

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI**

**YÜKSEK HIZLI DARBELERE KARŞI ÇOK TABAKALI, KARBON
ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT BİR ZİRHİN MODELLENMESİ,
SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK ANALİZİ**

HAZIRLAYAN

YELDA ÖZDİL KAÇAN

DOKTORA TEZİ

ANKARA – 2021

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI**

**YÜKSEK HIZLI DARBELERE KARŞI ÇOK TABAKALI, KARBON
ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT BİR ZIRHIN MODELLENMESİ,
SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK ANALİZİ**

HAZIRLAYAN

YELDA ÖZDİL KAÇAN

DOKTORA TEZİ

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. ÖMER FARUK ELALDI

ANKARA – 2021

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Mühendisliği Doktora Programı çerçevesinde Yelda Özdil Kaçan tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 14/06/2021

Tez Adı: Yüksek Hızlı Darbelere Karşı Çok Tabakalı, Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Bir Zırhın Modellenmesi, Sayısal ve Deneysel Olarak Analizi

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)

İmza

Prof. Dr. Ömer Faruk Elaldı, Başkent Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Müfit Gülgeç, Çankaya Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Tahir Yavuz, Başkent Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Hakan Argeşo, Atılım Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Bedi Cenk Balçık, Başkent Üniversitesi

.....

ONAY

Prof. Dr. Ömer Faruk Elaldı
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Tarih : ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 06/07/2021

Öğrencinin Adı, Soyadı: Yelda Özdil Kaçan

Öğrencinin Numarası: 21410402

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Programı: Makine Mühendisliği Doktora Programı

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Prof. Dr. Ömer Faruk Elaldı

Tez Başlığı: Yüksek Hızlı Darbelere Karşı Çok Tabakalı, Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Bir Zırhın Modellenmesi, Sayısal ve Deneysel Olarak Analizi

Yukarıda başlığı belirtilen Doktora tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 89 sayfalık kısmına ilişkin, 06/07/2021 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 3'tür. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

ONAY

Tarih: 06/07/2021

Prof. Dr. Ömer Faruk Elaldı

TEŞEKKÜR

Yazar, bu çalışmanın gerçekleşmesinde katkılarından dolayı, aşağıda adı geçen kişi ve kuruluşlara içtenlikle teşekkür eder.

Sayın Prof. Dr. Ömer Faruk Elaldı' ya (Tez Danışmanı), bu çalışmanın yürütülmesinde benden yardımlarını esirgemediği, çalışmamın her aşamasında bana yol gösterici olduğu, bilgi ve deneyimi ile tezimi yönlendirdiği için...

Tez izleme jürisinde yer alan hocalarım, Prof. Dr. Müfit Gülgeç ve Dr. Öğr. Üyesi Bedi Cenk Balçık' a, savunma jürisinde yer alan hocalarım, Prof. Dr. Tahir Yavuz ve Prof. Dr. Hakan Argeşo' ya, bilgi ve deneyimleriyle çalışmama katkı verdikleri için...

Başkent Üniversitesi' ne (Bilimsel Araştırma Projesi (Bap Proje No: BA17/FM-18)), tezin gerçekleştirilmesinde maddi katkı sağladığı için...

CES İleri Kompozit ve Savunma Teknolojileri A.Ş.' ye, karbon elyaf takviyeli kompozit blokların üretimine olanak sağladığı için...

Roketsan A.Ş.' ye panellerin atış testlerinin yapılmasına olanak sağladığı için...

Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu-Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü' nden Doç. Dr. Şinasi Ekinci ve Sebahattin Güvendik' e, panellerin röntgenlerinin çekilmesine olanak sağladıkları için...

Sevgili arkadaşım Dr. Öğr. Üyesi Emre Koç' a, çalışmalarım sırasında bana her konuda çok yardımcı olduğu için...

Aileme, eşim Hamit Kaçan' a, canım kızım Bensu Deren Kaçan' a tez çalışmamın her aşamasında her zaman yanımda oldukları ve beni destekledikleri için...

ÖZET

Yelda ÖZDİL KAÇAN

**YÜKSEK HIZLI DARBELERE KARŞI ÇOK TABAKALI, KARBON ELYAF
TAKVİYELİ KOMPOZİT BİR ZIRHIN MODELLENMESİ, SAYISAL VE
DENEYSEL OLARAK ANALİZİ**

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Doktora Programı

2021

İhtiyaçların karşılanmasına bağlı olarak geleneksel mühendislik malzemelerinden daha hafif ve daha iyi mekanik özelliklere (mukavemet, yorulma dayanımı, korozyon direnci vs.) sahip olan kompozit malzemelere ilgi günden güne artmaktadır. Kompozit malzemelerin kullanımı yaygınlaştıkça, dış etkenlere karşı nasıl bir davranış göstirecekleri merak edilmektedir. Özellikle, çevresel koşullar ile düşük ya da yüksek hızlı darbe yüklerine karşı verdikleri tepkiler son yılların önemli araştırma konuları arasındadır.

Bu tez çalışmasında savunma sanayiinde kullanılan geleneksel kompozit yapılardan farklı olarak yüksek hızlı çarpma durumlarında özellikle tamamı darbe yönüne paralel konumlandırılmış karbon fiberlerin penetrasyon direncine yaptığı etki araştırılmış ve yüksek hızlı darbe yüküne maruz kalan çok tabakalı hibrit (zırh çeliği ile sandviç edilmiş karbon elyaf takviyeli kompozit) bir kompozit zırhın penetrasyon direnci sayısal ve deneysel olarak analiz edilerek incelenmiştir. Tezin deneysel çalışmalarında Barut Enerjisi (Powder Gun) ile Çalışan Silah Sistemi kullanılmış ve ANSYS LS-DYNA programı ile oluşturulan sayısal model deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır. Doğruluğu teyit edilmiş sayısal model kullanılarak farklı zırh çeliği kalınlıkları ile çok tabakalı hibrit kompozit zırhın yüksek hızlı çarpma simülasyonları yapılmıştır. Bu simülasyonlar ile aynı koruma seviyesini verecek eş değer RHA zırh çeliğinden daha hafif olacak biçimde minimum ağırlığı sağlayan alansal yoğunluk bulunmuş ve böylece çok tabakalı kompozit yapının STANAG 4569' a göre 4. Seviyeden daha iyi bir oranda koruma sağladığı görülerek hipotez doğrulanmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: Çok Tabakalı Zırh, Darbe, Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit, Modelleme, Yüksek Hız.

Başkent Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP), Proje No: BA17/FM-18

ABSTRACT

Yelda ÖZDİL KAÇAN

MODELING, NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A MULTI-LAYERED, CARBON FIBER REINFORCED COMPOSITE ARMOR AGAINST HIGH-VELOCITY IMPACT

Başkent University Institute of Science and Engineering

Department of Mechanical Engineering

Ph. D. On Mechanical Engineering

2021

Interest in composite materials which are lighter and have better mechanical properties (strength, fatigue resistance, corrosion resistance, etc.) than traditional engineering materials is increasing depending on meeting the needs day by day. As the use of composite materials becomes widespread, it is wondered that how they will develop a behavior against external factors. In particular, their responses against low or high-velocity impact loads with environmental conditions have been among significant research topics of recent years.

In this study, unlike the traditional composite structures used in the defense industry, the effect of total carbon fibers parallel oriented to impact direction on penetration resistance has been investigated and penetration resistance of a multi-layer hybrid (carbon fiber reinforced composite sandwiched by two armor steel plates) composite armor exposed to high-velocity impact has been analyzed numerically and experimentally. Powder gun system was used in experimental part of the study and the numerical model created in ANSYS LS-DYNA program was verified by using the experimental data obtained. Verified numerical model was used to make high-velocity impact simulations of multi-layer hybrid composite armor for different armor steel thicknesses. By these simulations, minimum areal density compared to RHA steel equivalent protection was finally achieved and thus, the hypothesis saying that carbon fibers parallel oriented to impact direction can give high penetration resistance was proved by showing that multi-layer composite armor structure has provided a better protection level than STANAG 4569 Level-4.

KEYWORDS: Multi-layer Armor, Impact, Carbon Fiber Reinforced Composite, Modeling, High Velocity.

Başkent University Scientific Research Project, Project No: BA17/FM-18

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|-----------|
| TEŞEKKÜR..... | i |
| ÖZET..... | ii |
| ABSTRACT..... | iv |
| İÇİNDEKİLER..... | vi |
| TABLolar LİSTESİ..... | viii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ..... | ix |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ..... | xvi |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 1.1. Balistik..... | 2 |
| 1.1.1. İç balistik..... | 2 |
| 1.1.2. Dış balistik..... | 2 |
| 1.1.3. Terminal balistik..... | 2 |
| 1.2. Zırh Malzemeleri..... | 3 |
| 1.2.1. Çelik..... | 3 |
| 1.2.2. Alüminyum..... | 4 |
| 1.2.3. Titanyum..... | 4 |
| 1.2.4. Seramikler..... | 4 |
| 1.2.5. Kompozit malzemeler..... | 5 |
| 1.3. Literatür Araştırması..... | 6 |
| 1.4. Tezin Amaç ve Kapsamı..... | 9 |
| 2. YÜKSEK HIZLI ÇARPMA TESTLERİNDE KULLANILAN ÇOK TABAKALI KOMPOZİT YAPI TEST NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI..... | 11 |
| 2.1. Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Blokların Üretimi..... | 11 |
| 2.2. Çok Tabakalı Kompozit Zırhı Oluşturan Malzemelerin Birleştirilmesi..... | 22 |
| 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR..... | 25 |
| 3.1. Çok Tabakalı Küçük ve Büyük Kompozit Zırhların Yüksek Hızlı Çarpma Testleri..... | 25 |
| 3.2. Yüksek Hızlı Çarpma Testleri Sonrasında Panellerde Penetrasyon Derinliğinin Ölçülmesi..... | 26 |

| | |
|---|----|
| 3.3. Yüksek Hızlı Çarpma Testi Sonrasında Küçük Panellerin Açılıp İncelenmesi .. | 29 |
| 3.4. Yüksek Hızlı Çarpma Testi Sonrasında Büyük Panellerin Açılıp İncelenmesi... | 31 |
| 3.5. Bulgular ve Tartışma | 40 |
| 4. SAYISAL ÇALIŞMALAR | 42 |
| 4.1. Çok Tabakalı Büyük ve Küçük Kompozit Zırhların Üç Boyutlu Modellenmesi ve Sayısal Analizi..... | 42 |
| 4.2. Küçük Panellerin Sayısal Analiz Sonuçları | 57 |
| 4.3. Büyük Panellerin Sayısal Analiz Sonuçları..... | 64 |
| 4.4. Alan Yoğunluğu Düşürülmüş Panelin Sayısal Analizleri | 80 |
| 4.5. Bulgular ve Tartışma | 81 |
| 5. SAYISAL VE DENEYSEL SONUÇLARIN KIYASLANMASI VE İRDELENMESİ.. | |
| | 83 |
| 6. SONUÇ VE ÖNERİLER | 88 |
| 6.1. Sonuçlar | 88 |
| 6.2. Öneriler | 88 |
| KAYNAKLAR | 90 |

TABLULAR LİSTESİ

| | Sayfa |
|---|--------------|
| Tablo 3.1. STANAG 4569 Seviye-4 Koruma için Kullanılan Mermi Tipi, Hızı ve Ağırlığı..... | 25 |
| Tablo 3.2. Yüksek Hızlı Çarpma Testlerinde Merminin Küçük ve Büyük Panellere Vuruş Hızı | 26 |
| Tablo 4.1. Ön ve Arka Plakalarda Kullanılan MIL A46100 Çeliğinin Johnson Cook Parametreleri..... | 52 |
| Tablo 4.2. Karbon Fiber ile Takviye Edilmiş Kompozit Bloklarda Kullanılan Tek Yönlü Karbon/Epoksi (AS4/3501-6) Malzemesinin Mekanik Özellikleri..... | 55 |
| Tablo 4.3. Sayısal Analiz Sonucunda Merminin Panellerdeki Tabakalara Giriş Enerjisi ile Panellerdeki Tabakaların Absorbe Ettikleri Enerjiler..... | 79 |
| Tablo 5.1. Yüksek Hızlı Çarpma Testlerinin Sayısal ve Deneysel Karşılaştırması | 83 |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | Sayfa |
|--|--------------|
| Şekil 1.1. Darbeye Maruz Kalmış Plakalarda Kırılma Biçimleri | 3 |
| Şekil 1.2. Kompozit Üretim Tekniklerinin Sınıflandırılması | 6 |
| Şekil 2.1. 12 cm x 45 cm Boyutlarındaki Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Blok..... | 11 |
| Şekil 2.2. 12 cm x 45 cm Boyutlarındaki Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Bloğun Homojen Kalınlığa Sahip Kısmı | 12 |
| Şekil 2.3. Karbon Fiber Epoksi Prepreg Malzemelerin CNC Katman Kesici ile Kesimi | 13 |
| Şekil 2.4. Karbon Fiber Epoksi Prepreg Malzemelerin Serimi | 13 |
| Şekil 2.5. Karbon Fiber Epoksi Prepreg Malzemelerin Serimi Esnasında Oluşan Boşluklar ... | 14 |
| Şekil 2.6. Karbon Fiber Epoksi Prepreg Malzemelerin Serimi Esnasında Kullanılan Sensörler | 15 |
| Şekil 2.7. Karbon ile Takviye Edilmiş Kompozit Tabakanın Hasar Bölgesi | 15 |
| Şekil 2.8. Karbon Fiber ile Takviye Edilmiş Kompozit Bloklardaki Sensörlerin Yerleri..... | 16 |
| Şekil 2.9. Karbon Fiber ile Takviye edilmiş Kompozit Parçanın 62. Tabakasındaki Sensörlerin Yerleşimi | 16 |
| Şekil 2.10. Serimi Tamamlanmış Karbon Fiber ile Takviye Edilmiş Kompozit Parça..... | 17 |
| Şekil 2.11. Parça Üzerindeki Alüminyum Baskı Plakaları ve Parça Kenarlarındaki Alüminyum L Profiller..... | 17 |
| Şekil 2.12. Baskı Plakaları ve Profiller Üzerindeki Vakum Battaniyesi | 18 |
| Şekil 2.13. Karbon Fiber ile Takviye Edilmiş Kompozit Parçaya ve Plakaya Konulmuş Termal Çiftler | 18 |
| Şekil 2.14. Karbon Fiber ile Takviye Edilmiş Parçaların Vakumlama İşlemi | 19 |
| Şekil 2.15. Otoklav Sonrası Elde Edilen Karbon Fiber ile Takviye Edilmiş Kompozit Parçalar | 19 |
| Şekil 2.16. Kompozit Parçaların Su Jeti ile Kesilmesi | 20 |

| | |
|---|----|
| Şekil 2.17. Büyük Panellerde Kullanılan Karbon Fiber ile Takviye Edilmiş Kompozit Blokların Birleştirilmiş Hali | 20 |
| Şekil 2.18. Küçük Panellerde Kullanılan Karbon Fiber ile Takviye Edilmiş Kompozit Blokların Birleştirilmiş Hali | 21 |
| Şekil 2.19. Sensörlü Karbon ile Takviye Edilmiş Kompozit Bloklardaki Kanallar ve Sensörlerin Lehimlenmesi | 21 |
| Şekil 2.20. Sensörlü Karbon Fiber ile Takviye Edilmiş Kompozit Bloklardaki Lehimlenen Yüzeyin ve Kablo Kanalının Macunlanması..... | 22 |
| Şekil 2.21. Küçük Panel (a), Büyük Panel (b), Altı ve Yanları Çelik Plakalar ile Kapatılmış Büyük ve Küçük Paneller (c)..... | 23 |
| Şekil 2.22. Kapakları Kapatılmış Büyük (a) ve Küçük (b) Paneller | 23 |
| Şekil 2.23. Küçük (a) ve Büyük (b) Panellerin Boyanmış Arka ve Ön Yüzeyleri..... | 24 |
| Şekil 2.24. Yüksek Hızlı Çarpma Testleri için Hazır Hale Getirilen Küçük (a) ve Büyük (b) Panellerin Boyutları..... | 24 |
| Şekil 3.1. Panellerin Hedef Yerine Sabitlenmesi | 25 |
| Şekil 3.2. Yüksek Hızlı Atış Sonrasında Küçük Panellerin Röntgenleri (a) Küçük Panel-1, (b) Küçük Panel-2 ve (c) Küçük Panel-3..... | 27 |
| Şekil 3.3. Yüksek Hızlı Atış Sonrasında Büyük Panellerin Röntgenleri (a) Büyük Panel-1, (b) Büyük Panel-2 ve (c) Büyük Panel-3..... | 27 |
| Şekil 3.4. Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu-Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü' nde Bulunan Radyografi Cihazı..... | 28 |
| Şekil 3.5. Yüksek Hızlı Atış Sonrasında Büyük Panellerde oluşan Penetrasyon Derinliklerinin Ölçülmesi (a) Büyük Panel-1' deki 1.Atış, (b) Büyük Panel-2 | 28 |
| Şekil 3.6. Yüksek Hızlı Çarpma Testi Sonrası Küçük Panellerin Ön ve Arka Yüzeyleri (a) Küçük Panel-1, (b) Küçük Panel-2, (c) Küçük Panel-3..... | 29 |
| Şekil 3.7. Küçük Panel-1' in İç Yüzeyi | 30 |
| Şekil 3.8. Küçük Panel-2' nin İç Yüzeyi..... | 30 |
| Şekil 3.9. Küçük Panel-3' ün İç Yüzeyi..... | 31 |
| Şekil 3.10. Sensörsüz Büyük Panel-1' in Ön (a) ve Arka (b) Yüzeyi | 31 |

| | |
|--|----|
| Şekil 3.11. Sensörsüz Büyük Panel-1’ deki 1 Numaralı Atışta Merminin İisabet Ettiği Kompozit Bloğun Önden (a) ve Arkadan (b) Görünümü..... | 32 |
| Şekil 3.12. Sensörsüz Büyük Panel-1’ deki 1 Numaralı Atışta Merminin İisabet Ettiği Kompozit Bloğun İç Yüzey Görünümü..... | 32 |
| Şekil 3.13. Sensörsüz Büyük Panel-1’ deki 2 Numaralı Atışta Merminin İisabet Ettiği Kompozit Bloğun Önden (a) ve Arkadan (b) Görünümü..... | 33 |
| Şekil 3.14. Sensörsüz Büyük Panel-1’ deki 2 Numaralı Atışta Merminin İisabet Ettiği Kompozit Bloğun İç Yüzey Görünümü..... | 33 |
| Şekil 3.15. Sensörsüz Büyük Panel-1’ deki 3 Numaralı Atışta Merminin İisabet Ettiği Kompozit Bloğun Önden (a) ve Arkadan (b) Görünümü..... | 34 |
| Şekil 3.16. Sensörsüz Büyük Panel-1’ deki 3 Numaralı Atışta Merminin İisabet Ettiği Kompozit Bloğun İç Yüzey Görünümü..... | 34 |
| Şekil 3.17. Sensörsüz Büyük Panel-1’ deki 4 Numaralı Atışta Merminin İisabet Ettiği Kompozit Bloğun Önden (a) ve Arkadan (b) Görünümü..... | 35 |
| Şekil 3.18. Sensörsüz Büyük Panel-1’ deki 4 Numaralı Atışta Merminin İisabet Ettiği Kompozit Bloğun İç Yüzey Görünümü..... | 35 |
| Şekil 3.19. Sensörlü Büyük Panel-2’ nin Ön (a) ve Arka (b) Yüzeyleri | 36 |
| Şekil 3.20. Sensörlü Büyük Panel-2’ deki Merminin İisabet Ettiği Kompozit Bloğun Önden (a) ve Arkadan (b) Görünümü..... | 36 |
| Şekil 3.21. Sensörlü Büyük Panel-2’ deki Merminin İisabet Ettiği Kompozit Bloğun İç Yüzey Görünümü..... | 36 |
| Şekil 3.22. Sensörlü Büyük Panel-3’ ün Ön (a) ve Arka (b) Yüzeyleri | 37 |
| Şekil 3.23. Sensörlü Büyük Panel-3’ teki Merminin İisabet Ettiği Kompozit Bloğun Önden (a) ve Arkadan (b) Görünümü..... | 37 |
| Şekil 3.24. Sensörlü Büyük Panel-3’ teki Merminin İisabet Ettiği Kompozit Bloğun İç Yüzey Görünümü | 38 |
| Şekil 3.25. Sensörlü Büyük Panel-2 (a) ve Sensörlü Büyük Panel-3 (b)’ teki Sensörlerin Numaralandırılması | 38 |
| Şekil 3.26. Sensörlü Büyük Panel-2’ deki Sensörlerden Alınan Gerinim Verileri | 39 |

