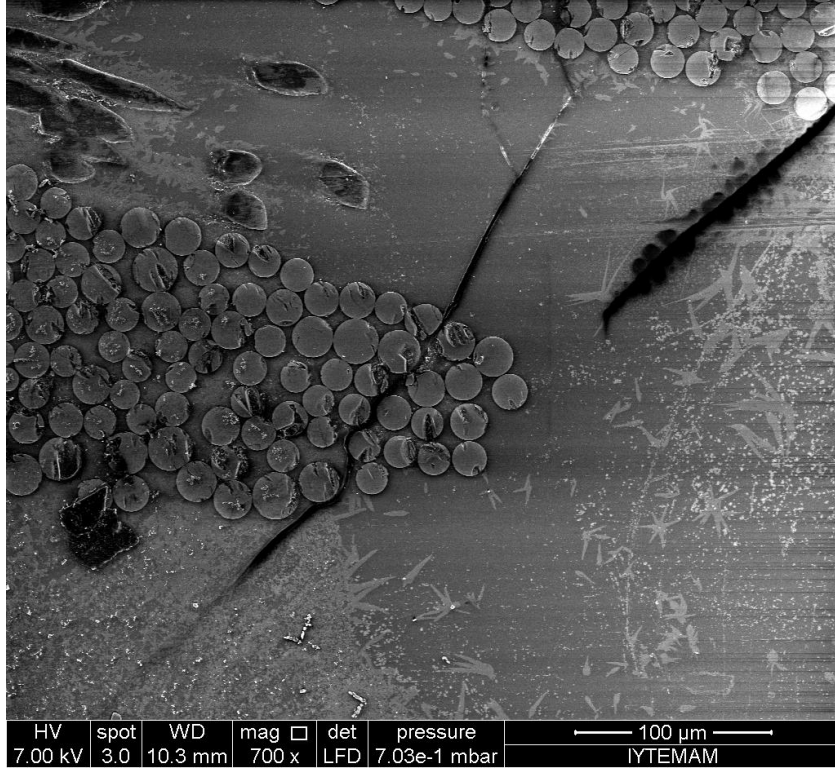
(a)



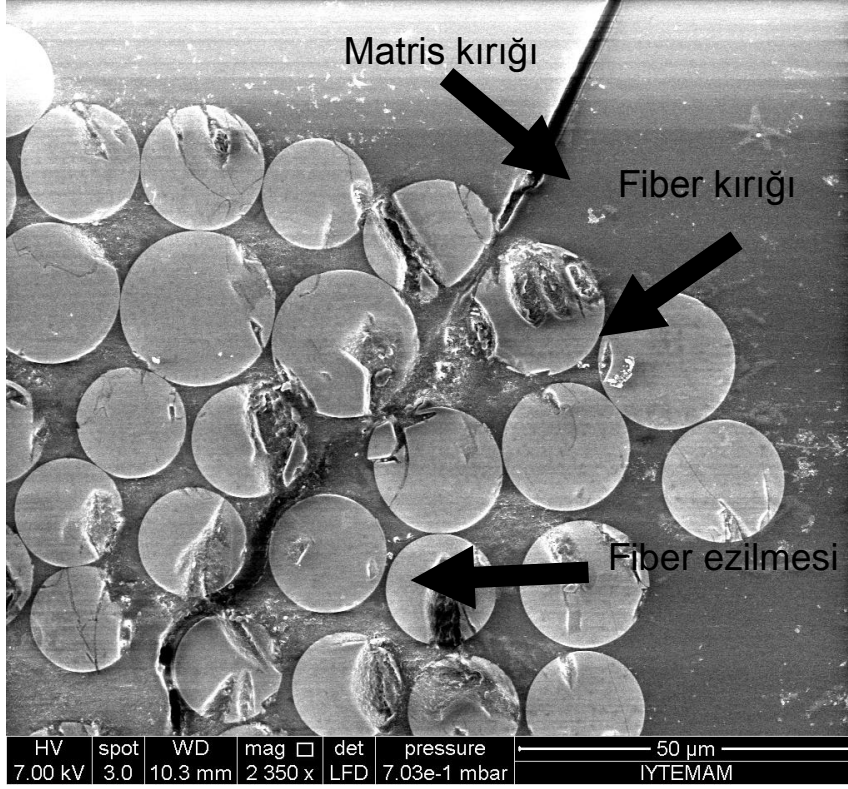
(b)

**Şekil 4.40 Farklı hasar modları.**

Delaminasyon, kompozit destek plakasının maruz kaldığı geriye dönen çekme gerilmeleri ve kayma kuvvetinin çarpma sonrası yaptığı eğilme hareketi nedeniyle görülürken, fiber ezilmelerinin başlıca nedeni, plakaya dik yönde ve hızla gelen basma gerilmesinin fiberleri sıkıştırarak birbirlerine hasar verdirmesidir. Ayrıca yine basma gerilmesinin etkisiyle fiber ve matrislerde çatlaklar meydana gelmektedir. (Şekil 4.41)



(a)



(b)

Şekil 4.41 Fiber ezilmesi , fiber ve matris kırılmaları.

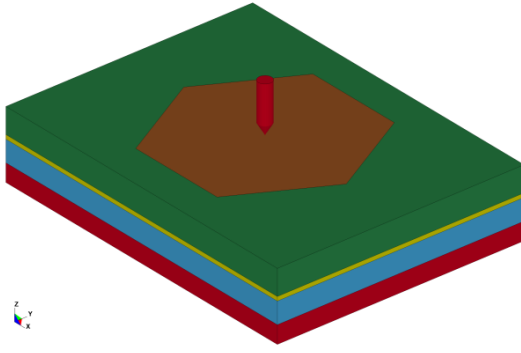
Şekil 4.41’de görüldüğü gibi kırıklar genellikle fiberlerin arasından ilerlemektedir.

Sonuç olarak, alüminyum köpük ve teflon ara yüzey ihtiva eden zırh sistemleri, incelenen dört konfigürasyon arasında en iyi balistik korumayı sağlamıştır. Bu sonuç, balistik testlerde elde edilen sonuçlarla paralellik göstermektedir. Burada köpük ve teflon ara yüzey malzemelerinin balistik koruma performanslarının diğer alternatiflerden daha yüksek olduğu görülmüştür. Bir sonraki çalışma adımı olarak bu malzemelerin farklı kalınlıklarda balistik performansa etkilerinin incelenmesine karar verilmiştir.

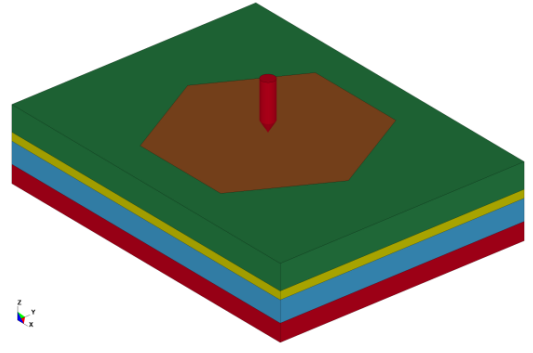
### **4.3.Ara yüzey katmanı kalınlığının balistik performansa etkisi**

Balistik ve çarpma haznesi deney ve nümerik simülasyon sonuçlarından da görülebileceği gibi Teflon ve alüminyum metalik köpük ara yüzey malzemeleri, kompozit katmana iletilen gerilme değerlerinde azalmaya ve iletim zamanı gecikmesine sebep olmaktadır. Bu sebeple kompozit katmanda meydana gelen hasar miktarı azalmaktadır. Bu bilgilerin ışığı altında bahsi geçen iki malzemenin balistik performansa etkilerinin daha detaylı incelenmesi gerektiğine karar verilmiştir. Bu amaçla aynı alansal yoğunluk (areal density) değerlerine sahip zırh sistemleri seçilmiştir. Bu sistemler; 2.3 ve 4.6 mm kalınlıklarında Teflon ve bunlara karşılık gelen 4 ve 8 mm kalınlıklarında alüminyum metalik köpük ara yüzey ihtiva eden konfigürasyonlardır (Şekil 4.42).

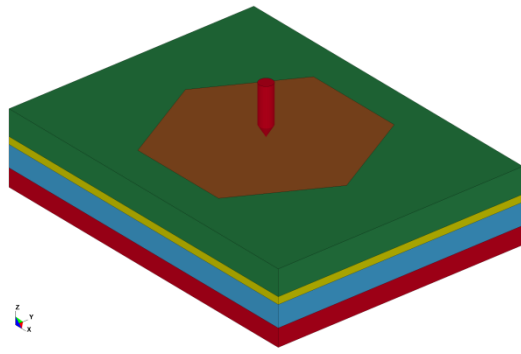
Raporun önceki bölümlerinde nümerik simülasyon sonuçlarının deneylerle doğrulanmış olması, bu bölümün konusu olan alternatif senaryolu nümerik modellerin güvenle kullanılabilmesini sağlamıştır.



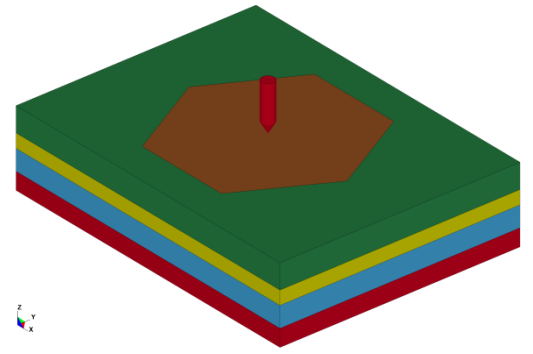
(a)



(b)



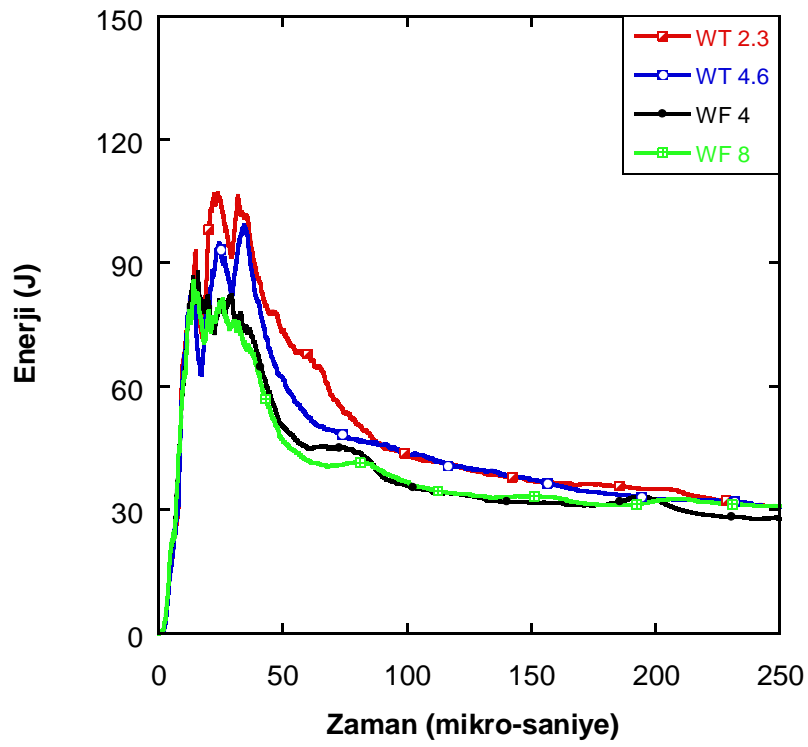
(c)



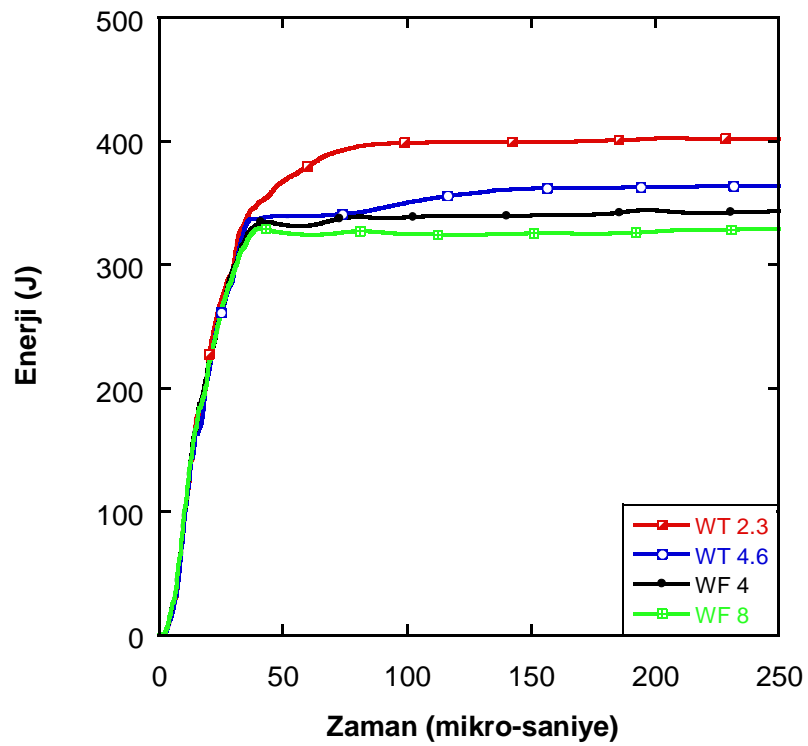
(d)

Şekil 4.42 Nümerik modeller: (a-b) 2.3 - 4.6 mm teflon, (c-d) 4 - 8mm köpük.

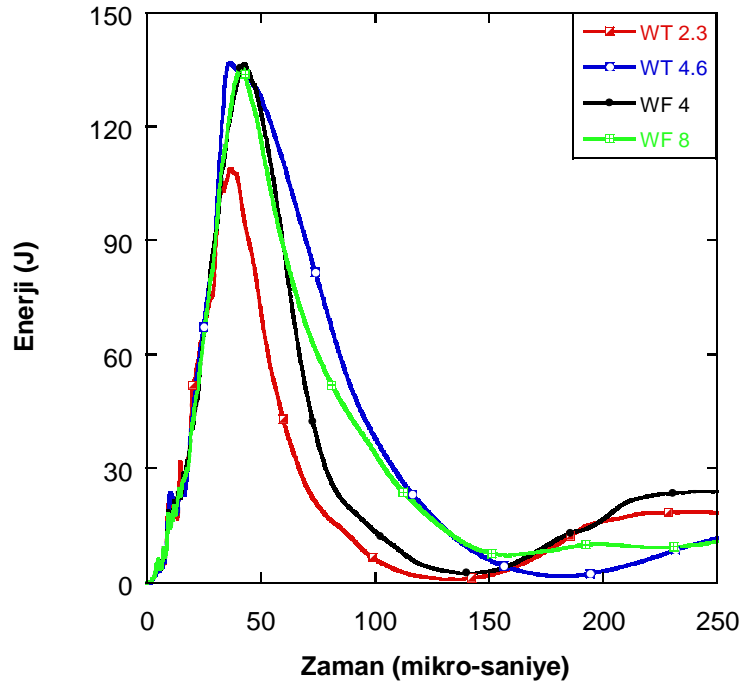
Öncelikle seramik katmanlardaki enerji emilimleri kıyaslanmıştır. İç, kinetik ve toplam iç enerji değişimleri sırasıyla Şekil 4.43 a-c'de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.43 Seramik katmanda enerji değişimleri: a) iç enerji, b) toplam iç enerji ve c) kinetik enerji.