| | |
|---|----|
| Şekil 3.27. Sensörlü Büyük Panel-3’ teki Sensörlerden Alınan Gerinim Verileri | 39 |
| Şekil 4.1. Üç Tabakalı Kompozit Yapı ve Penetratör Modeli..... | 42 |
| Şekil 4.2. Karbon Fiber ile Takviye Edilmiş Kompozit Tabakanın “Yüzey” (a) ve “Katı” (b) Modeli | 43 |
| Şekil 4.3. Modellere Verilen Sınır Koşulları (a) “Katı” Model, (b) “Yüzey” Model | 44 |
| Şekil 4.4. Katmanlı Modeller (a) “Katı” Model, (b) “Yüzey” Model | 44 |
| Şekil 4.5. 850 m/s Hız için Gerçek Boyutları ile Sayısal Analizi Yapılmış Kompozit Yapı | 45 |
| Şekil 4.6. Küçük Panel-1’ in Sayısal Modeli ve Küçük Panellerin Boyutları..... | 46 |
| Şekil 4.7. Küçük Panel-2’ nin Sayısal Modeli | 46 |
| Şekil 4.8. Küçük Panel-3’ ün Sayısal Modeli..... | 47 |
| Şekil 4.9. Büyük Panel-1’ in Sayısal Modeli | 47 |
| Şekil 4.10. Büyük Panel-2’ nin Sayısal Modeli ve Büyük Panellerin Boyutları..... | 48 |
| Şekil 4.11. Büyük Panel-3’ ün Sayısal Modeli..... | 48 |
| Şekil 4.12. STANAG 4569 Seviye-4 Koruması için Kullanılan Mermi Geometrisi | 49 |
| Şekil 4.13. Büyük, Küçük Panellerin ve Merminin Sayısal Ağ Yapıları | 49 |
| Şekil 4.14. Büyük ve Küçük Panellerin Sınır Koşulları | 50 |
| Şekil 4.15. Karbon Fiber ile Takviye Edilmiş Kompozit Bloklardaki Fiber Yönleri | 56 |
| Şekil 4.16. Küçük Panel-1’ in Üstten Görünüşü | 57 |
| Şekil 4.17. Küçük Panel-1’ in Analiz Süresi Sonunda Penetratör Kinetik Enerjisi-Penetrasyon Derinliği Grafiği | 58 |
| Şekil 4.18. Atış Sonrasında Küçük Panel-1’ i Oluşturan Öndeki Çelik Tabakadaki (a), Kompozit Bloktaki (b) ve Arkadaki Çelik Tabakadaki (c) Maksimum Efektif Gerilme Değerleri | 58 |
| Şekil 4.19. Küçük Panel-1’ i Oluşturan Tabakaların Atış Sonrasında Absorbe Ettiği Enerji Grafiği..... | 59 |
| Şekil 4.20. Küçük Panel-2’ nin Üstten Görünüşü | 60 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4.21. Küçük Panel-2' nin Analiz Süresi Sonunda Penetratör Kinetik Enerjisi-Penetrasyon Derinliği Grafiği | 60 |
| Şekil 4.22. Atış Sonrasında Küçük Panel-2' yi Oluşturan Öndeki Çelik Tabakadaki (a), Kompozit Bloktaki (b) ve Arkadaki Çelik Tabakadaki (c) Maksimum Efektif Gerilme Değerleri | 61 |
| Şekil 4.23. Küçük Panel-2' yi Oluşturan Tabakaların Atış Sonrasında Absorbe Ettiği Enerji Grafiği..... | 61 |
| Şekil 4.24. Küçük Panel-3' ün Üstten Görünüşü | 62 |
| Şekil 4.25. Küçük Panel-3' ün Analiz Süresi Sonunda Penetratör Kinetik Enerjisi-Penetrasyon Derinliği Grafiği | 62 |
| Şekil 4.26. Atış Sonrasında Küçük Panel-3' ü Oluşturan Öndeki Çelik Tabakadaki (a), Kompozit Bloktaki (b) ve Arkadaki Çelik Tabakadaki (c) Maksimum Efektif Gerilme Değerleri | 63 |
| Şekil 4.27. Küçük Panel-3' ü Oluşturan Tabakaların Atış Sonrasında Absorbe Ettiği Enerji Grafiği..... | 63 |
| Şekil 4.28. Büyük Panel-1' in 4 Atışlı Sayısal Analizi | 64 |
| Şekil 4.29. Büyük Panel-1' in 1. Atış Sonrası Üstten Görünüşü..... | 64 |
| Şekil 4.30. Büyük Panel-1' in 2. Atış Sonrası Üstten Görünüşü..... | 65 |
| Şekil 4.31. Büyük Panel-1' in 3. Atış Sonrası Üstten Görünüşü..... | 65 |
| Şekil 4.32. Büyük Panel-1' in 4. Atış Sonrası Üstten Görünüşü..... | 65 |
| Şekil 4.33. Büyük Panel-1' in 3. Atış Sonrası Arka Görüntüsü | 66 |
| Şekil 4.34. Büyük Panel-1' in 1. Atış Analiz Süresi Sonunda Penetratör Kinetik Enerjisi-Penetrasyon Derinliği Grafiği..... | 66 |
| Şekil 4.35. 1. Atış Sonrasında Büyük Panel-1' i Oluşturan Öndeki Çelik Tabakadaki (a), Kompozit Bloktaki (b) ve Arkadaki Çelik Tabakadaki (c) Maksimum Efektif Gerilme Değerleri | 67 |
| Şekil 4.36. Büyük Panel-1' i Oluşturan Tabakaların 1. Atış Sonrasında Absorbe Ettiği Enerji Grafiği..... | 68 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4.37. Büyük Panel-1' in 2. Atış Analiz Süresi Sonunda Penetratör Kinetik Enerjisi-Penetrasyon Derinliği Grafiği..... | 68 |
| Şekil 4.38. 2. Atış Sonrasında Büyük Panel-1' i Oluşturan Öndeki Çelik Tabakadaki (a), Kompozit Bloktaki (b) ve Arkadaki Çelik Tabakadaki (c) Maksimum Efektif Gerilme Değerleri | 69 |
| Şekil 4.39. Büyük Panel-1' i Oluşturan Tabakaların 2. Atış Sonrasında Absorbe Ettiği Enerji Grafiği..... | 70 |
| Şekil 4.40. Büyük Panel-1' in 3. Atış Analiz Süresi Sonunda Penetratör Kinetik Enerjisi-Penetrasyon Derinliği Grafiği..... | 70 |
| Şekil 4.41. 3. Atış Sonrasında Büyük Panel-1' i Oluşturan Öndeki Çelik Tabakadaki (a), Kompozit Bloktaki (b) ve Arkadaki Çelik Tabakadaki (c) Maksimum Efektif Gerilme Değerleri | 71 |
| Şekil 4.42. Büyük Panel-1' i Oluşturan Tabakaların 3. Atış Sonrasında Absorbe Ettiği Enerji Grafiği..... | 72 |
| Şekil 4.43. Büyük Panel-1' in 4. Atış Analiz Süresi Sonunda Penetratör Kinetik Enerjisi-Penetrasyon Derinliği Grafiği..... | 72 |
| Şekil 4.44. 4. Atış Sonrasında Büyük Panel-1' i Oluşturan Öndeki Çelik Tabakadaki (a), Kompozit Bloktaki (b) ve Arkadaki Çelik Tabakadaki (c) Maksimum Efektif Gerilme Değerleri | 73 |
| Şekil 4.45. Büyük Panel-1' i Oluşturan Tabakaların 4. Atış Sonrasında Absorbe Ettiği Enerji Grafiği..... | 74 |
| Şekil 4.46. Büyük Panel-2' nin Atış Sonrası Üstten Görünüşü..... | 74 |
| Şekil 4.47. Büyük Panel-2' nin Analiz Süresi Sonunda Penetratör Kinetik Enerjisi-Penetrasyon Derinliği Grafiği | 75 |
| Şekil 4.48. Atış Sonrasında Büyük Panel-2' yi Oluşturan Öndeki Çelik Tabakadaki (a), Kompozit Bloktaki (b) ve Arkadaki Çelik Tabakadaki (c) Maksimum Efektif Gerilme Değerleri | 75 |
| Şekil 4.49. Büyük Panel-2' yi Oluşturan Tabakaların Atış sonrasında Absorbe Ettiği Enerji Grafiği..... | 76 |
| Şekil 4.50. Büyük Panel-3' ün Atış Sonrası Üstten Görünüşü..... | 76 |
| Şekil 4.51. Büyük Panel-3' ün Analiz Süresi Sonunda Penetratör Kinetik Enerjisi-Penetrasyon Derinliği Grafiği | 77 |

| | |
|---|----|
| Şekil 4.52. Atış Sonrasında Büyük Panel-3' ü Oluşturan Öndeki Çelik Tabakadaki (a), Kompozit Bloktaki (b) ve Arkadaki Çelik Tabakadaki (c) Maksimum Efektif Gerilme Değerleri | 78 |
| Şekil 4.53. Büyük Panel-3' ü Oluşturan Tabakaların Atış sonrasında Absorbe Ettiği Enerji Grafiği..... | 78 |
| Şekil 4.54. STANAG 4569 Seviye-4 Korumasını Sağlamış Toplam Kalınlığı 120 mm Olan Kompozit Zırh | 81 |
| Şekil 4.55. Toplam Kalınlığı 120 mm olan Kompozit Zırhın Analiz Süresi Sonunda Penetratörün Kinetik Enerjisi-Penetrasyon Derinliği Grafiği..... | 81 |
| Şekil 5.1. Büyük Panel-1' de 1.Atış sonrası Oluşan Penetrasyon Bölgesi (a) Sayısal ve (b) Deneysel | 84 |
| Şekil 5.2. Büyük Panel-2' de Oluşan Penetrasyon Bölgesi (a) Sayısal ve (b) Deneysel..... | 84 |
| Şekil 5.3. Büyük Panel-3' te Oluşan Penetrasyon Bölgesi (a) Sayısal ve (b) Deneysel | 85 |
| Şekil 5.4. Penetratörlerin Panellerdeki Konumları (a) Büyük Panel-1, (b) Büyük Panel-2 ve (c) Büyük Panel-3..... | 86 |

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

| | |
|--|--|
| a | gama için birinci dereceden hacim düzeltme katsayısı |
| A | malzemenin akma gerilmesi |
| Al ₂ O ₃ | alümina |
| AP | armor piercing |
| AY | alan yoğunluğu |
| B | gerinim sertleşme sabiti |
| BP | büyük panel |
| Br ₄ C | bor karbür |
| c | gerinim hızı güçlendirme katsayısı |
| C | $v_s(v_p)$ eğrisinin kesişim noktası |
| CNC | computer numerical control |
| D ₁ , D ₂ , D ₃ , D ₄ , D ₅ | kırılma parametresi |
| E | iç enerji |
| E ₁ , E ₂ , E ₃ | elastisite modülü |
| E _ç | mil a46100 çeliğinin elastisite modülü |
| F _{1c} , F _{2c} , F _{3c} | basma mukavemeti |
| F _{1t} , F _{2t} , F _{3t} | çekme mukavemeti |
| F ₆ | düzlem içi kayma mukavemeti |
| FMJ | full metal jacket |
| G ₁₂ , G ₁₃ , G ₂₃ | kayma modülü |
| HHA | high hardness armor |
| HMWPE | high molecular weight polyethylene |
| KE | kinetik enerji |
| KP | küçük panel |
| KPE | kısmi penetrasyon |
| m | termal yumuşama katsayısı |
| n | gerinim sertleşme katsayısı |
| NATO | north atlantic treaty organization |
| p | basınç |
| PBO | poly-p-phenylene benzobisoxazole |
| PL | plugging |
| PPID | polypyridobisimidazole |
| RHA | rolled homogeneous armor |
| S ₁ , S ₂ , S ₃ | $v_s(v_p)$ eğrisinin birimsiz eğim katsayısı |
| S _c | malzemenin kayma mukavemeti |
| SiC | silisyum karbür |
| T _m | erime sıcaklığı |
| T _r | oda sıcaklığı |
| v | merminin hedefe çarptığı andaki hızı |
| v _p | parçacık hızı |
| v _s | şok hızı |
| Y _c | malzemenin fiberlere dik yönde basma dayanımı |

| | |
|--------------------------------|--|
| Y_t | malzemenin fiberlere dik yönde çekme dayanımı |
| X_c | malzemenin fiberlere paralel yönde basma dayanımı |
| X_t | malzemenin fiberlere paralel yönde çekme dayanımı |
| β | uygulanan yük fiberleri çekme modunda olduğu zaman kayma terimi için ağırlık faktörü |
| γ_0 | birimsiz grüneisen gama |
| $\Delta\varepsilon$ | plastik gerinimdeki artış |
| ε | efektif plastik gerinim |
| ε^f | kırılma anındaki gerinim |
| $\dot{\varepsilon}$ | gerinim hızı |
| $\dot{\varepsilon}_0$ | referans gerinim hızı |
| $\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$ | poisson oranı |
| ν_φ | mil a46100 çeliğinin poisson oranı |
| ρ | yoğunluk |
| ρ_0 | t_0 anında (başlangıçta) malzeme yoğunluğu |
| ρ_φ | mil a46100 çeliğinin yoğunluğu |
| σ_{aa} | malzemeye fiberlere paralel yönde uygulanan gerilme |
| σ_{ab} | malzemeye uygulanan kayma gerilmesi |
| σ_{bb} | malzemeye fiberlere dik yönde uygulanan gerilme |
| σ_{eff} | efektif gerilme |

1. GİRİŞ

Son yıllarda ihtiyaçların karşılanmasına bağlı olarak malzeme bilimi ve teknolojisine talep, kompozit malzemeye ilgi günden güne artmaktadır. “Kompozit malzeme” terimindeki “kompozit” kelimesi iki veya daha fazla kimyasal ve/veya fiziksel özellikleri farklı malzemenin yeni bir malzemeyi oluşturmak için makroskopik ölçekte birleştirilmesidir [1, 2]. Günümüzde “kompozit” kelimesi hem metalik olmayan elyaf takviyeli matris malzemesi hem de savunma araçlarının zırh koruması için çok tabakalı bileşim anlamında yaygın olarak kullanılmaktadır. Aslında, çok tabakalı kompozit zırh ve elyaf takviyeli kompozit farklı şeyler ifade etmektedir. Çok tabakalı kompozit zırhlar, metal plakalar, seramikler ve metalik olmayan kompozit malzemelerden oluşabilirken, metalik olmayan elyaf takviyeli kompozit malzemeler matrislerin elyaflar ile güçlendirilmesiyle üretilmektedirler. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler diğer geleneksel mühendislik malzemelerinden daha hafif ve daha iyi mekanik özelliklere sahip olmasının yanı sıra üretim kolaylığının ve gömülü işlevselliğinin olması nedeniyle daha çok tercih edilmektedirler. Örneğin uçak, helikopter gibi askeri hava taşıtlarının kanat ve kuyruk elemanlarında ve iniş-kalkış pistlerinde, tank zırhlarında, vücut koruyucu hafif zırhlarda, kurşungeçirmez yeleklerde, sıvı zırhlarda, insansız hava araçlarında kompozit malzemeler kullanılmaktadır [2]. Kompozit malzemelerin kullanımı gün geçtikçe önemli ölçüde artmakla birlikte dış etkenlere karşı nasıl davranış geliştirdikleri de merak edilmektedir. Özellikle, çevresel koşullara sahip düşük veya yüksek hızlı darbe yüklerine karşı tepkileri savunma sanayii sektöründe önemli bir hal almaktadır. Örneğin bir tanka isabet eden merminin doğurabileceği darbe hasarının kalıcı hasara dönüşmemesi için komponentlerin hem yüksek hızlı darbeye karşı mukavemetli hem de daha hafif olacak şekilde modellenmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır.

Bu nedenle, bu tez çalışmasında geleneksel kompozit zırhlardan farklı olarak yüksek hızlı çarpma durumlarında darbe yönüne ve yük durumuna göre daha mukavemetli çok tabakalı bir kompozit zırhın modellenmesi, yüksek hızlı çarpma testlerinin ve sayısal analizinin yapılması amaçlanmıştır.

1.1. Balistik

Balistik, merminin silah içindeki hareketini, hedefe ulaşmaya kadar sürecini ve hedef üzerindeki etkisini inceleyen bilim dalıdır [3, 4]. Balistik alanı iç balistik, dış balistik ve terminal balistik olarak üç ana kategoriye ayrılır [4, 5].

1.1.1. İç balistik

İç balistik, itici yakıtın yanmasından itibaren merminin namludan çıkmasına kadar olan süreçte tabanca içindeki silah, mermi ve sevk yükünün etkileşimi gibi çalışma süreçlerinin bilimsel çalışmasıdır [5, 6]. İç balistik iticinin ateşleme sürecini, iticinin haznede yanmasını, haznenin basınçlandırılmasını, merminin ilk hareket olayını, merminin delik içi dinamiklerini içerir [5].

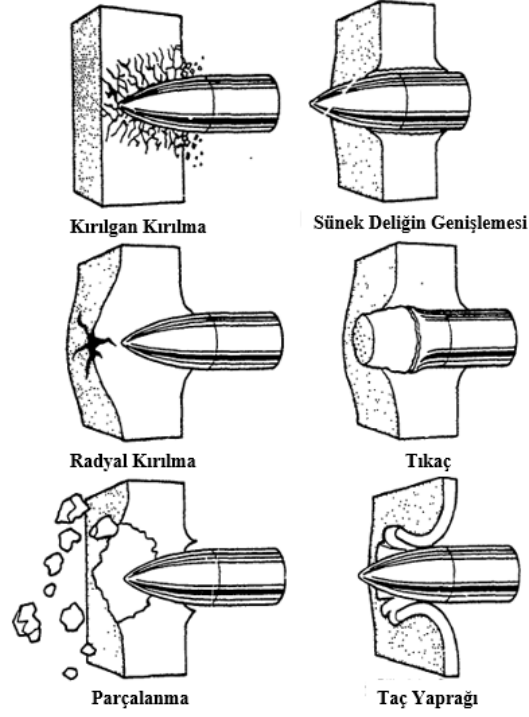
1.1.2. Dış balistik

Mermi silahı terk ettikten ve yanan gazların etkisi geçtikten sonra merminin hedefe ulaşmaya kadar uçuş kısmı dış balistiktir [5, 6]. Dış balistik genellikle mermi dinamikleri ve stabilitesi, tahmini uçuş yolu, uçuş süresi, çarpmanın açısı, hızı ve konumu ile ilgilenir [5].

1.1.3. Terminal balistik

Merminin hedef üzerindeki etkilerinin incelenmesi olarak tanımlanır [5, 6]. Terminal balistik penetrasyon mekaniği, zırh arkasındaki etkiler ve parça püskürtme olayları ile ilgilenir [5].

Merminin hedefe çarpma olayı, hedefin geometrik, konfigürasyon ve malzeme özelliklerine, merminin şekline, çarpma açısına ve ilk hızına göre birkaç şekilde karakterize edilebilir [6, 7] (Şekil 1.1.).



Şekil 1.1. Darbeye Maruz Kalmış Plakalarda Kırılma Biçimleri [7]

Bu tez çalışması terminal balistik ile ilgili olup merminin hızı, hedef konfigürasyonu ve malzemesi aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

1.2. Zırh Malzemeleri

Bir zırhın balistik performansını merminin kütlesi, hızı, malzemesi, şekli ve vuruş açısı ile zırhın malzemesi ve çevredeki sıcaklık, nem gibi faktörler etkilemektedir [8]. Bir zırhtan en çok beklenen özellikler ise sertlik, tokluk, hafiflik ile birlikte penetrasyon direnci ve enerji absorbe edebilme kabiliyetidir [9]. Bu özelliklerin sağlanabilmesi zırh kombinasyonu ve zırhı oluşturan malzeme özellikleri ile yakından ilgilidir. Zırhlarda en çok kullanılan malzemeler çelik, alüminyum, titanyum, seramikler ve kompozit malzemelerdir.

1.2.1. Çelik

İlk mühendislik zırh malzemesi olarak yüksek sertlikte çelik kullanılmıştır. Zırh çelikleri değişik karakterli mermilerin düşük ve yüksek hızlı darbesine mukavemet göstererek koruma

sağlaması amacıyla zırhlı araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Zırh çeliklerinin başlıca alaşım elementleri karbon, krom, nikel, molibden, manganez, kükürt, fosfor ve silisyumdur [10]. En bilinen zırh çelikleri ise haddelenmiş homojen zırh çeliği (RHA-Rolled Homogeneous Armor), yüksek sertlikte zırh çelikleri (HHA-High Hardness Armor), değişken sertlikte çelikler ve delikli zırh çelikleridir [4]. RHA en yaygın kullanılan zırh çeliğidir ve bir mühimmatın gücü delebildiği RHA zırh çeliği kalınlığı ile ölçüldüğü için farklı zırh sistemlerinin veya malzemelerin performansını tanımlamak ve karşılaştırmak için kullanılır [4, 11].

Kara araçlarının zırhlandırılmasında genel olarak dışa sert içe yumuşak çelik uygulanmaktadır. Böylece ilk yüzey direnci alırken ikinci yüzey enerjisi emmektedir [11]. Böylece mühimmatın enerjisi azaldığından hedefteki malzemeye daha az hasar vermektedir. Çeliğin bu özellikleri avantaj sağlarken çok ağır olması da dezavantajdır.

1.2.2. Alüminyum

Balistik koruma için genellikle 7020 ve AZ5G alüminyum çeşidi kullanılmaktadır. Çeliğe göre yoğunluğu daha az olduğu için hafiflik bakımından avantajlı görünse de yüksek hızlı darbe karşısında çelik kadar penetrasyon direnci yüksek değildir [11, 12]. Bu yüzden alüminyum ile üretilen araçlar ek zırhlar ile donatılmaktadırlar [11].

1.2.3. Titanyum

Zırhlı araçların tamamında kullanılması yerine kısmi kullanımı tercih edilmektedir. Çeliğe göre daha hafif, yüksek sertlik ve mukavemete sahip olmasına rağmen çok daha pahalıdır [11, 12].

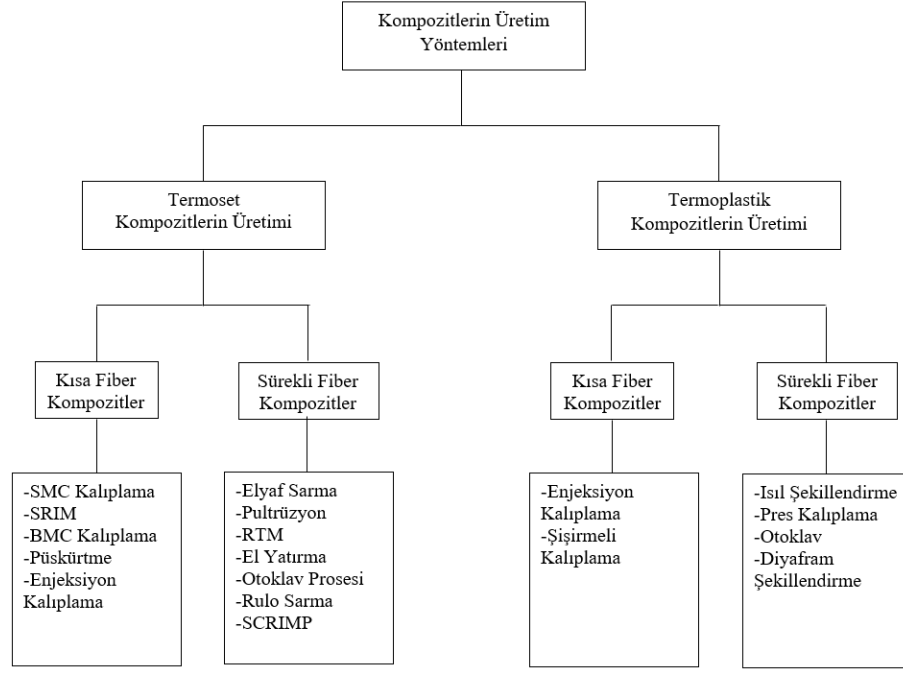
1.2.4. Seramikler

Seramikler zırhlarda en çok kullanılan malzemelerden biridir. Seramikler genellikle karışık bir kalkan sisteminin ilk tabakasını oluşturur, merminin ilk etkisini alır ve merminin kinetik enerjisinin çoğunu dağıtır. Balistik zırh için ana seramik malzemeler alümina (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC) ve bor karbürdür (B_4C) [13]. Seramiklerin basma mukavemeti

metallerden daha yüksektir fakat seramiklerin işlenmesi için yüksek basınç ve sıcaklık gerekmektedir. Dolayısıyla metallerden daha pahalıdır. Seramiklerin bir diğer dezavantajı ise kırılğan oldukları için çoklu darbe karşısında metallere göre dayanma kapasiteleri daha düşüktür [9].

1.2.5. Kompozit malzemeler

Kompozit malzemeler diğer mühendislik malzemelerinden daha hafif ve daha iyi mekanik özelliklere sahip olması yanında korozyona ve darbeye karşı dayanıklı olduğu için rüzgar türbin kanatlarında, spor ekipmanlarında, askeri ve sivil uçaklarda, tanklarda, inşaat, ulaşım ve sağlık sektöründe, denizcilik, otomotiv, uzay ve havacılık ile savunma sanayii uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadırlar [1]. Özellikle kara araç zırhlandırılmasında balistik performans açısından kompozit malzemelerin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Genel kabul edilen 4 tip kompozit malzeme vardır; matris içinde elyaflardan oluşan elyaf takviyeli kompozit malzemeler, çeşitli malzemelerden oluşan tabakalı kompozit malzemeler, matris içinde parçacıklardan oluşan parçacıklı kompozit malzemeler ve bu türlerin kombinasyonlarından oluşan kompozit malzemelerdir [1]. Zırhlarda bu 4 tip kompozit malzemenin kullanılmasıyla birlikte en çok kullanılan elyaf malzemeleri ise yüksek molekül ağırlıklı polietilen (HMWPE), PBO (poly-p-phenylene benzobisoxazole), PPID (Polypyridobisimidazole), S-cam, E-cam, aramid, karbon ve boron' dur [4, 14, 15]. Bu elyaflar ile üretilen kompozit zırhlar metal ve seramik zırhlardan daha hafif oldukları için hareket kabiliyeti sağlamaktadırlar [15]. Kompozit malzemeler iki ya da daha fazla farklı malzemeleri içerdikleri için kompozit malzemelerin üretim teknikleri metallerde kullanılan üretim tekniklerinden oldukça farklıdır. Çeşitli tiplerde kompozit malzeme elde etmek için çok fazla üretim tekniği mevcuttur [16] (Şekil 1.2.).



Şekil 1.2. Kompozit Üretim Tekniklerinin Sınıflandırılması [16]

Kompozit malzemenin üretimi için seçilecek yöntem matris malzemesine ve takviye elemanına bağlıdır (Şekil 1.2.). Bu tezin deneysel çalışma kısmında karbon elyaf takviyeli kompozit blokların üretimi için termoset reçine ve sürekli fiberden oluşan karbon fiber takviyeli/epoksi prepreg malzeme kullanılmıştır.