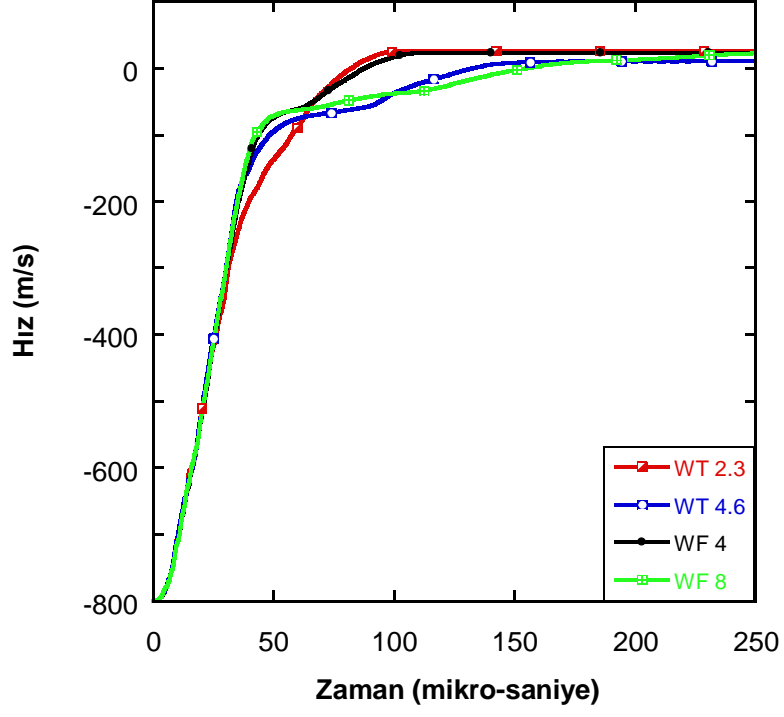
İlk 50 mikro saniye içerisinde mermi, seramik katmana doğru penetre olmaktadır. Bu sürede seramik katmandaki iç ve kinetik enerji değerleri artmaktadır. Merminin zamana bağlı hız ve kütle değişim grafikleri incelendiğinde (Şekil 4.44 a ve b), ilk 50 mikro saniyedeki penetrasyon sırasında mermi hızının ve kütesinin önemli oranda azaldığı görülmektedir. Bu da mermideki enerjinin büyük bir bölümünün ilk 50 mikro saniyede seramik mermi etkileşimi sırasındaki deformasyona harcadığını göstermektedir. Sonrasında ise seramik katmana iletilen enerjinin bir bölümü kompozit katmana aktarılmaktadır. Bu sebeple kompozit katmanda (Şekil 4.45 a-c) 50. mikro saniyeden sonra enerji değeri artışa geçmekteyken, seramikteki enerji komponentleri azalmaktadır.

Köpük ara yüzey içeren konfigürasyonlarda seramik katman iç enerjileri, Teflon ihtiva eden konfigürasyonlara göre daha düşüktür. Bu durum, metalik ara yüzey malzemesinin tam olarak sıkışmamasından (densifikasyon şekil değiştirmesine kadar) kaynaklanmaktadır. Seramik katmanların kinetik enerjileri incelendiğinde; 2.3 mm Teflon içeren ara yüzeyde kinetik enerji en düşük değerlerdedir. Teflon tabaka, merminin çarpmasıyla deforme olmakta ve seramik ile kompozit katmanların doğrudan teması diğer alternatiflere göre daha kısa zaman dilimi ve mesafelerde gerçekleşmektedir. Bu sebeple mermi de seramik

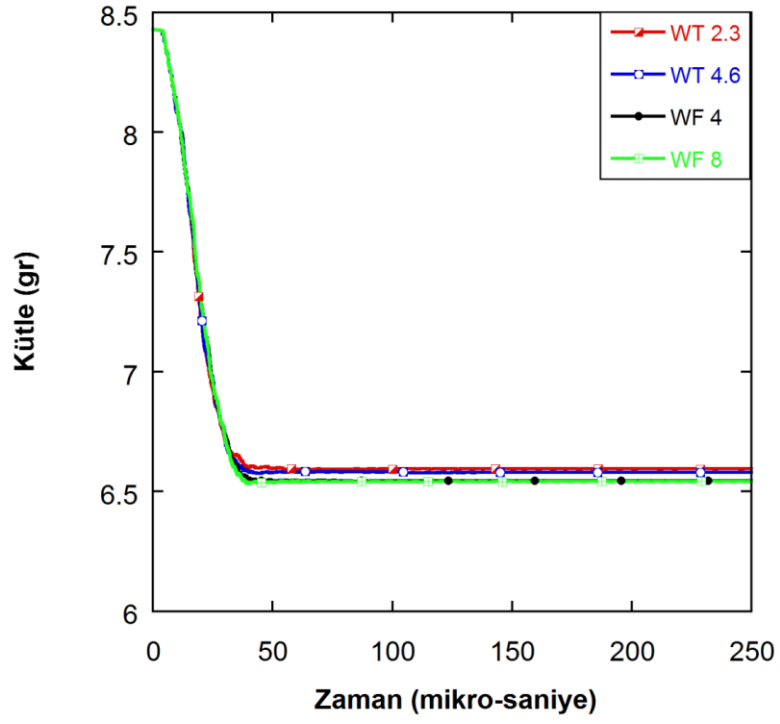


katmanla daha çok yüksek yük seviyelerinde karşılaşmakta ve iç enerjisi artmaktadır.

Mermi hızı, aynı alansal yüzey yoğunluğundaki ara yüzey malzemelerine sahip konfigürasyonlarda benzer şekilde değişmektedir (Şekil 4.44 a ). Köpük ara yüzey her iki alansal yoğunluk değeri için de tam olarak sıkışmadığından seramik katmana geri dönen dalga miktarı daha fazla olmaktadır. Bu sebeple seramik daha fazla hasara uğramakta ve mermiyle etkileşime giren malzeme miktarı artmaktadır. Bu da mermideki erozyonu artırmakta ve köpük arayüzey malzemesi içeren konfigürasyonlarda mermi nispeten daha büyük oranlarda aşınmaktadır (Şekil 4.44 b).

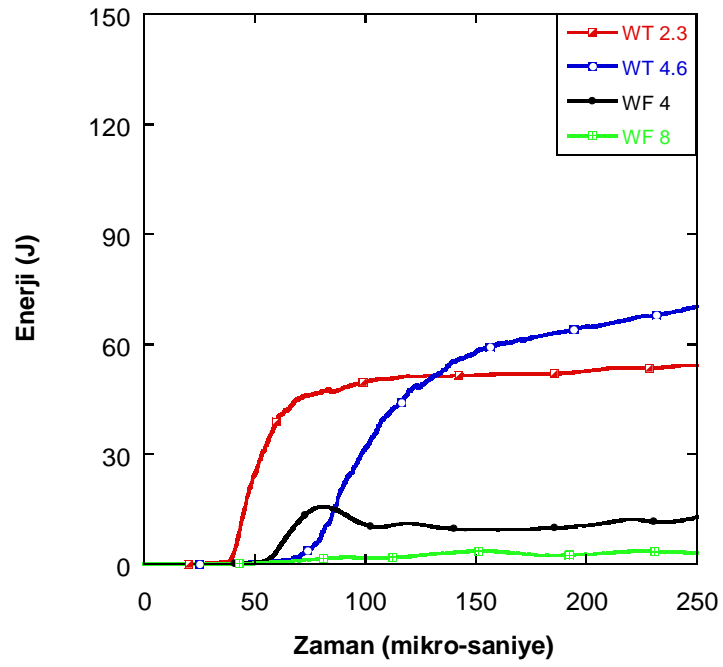


(a)

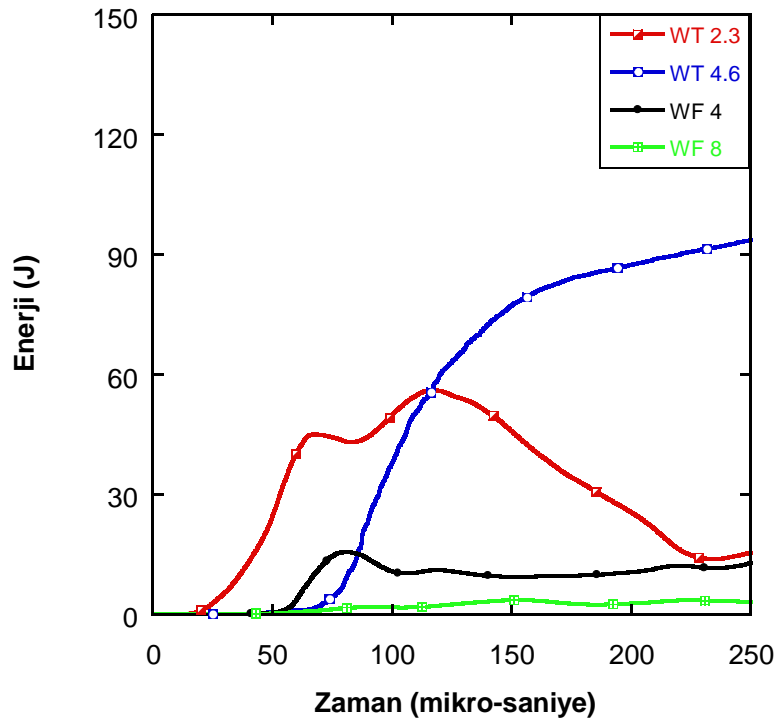


(b)

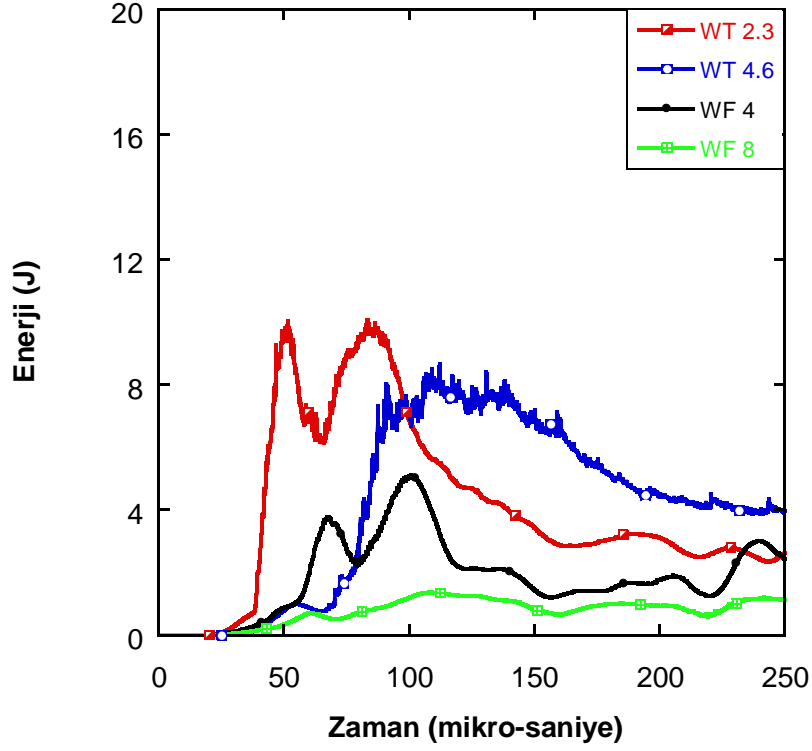
Şekil 4.44. Mermideki: a) hız ve b) kütle değişimleri.



(a)



(b)

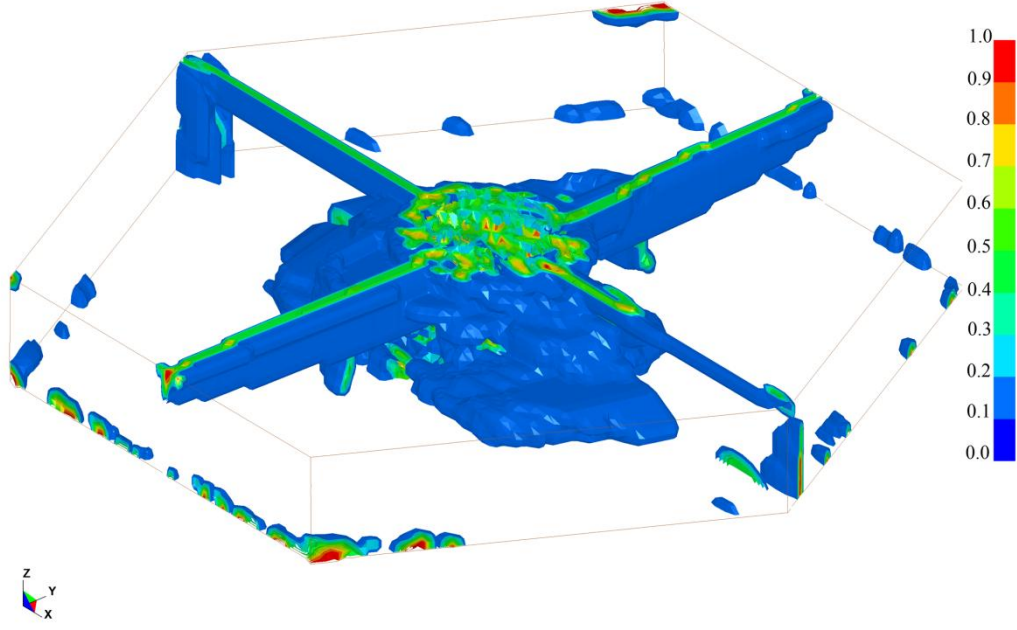


(c)