1.3. Literatür Araştırması

Zırh korumasında korumanın anlamı kinetik enerjili (KE) merminin nüfuz etmesini önlemek olduğu için çarpma yönüne karşı yüksek darbe direncine sahip bir veya birden fazla tabakadan oluşan bir zırh tasarlama gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bir zırhta penetrasyon veya perforasyon olması, penetratörün çarpma hızı, çarpma açısı, kütlesi ile hedef yapının malzemesi, konfigürasyonu ve elastik-plastik özellikleri gibi birçok faktöre bağlıdır. Zırhın kalınlığı, zırhı oluşturan malzemelerin özellikleri ve diziliş sırası bu alandaki temel araştırma konularıdır. Savunma endüstrisindeki en son zırh teknolojisi, kinetik enerjili tehditlere karşı kompozit zırh üretmek için silisyum karbür (SiC) veya bor karbür (B₄C) gibi seramikler kullanılmaktadır. Seramikler çoğunlukla geleneksel zırh çeliği veya alüminyum plakalarla sandviç edilirler. Diğer

yandan, havacılık endüstrisinde genellikle karbon veya cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler tercih edilirken, zırh korumalı ürün ve araçlarda genellikle ana yapı olarak metal/seramik/kevlar kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Çok açılı yönlendirilmiş karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin çeşitli koşullarda yüksek ve düşük hızlı darbelere karşı tepkileri üzerine çok sayıda araştırma olmasına rağmen, darbe yönüne paralel olarak konumlandırılmış karbon elyaf takviyeli kompozitler üzerine çok sınırlı çalışma vardır.

Yüksek hızlı darbe yüklemesi altında karbon fiber takviyeli plastiklerdeki hasarı etkileyen faktörleri incelemek için bazı araştırmalar yapılmıştır. Numata et al., [17] karbon elyaf takviyeli plastik laminat numunelerinin kırılma modellerinin düşük hız etkisinde sıcaklıklarına bağlı olarak değişebileceğini, yüksek hızlı darbeye ise sıcaklıklara karşı duyarsız olduklarını göstermişlerdir. Fujii et al., [18] kırılma modlarının fiberlerin mekanik özelliklerinden önemli ölçüde etkilendiğini ortaya koymuşlardır. Xie et al., [19] balistik sınırın altında normal çarpmaların eğik darbelere göre daha fazla hasar verdiğini, balistik sınırın üzerinde ise tersi bir eğilim olduğunu göstermişlerdir. Cantwell and Morton [20] hedefin genişliği ve uzunluğu gibi geometrik parametrelerin, yüksek hızlı darbe yüklemesi koşulları altında çarpma tepkisi üzerinde çok az etkiye sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Shimamoto et al., [21] kriyojenik sıcaklıklarda karbon elyaf takviyeli plastik kırılma davranışını incelemek için yüksek hızlı darbe deneyleri gerçekleştirmişlerdir ve yüksek hızlı darbelere laminasyon yönüne güçlü bir bağımlılığın gözlemlendiğini ortaya koymuşlardır. Karbon fiber takviyeli plastik katmanlı bileşimin önemli bir rol oynadığını ve hasarlı bölgelerin karbon fiber takviyeli plastiklerin lamine yapısı ile kontrol edilebilir olduğunu göstermişlerdir. Hazell et al., [22] daha kalın dokuma (woven) karbon fiber takviyeli plastik panellerin, taç yaprağı gibi açılmanın (petaling) penetrasyonda baskın bir faktör olduğu daha düşük çarpma enerjilerinde etkin doğrusal kalınlık başına daha fazla kinetik enerji absorbe ederek daha verimli davrandığını göstermişlerdir. Tanabe et al., [23] karbon fiber takviyeli plastiklerin arka katmanının 150 ila 314 m/s aralığındaki hızlarda daha yüksek enerji emilimi için yüksek mukavemetli elyaftan oluşması gerektiğine dikkat çekmişlerdir. Pernas-Sánchez et al., [24] karbon/epoksi bant laminatlarının hasar mekanizmasını hem tahribatlı hem de tahribatsız teknikler kullanarak analiz etmiş ve hasar mekanizmalarının emilen enerji açısından katkısını anlamak için analitik bir model önermişlerdir. Francesconi et al., [25] darbe hasarının evrimini ve numune delinmesi ve ardından parçaların fırlatılması durumunda karbon fiber takviyeli plastik tamponların koruma

kapasitesini nitel olarak tanımlamak için enkaz bulutunun yüksek hızlı gölge grafiklerini analiz etmişlerdir.

Malzemelerin yüksek hızda balistik performansı ile ilgili bazı çalışmalar da mevcuttur. Örneğin, Yashiro et al., [26] 300-1200 m/s' lik çok çeşitli hızlarda belirli dizilimdeki karbon fiber takviyeli plastik laminat numunelerinin arka yüzeylerinde ciddi hasar olmasına rağmen, merminin hiçbir numuneye nüfuz etmediğini gözlemlemişlerdir. Tang et al., [27] karbon fiber takviyeli plastik/alüminyum köpük sandviç yapısının 100 m/s hızında delinmediğini ve merminin kinetik enerjisinin sandviç yapı tarafından tamamen emildiğini, aynı sandviç yapının 172-300 m/s' lik hızlarda ise tamamen delindiğini göstermişlerdir. Medvedovski [28] seramik, seramik-polimer tabaka ve aramidden oluşan hafif seramik kompozit zırh sisteminin önde bulunan seramik plakanın kalınlığına bağlı olarak 7,62x51 mm NATO mermisi FMJ, 7,62x54R LPS ve 7,62x63 mm AP M2 mermilerine karşı yüksek düzeyde balistik performans sergilediğini göstermiştir. Diederer et al., [29] 14,5 mm çelik çekirdekli B32 kullanarak SiC ve Al₂O₃ seramik/alüminyum/titanyum metalden oluşan bir konfigürasyonun balistik testini incelemişlerdir. Çalışmaları, zırh konfigürasyonunun alan yoğunluğunun, benzer bir tehdidi (Seviye-4) durdurmak için gerekli olan RHA' nın alan yoğunluğundan neredeyse %50 daha az olduğunu göstermiştir. Roeder and Sun [30] alümina/alüminyum katmanlı yapıların dinamik penetrasyonunu araştırmış ve kalın katmanlı laminatların ince katmanlı laminatlara göre daha az penetrasyona izin verdiği sonucuna varmışlardır. Yadav and Ravichandran [31] üç adet 12,7 mm seramik tabakadan oluşan seramik/polimer yapının penetrasyon direncinin, karşılaştırılabilir darbe hızlarında (1000-1200 m/s) monolitik seramiğe göre daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. Gower et al., [32] keskin uçlu mermilere karşı kevlar 129 panellerinin kevlar 29 panellerden daha az direnç gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Ramadhan et al., [33] kevlar-29/epoksi ve 6061-T6 alüminyumdan oluşan sandviç yapıların yüksek hızlı darbe yükleme koşullarında mükemmel enerji soğurma özellikleri sergilediğini göstermişlerdir. Gama et al., [34] farklı kalınlıktaki alümina seramik (Al₂O₃), kauçuk, alüminyum köpük ve S-2 cam/vinil ester kompozitlerinden oluşan hafif kompozit yekpare zırhın tasarımı ve balistik performansı üzerine çalışmışlardır. Tasarımları, kauçuk tabaka kalınlığının balistik performanstaki etkisini test etmek için bir dizi kompozit yekpare zırh hedefinin gerilim dalgası modellemesine dayanmaktadır ve alüminyum köpük kullanan yenilikçi tasarım konseptleri geliştirmişlerdir. Arkadaki kompozit tabaka ile seramik arasında alüminyum köpük veya kauçuk

tabaka kullanıldığında zırhın arkadaki kompozit tabakasında darbenin yarattığı gerilme dalgalarında zaman gecikmesinin oluştuğunu ve böylece arkadaki kompozit tabakadaki hasarın azaltıldığını göstermişlerdir.

Bu çalışmanın amacı, zırh çeliği plakaları ve tek yönlü yönlendirilmiş karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit bloklardan oluşan hibrit bir yapının darbe yönüne paralel olarak konumlandırılmış tek yönlü karbon fiber oryantasyonunun yüksek hızlı darbe direncine etkisini araştırmaktır. Karbon fiberlerin normalde enine yükleme yönüne karşı çok kırılğan olmasına rağmen aksenal yöndeki çekme ve basma dayanımlarının oldukça yüksek olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, tabaka sayısı, karbon fiberlerin oryantasyonu ve yönü kara araç zırhlanmasında yaygın olarak kullanılan diğer kompozit zırhlardan farklı olacak şekilde seçilmiştir. Darbe yönünde oryente edilmiş karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit bloklar zırh çeliği plakalarla sıkıştırılarak çok tabakalı hibrit kompozit zırh oluşturulmuş ve bu yapının yüksek hızlı darbeye karşı tepkisinin araştırılması hedeflenmiştir.

Bu nedenle, mevcut çalışmanın ana odağı, karbon fiberlerin çarpma yönüne paralel konumlandırıldığı çok tabakalı karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit-zırh çelikli hibrit yapının yüksek hızlı çarpma sonucu delinip delinmediğini incelemektir. Bu bağlamda, 911 m/s hızda barut enerjisi ile çalışan silah (powder gun) sistemi kullanılarak uluslararası kabul görmüş STANAG 4569 Seviye-4' e göre yüksek hızlı darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Yüksek hızlı test sonuçları ile sayısal analiz sonuçları mukayese edilerek sayısal model doğrulanmıştır.

1.4. Tezin Amaç ve Kapsamı

Bu tez çalışması ile;

- i) Yüksek hızlı çarpmalarda perfore olmayacak,
- ii) Alan yoğunluğu daha düşük

bir zırh paketinin modellenmesi, yüksek hızlı çarpma deneylerinin yapılması ve sayısal olarak doğrulanması amaçlanmıştır. Böylece;

1) Yüksek hızlı çarpma testleri ve sayısal analizi yapılan kompozit zırhın deneysel sonuçları ile doğrulanan sayısal modeli kullanılarak çok tabakalı kompozit zırhı oluşturan tabakaların kalınlıkları değiştirilerek aynı malzemedeki fakat farklı kalınlıkta tabakalar ile daha az sayıda test yapılacak, tasarlanacak konfigürasyonların simülasyonları yapılabilecek ve dolayısı

ile farklı koruma seviyeleri elde edebilmek için kullanılabilir.

2) Aynı zamanda bu alandaki (yüksek hızlı çarpma, çok tabakalı kompozit zırh) literatüre önemli bir katkıda bulunacaktır.

3) Tanklarda “tak-çıkart (add-on armor)” modülünde kullanılan iki çelik arasına sandviç edilmiş seramik malzemedan oluşan bir zırhta seramik malzeme yerine darbe yönüne göre paralel konumlandırılmış karbon elyaf takviyeli kompozit bloklar kullanılarak gelecek tehdidin enerjisi sönmölenecek ve zırhın arkasında bulunan teçhizatın ya da insanın zarar görmesi engellenirken, düşük alan yoğunluğu ile de zırhlı aracın hareket kabiliyeti arttırılabilecektir.

Toplam altı bölümden oluşan tez çalışmasının ikinci bölümünde yüksek hızlı çarpma testlerinde kullanılan karbon elyaf takviyeli kompozit blokların üretimi ile çok tabakalı kompozit yapı test numunelerinin hazırlanma aşamalarına, üçüncü bölümünde çok tabakalı küçük ve büyük kompozit zırhların yüksek hızlı çarpma deneylerine ve sonuçlarına, dördüncü bölümünde çok tabakalı küçük ve büyük kompozit zırhların üç boyutlu modellenmesine, sayısal analizlerine ve sayısal analiz sonuçlarına, beşinci bölümünde sayısal ve deneysel çalışma sonuçlarının değerlendirilmesine, altıncı bölümünde ise sonuç ve öneriler kısımlarına yer verilmiştir.

2. YÜKSEK HIZLI ÇARPMA TESTLERİNDE KULLANILAN ÇOK TABAKALI KOMPOZİT YAPI TEST NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI

2.1. Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Blokların Üretimi

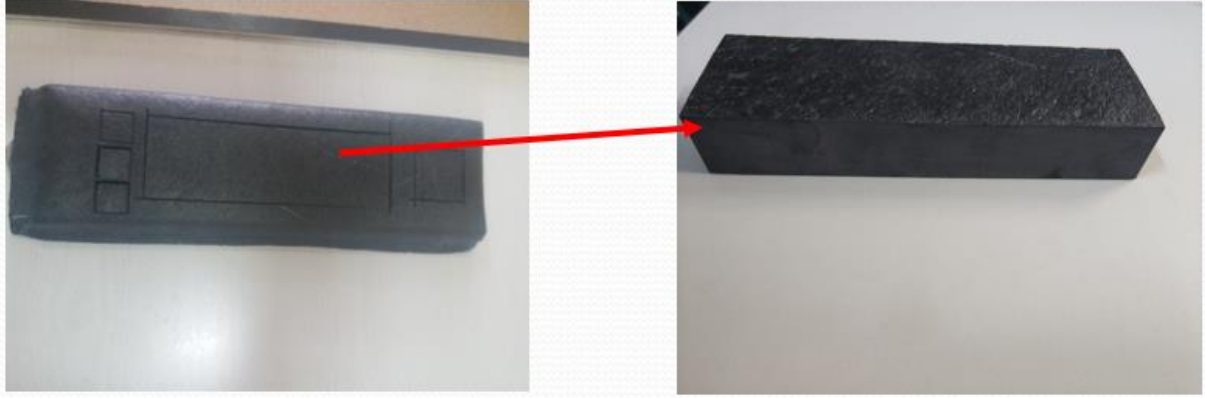
Bu tez çalışmasında deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar ile sayısal analizlerin doğrulanması hedeflendiği için öncelikle deneysel çalışmada kullanılan kompozit zırhın orta kısmında yer alan fiber ekseninde oryente edilmiş karbon fiber ile takviye edilmiş kompozit blokların kalınlığını belirlemek ve böylece nihai kompozit zırhtaki bütün tabakaların gerçek boyutları ile sayısal analizini yapabilmek için bir ön çalışma olarak 12 cm x 45 cm boyutlarında bir karbon fiber takviyeli/epoksi kompozit blok (Şekil 2.1.) üretilmiştir.



Şekil 2.1. 12 cm x 45 cm Boyutlarındaki Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Blok

Karbon elyaf takviyeli/epoksi kompozit bloğun üretiminde termoset reçine ve sürekli fiberden oluşan prepreg malzemenin kullanılacak olması, blokların geometrik şekli ve üretimin az maliyetli oluşundan dolayı el yatırma yöntemi tercih edilmiştir. Şekil 2.1' deki kompozit blok 100 adet aynı yönde oryente edilmiş karbon fiber/epoksi prepreg tabakanın (layer) üst üste

konulması (el yatırma yöntemi) ile oluşturulmuş ve daha sonra otoklav ile kürleştirme işlemine tabi tutularak üretilmiştir. Kürleştirme işleminden sonra 100 tabakanın ne kadar kalınlığa sahip olduğunu görmek için kompozit bloğun homojen kalınlığa sahip kısmı su jeti ile kesilmiş ve kalınlık 3,7 cm olarak ölçülmüştür (Şekil 2.2.).



Şekil 2.2. 12 cm x 45 cm Boyutlarındaki Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Bloğun Homojen Kalınlığa Sahip Kısmı

Tez kapsamında yüksek hızlı çarpma testlerinde kullanılan büyük (41 cm x 41 cm) ve küçük (12 cm x 12 cm) panellerin boyutları ve üretilen örnek kompozit bloğun kalınlığı dikkate alınarak panellerin orta kısmında yer alan karbon fiber takviyeli kompozit blokların kalınlıkları 3,5 cm (1 blok = 3,5 cm = 95 tabaka) olacak şekilde bir büyük panelde 11 adet, bir küçük panelde ise 3 adet karbon fiber takviyeli kompozit blok olması gerektiği uygun görülmüştür. Dolayısıyla yüksek hızlı çarpma testleri için büyük panellerde toplam 33 adet 39,5 cm x 10 cm boyutlarında, küçük panellerde ise toplam 9 adet 11 cm x 10 cm boyutlarında aynı yönde oryente edilmiş karbon fiber takviyeli-epoksi kompozit blok kullanılması gerektiğine karar verilip, kompozit blokların üretimi gerçekleştirilmiştir.

Kompozit blokların tek tek üretilmesi yerine büyük boyutlarda kompozit parçalar üretilip bu parçalardan su jeti kesimi ile kompozit blokların çıkarılması uygun görülmüştür. Bu yüzden karbon fiber takviyeli kompozit parçaların her biri 95 tabaka olacak şekilde; 40 cm x 150 cm boyutlarında 1 parça, 41 cm x 150 cm boyutlarında 1 parça, 41 cm x 140 cm boyutlarında 1 parça, 15 cm x 70 cm boyutlarında 2 parça olarak tasarlanmıştır.

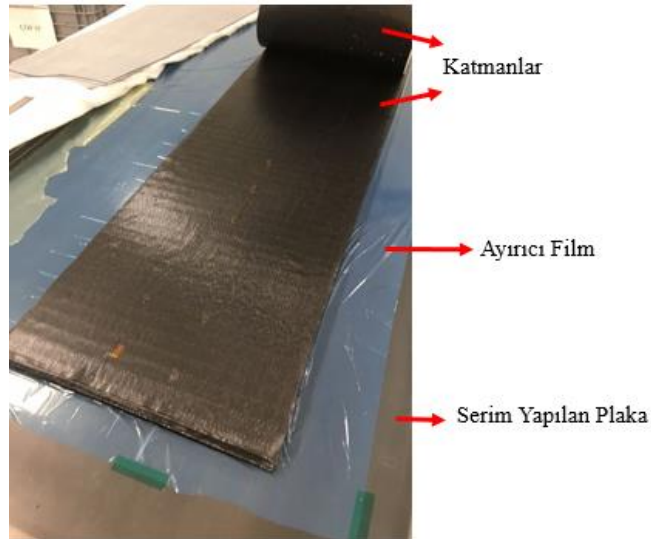
Kompozit parçaların üretiminde kullanılan karbon fiber ile takviye edilmiş prepreg malzemeler CES İleri Kompozit ve Savunma Teknolojileri A.Ş.' de bulunan CNC katman kesici

(CNC ply cutter) (Şekil 2.3.) ile istenilen parça boyutlarına göre kesilmiş ve kompozit parçaları oluşturmak üzere bu malzemelerin serim işlemi gerçekleştirilmiştir.



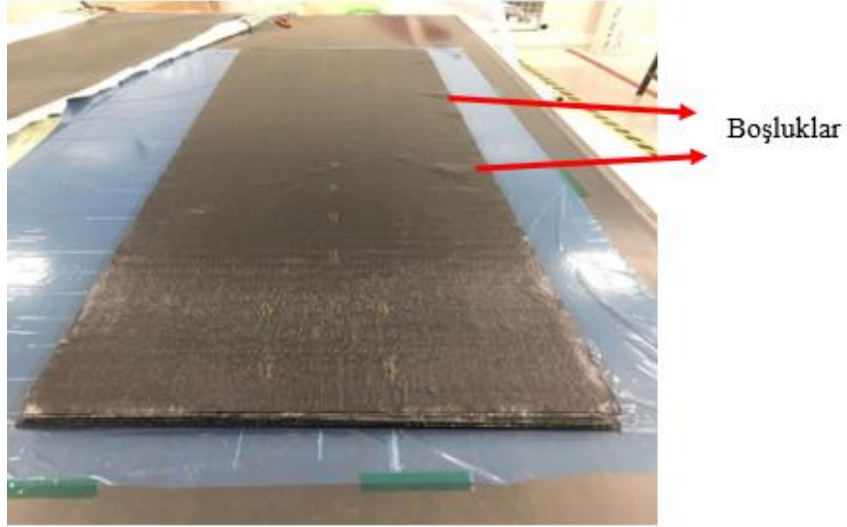
Şekil 2.3. Karbon Fiber Epoksi Prepreg Malzemelerin CNC Katman Kesici ile Kesimi

Malzemelerin serimi yapılmadan önce serim yapılacak plakalara kompozit parçanın otoklav sonrasında yapışmaması için kalıp ayırıcı sprej sıkılmış, sprej sıkılmayan plakalarda ise plakalar üzerine ayırıcı film (release film) konulmuştur. Prepreg malzemelerin serimi bu film ve sprej sıkılmış plakalar üzerine (Şekil 2.4.) el yatırma yöntemi ile yapılmıştır.



Şekil 2.4. Karbon Fiber Epoksi Prepreg Malzemelerin Serimi

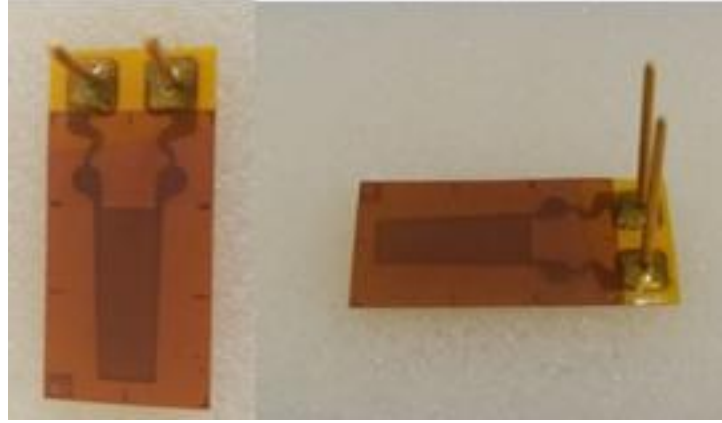
Tabakalar arasında delaminasyona sebebiyet veren boşlukların (kabarcıkların) (Şekil 2.5.) olmaması için her tabaka seriminden sonra ıspatula yardımı ile malzeme sıvazlanmış ve her 15 tabakada bir ara vakumlama yapılmıştır. Malzemelerin serim işlemi CES İleri Kompozit ve Savunma Teknolojileri A.Ş.' de bulunan sıcaklık ve nem kontrolü olan temiz odada gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.5. Karbon Fiber Epoksi Prepreg Malzemelerin Serimi Esnasında Oluşan Boşluklar

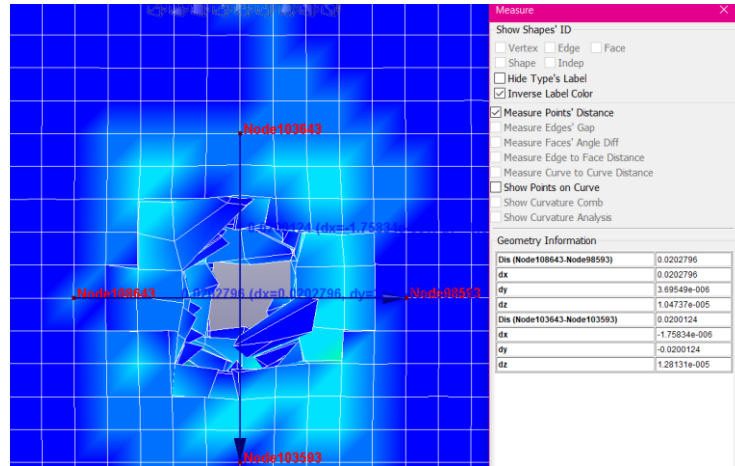
Tez kapsamında kompozit bloklar içinde kullanılan sensörlerin yerleri ve sayılarına ise şu şekilde karar verilmiştir; öncelikle kürleştirme işlemi sonrası sensörlerin kompozit parçanın içinde tamamen gömülü kalmayıp sensör terminal uçlarından sinyal alınabilmesi gerekmektedir. Bu yüzden, her bir tabakanın kalınlığı 0,37 mm ve sensör terminal uçlarının uzunluğu 15 mm olması sebebi ile sensörlerin kompozit parçanın 62. tabakasına konulmasına karar verilmiştir.

Şekil 2.6.' da görülen sensörler fiber ile takviye edilmiş kompozit malzemenin üretiminde de kullanılabilen özel gerinim ölçerlerdir (strain gauges). Bu sensörler kompozit zırhların içine gömülü şekilde kullanılabilir ve 180°C çalışma sıcaklığına sahiptir. Üretilen karbon fiber ile takviye edilmiş kompozit parçanın kürleşme sıcaklığı 120°C olduğundan bu özel sensörlerin kullanılmasına karar verilmiştir.



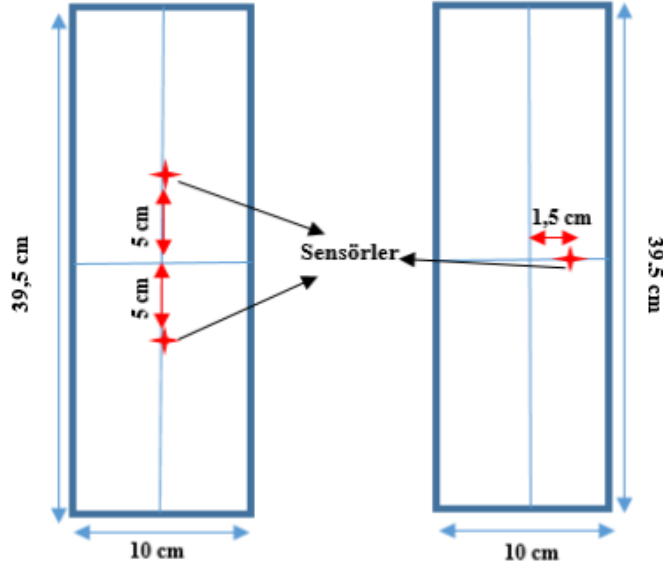
Şekil 2.6. Karbon Fiber Epoksi Prepreg Malzemelerin Serimi Esnasında Kullanılan Sensörler

Sensörlerin konumlarına ve sayılarına ise kompozit zırhın orta bölümünde bulunan karbon fiber ile takviye edilmiş kompozit blokların yapılan sayısal analiz sonuçlarından elde edilen gerilme dağılımı dikkate alınarak karar verilmiştir. Şekil 2.7.' de görüldüğü üzere karbon fiber ile takviye edilmiş kompozit blokta meydana gelen hasar bölgesinin çapı 2 cm' dir.

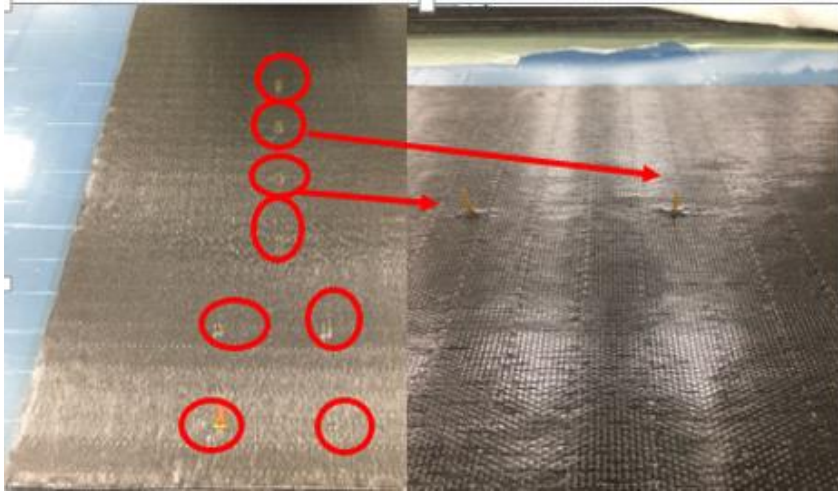


Şekil 2.7. Karbon ile Takviye Edilmiş Kompozit Tabakanın Hasar Bölgesi

Bu veriler ışığında, bir kompozit bloktaki sensörlerin yerleri ve sayıları belirlenmiş (Şekil 2.8.) ve sensörler kompozit parçanın 62. tabakasına uzun eksenleri fiberlere paralel olacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 2.9.). Böylece 2 adet 2 sensörlü, 4 adet tek sensörlü karbon fiber takviyeli kompozit blok elde edilmiştir.



Şekil 2.8. Karbon Fiber ile Takviye Edilmiş Kompozit Bloklardaki Sensörlerin Yerleri



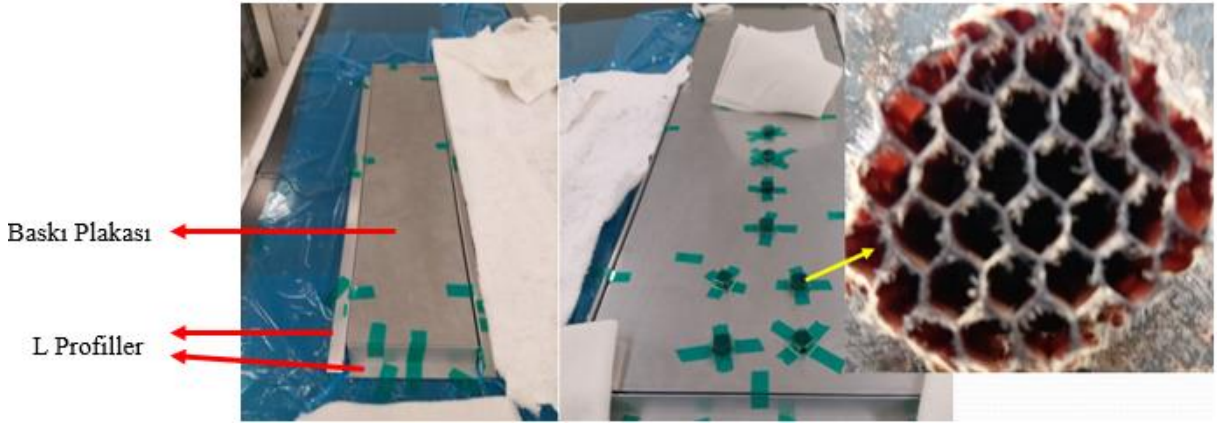
Şekil 2.9. Karbon Fiber ile Takviye edilmiş Kompozit Parçanın 62. Tabakasında Sensörlerin Yerleşimi

95 kat prepreg malzemenin serim işlemi tamamlandıktan sonra her bir parçanın üzerine tekrar ayırıcı film serilmiştir (Şekil 2.10.).



Şekil 2.10. Serimi Tamamlanmış Karbon Fiber ile Takviye Edilmiş Kompozit Parça

Ayrıcı film (release film) üzerine otoklav sonrası parça kalınlığının parçanın her yerinde aynı olması için alüminyum baskı plakaları ve parçanın istenilen boyutlarda otoklavdan çıkması için parça kenarlarına alüminyum L profiller konulmuştur (Şekil 2.11.). Ayrıca sensörlerin otoklav sonrası reçine içinde kaybolmasını engellemek için sensörlerin üzerine bal peteği malzemesi konulmuştur (Şekil 2.11.).



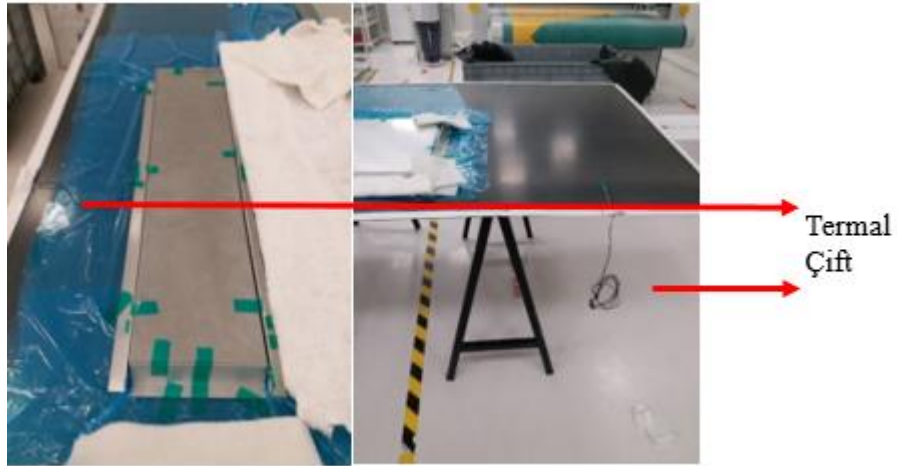
Şekil 2.11. Parça Üzerindeki Alüminyum Baskı Plakaları ve Parça Kenarlarındaki Alüminyum L Profiller

Baskı plakalarının ve profillerin keskin köşelerinin vakumlama işlemi esnasında vakum torbasını yırtabileceği düşünülerek köşelere ekstra vakum battaniyesi konulmuştur (Şekil 2.12.).



Şekil 2.12. Baskı Plakaları ve Profiller Üzerindeki Vakum Battaniyesi

Malzemelerin kalın olması nedeniyle otoklavda hem ekzotermik olay yaşanmaması hem de malzemelerin kürleşme sıcaklığının kontrol altında tutulabilmesi için her bir parçanın orta kısmına termal çift bağlanmıştır (Şekil 2.13.).



Şekil 2.13. Karbon Fiber ile Takviye Edilmiş Kompozit Parçaya ve Plakaya Konulmuş Termal Çiftler

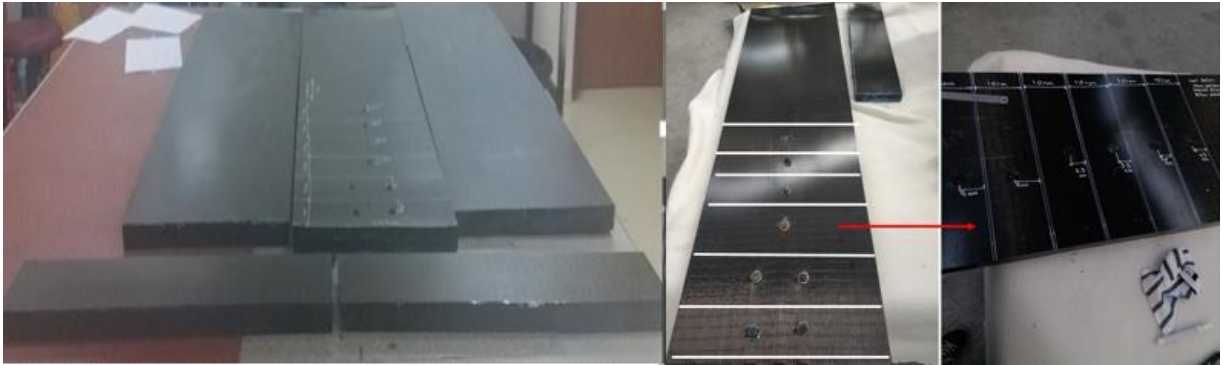
Bu işlemden sonra kompozit parçaların konulduğu plakaların etrafına sızdırmazlık bandı yapıştırılmış ve bütün parçaların üzerine tekrar vakum battaniyesi ile vakum torbası serilerek

vakumlama işlemi (Şekil 2.14.) gerçekleştirilmiş ve parçalar otoklava girmeye hazır hale getirilmiştir.



Şekil 2.14. Karbon Fiber ile Takviye Edilmiş Parçaların Vakumlama İşlemi

Otoklav' dan çıkan kompozit parçalar (Şekil 2.15.) istenilen boyutlarda kompozit bloklar elde etmek amacıyla su jeti ile kesilmiştir (Şekil 2.16.).



Şekil 2.15. Otoklav Sonrası Elde Edilen Karbon Fiber ile Takviye Edilmiş Kompozit Parçalar

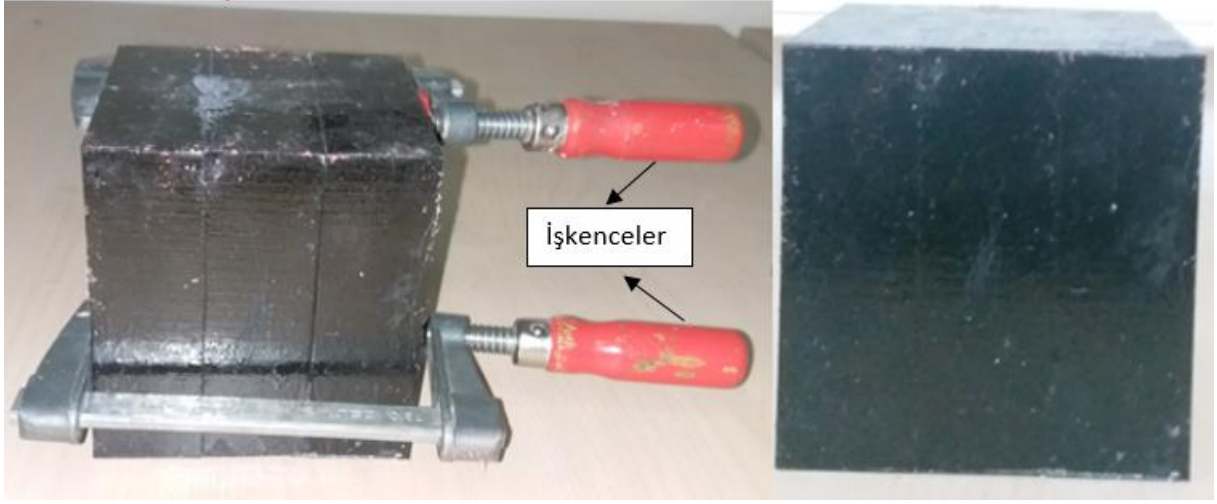


Şekil 2.16. Kompozit Parçaların Su Jeti ile Kesilmesi

Bu aşamadan sonra karbon fiber ile takviye edilmiş kompozit blokların yüksek hızlı çarpma testleri esnasında birbirinden ayrılmaması için sensörsüz kompozit bloklar arasına epoksi + sertleştirici karışımı sürülerek büyük bloklar 4' erli şekilde lamalarla (Şekil 2.17.), küçük bloklar ise 3' erli gruplar halinde (Şekil 2.18.) işkenceler ile sıkıştırılarak 120°C' de fırında 2 saat bekletilmiş ve böylece bloklar arasındaki epoksi + sertleştirici karışım kürleştirilerek kompozit bloklar birleştirilmiştir.

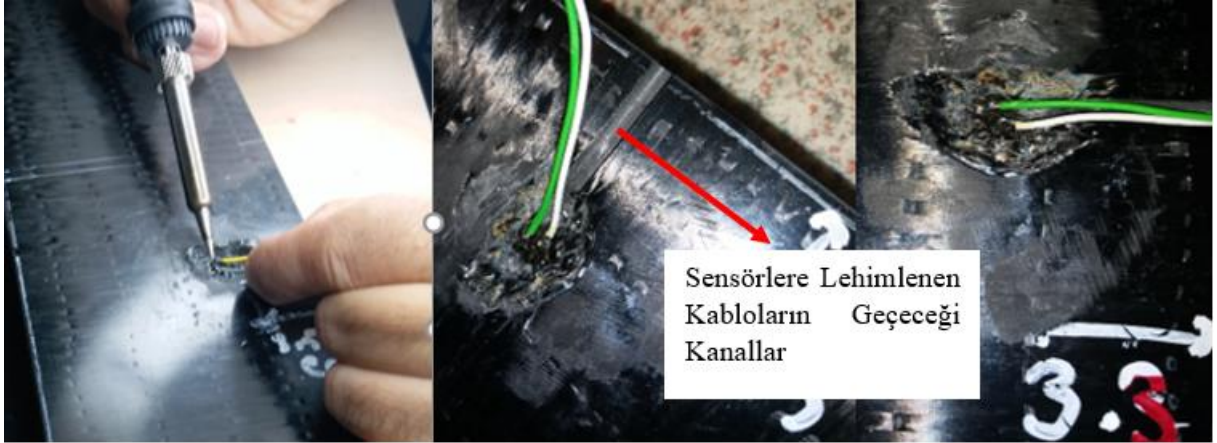


Şekil 2.17. Büyük Panellerde Kullanılan Karbon Fiber ile Takviye Edilmiş Kompozit Blokların Birleştirilmiş Hali



Şekil 2.18. Küçük Panellerde Kullanılan Karbon Fiber ile Takviye Edilmiş Kompozit Blokların Birleştirilmiş Hali

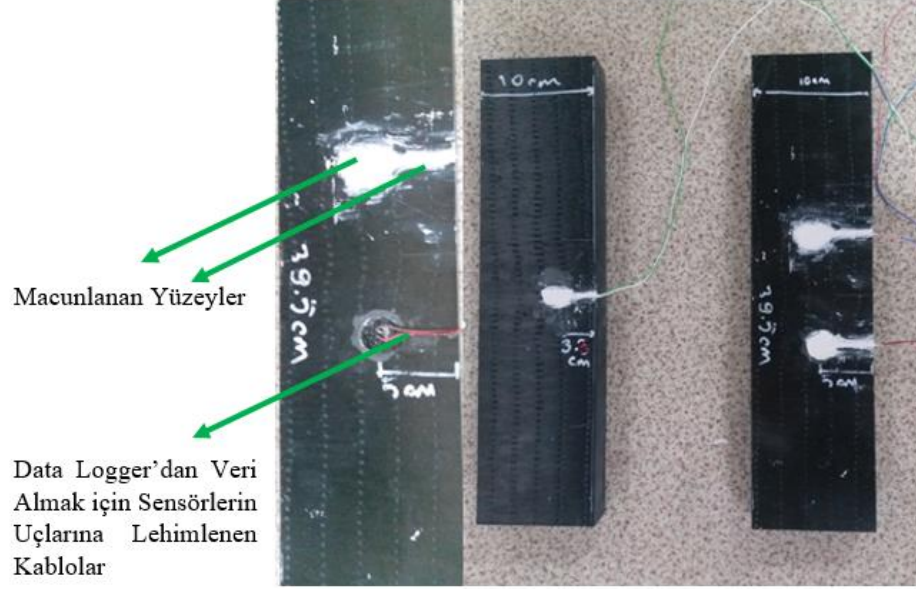
Sensörlü karbon fiber ile takviye edilmiş kompozit bloklarda ise öncelikle bir ucu sensöre diğer ucu “Data Logger” a bağlanacak kabloların blokları birleştirirken bloklar arasında boşluk yaratmaması için bloklara 3 mm genişliğinde kanallar açılmış ve kablolar bu kanallardan geçirilerek sensörlere lehimlenmiştir (Şekil 2.19.).



Şekil 2.19. Sensörlü Karbon ile Takviye Edilmiş Kompozit Bloklardaki Kanallar ve Sensörlerin Lehimlenmesi

Yüksek hızlı çarpma testi esnasında kabloların sensörlere lehimlenen yerinden çıkıp sinyal vermeme durumunu engellemek için ise lehimlenen yüzeye ve kanallarda kalan boşluklara

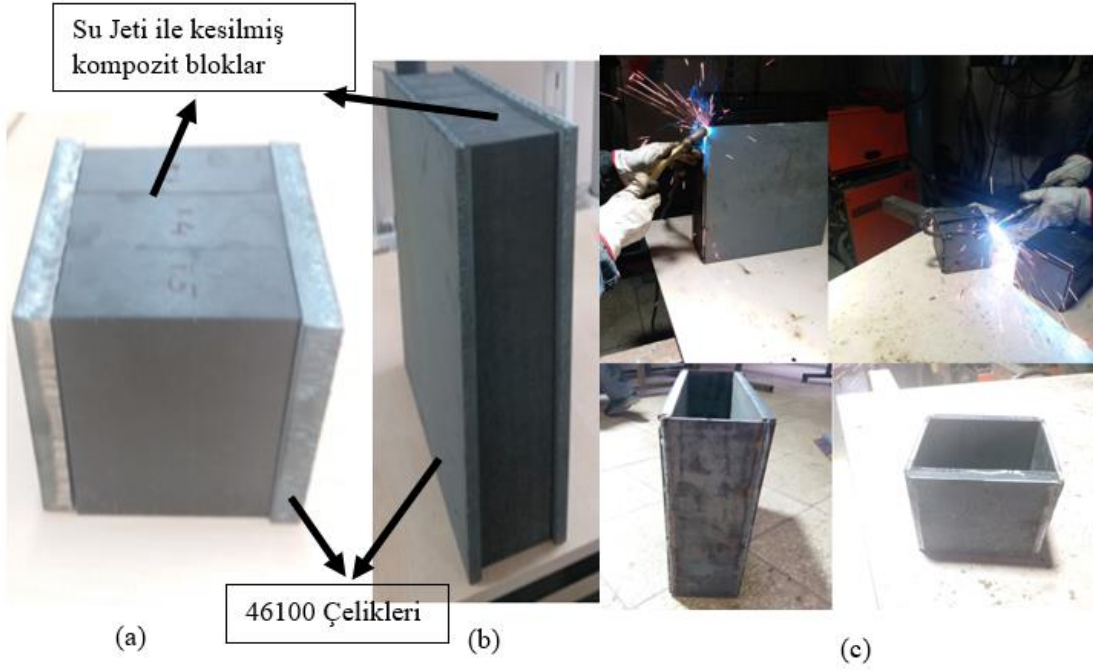
macun çekilmiştir (Şekil 2.20.). Kanallardan geçen kablolar yerinden çıkmaması için yapıştırıcı ile sabitlenmiştir.



Şekil 2.20. Sensörlü Karbon Fiber ile Takviye Edilmiş Kompozit Bloklardaki Lehimlenen Yüzeyin ve Kablo Kanalının Macunlanması

2.2. Çok Tabakalı Kompozit Zırhı Oluşturan Malzemelerin Birleştirilmesi

Birbirine yapıştırılan karbon fiber ile takviye edilmiş kompozit blokların ön ve arka kısımlarına 16 mm kalınlığında 46100 zırh çeliği yerleştirilerek elde edilen kompozit zırhın (Şekil 2.21. (a) ve Şekil 2.21.(b)) tanklarda “tak-çıkâr (add on armor)” şeklinde kullanılabilmesi ve yapılan sayısal analizlerde verilen sınır koşulları (“Fixed Support”) ile örtüşmesi amacıyla yan ve alt kısımları çelik plakalar ile kaynak yapılarak (Şekil 2.21.(c)) kapatılmıştır.



Şekil 2.21. Küçük Panel (a), Büyük Panel (b), Altı ve Yanları Çelik Plakalar ile Kapatılmış Büyük ve Küçük Paneller (c)

Bu aşamadan sonra karbon fiber ile takviye edilmiş kompozit bloklar panellerin içine yerleştirilerek panellerin paketleme işlemi tamamlanmıştır (Şekil 2.22.).



Şekil 2.22. Kapakları Kapatılmış Büyük (a) ve Küçük (b) Paneller

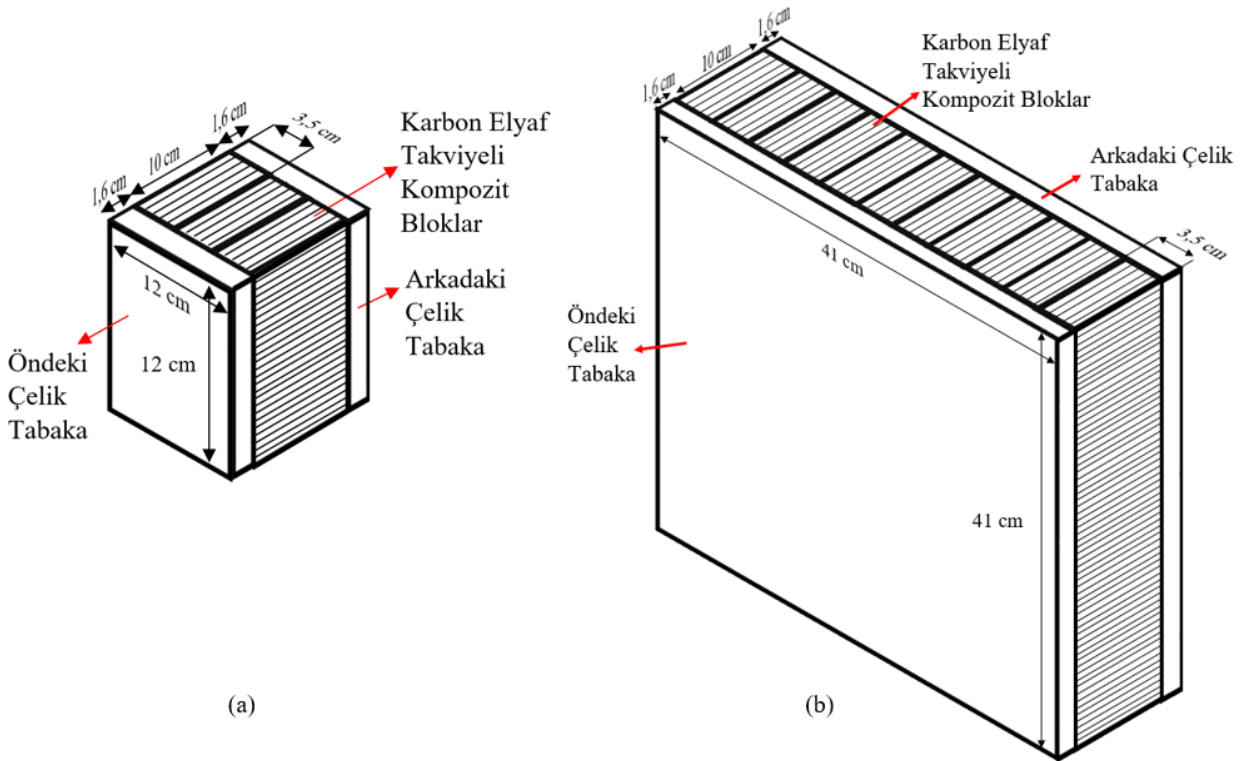
Yüksek hızlı çarpma testlerinde merminin istenilen yere isabet etmesi ve yüksek hızlı çarpma testlerinden sonra panellerin arka yüzeyinde oluşacak hasar bölgelerinin incelenmesi için paketleme işlemi tamamlanmış olan küçük (Şekil 2.23.(a)) ve büyük panellerin (Şekil

2.23.(b)) ön ve arka yüzeyleri boyanarak paneller yüksek hızlı çarpma testleri için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 2.23. Küçük (a) ve Büyük (b) Panellerin Boyanmış Arka ve Ön Yüzeyleri

Yüksek hızlı çarpma testleri için hazır hale getirilen küçük ve büyük panellerin boyutları Şekil 2.24.' te verilmiştir.