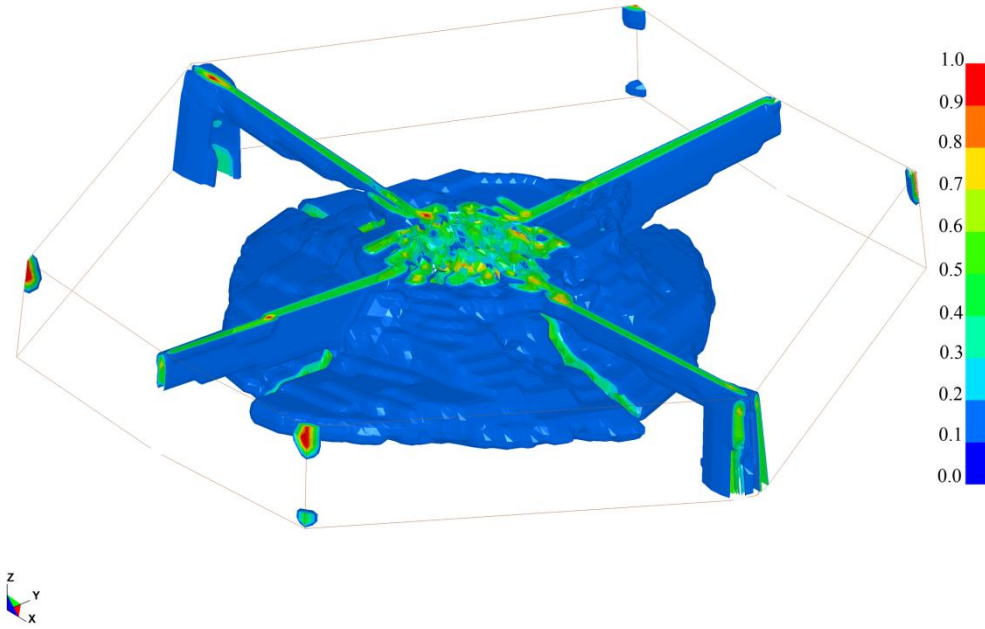
Şekil 4.45 Kompozit katmanda: a) iç enerji, b) toplam iç enerji ve c) kinetik enerji değişimleri.

Şekillerden de görüldüğü gibi, alansal yoğunluk değerinin enerji iletimi gecikmesinde önemli rol oynamaktadır. Eş alansal yoğunluğa sahip 2.3 mm teflon ve 4 mm köpük için 50 mikrosaniye civarlarında enerji iletimi başlarken, 4.6 mm teflon ve 8 mm köpük için 50 mikrosaniye sonrasında başlamaktadır. Buna göre daha yüksek yoğunluk değerlerindeki teflon ve köpük içeren konfigürasyonlarda enerji iletimi gecikmektedir. Bu da zırh sistemlerinde istenen bir durumdur. Ayrıca, alüminyum metalik köpük ara yüzeyli konfigürasyonlarda kompozit katmanda görülen enerji miktarının daha az olduğu Şekil 4.45 a-c'de görülmektedir. Bunun yanı sıra, kompozit iç enerji ve toplam iç enerji değerleri Teflon ara yüzey içeren konfigürasyonda değişkenlik gösterirken; alüminyum metalik köpük içeren konfigürasyonda göstermemektedir. Bu durumun sebebi Teflon ara yüzey malzemesi içeren konfigürasyonun kompozit katmanında da erozyon olmasıdır.

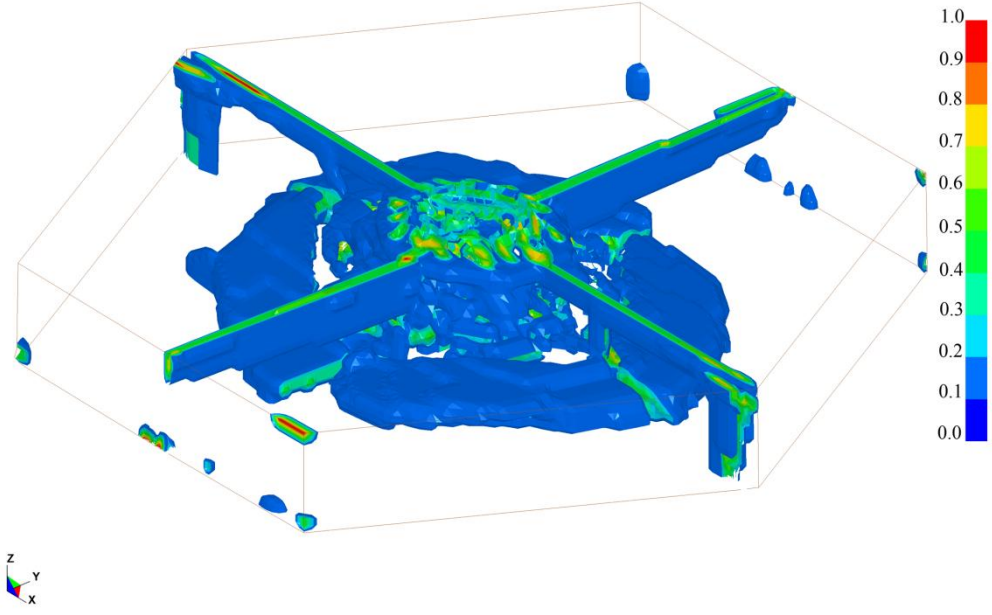
Enerji değerlerinin incelenmesinden sonra kompozit ve seramik katmanlardaki hasar incelenmesine geçilmiştir (Şekil 4.46 ve 4.47).



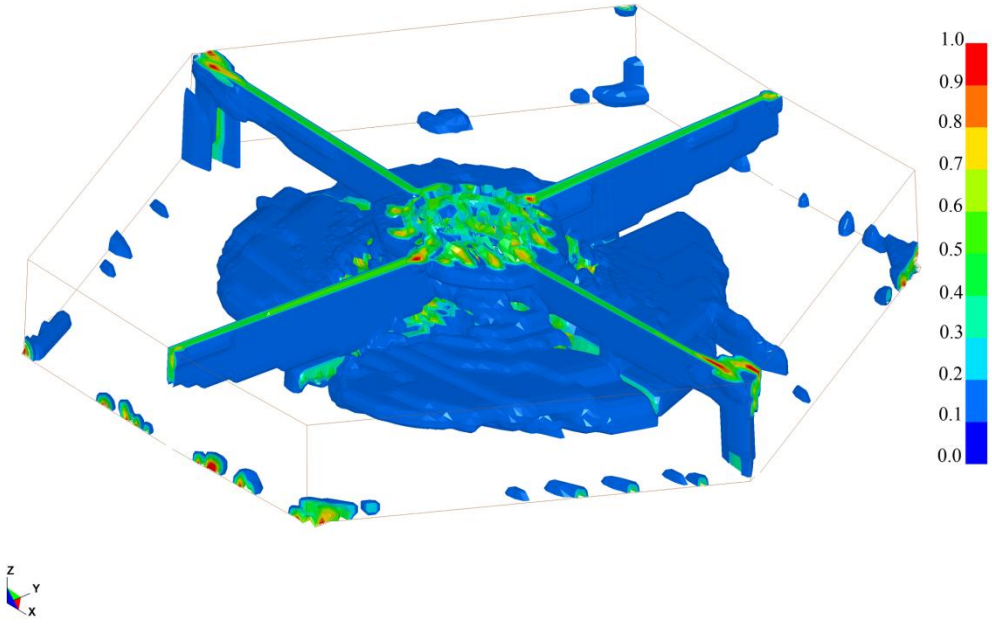
(a)



(b)