Şekil 2.24. Yüksek Hızlı Çarpma Testleri için Hazır Hale Getirilen Küçük (a) ve Büyük (b) Panellerin Boyutları

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

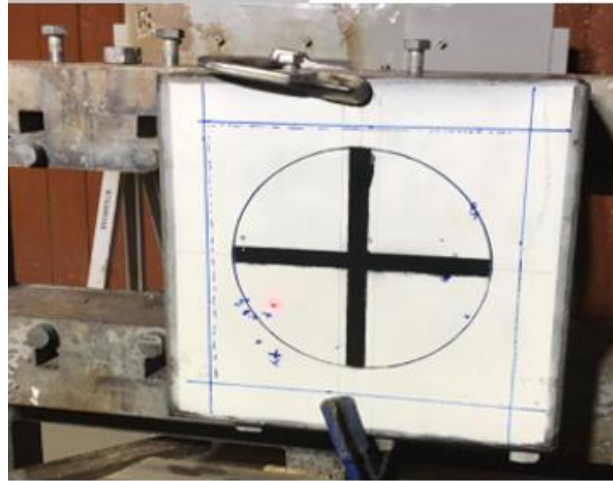
3.1. Çok Tabakalı Küçük ve Büyük Kompozit Zırhların Yüksek Hızlı Çarpma Testleri

Yüksek hızlı çarpma testleri Roketsan A.Ş.' nin Balistik Koruma Merkezi' nde bulunan Barut Enerjisi (powder gun) [35] ile Çalışan Silah Sistemi kullanılarak yapılmıştır. Yüksek hızlı çarpma testlerine, yapılan sayısal analiz sonuçları ve buna bağlı olarak STANAG 4569' daki Seviye-4 koruması (Tablo 3.1.) dikkate alınarak küçük paneller ile başlanmıştır. Küçük panellerin atış sonrasında bu koruma seviyesini sağlaması üzerine büyük panellere de yüksek hızlı atışlar STANAG 4569 Seviye-4 test prosedürü dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.1. STANAG 4569 Seviye-4 Koruma için Kullanılan Mermi Tipi, Hızı ve Ağırlığı

| | |
|---------------------|----------------------|
| Mühimmat | 14,5 mm x 114 B32 AP |
| Mermi Ağırlığı (gr) | 63,4 |
| Hızı (m/s) | 911 |
| Enerjisi (J) | 26308 |

Atış sonrasında perforasyon olması ihtimaline karşı küçük panellerin arka tarafına şahit numune olarak zırh çeliği (RHA) yerleştirilmiş ve paneller bant ve mengeneler ile hedef yerine sabitlenmiştir (Şekil 3.1.). Merminin vuracağı yer ise lazer ile belirlenerek yüksek hızlı çarpma testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1. Panellerin Hedef Yerine Sabitlenmesi

Küçük panellerin her birine birer atış yapılırken, büyük panellere ise şu şekilde atışlar yapılmıştır; sensörsüz büyük panele 4, sensörlü büyük panellere ise 1' er yüksek hızlı atış yapılmıştır ve merminin panele vuruş hızı kaydedilmiştir (Tablo 3.2.).

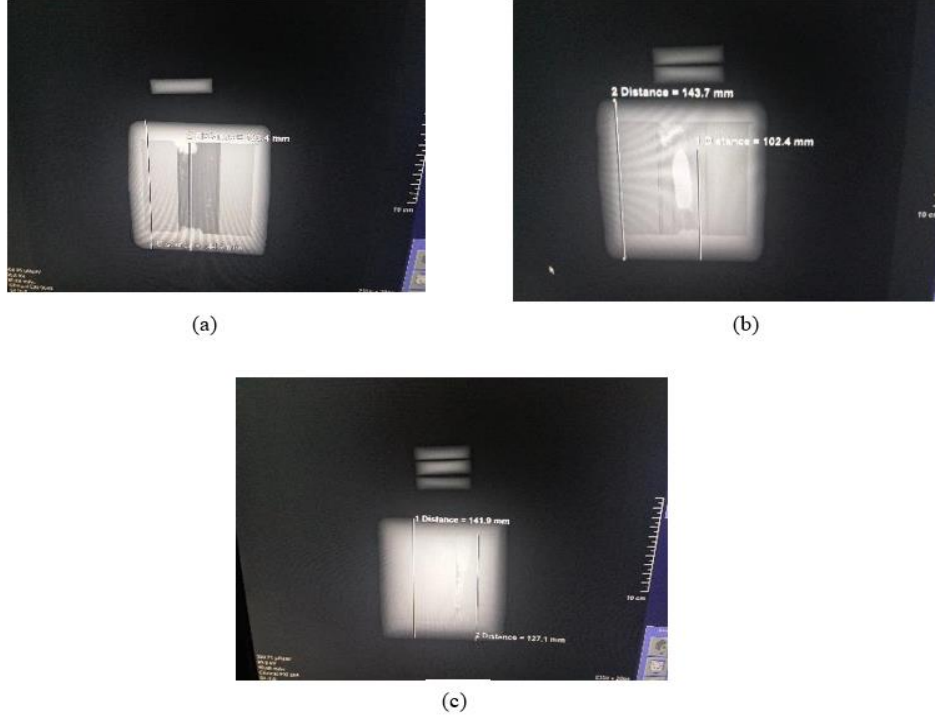
Tablo 3.2. Yüksek Hızlı Çarpma Testlerinde Merminin Küçük ve Büyük Panellere Vuruş Hızı

| Paneller | | v (m/s) |
|---------------|--------|-----------|
| Küçük Panel-1 | | 911,4 |
| Küçük Panel-2 | | 910,7 |
| Küçük Panel-3 | | 908,8 |
| Büyük Panel-1 | Atış 1 | 922,9 |
| | Atış 2 | 908,9 |
| | Atış 3 | 911,6 |
| | Atış 4 | 909,7 |
| Büyük Panel-2 | | 917,5 |
| Büyük Panel-3 | | 916,1 |

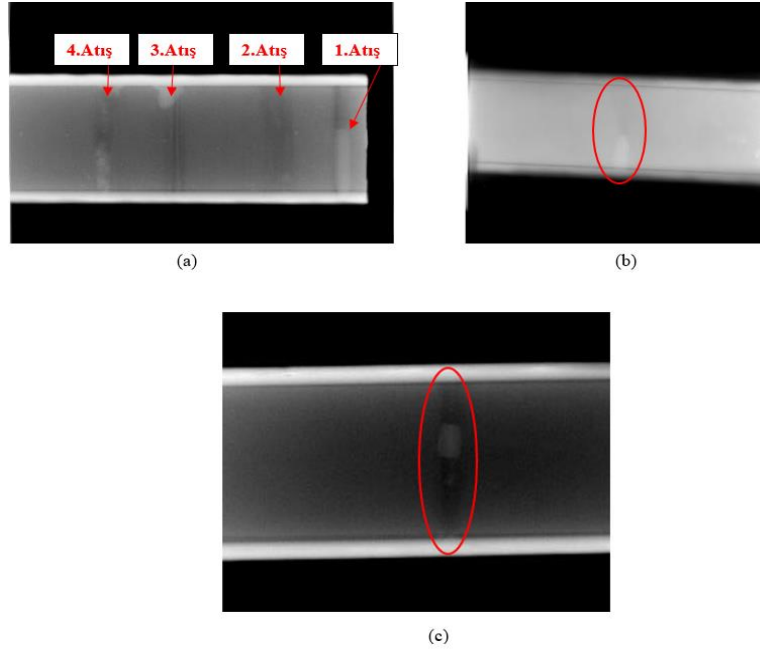
Tablo 3.2'de v merminin hedefe çarptığı andaki hızı' dır.

3.2. Yüksek Hızlı Çarpma Testleri Sonrasında Panellerde Penetrasyon Derinliğinin Ölçülmesi

Yüksek hızlı atış testleri sonrasında hiçbir küçük ve büyük panel perfore olmamıştır. Bu sebeple paneller açılıp incelenmeden önce penetratörlerin paneldeki yerlerinin tespiti için panellerin röntgenleri çekilmiştir. Küçük panellerin röntgenleri (Şekil 3.2.) Başkent Üniversitesi Hastanesi' nde bulunan röntgen cihazı, büyük panellerin röntgenleri (Şekil 3.3.) ise Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu-Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü' nde bulunan radyografi cihazı (Şekil 3.4.) ile çekilmiştir. Büyük panellerin kalınlıkları 10 cm' yi aştığı için giricilik (penetrasyon) gücü X ışımına göre daha yüksek olan Co-60 radyoizotop kaynaklı gama grafi kullanılmıştır.



Şekil 3.2. Yüksek Hızlı Atış Sonrasında Küçük Panellerin Röntgenleri (a) Küçük Panel-1, (b) Küçük Panel-2 ve (c) Küçük Panel-3



Şekil 3.3. Yüksek Hızlı Atış Sonrasında Büyük Panellerin Röntgenleri (a) Büyük Panel-1, (b) Büyük Panel-2 ve (c) Büyük Panel-3



Şekil 3.4. Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu-Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü' nde Bulunan Radyografi Cihazı

Şekil 3.2. ve Şekil 3.3.' ten de görüleceği gibi çoğu penetratör yüksek hızlı atış sonrasında panel içinde parçalanmıştır. Sadece Büyük Panel-1' in 1. atışı için kullanılan penetratör ile Büyük Panel-2' ye atılan penetratör yüksek hızlı atış sonrasında rijit kalabilmiştir. Bu yüzden sadece bu iki penetratörün paneldeki penetrasyon derinlikleri hem röntgenler üzerinden cetvel ile hem de paneller açıldıktan sonra panellerde gitmiş oldukları mesafe kumpas yardımı ile ölçülebilmıştır (Şekil 3.5.).



(a)



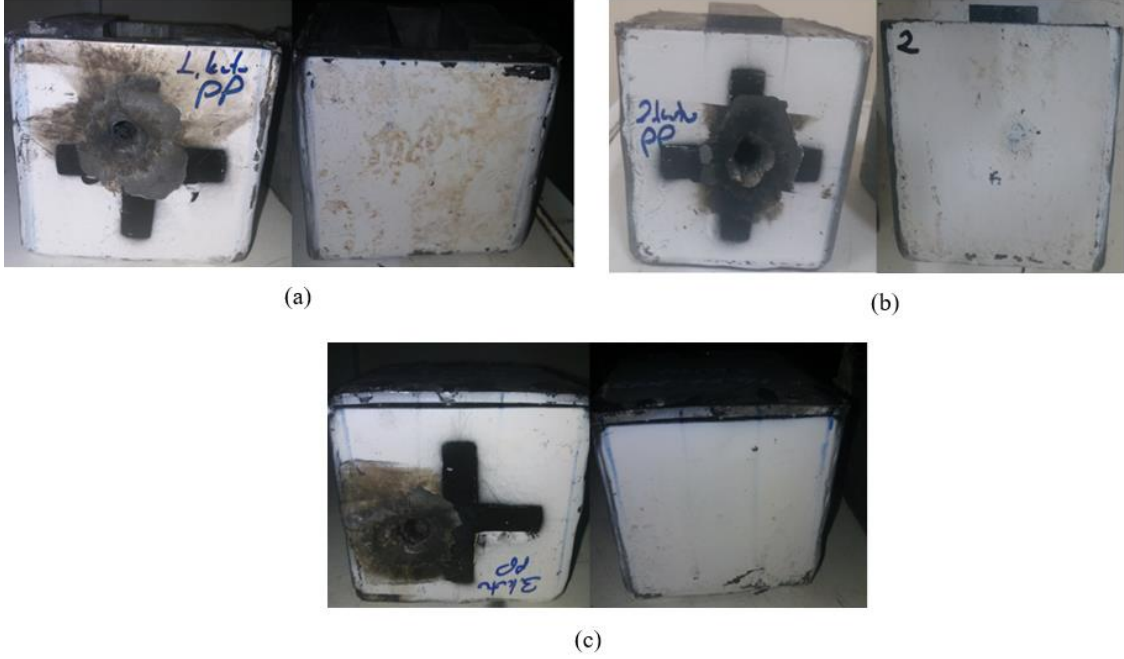
(b)

Şekil 3.5. Yüksek Hızlı Atış Sonrasında Büyük Panellerde oluşan Penetrasyon Derinliklerinin Ölçülmesi (a) Büyük Panel-1' deki 1.Atış, (b) Büyük Panel-2

Bu ölçüm sonucunda Büyük Panel-1' in 1.atış sonrası penetrasyon derinliği 127,8 mm, Büyük Panel-2' nin penetrasyon derinliği ise 123,7 mm ölçülmüştür.

3.3. Yüksek Hızlı Çarpma Testi Sonrasında Küçük Panellerin Açılıp İncelenmesi

Yüksek hızlı atışlardan sonra öncelikle panellerin perfore olup olmadığına bakılmıştır. Küçük paneller incelendiğinde; Şekil 3.6.' da görüldüğü gibi, 3 küçük panel yüksek hızlı darbe testinin sonunda perfore olmamıştır.



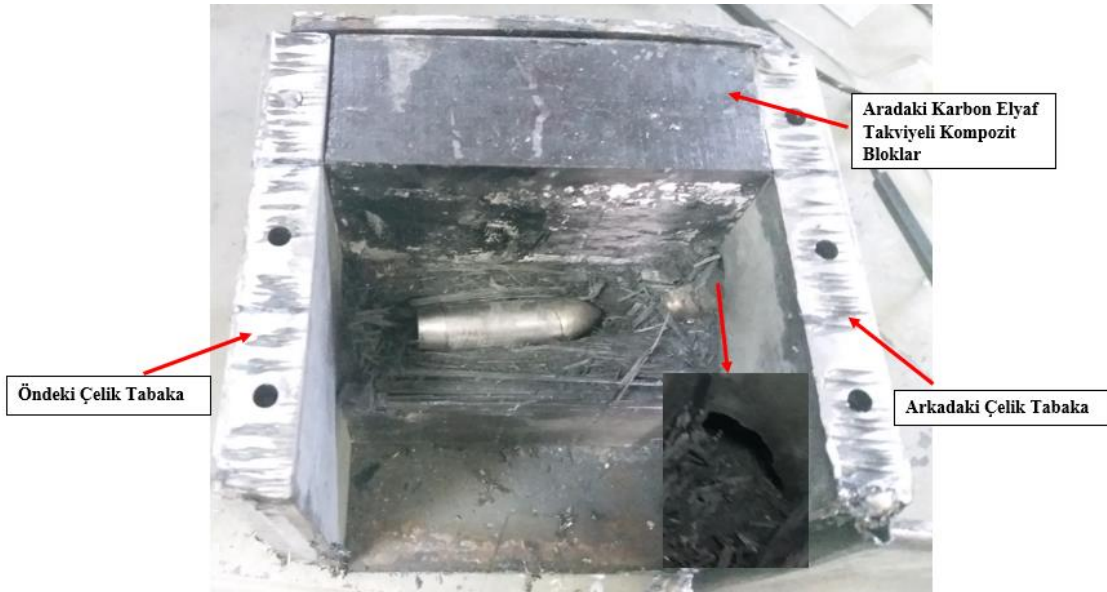
Şekil 3.6. Yüksek Hızlı Çarpma Testi Sonrası Küçük Panellerin Ön ve Arka Yüzeyleri (a) Küçük Panel-1, (b) Küçük Panel-2, (c) Küçük Panel-3

Küçük paneller açılıp incelendiğinde; Küçük Panel-1' de merminin öndeki çelik tabakayı ve ortadaki kompozit bloğu geçerek arkadaki çelik tabakada iz bıraktığı tespit edilmiştir (Şekil 3.7.).



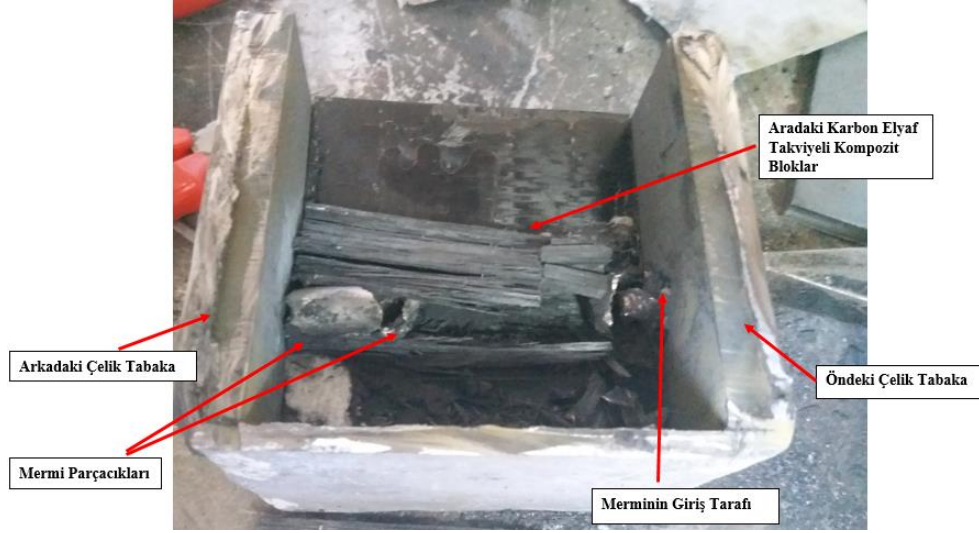
Şekil 3.7. Küçük Panel-1' in İç Yüzeyi

Küçük Panel-2' de ise mermi öndeki çelik tabakayı geçip, ortadaki kompozit bloğun orta kısmında durmuştur. Fakat mermi çarptığı malzemeyi arkadaki çelik tabakaya kadar sürükleyip arkadaki çelik tabakada kısmi penetrasyona sebebiyet vermiştir (Şekil 3.8.).



Şekil 3.8. Küçük Panel-2' nin İç Yüzeyi

Küçük Panel-3' te ise mermi öndeki çelik tabakayı perfore ederek ortadaki kompozit blok içinde parçalanmış ve arkadaki çelik tabakada iz bırakmıştır (Şekil 3.9.).



Şekil 3.9. Küçük Panel-3' ün İç Yüzeyi

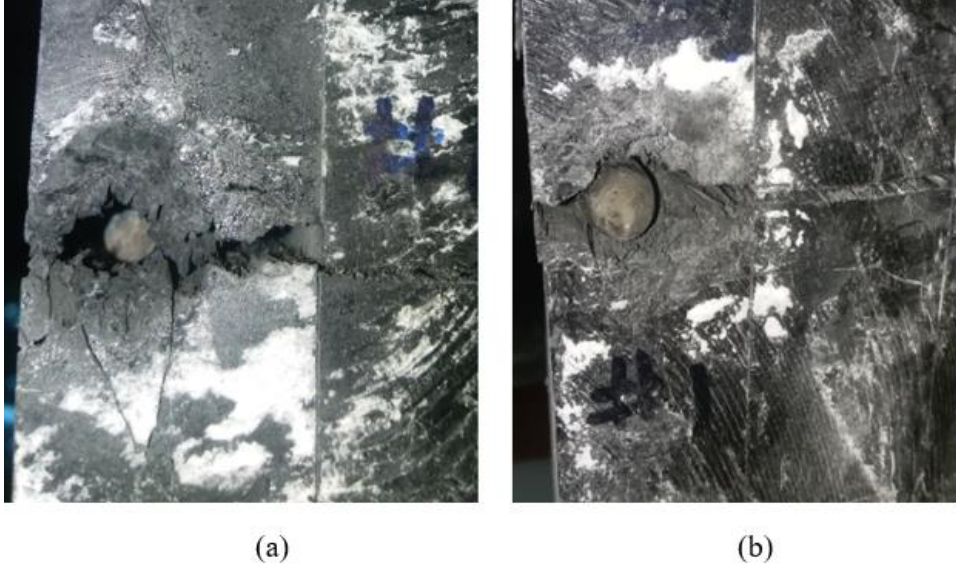
3.4. Yüksek Hızlı Çarpma Testi Sonrasında Büyük Panellerin Açılıp İncelenmesi

Büyük paneller atış sonrasında incelendiğinde Sensörsüz Büyük Panel-1' in yapılan 4 atış sonrasında perfore olmadığı görülmüştür (Şekil 3.10.). Sensörsüz Büyük Panel-1' in 1 numaralı atışında; mermimin çarptığı malzemeyi arkada bulunan çelik tabakanın arkasına kadar sürüklediği fakat paneli perfore etmediği tespit edilmiştir.



Şekil 3.10. Sensörsüz Büyük Panel-1' in Ön (a) ve Arka (b) Yüzeyi

Şekil 3.11. ve Şekil 3.12.’ de görüldüğü üzere Sensörsüz Büyük Panel-1’ in 1. Atışı sonrası merminin çoğu kısmı kompozit malzeme içinde kalmıştır.

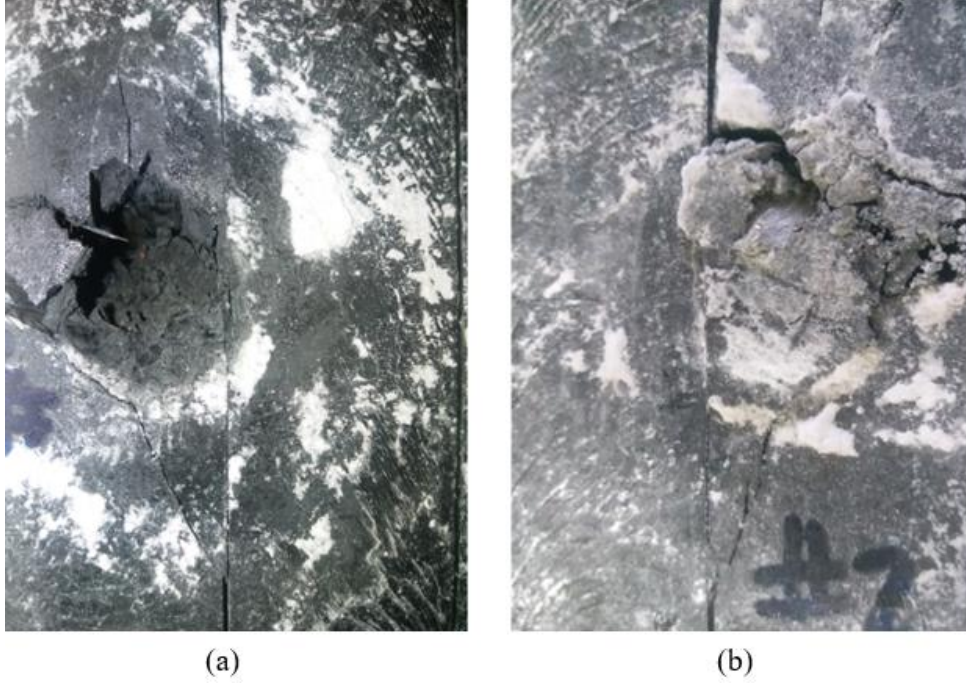


Şekil 3.11. Sensörsüz Büyük Panel-1’ deki 1 Numaralı Atışta Merminin İsabet Ettiği Kompozit Bloğun Önden (a) ve Arkadan (b) Görünümü



Şekil 3.12. Sensörsüz Büyük Panel-1’ deki 1 Numaralı Atışta Merminin İsabet Ettiği Kompozit Bloğun İç Yüzey Görünümü

Sensörsüz Büyük Panel-1’ e yapılan diğer atışlar sonrasında panel incelendiğinde mermi arkadaki çelik tabakaya ulaşamamış hatta kompozit zırhın ara kısmında bulunan karbon fiber takviyeli kompozit bloğu perforo edememiştir (Şekil 3.13. - Şekil 3.18.).



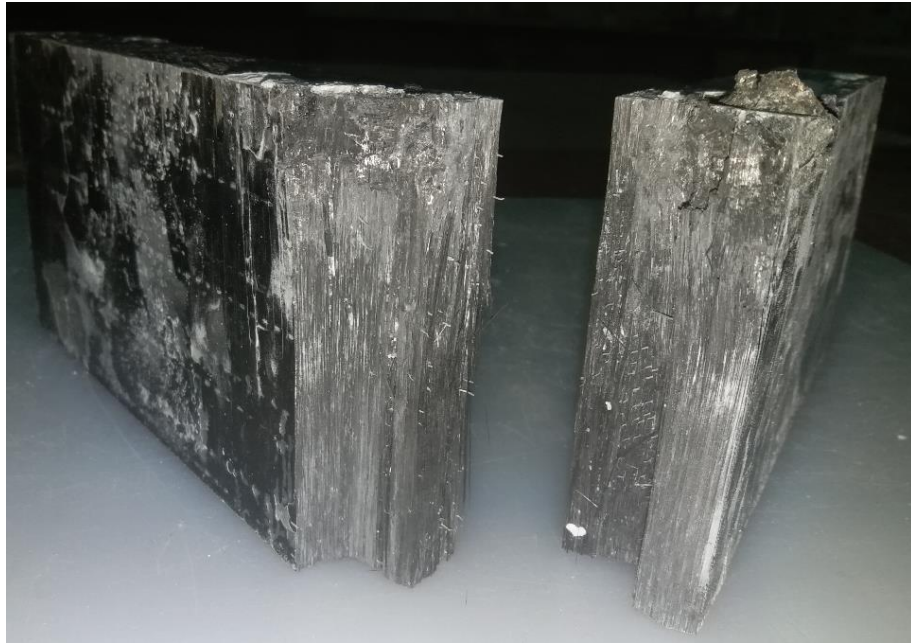
Şekil 3.13. Sensörsüz Büyük Panel-1' deki 2 Numaralı Atışta Merminin İsabet Ettiği Kompozit Bloğun Önden (a) ve Arkadan (b) Görünümü



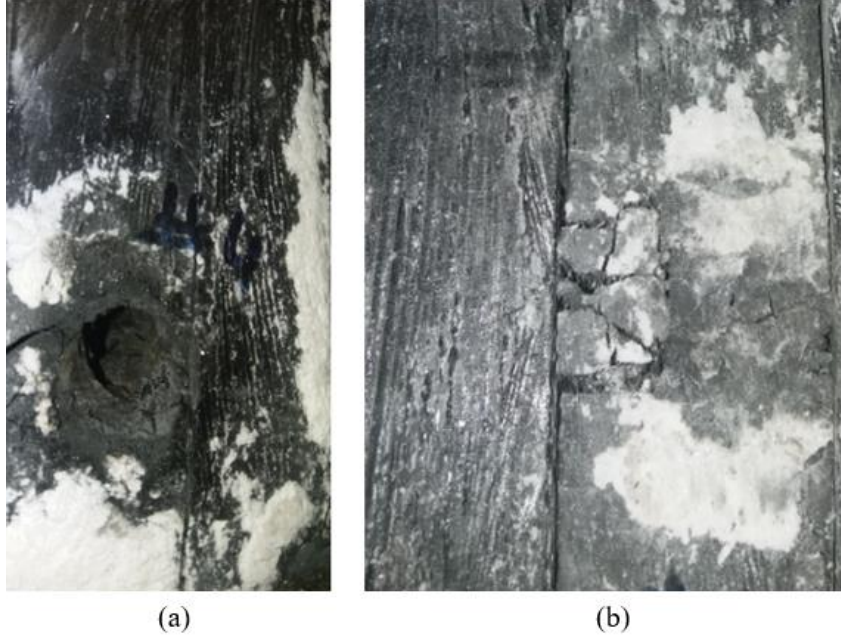
Şekil 3.14. Sensörsüz Büyük Panel-1' deki 2 Numaralı Atışta Merminin İsabet Ettiği Kompozit Bloğun İç Yüzey Görünümü



Şekil 3.15. Sensörsüz Büyük Panel-1' deki 3 Numaralı Atışta Merminin İsabet Ettiği Kompozit Bloğun Önden (a) ve Arkadan (b) Görünümü



Şekil 3.16. Sensörsüz Büyük Panel-1' deki 3 Numaralı Atışta Merminin İsabet Ettiği Kompozit Bloğun İç Yüzey Görünümü



Şekil 3.17. Sensörsüz Büyük Panel-1’ deki 4 Numaralı Atışta Merminin İsabet Ettiği Kompozit Bloğun Önden (a) ve Arkadan (b) Görünümü



Şekil 3.18. Sensörsüz Büyük Panel-1’ deki 4 Numaralı Atışta Merminin İsabet Ettiği Kompozit Bloğun İç Yüzey Görünümü

Sensörlü Büyük Panel-2 yüksek hızlı atıştan sonra incelendiğinde, merminin arkadaki çelik tabakayı “plugging” mekanizması ile hasara uğrattığı fakat merminin panel içinde kaldığı görülmüştür (Şekil 3.19.) hatta merminin büyük bir bölümü kompozit blok içinde kalmıştır (Şekil 3.20. ve Şekil 3.21.).



(a)



(b)

Şekil 3.19. Sensörlü Büyük Panel-2' nin Ön (a) ve Arka (b) Yüzeyleri



(a)



(b)

Şekil 3.20. Sensörlü Büyük Panel-2' deki Merminin İsalet Ettiği Kompozit Bloğun Önden (a) ve Arkadan (b) Görünümü

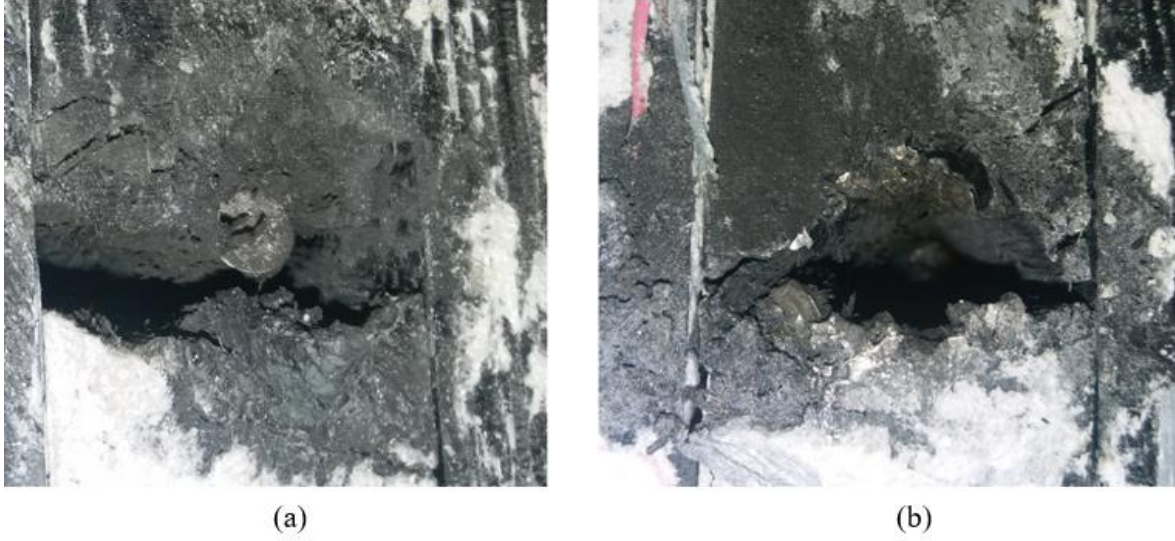


Şekil 3.21. Sensörlü Büyük Panel-2' deki Merminin İsalet Ettiği Kompozit Bloğun İç Yüzey Görünümü

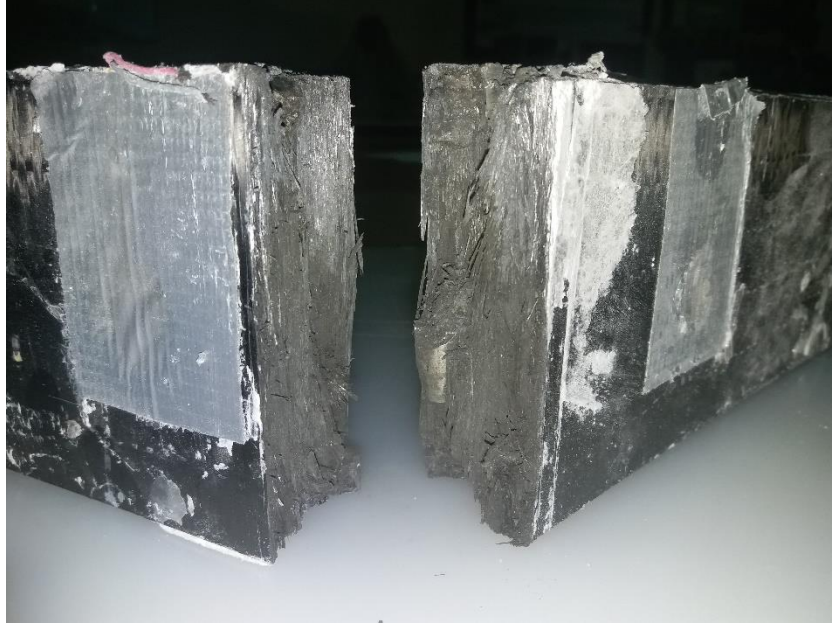
Sensörlü Büyük Panel-3 atış sonrasında incelendiğinde, panelin perfore olmadığı (Şekil 3.22.) ve merminin karbon fiber takviyeli kompozit bloğun içinde kırıldığı görülmüştür (Şekil 3.23. ve Şekil 3.24.).



Şekil 3.22. Sensörlü Büyük Panel-3'ün Ön (a) ve Arka (b) Yüzeyleri

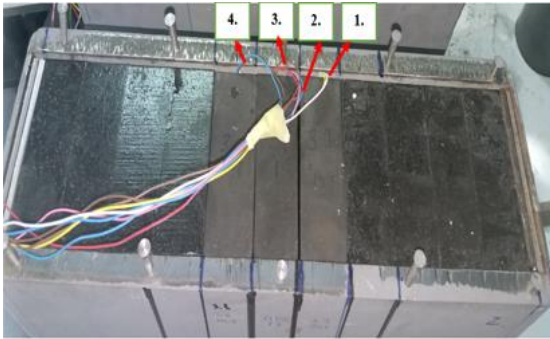


Şekil 3.23. Sensörlü Büyük Panel-3'teki Merminin İsabet Ettiği Kompozit Bloğun Önden (a) ve Arkadan (b) Görünümü

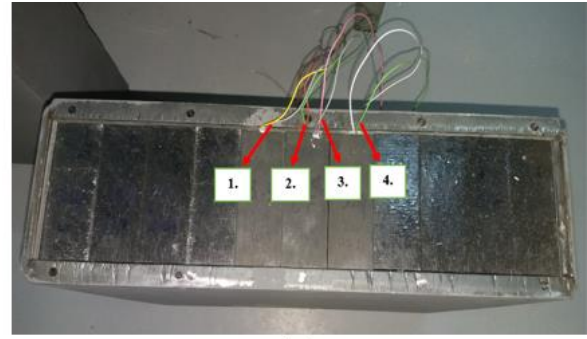


Şekil 3.24. Sensörlü Büyük Panel-3' teki Merminin İsalet Ettiği Kompozit Bloğun İç Yüzey Görünümü

Yüksek hızlı çarpma testleri yapılırken sensörlü büyük panellerdeki kompozit blokların içine gömülü gerinim ölçerlerden (sensör) gerinim değerlerinin ölçülmesi hedeflenmiştir. Şekil 3.25. (a) ve Şekil 3.25. (b)' de gösterilen 2. ve 3. sensörler, sensörlü büyük panellerdeki (Büyük Panel-2 ve Büyük Panel-3) merminin isabet ettiği kompozit bloğun içine gömülü olan sensörler olup, 1. ve 4. sensörler ise çarpmanın gerçekleştiği bölgede bulunan kompozit blokların sağında ve solunda bulunan kompozit bloklardaki sensörlerdir.



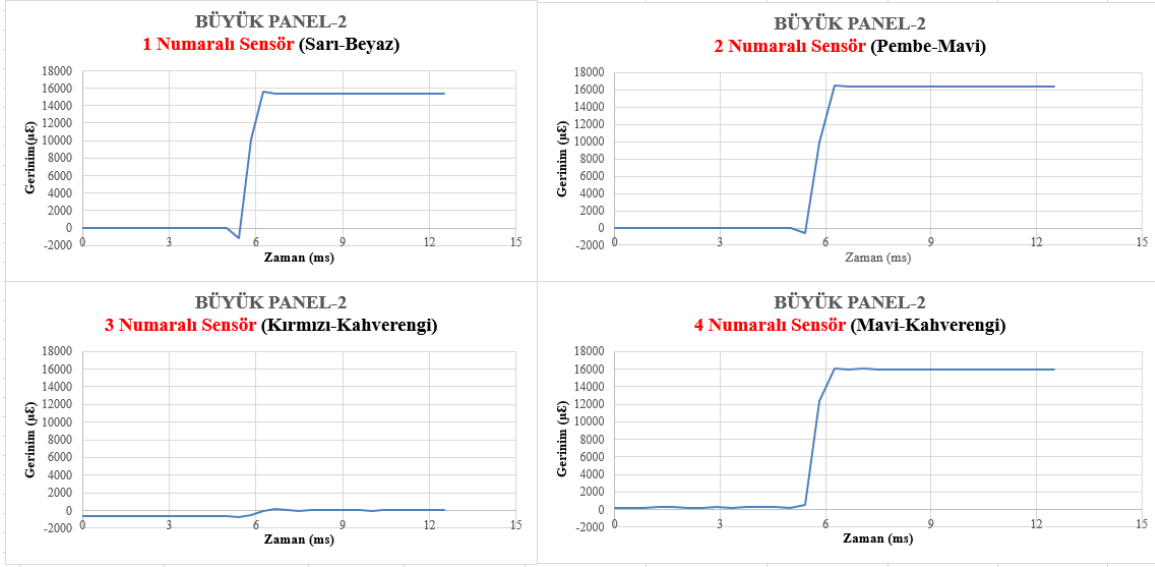
(a)



(b)

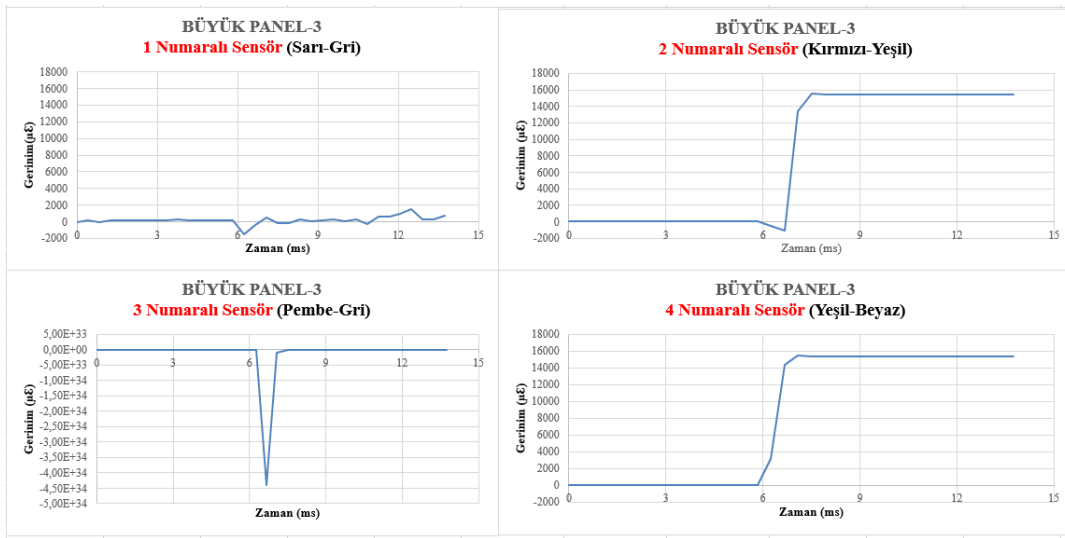
Şekil 3.25. Sensörlü Büyük Panel-2 (a) ve Sensörlü Büyük Panel-3 (b)' teki Sensörlerin Numaralandırılması

Yüksek hızlı darbe deneyleri yapılırken sensörlü büyük panellerin (Büyük Panel-2 ve Büyük Panel-3), kompozit blokların içine gömülü olan bu sensörlerden “Data Logger” aracılığı ile gerinim verileri elde edilmiştir (Şekil 3.26. ve Şekil 3.27.).



Şekil 3.26. Sensörlü Büyük Panel-2’ deki Sensörlerden Alınan Gerinim Verileri

Şekil 3.26.’ da görüleceği gibi 1, 2 ve 4 numaralı sensörlerden alınan en yüksek gerinim değeri 16502 µE’ dir ve bu değerden sonra gerinim değeri sabit kalmıştır. 3 numaralı sensörden gerinim değeri okunamamıştır.



Şekil 3.27. Sensörlü Büyük Panel-3’ teki Sensörlerden Alınan Gerinim Verileri

Büyük Panel-3' teki sensörlerden alınan gerinim değerlerine bakıldığında ise 2 ve 4 numaralı sensörlerden alınan gerinim değerleri Büyük Panel-2' deki 1, 2 ve 4 numaralı sensörlerden alınan gerinim değerlerine yakın değerlerdir (Şekil 3.27.). Fakat bu panelde 1 numaralı sensörden gerinim değeri okunmadığı gözlemlenmiştir. 3 numaralı sensörden alınan gerinim değeri ise diğer sensörlerden alınan gerinim değerlerinden farklı olarak basma yönündedir.

3.5. Bulgular ve Tartışma

DeneySEL çalışmalar sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir;

1) Yüksek hızlı darbe testleri sonrasında küçük ve büyük panellerden sadece biri “plugging” mekanizması ile hasara uğramış ancak hiçbir panel perfore olmamıştır ve çoğu test panelinin içinde mermi kırılarak arkadaki çelik zırh tabakasına ulaşamamıştır. Bu sonuçlar, tek yönlü karbon fiberlerin darbe yönünde konumlandırılmasıyla yüksek hızlı darbe karşında darbe direncinin yüksek olduğunu kanıtlamıştır.

2) En yüksek 3 atış sırasıyla Büyük Panel-1, Büyük Panel-2 ve Büyük Panel-3' e yapılmıştır. Büyük Panel-2' de “plugging” gözlemlenirken, Büyük Panel-1' in arka yüzeyinde sadece hasar olduğu görülmüştür. Büyük Panel-1 ve Büyük Panel-2' de gözlemlenen bu durumların merminin iki karbon fiber takviyeli kompozit blokların birleşim yerlerine yakın yerlere çarpması sonucunda oluştuğu değerlendirilmiştir.

3) Büyük Panel-2 ile Büyük Panel-3' e yapılan atış hızları birbirine yakın olmasına rağmen Büyük Panel-3' ün arka yüzeyinde herhangi bir hasar gözlenmemiştir. Hatta merminin Büyük Panel-3' te bulunan karbon fiber takviyeli kompozit bloğun içinde kırıldığı gözlenmiştir. Bu durumun merminin iki karbon takviyeli kompozit bloğun birleşme yerinden biraz daha uzak bir yere çarpması sonucunda oluştuğu düşünülmektedir.

4) Panellerin içindeki karbon fiber takviyeli kompozit bloğun ön ve arka yüzeyleri atış sonrasında incelendiğinde merminin karbon fiber takviyeli kompozit bloğa nüfuz ettikten sonra doğrusal bir şekilde ilerlemediği tespit edilmiştir. Bu durum darbe yönüne paralel konumlandırılan karbon fiberlerin yüksek basma mukavemeti sayesinde merminin yönünü

değiştirdiğini ve böylece penetrasyon derinliğini azaltarak kompozit zırhın perfore olmasını engellediğini göstermektedir.

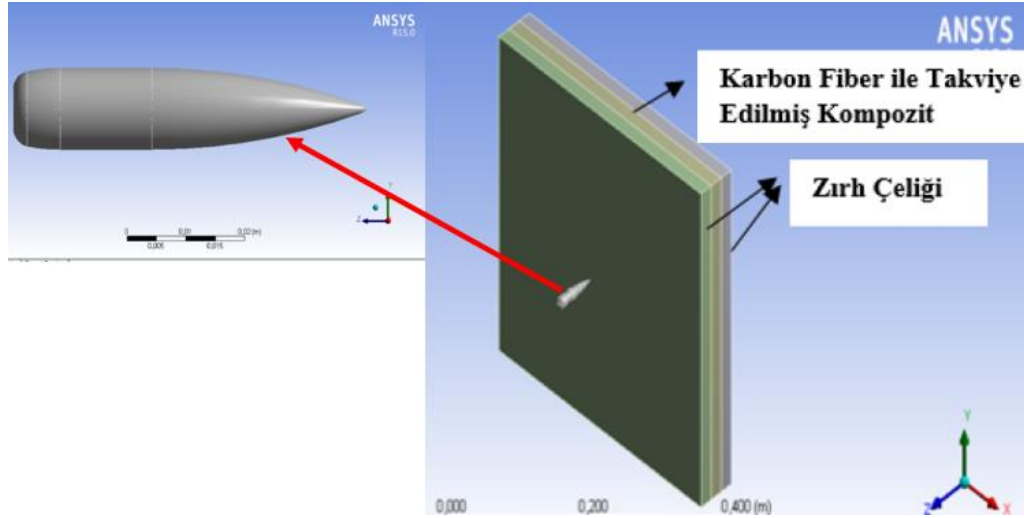
5) Sensörlü karbon elyaf takviyeli kompozit blokların içine gömülü olan sensörlerden deney çalışmaları sırasında “Data Logger” aracılığı ile alınan gerinim değerlerinin belirli bir seviyeden sonra sabit kaldığı, buna “Data Logger” ayarlarında üst limit üzerine çıkılmasının neden olduğu değerlendirilmiş ve istenen değerleri vermediği düşünülerek gerinim ölçer ile elde edilen veriler ile sayısal analizin verdiği deformasyon büyüklüğü mukayese edilememiştir. Diğer yandan, Büyük Panel-2 ve Büyük Panel-3 test numunelerinde veri okunamayan sensörlerin (gerinim ölçer) kablo bağlantılarının kopması nedeniyle fonksiyon göstermediği değerlendirilmektedir. Bu durum gerinim ölçerden alınan verileri ölçebilecek aralığa sahip “Data Logger” kullanılarak aşılabilir. Böylece üretimi yapılan kompozit yapının içine gömülü olan sensörlerden gerinimler (deformasyonlar) elde edilerek, bu değerler yardımıyla geliştirilen bir algoritma üzerinden akıllı kompozit zırh hasar tolerans kriterleri çerçevesinde monitör edilebilir.