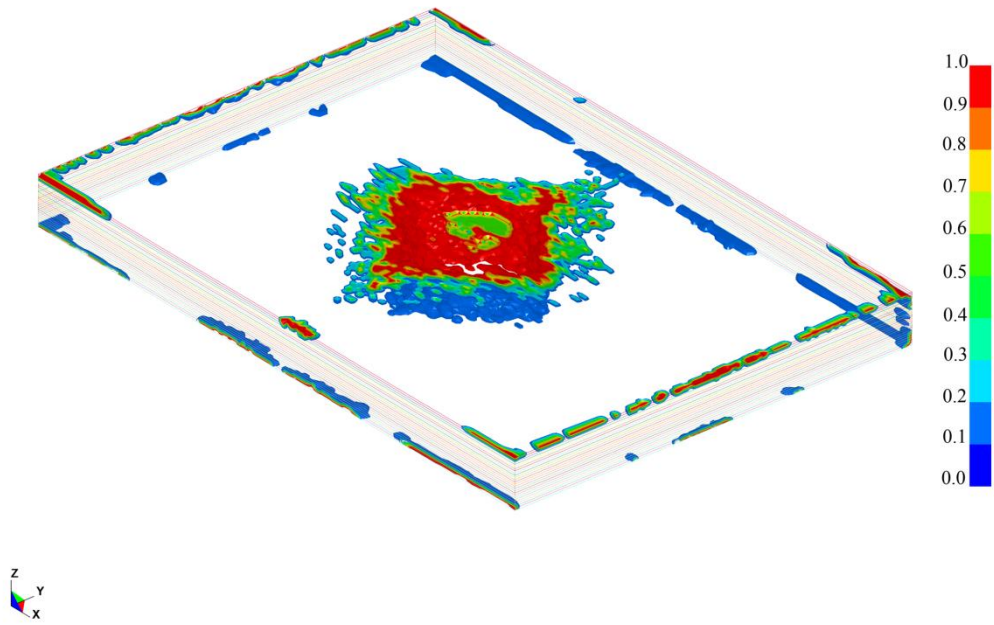


(c)

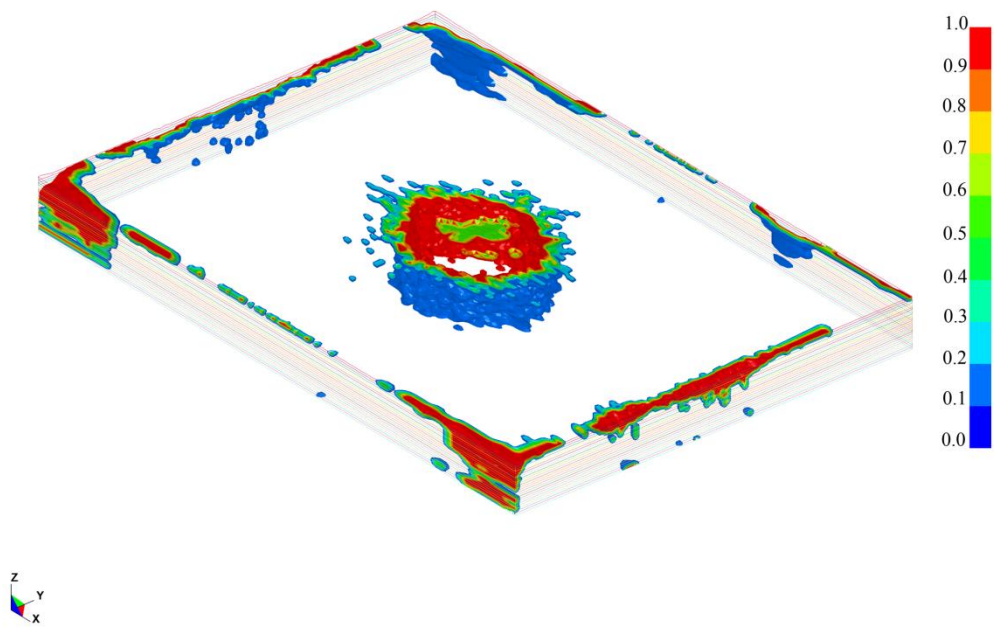


(d)

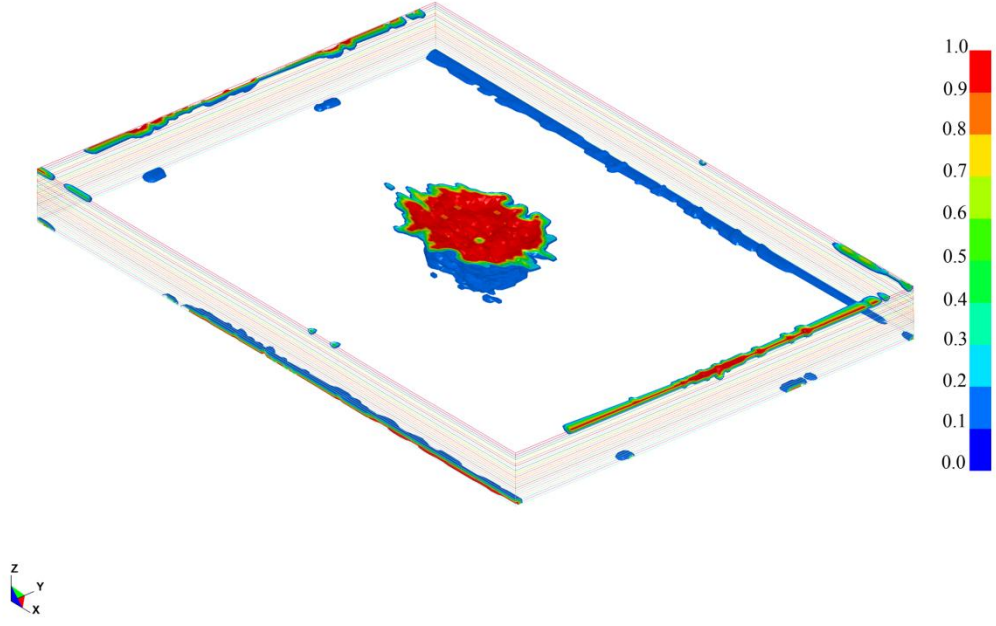
**Şekil 4.46** Seramik katmanda oluşan hasar: (a-b) 2.3 ve 4.6 mm teflon ve (c-d) 4 ve 8 mm alüminyum metalik köpük.



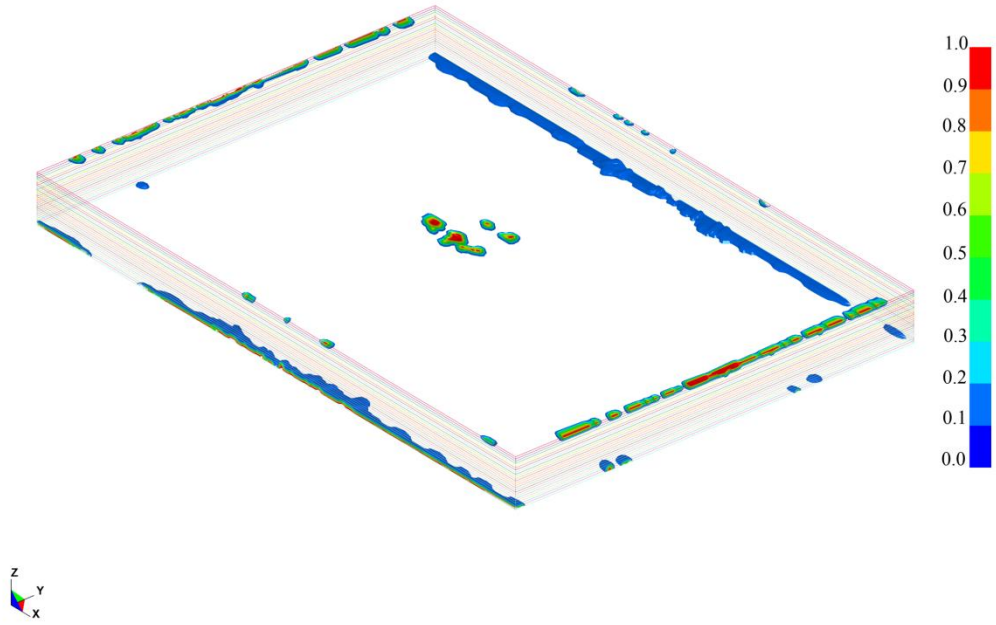
(a)



(b)



(c)



(d)

**Şekil 4.47 Kompozit katmanda oluşan hasar: (a-b) 2.3 ve 4.6 mm teflon ve (c-d) 4 ve 8 mm alüminyum metalik köpük.**

Alüminyum metalik köpük ara yüzey içeren konfigürasyonlarda seramikte meydana gelen hasar, teflon içeren konfigürasyonlara göre daha fazla iken kompozit hasarı ise daha azdır. Alüminyum metalik köpük ara yüzey malzemesi



kullanılması durumunda seramik ve mermi etkileşimi daha uzun sürelerde meydana gelmektedir. Ara yüzey malzemesinin kalınlığı arttıkça enerji ve gerilme dalgası emilimi artmakta, bu sebeple kompozit matris hasarı azalmaktadır.

Sonuç olarak, eş alansal yoğunluk değerleri dikkate alınarak yapılan incelemeler, alüminyum metalik köpük malzemenin zırh sistemi içerisinde teflondan daha verimli çalıştığını göstermiştir. Ayrıca ara yüzey kalınlığı arttıkça; kompozit katmana iletilen enerji miktarı azalırken, iletirme süresinin ve mermi hasarının arttığı gözlemlenmektedir.

## 5. SONUÇLAR

Detayları bu sonuç raporundan da görülebileceği gibi proje, başlangıçta taahhüt edilen zaman dilimi içerisinde ve amaçlanan hedeflerine ulaşılarak başarıyla tamamlanmıştır. Bu noktada edinilen kazanımlar ve erişilen hedefler aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Öncelikli olarak proje önerisinde de esas amaç olarak belirtildiği gibi çok katmanlı malzemelerden oluşan bir zırh sisteminin geliştirilmesine olanak sağlayacak olan bir metodoloji ortaya konmuştur. Bu metodoloji, detaylı nümerik ve deneysel gerilme dalgası geçiş analizini içermektedir. Bu kapsamda testler ve nümerik simülasyonlar eş zamanlı olarak yürütülmüş ve her iki tekniğin avantajları bir arada kullanılmıştır.

Proje kapsamı dahilinde ülkemiz savunma sanayii envanterine çok önemli bir katkıda bulunularak ülkemizde bir ilk olarak Hopkinson Basınç Barı test düzeneği başarıyla kurulmuş ve ülkemiz hizmetine sunulmuştur. Bu kapsamda proje, hem proje ekibinin hem de ülkemizde bu alanda çalışan akademik ve teknik personelin bilimsel araştırmalarına devam etmelerini sağlama açısından son derece önem arz etmektedir.

Proje kapsamında entegre zırh sistemini oluşturacak malzemelerin tek katmanlı ve çok katmanlı kombinasyonlarının yüksek şekil değiştirme hızlarındaki mekanik özellikleri ve gerilme dalgası ilerleyiş karakteristikleri tespit edilmiş ve bu tespit edilen özellikler daha sonraki adımlarda nümerik modellerde kullanılmıştır. Aynı zamanda test edilen numunelerde meydana gelen hasar mekanizmaları tespit edilmiş ve bu mekanizmaların birbirine ve malzeme davranışına etkisi gösterilmiştir. Bu çalışmalara paralel olarak nümerik modellemeye geçilmiştir. Nümerik modellemede de deneysel çalışmada kullanılan metodoloji takip edilmiş ve ilk önce en basit hal olan tek katmanlı malzemelerde gerilme dalgası geçişi incelenmiş, daha sonra çalışma çok katmanlı hallerin incelenmesi ile sürdürülmüştür.

Entegre zırh sistemlerinin balistik performanslarının artırılmasında en önemli husus, sistemi oluşturan seramik ön yüzey ve kompozit destek plakası ana komponentleri arasına konulacak olan ara yüzey malzemesidir. Proje kapsamında

bu amaçla üç farklı alternatif ara yüzey malzemesinin etkisi incelenmiştir. Bu malzemeler; EPDM lastik, Teflon ve alüminyum köpüktür.

Yapılan testler ve simülasyonlar sonucunda seramik katmanda meydana gelen hasar seviyeleri dikkate alındığında; ara yüzey malzemesinin kullanılmaması durumunda hasar, genellikle merminin çarptığı bölgede lokalize olmuştur. EPDM lastik kullanılması durumunda ise referans (ara yüzey malzemesiz) konfigürasyonla kıyaslandığında hasara uğrayan bölge miktarının çok fazla değişmediği tespit edilmiştir. Teflon ara yüzey malzemesi kullanılması durumunda ise hasar, hem referans hal hem de EPDM lastik hale göre artmıştır. Daha fazla miktarda seramik, mermi ile etkileşime girmiş ve bu geniş bölge, yükü kompozit katmana daha geniş bir alan üzerinden aktarmıştır. Böylelikle kompozit katmana iletilen gerilme değerleri azalmıştır. Alüminyum köpük ara yüzey kullanılması durumunda ise referans ve EPDM lastikli hale göre hasara uğrayan bölge miktarı artmış olmakla beraber, Teflon ara yüzey malzemesinin kullanıldığı konfigürasyona yakın hasar seviyeleri tespit edilmiştir.

Kompozit katmanda meydana gelen hasar dikkate alındığında; ara yüzey malzemesinin kullanılmaması durumunda, merminin çarpma noktasının altında yoğunlaşan fiber hasarları ve yine altıgen geometriye sahip seramik katmanın kırıldıktan sonraki sınırlarını izleyen delaminasyon tespit edilmiştir. EPDM lastik kullanılması durumunda ise hasar, referans hale göre artmış ve seramik katmanın hemen altında bulunan kompozitin üst katmanlarında yoğunlaşan delaminasyon gözlenmiştir. Teflon kullanılması durumunda ise delaminasyon hasarı, EPDM lastikte olduğu gibi referans hale göre artmıştır. Ancak EPDM lastikle kıyaslandığında Teflon, kompozitin üst katmanlarında daha az delaminasyona sebep olmuştur. Alüminyum köpük kullanılması durumunda ise yapıda meydana gelen hasar diğer konfigürasyonlarla kıyaslandığında oldukça düşük seviyelerde kalmıştır.