4. SAYISAL ÇALIŞMALAR

4.1. Çok Tabakalı Büyük ve Küçük Kompozit Zırhların Üç Boyutlu Modellenmesi ve Sayısal Analizi

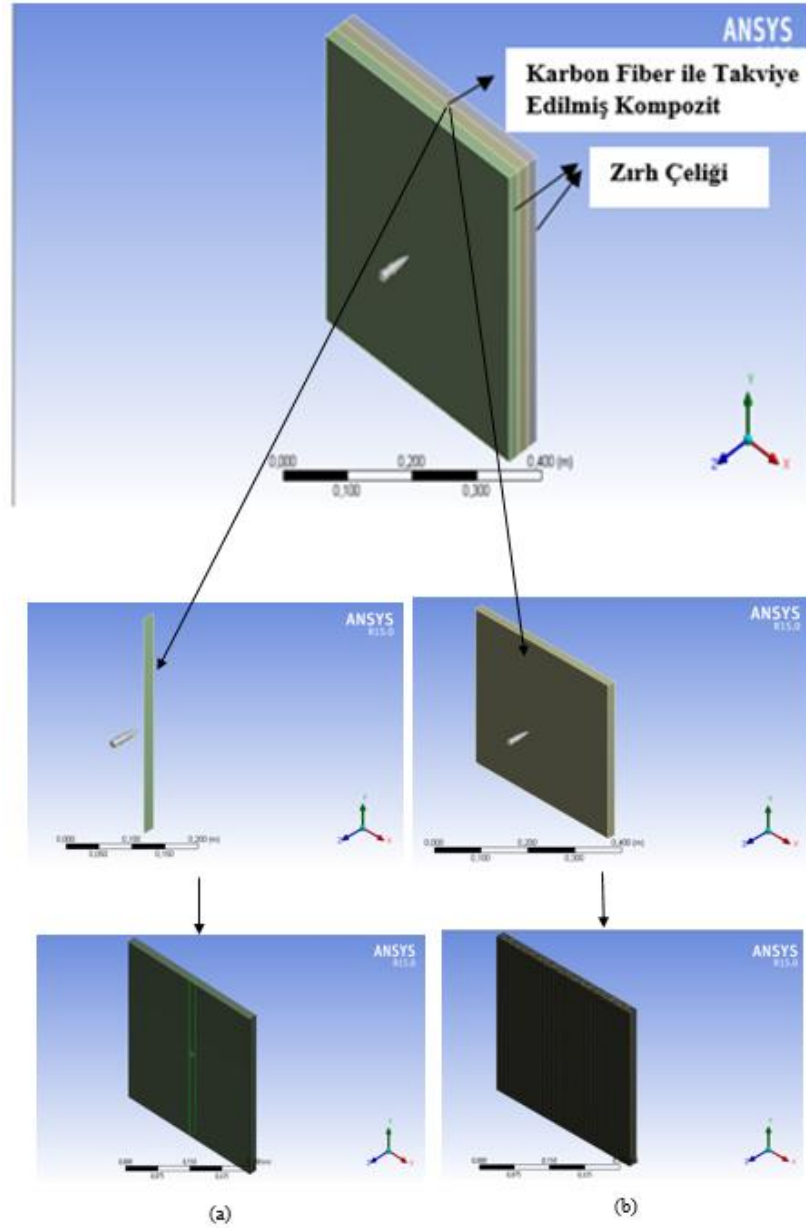
Düşme testleri, çarpma ve penetrasyon gibi uygulamalar sonucunda oluşan şok dalgalarının yayılımı, büyük deformasyonlar ve gerinimler, doğrusal olmayan malzeme davranışları ve parçalanma gibi problemlerin çözümlenmesi için genellikle sonlu elemanlar yöntemini esas alan ticari programlar [36-52] kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında imal edilmiş olan yüksek hızlı darbeye dayanıklı çok tabakalı küçük ve büyük panellerin sayısal analizi için ANSYS LS-DYNA programı kullanılmış ve penetratör ile çok tabakalı kompozit yapı zırh modelleri ANSYS Workbench’ te “Geometry” modülü ile çizilmiştir.

Tezin sayısal çalışmalarına başlanırken ilk etapta yüksek hızlı bir merminin (50 BMG) üç tabakadan oluşan bir zırha çarpma analizinin yapılması hedeflenmiştir (Şekil 4.1.).



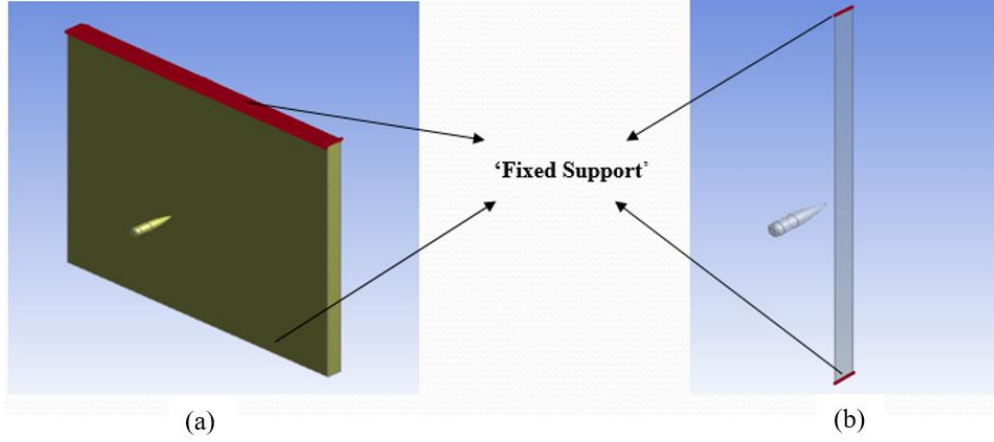
Şekil 4.1. Üç Tabakalı Kompozit Yapı ve Penetratör Modeli

Şekil 4.1.’ de görülen üç tabakalı zırhın sayısal ön analizi için 850 m/s hıza sahip 50 BMG mermi modeli kullanılmıştır. Aradaki karbon fiber ile takviye edilmiş kompozit tabaka hem “yüzey” hem de “katı” olarak modellenip (Şekil 4.2.) elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.



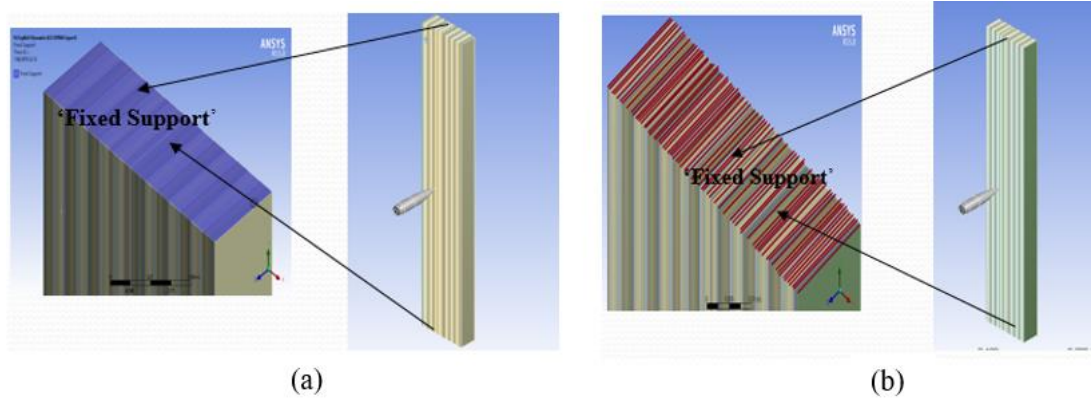
Şekil 4.2. Karbon Fiber ile Takviye Edilmiş Kompozit Tabakanın “Yüzey” (a) ve “Katı” (b) Modeli

Modellere “fixed support” sınır koşulu “katı” modelde yüzeylere verilebilirken, “yüzey” modelde kenarlara verilebilmektedir (Şekil 4.3.). Bu sebepten dolayı modeller üzerinde oluşan efektif gerilme değerlerinin birbirinden ciddi derecede farklı çıktığı görülmüştür.



Şekil 4.3. Modellere Verilen Sınır Koşulları (a) “Kati” Model, (b) “Yüzey” Model

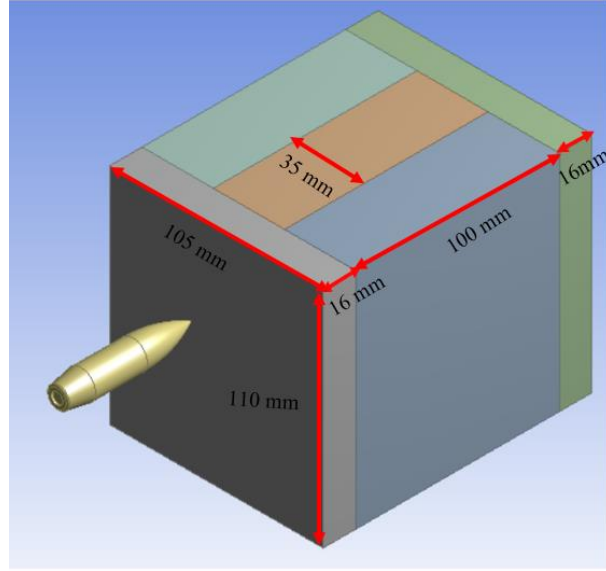
Sınır koşullarındaki bu farklılığın azaltılabilmesi amacıyla “yüzey” ve “kati” modellerde katman sayısı artırılarak (Şekil 4.4.) sayısal çalışmalara devam edilmiştir.



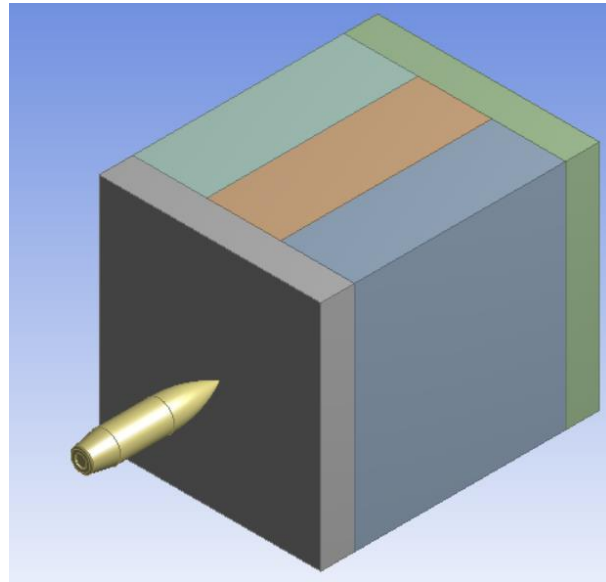
Şekil 4.4. Katmanlı Modeller (a) “Kati” Model, (b) “Yüzey” Model

“Kati” modelin sayısal analizi düzgün çalışırken “yüzey” modelin analizinde “energy error” hatası ile karşılaşmıştır. Bu yüzden tez kapsamında çok tabakalı kompozit zırhın orta kısmında bulunan karbon fiber ile takviye edilmiş kompozit bloklar;

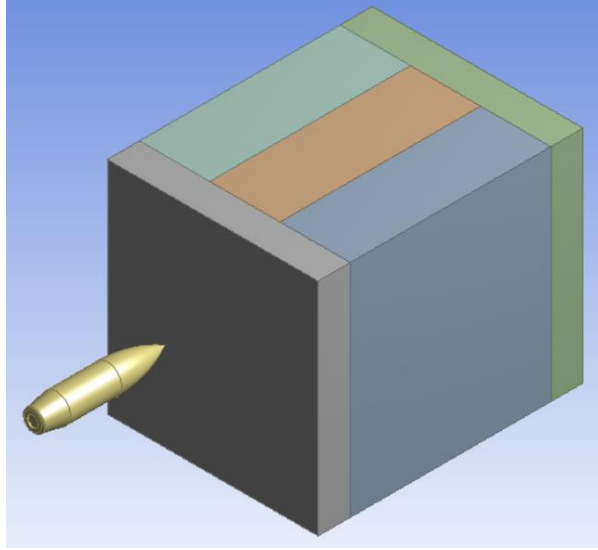
- Kompozit zırhın arka ve ön kısımdaki tabakalar zırh çeliği olduğundan ve dolayısıyla bu tabakaların “kati” olarak modellenmesi gerektiğinden,
- Birden fazla karbon fiber ile takviye edilmiş kompozit prepreg malzemenin kür işleminden sonra “kati” bir model gibi davranacağından,
- Kompozit zırhtaki (çelik + kompozit + çelik tabakalarında) ağ yapısının örtüşmesinin sağlanması açısından,
- Karbon fiber ile takviye edilmiş kompozit bloklara doğru sınır koşulları verilebilmesi



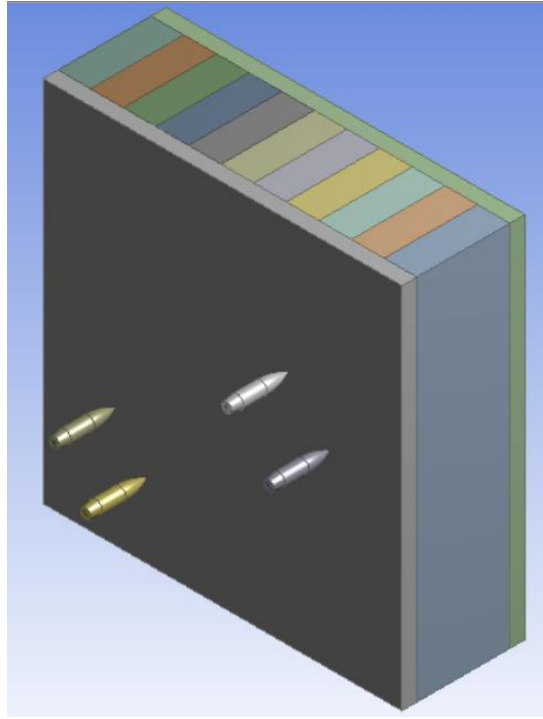
Şekil 4.6. Küçük Panel-1' in Sayısal Modeli ve Küçük Panellerin Boyutları



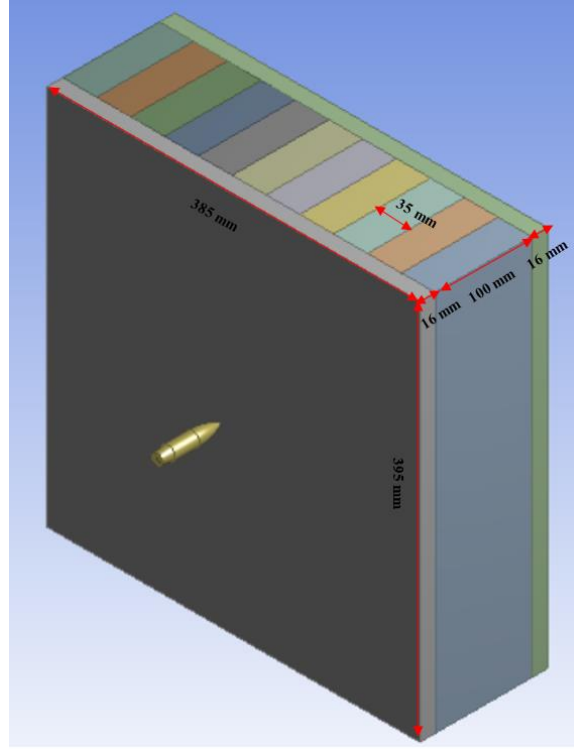
Şekil 4.7. Küçük Panel-2' nin Sayısal Modeli



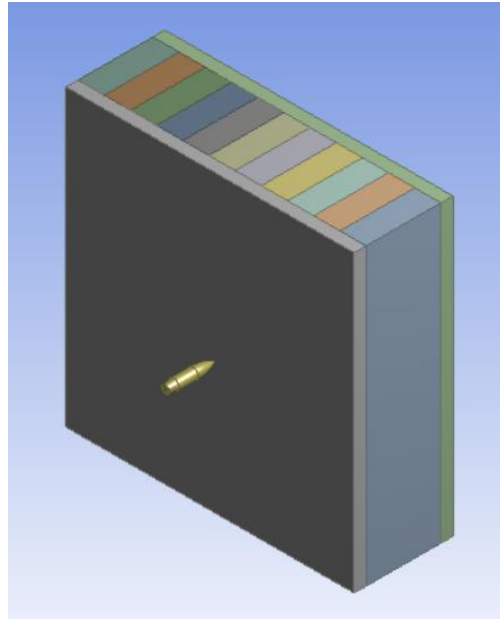
Şekil 4.8. Küçük Panel-3' ün Sayısal Modeli



Şekil 4.9. Büyük Panel-1' in Sayısal Modeli



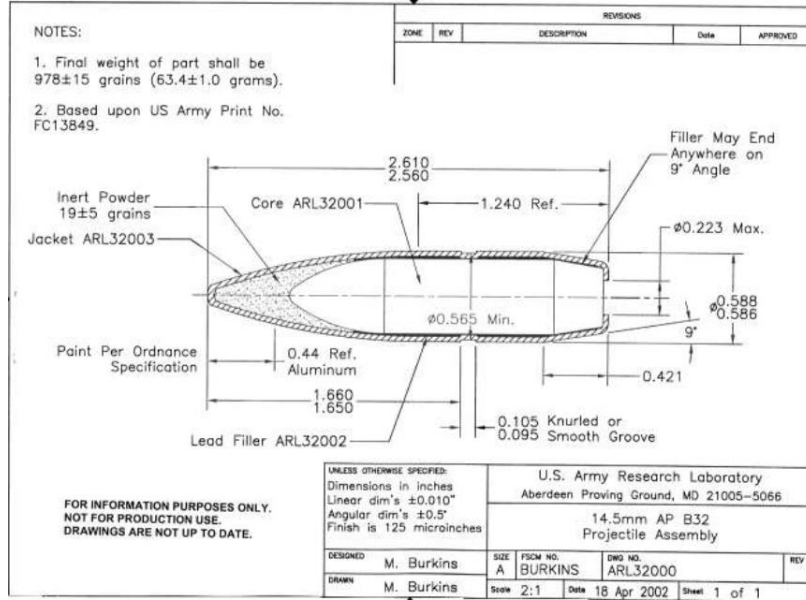
Şekil 4.10. Büyük Panel-2' nin Sayısal Modeli ve Büyük Panellerin Boyutları



Şekil 4.11. Büyük Panel-3' ün Sayısal Modeli

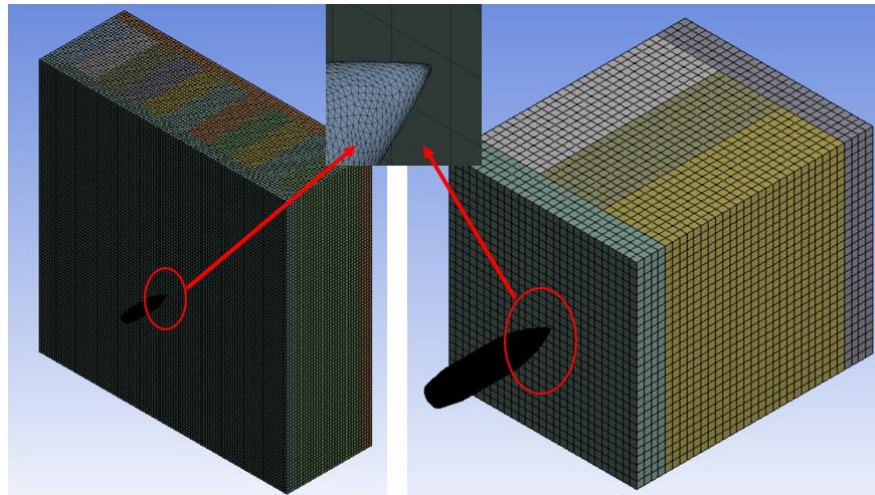
Küçük ve büyük panellerin sayısal modellerindeki mermi koordinatları deneysel çalışmalar sonucunda merminin panele çarptığı nokta dikkate alınarak belirlenmiştir.

Gerçek modelin sayısal analizinde kullanılan mermi (14,5 mm çelik çekirdekli) ise deneysel çalışmalarda STANAG 4569 Seviye-4 koruması için kullanılan penetratörün geometrisi (Şekil 4.12.) dikkate alınarak modellenmiştir.



Şekil 4.12. STANAG 4569 Seviye-4 Koruması için Kullanılan Mermi Geometrisi [53]

Ansys “Geometry” modülünde çizimi yapılan panellerin ve merminin geometrileri “Explicit Dynamics (LS-DYNA Export)” modülüne aktarılarak ağ yapıları oluşturulmuştur (Şekil 4.13.).

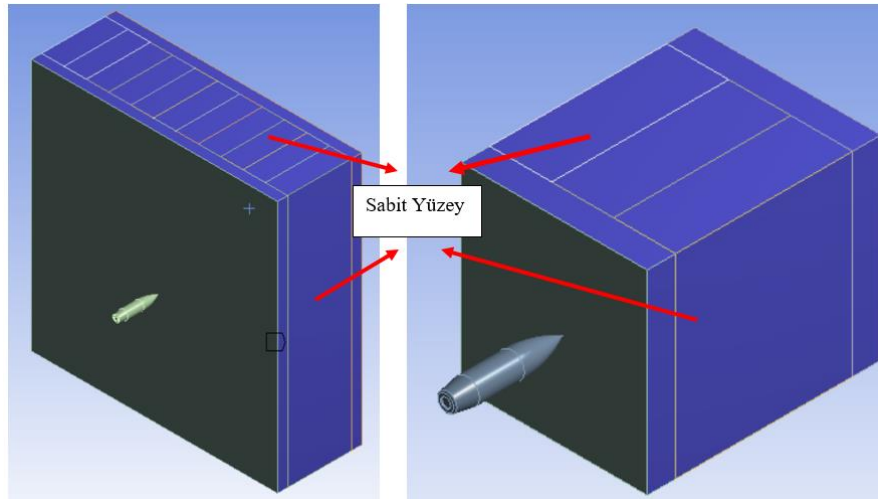


Şekil 4.13. Büyük, Küçük Panellerin ve Merminin Sayısal Ağ Yapıları

Panellerin geometrileri dikdörtgen olduğundan sayısal ağ yapılarında “hexa” elemanlar, merminin geometrisi nedeni ile de sayısal ağ yapısında “tetra” elemanlar kullanılmıştır. Mermi ve küçük panellerden oluşan modellerin ağ yapısındaki toplam eleman sayısı 265580 ve düğüm sayısı 74449 iken, mermi ve Büyük Panel-2 ile Büyük Panel-3’ ün modellerinin ağ yapısındaki toplam eleman sayısı 486669 ve düğüm sayısı 354295’ tir. 4 atış yapılan Büyük Panel-1’ in ağ yapısındaki toplam eleman sayısı ise 1044440, düğüm sayısı 467302’ dir.

Modellere sınır koşulları ise şu şekilde verilmiştir;

- Analizde penetratörün plakada oluşturduğu hasar inceleneceği için penetratör “rijit” [36, 51] seçilmiştir.
- Penetratörün serbestlik derecesi yalnızca z yönünde hareketin sağlanması açısından tanımlanmıştır.
- Penetratörün ilk hızı deneysel çalışmalarda her bir panele isabet eden merminin vuruş hızı olarak tanımlanmıştır.
- Çok tabakalı kompozit zırhın tüm kenar yüzeyleri çelik plakalarla kapatıldığından bu yüzeyler “sabit yüzey/ fixed support” ile bütün yönlerde sabitlenmiştir (Şekil 4.14.).



Şekil 4.14. Büyük ve Küçük Panellerin Sınır Koşulları

Böylelikle sayısal ağ yapıları ve sınır koşulları tanımlanmış olan mermi ve panel yapısının “LS-Prepost” programında malzeme modelinin oluşturulması için “.k” dosyası oluşturulmuştur. Kompozit zırhın MIL A46100 çeliğinden olan ön ve arka tabakası Johnson-Cook Plastik Modeli

[36-42] ile tanımlanmıştır. Johnson-Cook malzeme modeli izotropik malzemeler için yaygın bir şekilde balistik penetrasyon, darbe ve çarpışma gibi uygulamalarda çok kullanılan bir modeldir [54]. LS-DYNA Prepost programında Johnson Cook modelindeki akma gerilmesi [55] denklem 4.1 kullanılarak bulunmaktadır.

$$\sigma_y = (A + B \varepsilon^n)(1 + c \ln(\dot{\varepsilon}^*))(1 - (T^*)^m) \quad (4.1)$$

Bu denklemde:

A: malzemenin akma gerilmesini,

B: gerinim sertleşme sabitini,

ε : efektif plastik gerinimi,

n: gerinim sertleşme katsayısını,

c: gerinim hızı güçlendirme katsayısını,

m: termal yumuşama katsayısını ifade etmektedir [54, 55, 56].