Alternatif ara yüzey malzemelerinin etkinlikleri tespit edildikten sonra bu malzemeler arasından en iyi sonucu alüminyum köpük ve Teflon malzemelerinin verdiği tespit edilmiştir. Ayrıca eş alansal yoğunluk seviyeleri seçilerek yapılan analizler sonucunda; alüminyum metalik köpük ara yüzey içeren konfigürasyonlarda seramik katmanda meydana gelen hasarın, Teflon içeren konfigürasyonlara göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Kompozit katmandaki

hasar ise alüminyum metalik köpük ara yüzey içeren konfigürasyonlarda daha azdır. Alüminyum metalik köpük ara yüzey malzemesi kullanılması durumunda seramik ve mermi etkileşiminin daha uzun sürelerde meydana geldiği görülmüştür. Ara yüzey malzemesinin kalınlığı arttıkça enerji ve gerilme dalgası emilimi artmıştır, bu sebeple kompozit matris hasarı azalmıştır. Eş alansal yoğunluk değerleri dikkate alınarak yapılan incelemeler, alüminyum metalik köpük malzemenin zırh sistemi içerisinde Teflondan daha verimli çalıştığını göstermiştir. Ayrıca ara yüzey kalınlığı arttıkça; kompozit katmana iletilen enerji miktarı azalmış, iletim süresi ve mermi hasarı artmıştır.

Bu sonuçların ışığı altında zırh kalınlığının önemli bir dizayn sınırlaması getirmediği durumlarda çok katmanlı zırh sistemlerinde alüminyum metalik köpük ara yüzey malzemesinin, kalınlığın önemli sınırlama olduğu durumlarda ise Teflon ara yüzey malzemesinin kullanılmasının daha uygun olacağı tespit edilmiştir.

## Referanslar

- Abrate, S., Ballistic Impacts on Composite and Sandwich Structures, Springer Science+Business Media, Carbondale, (2009).
- Abrate, S., Wave Propagation in Lightweight Composite Armor, Journal De Physique Iv, 110, 657-62, (2003).
- Gama, B. A. ve diğ., Aluminum Foam Integral Armor: A New Dimension in Armor Design, Composite Structures, 52, 3-4, 381-95, (2001).
- Gama, B. A., Gillespie Jr JW, Bogetti TA, Fink B., Innovative Design and Ballistic Performance of Lightweight Composite Integral Armor, SAE 2001 World Congress, Detroit, USA, (2001).
- Gupta, N. K. and Madhu, V., Normal and Oblique Impact of a Kinetic-Energy Projectile on Mild-Steel Plates, International Journal of Impact Engineering, 12, 3, 333-43, (1992).
- Gupta, Y. M. and Ding, J. L., Impact Load Spreading in Layered Materials and Structures: Concept and Quantitative Measure, International Journal of Impact Engineering, 27, 3, 277-91, (2002).
- Mines, R. A. W., A One-Dimensional Stress Wave Analysis of a Lightweight Composite Armour, Composite Structures, 64, 1, 55-62, (2004).
- Naik, N. K. and Kavala, V. R., High Strain Rate Behavior of Woven Fabric Composites under Compressive Loading, Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 474, 1-2, 301-11, (2008).
- Tasdemirci, A. and Hall, I. W., Development of Novel Multilayer Materials for Impact Applications: A Combined Numerical and Experimental Approach, Materials & Design, 30, 5, 1533-41, (2009).
- Tasdemirci, A. and Hall, I. W., The Effects of Plastic Deformation on Stress Wave Propagation in Multi-Layer Materials, International Journal of Impact Engineering, 34, 11, 1797-813, (2007).
- Tasdemirci, A. and Hall, I. W., Experimental and Modeling Studies of Stress Wave Propagation in Multilayer Composite Materials: Low Modulus Interlayer Effects, Journal of Composite Materials, 39, 11, 981-1005, (2005).

Tasdemirci, A. and Hall, I. W., Numerical and Experimental Studies of Damage Generation in a Polymer Composite Material at High Strain Rates, *Polymer Testing*, 25, 6, 797-806, (2006).

Tasdemirci, A. and Hall, I. W., Numerical and Experimental Studies of Damage Generation in Multi-Layer Composite Materials at High Strain Rates, *International Journal of Impact Engineering*, 34, 2, 189-204, (2007).

Tasdemirci, A. ve diğ., The Effects of Layer Constraint on Stress Wave Propagation in Multilayer Composite Materials, Aberdeen Proving Ground, (2004),

Tasdemirci, A. ve diğ., Stress Wave Propagation Effects in Two- and Three-Layered Composite Materials, *Journal of Composite Materials*, 38, 12, 995-1009, (2004).

Zaera, R. ve diğ., Modelling of the Adhesive Layer in Mixed Ceramic/Metal Armour Subjected to Impact, *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 31, 8, 823-33, (2000).

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

<b>Proje No:</b> 106M353
<b>Proje Başlığı:</b> Patlama ve balistik tehditlere karşı koruyucu çok katmanlı malzeme sistemlerinin yüksek deformasyon hızlarında mekanik ve nümerik test metotlarının geliştirilmesi ve optimizasyonu
<b>Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar:</b> <b>Proje yürütücüsü:</b> Doç.Dr. Alper TAŞDEMİRCİ
<b>Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:</b> İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Gülbahçe Köyü Urla/İZMİR
<b>Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:</b> TÜBİTAK Atatürk Bulvarı No:221 06100 Kavaklıdere/ANKARA
<b>Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:</b> 01.02.2007 - 01.02.2011
<b>Öz (en çok 70 kelime)</b> Bu çalışmada ana amaç çok katmanlı zırh sistemlerinde kullanılacak malzemelerin yüksek deformasyon hızlarındaki mekanik davranışlarını ve gerilme dalgası ilerleyişi karakteristiklerini incelemek ve bu amaca uygun çeşitli mekanik ve nümerik test metotları geliştirmektir. Bu amaçla ülkemizde bir ilk olarak Hopkinson basınç barı kurulmuştur. Proje kapsamında çeşitli ara yüzey malzemelerinin zırh sistemlerinin balistik performanslarına etkisi laboratuvar ve açık saha ortamında yapılan yapılan testler ve bu testlerin nümerik simülasyonları ile incelenmiştir.
<b>Anahtar Kelimeler:</b> Çok Katmanlı Zırhlar, Hopkinson Basınç Barı, Yüksek Hızda Deformasyon, Sonlu Elemanlar Metodu
<b>Fikri Ürün Bildirim Formu</b> Sunuldu mu? Evet <input type="checkbox"/> Gerekli Değil <input checked="" type="checkbox"/> Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.
<b>Projeden Yapılan Yayınlar:</b> 1) G. Tunusoğlu, M. Güden, A. Tasdemirci, "The effect of interlayer on the ballistic performance of ceramic/composite armors:experimental and numerical study", International Journal of Impact Engineering, gönderildi. 2) Tasdemirci, A., Ç. Ergönenç ve M. Güden, "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 (2010).Engineering, Volume 37, Issue 3, March 2010, Pages 250-259. 3) Tunusoğlu, G., A. Taşdemirci, M. Guden ve I.W. Hall , "Numerical and Experimental Studies of High Strain Rate Mechanical Behavior of E-Glass/Polyester Composite Laminates" ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Istanbul, Turkey.

4) Tasdemirci, A, M. Guden ve Ç. Ergöner, "Alüminyum metal köpük sandviç yapıların mayın patlaması yüklerine karşı davranış simülasyonu" SAVTEK2010, METU-Ankara.

5) Tasdemirci, A.; Kara, A.; Turan, A.K.; Tunusoğlu, G.; Güden, M.; Hall, I.W. : "Experimental and Numerical Investigation of High Strain Rate Mechanical Behavior of a [0/45/90/-45] Quadriaxial E-Glass/Polyester Composite"; International Conference on the Mechanical Behavior of Materials, Como, Italy, Haziran 2011, kabul edildi.