$\dot{\varepsilon}^*$ ve T^* sırasıyla denklem 4.2 ve denklem 4.3' te verilmiştir.

$$\dot{\varepsilon}^* = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \quad (4.2)$$

$$T^* = \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \quad (4.3)$$

Denklem 4.2 ve 4.3' te:

$\dot{\varepsilon}$: gerinim hızını,

$\dot{\varepsilon}_0$: referans gerinim hızını,

T_m : erime sıcaklığını,

T_r : oda sıcaklığını ifade etmektedir. LS-DYNA Prepost programında malzemenin kırılma anındaki gerinim değeri ise aşağıdaki denklem [57] kullanılarak bulunmaktadır.

$$\varepsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*][1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*](1 + D_5 T^*) \quad (4.4)$$

Denklem 4.4' te $D_1 - D_5$ kırılma parametreleridir. σ^* denklem 4.5' te verilmiştir.

$$\sigma^* = \frac{p}{\sigma_{eff}} \quad (4.5)$$

Denklem 4.5' te:

p : basıncı,

σ_{eff} : efektif gerilme gerilmeyi [54] ifade etmektedir.

Hasar parametresi ise denklem 4.6' da verilmiştir. Hasar parametresi 1 değerine ulaştığı zaman kırılma olmaktadır.

$$D = \sum \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_f} \quad (4.6)$$

Denklem 4.6' da $\Delta\varepsilon$ efektif plastik gerinimdeki artışı ifade etmektedir. Modelde ön ve arka tabaka malzemeleri için kullanılan Johnson-Cook parametreleri [58] Tablo 4.1.' de verilmiştir.

Tablo 4.1. Ön ve Arka Plakalarda Kullanılan MIL A46100 Çeliğinin Johnson Cook Parametreleri [55, 57, 59]

| | |
|------------------------------|--------|
| E_c , MPa | 215000 |
| ν_c | 0,29 |
| ρ_c , g/cm ³ | 7,85 |
| A, MPa | 1050 |
| B, MPa | 250 |
| n | 0,12 |
| C | 0,02 |
| m | 0,5 |
| T_r , K | 298 |
| T_m , K | 1720 |
| D_1 | 0,05 |
| D_2 | 3,44 |
| D_3 | -2,12 |
| D_4 | 0,002 |
| D_5 | 0,61 |

Tablo 4.1' de E_c MIL A46100 çeliğinin elastisite modülünü, ν_c MIL A46100 çeliğinin poisson oranını, ρ_c MIL A46100 çeliğinin yoğunluğunu ifade etmektedir.

Tablo 4.1' deki parametreler LS-Prepost programının malzeme modelleme sekmesi altında bulunan Johnson-Cook malzeme modeli için girilmiştir. Ayrıca malzeme modeli

Johnson Cook olan ön ve arka çelik tabakalar için Gruneisen [39, 40, 60] hal denklemi tanımlanmıştır. LS-DYNA Prepost programında kullanılan parçacık hızının bir fonksiyonu olarak kübik şok hızı $v_s(v_p)$ ile Gruneisen durum denklemi sıkıştırılmış malzemeler için basıncı denklem 4.7' deki gibi tanımlamaktadır [54]:

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu [1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2})\mu - \frac{a}{2}\mu^2]}{[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}]^2} + (\gamma_0 + a\mu)E \quad (4.7)$$

Denklem 4.7' de:

ρ_0 : t_0 anında (başlangıçta) malzeme yoğunluğunu,

C: $v_s(v_p)$ eğrisinin kesişim noktasını,

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1,$$

γ_0 : birimsiz gruneisen gamayı,

a: gama için birinci dereceden hacim düzeltme katsayısını,

E: iç enerjisi,

S_1, S_2, S_3 : $v_s(v_p)$ eğrisinin birimsiz eğim katsayılarını ifade etmektedir.

Karbon fiber ile takviye edilmiş kompozit bloklar için LS DYNA' da en çok kullanılan kompozit malzeme modellerinden biri olan Tsai-wu kopma kriteri ile kompozit hasarı (composite damage with tsai-wu (55)) modeli kullanılmıştır. LS-DYNA Prepost programında kullanılan Tsai-wu kopma kriteri [54] denklem 4.8, denklem 4.9 ve denklem 4.10' da verilmiştir. Eğer malzemeye uygulanan yük;

fiberlere paralel yönde çekme ise;

$$e_f^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_t}\right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right) - 1 \quad (4.8)$$

fiberlere paralel yönde basma ise;

$$e_c^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_c}\right)^2 - 1 \quad (4.9)$$

fiberlere dik yönde çekme yada basma ise;

$$e_{md}^2 = \frac{\sigma_{bb}^2}{Y_c Y_t} + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c} \right)^2 + \frac{(Y_c - Y_t) \sigma_{bb}}{Y_c Y_t} - 1 \quad (4.10)$$

denklemini uygulanmaktadır.

Denklem 4.8, denklem 4.9 ve denklem 4.10' da:

a: fiberlere paralel olan yönü,

b: fiberlere dik olan yönü belirtmektedir.

Denklem 4.8 ve denklem 4.9' da:

σ_{aa} : malzemeye fiberlere paralel yönde uygulanan gerilmeyi,

σ_{ab} : malzemeye uygulanan kayma gerilmesini,

β : uygulanan yük fiberleri çekme modunda olduğu zaman kayma terimi için ağırlık faktörünü

X_t : malzemenin fiberlere paralel yönde çekme dayanımını,

S_c : malzemenin kayma mukavemetini,

X_c : malzemenin fiberlere paralel yönde basma dayanımını ifade etmektedir.

Denklem 4.10' da:

σ_{bb} : malzemeye fiberlere dik yönde uygulanan gerilmeyi,

Y_t : malzemenin fiberlere dik yönde çekme dayanımını,

Y_c : malzemenin fiberlere dik yönde basma dayanımını göstermektedir.

Denklem 4.8' de $e_f^2 \geq 0$, denklem 4.9' da $e_c^2 \geq 0$ ve denklem 4.10' da $e_{md}^2 \geq 0$ durumunda malzeme kopmaktadır.

Kompozit malzemeler geleneksel mühendislik malzemelerinden farklı birçok mekanik davranış özelliğine sahiptir. Yaygın olarak kullanılan mühendislik malzemeleri hem homojen hem de izotropiktir. Homojen bir malzemede malzeme özellikleri pozisyondan bağımsızdır. İzotropik malzemede ise malzemenin bir noktasında her yönde malzeme özellikleri aynıdır. Yani malzeme özellikleri o noktada oryantasyondan bağımsızdır [1].

Kompozit malzemeler ise heterojen olup izotropik değildir (ortotropik ya da genel terim ile anizotropik). Heterojen malzemelerde malzeme özellikleri pozisyona bağlıdır. İzotropik olmayan yani ortotropik malzemelerde ise birbirine dik üç yöndeki malzeme özellikleri birbirinden farklıdır. Yani birbirine dik üç adet malzeme simetri düzlemi vardır ve malzeme özellikleri malzemenin oryantasyonuna bağlıdır [1]. Ortotropik malzemede 9 tane bağımsız

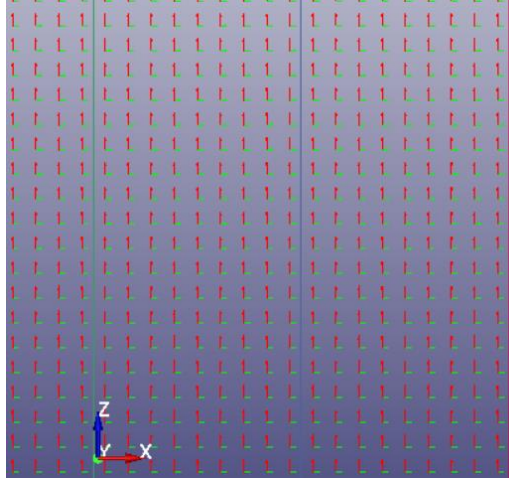
parametre vardır. Bunların 3 tanesi elastisite modülü (E_1, E_2, E_3), 3 tanesi poisson oranı ($\nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}$) ve 3 tanesi kayma modülüdür (G_{12}, G_{23}, G_{13}).

Kompozit zırhın orta kısmında bulunan karbon elyaf takviyeli kompozit bloklar için karbon/epoksi kompozit malzemenin özellikleri (Tablo 4.2.) 55 numaralı kompozit malzeme modelinde tanımlanarak karbon elyaf takviyeli kompozit bloklar ortotropik malzeme olarak modellenmiştir.

Tablo 4.2. Karbon Fiber ile Takviye Edilmiş Kompozit Bloklarda Kullanılan Tek Yönlü Karbon/Epoksi (AS4/3501-6) Malzemesinin Mekanik Özellikleri [61]

| | |
|-----------------------|------|
| $\rho, \text{g/cm}^3$ | 1,60 |
| E_1, GPa | 147 |
| E_2, GPa | 10,3 |
| E_3, GPa | 10,3 |
| ν_{12} | 0,27 |
| ν_{23} | 0,54 |
| ν_{13} | 0,27 |
| G_{12}, GPa | 7,0 |
| G_{23}, GPa | 3,7 |
| G_{13}, GPa | 7,0 |
| F_{1t}, MPa | 2280 |
| F_{2t}, MPa | 57 |
| F_{3t}, MPa | 57 |
| F_{1c}, MPa | 1725 |
| F_{2c}, MPa | 228 |
| F_{3c}, MPa | 228 |
| F_6, MPa | 76 |

Tablo 4.2.’ de ρ yoğunluk, E_1, E_2, E_3 elastisite modülü, $\nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}$ poisson oranı, G_{12}, G_{23}, G_{13} kayma modülü, F_{1t}, F_{2t}, F_{3t} çekme mukavemeti, F_{1c}, F_{2c}, F_{3c} basma mukavemeti, F_6 düzlem içi kayma mukavemetidir. Karbon fiber ile takviye edilmiş kompozit bloklardaki fiber yönleri Şekil 4.15.’ te gösterildiği gibi element tanım kısmında “yön/direction” ve “katı/solid” sekmesi seçilerek darbe yönüne paralel olacak şekilde (z yönünde) tanımlanmıştır.



Şekil 4.15. Karbon Fiber ile Takviye Edilmiş Kompozit Bloklardaki Fiber Yönleri

Penetratör ile tabakalar arasında “Surface to Surface Eroding Contact [44, 49, 52]” tipi kullanılmıştır. “Eroding Contact” yüksek hızlı çarpmalarda kullanılan bir bağlantı tipidir. Penetratörün yüksek hızlı çarpmasından dolayı plakada kullanılan malzeme modelinde tanımlanan kırılma parametrelerine göre kırılan elemanların gösterilmesini sağlayan bir kontak tipi olarak bilinmektedir. Bağlantı ve malzeme modeli oluşturulan büyük ve küçük panellerin “.k” dosyası ANSYS Programına ait Mechanical APDL Product Launcher’ da çözdürülüp, bu işlem sonrasında ortaya çıkan “d3plot” sonuç dosyaları LS-Prepost programında açılmıştır. “d3plot” dosyasından tabakalarda oluşan maksimum efektif gerilmelerine, kompozit zırhın perfore olup olmadığına, kompozit zırhı oluşturan tabakaların absorbe edebildiği enerji miktarlarına, analiz süresi sonunda mermide kalan kinetik enerji miktarına bakılmıştır. Büyük Panel-1 harici tüm büyük ve küçük panellerin sayısal analizi bu şekilde gerçekleştirilmiştir.

Büyük Panel-1’ in yüksek hızlı çarpma testlerinde 4 atış yapıldığı için bu panelin sayısal analiz çalışmaları şu şekilde gerçekleştirilmiştir;

- 1. atışın sayısal analizi diğer tüm panellerde olduğu gibi yapılmıştır.
- 1. atış gerçekleştirildikten sonra merminin panelde maksimum penetrasyon derinliğinin (o mesafedeki merminin hızı da göz önünde bulundurularak) hangi zamanda oluştuğu tespit edilerek bu zaman dilimi referans alınmıştır.
- Referans alınan zamanda panelde meydana gelen gerilme değerleri “dynain” sonuç dosyası ile elde edilmiştir. Bu sonuç dosyasında sadece referans alınan zamanda zırhta meydana gelen gerilme değerleri mevcuttur. Bu yüzden 1. atış sonrası elde edilen

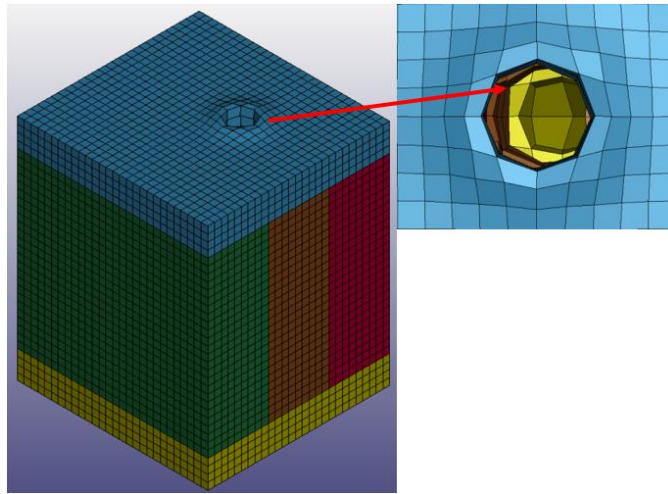
gerilmeler ile birlikte “dynain” sonuç dosyasının 2. atış için yeniden analiz edilebilmesi için sonuç dosyasında gerekli olan sınır koşullarının verilmesi, zırh ile mermi arasında “contact” tanımlarının yapılması, zırhı oluşturan malzemelerin modellenmesi ve analiz süresinin tanımlanması gibi ayarlamalar tekrar yapılmıştır. Böylece 2.atış için “dynain” dosyası analiz edilmeye hazır hale getirilmiştir.

Bu işlemler 3. ve 4. atışlar için de yapılarak Büyük Panel-1’ in 4 atışlı sayısal analizi tamamlanmıştır.

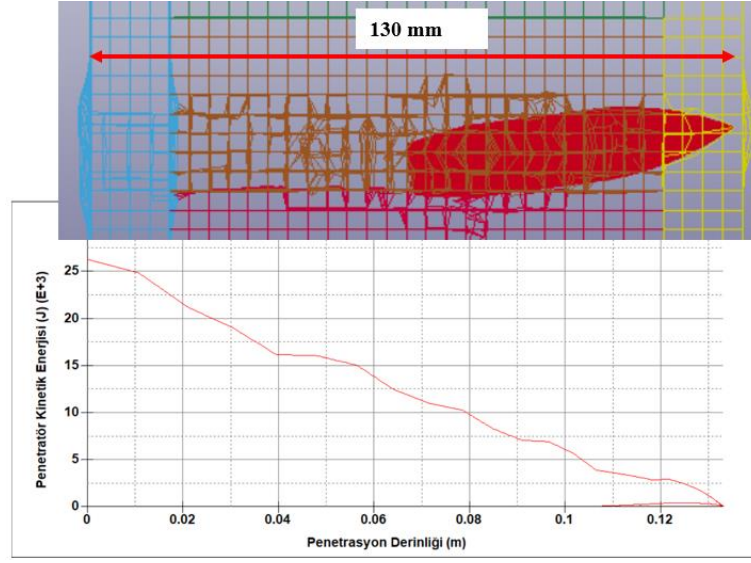
Büyük test panellerin sayısal analiz sonuçları deneysel sonuçlar ile kıyaslandığında sonuçların maksimum % 2.99 hata payıyla uyumlu olduğu görülmüştür. Yüksek hızlı çarpma test sonuçlarının uyumlu görülmesi sonrasında 132 mm (16 mm Zırh Çeliği + 100 mm Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Blok + 16 mm Zırh Çeliği) kalınlığına sahip panellerin sadece ön ve arka kısmında bulunan zırh çeliklerinin kalınlıkları değiştirilerek alan yoğunluğu düşürülmüş ve bu yeni konfigürasyonlu panellerin de STANAG 4569 Seviye-4 korumasını sağlayıp sağlamadığına bakmak maksadıyla sayısal analizler tekrarlanmıştır.

4.2. Küçük Panellerin Sayısal Analiz Sonuçları

Sayısal analiz sonucunda hiçbir küçük panel perfore olmamıştır. Şekil 4.16. ve Şekil 4.17.’ de görüldüğü üzere analiz süresi sonunda Küçük Panel-1’ in perfore olmadığı görülmüştür ve penetrasyon derinliği 130 mm’ dir.

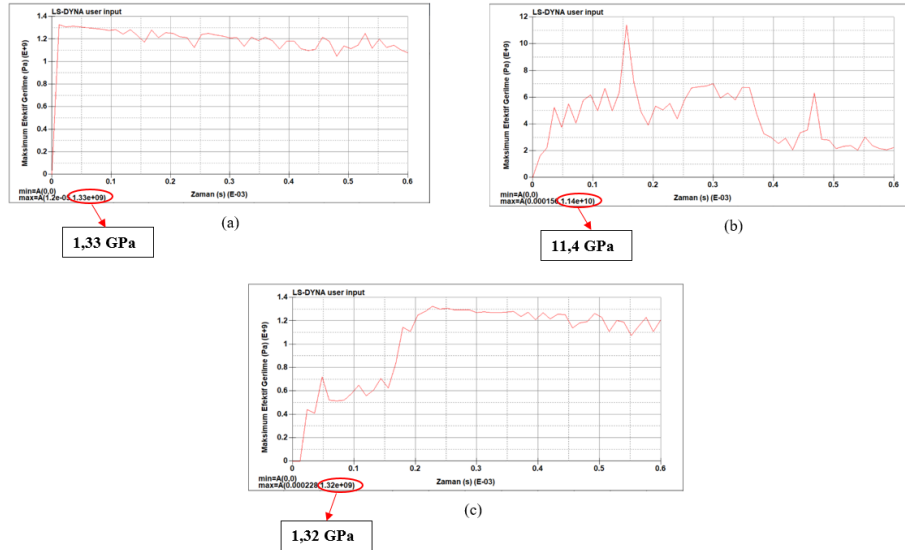


Şekil 4.16. Küçük Panel-1’ in Üstten Görünüşü



Şekil 4.17. Küçük Panel-1' in Analiz Süresi Sonunda Penetratör Kinetik Enerjisi-Penetrasyon Derinliği Grafiği

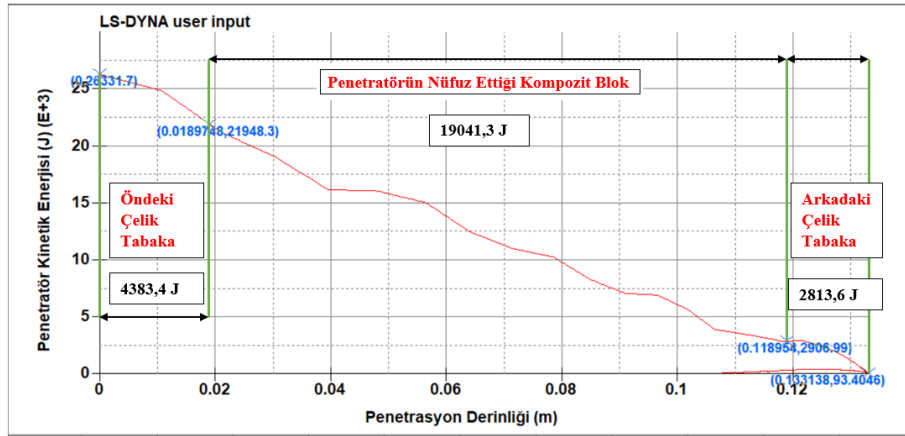
Küçük Panel-1' i oluşturan tabakalarda atış sonrası meydana gelen maksimum efektif gerilme değerleri ise Şekil 4.18.' de verilmiştir.



Şekil 4.18. Atış Sonrasında Küçük Panel-1' i Oluşturan Öndeki Çelik Tabakadaki (a), Kompozit Bloktaki (b) ve Arkadaki Çelik Tabakadaki (c) Maksimum Efektif Gerilme Değerleri

Küçük Panel-1' de öndeki çelik tabakanın maksimum efektif gerilme değeri 1,33 GPa iken arkadaki çelik tabakanın maksimum efektif gerilme değeri 1,32 GPa' dır. Ortadaki kompozit blokta oluşan maksimum efektif gerilme değeri ise 11,4 GPa' dır.

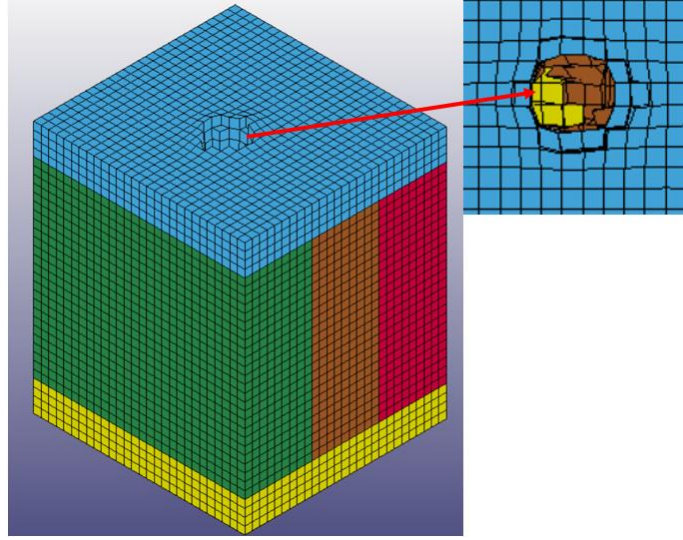
Küçük Panel-1' i oluşturan tabakaların yaklaşık olarak absorbe ettikleri enerjiler Şekil 4.19.' da verilmiştir. Öndeki zırh çeliği tabakasının yaklaşık 19 mm olarak gösterilmesinin nedeni penetratörün temasından önce önünde sürüklediği şok dalgasının hava yastığı biçimindeki ilk teması ve darbe etkisini gerçekleştirmesinden kaynaklanmaktadır. Bu yüzden büyük ve küçük panellerin sayısal analiz sonucunda elde edilen tabakaların absorbe ettiği enerji grafiklerinde öndeki çelik tabakanın absorbe ettiği enerji yaklaşık 19 mm dikkate alınarak gösterilmiştir.



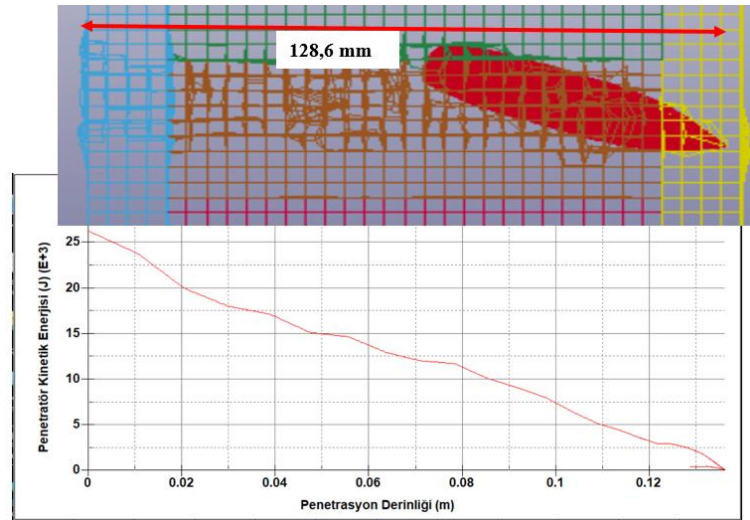
Şekil 4.19. Küçük Panel-1' i Oluşturan Tabakaların Atış Sonrasında Absorbe Ettiği Enerji Grafiği

Şekil 4.19.' da görüldüğü üzere penetratörün nüfuz ettiği kompozit blok 19041,3 J enerji absorbe ederken, öndeki çelik tabaka 4383,4 J, arkadaki çelik tabaka ise 2813,6 J enerji absorbe etmiştir.

Şekil 4.20. ve Şekil 4.21.' de görüldüğü üzere analiz süresi sonunda Küçük Panel-2' nin perfore olmadığı görülmüştür ve penetrasyon derinliği 128,6 mm' dir.

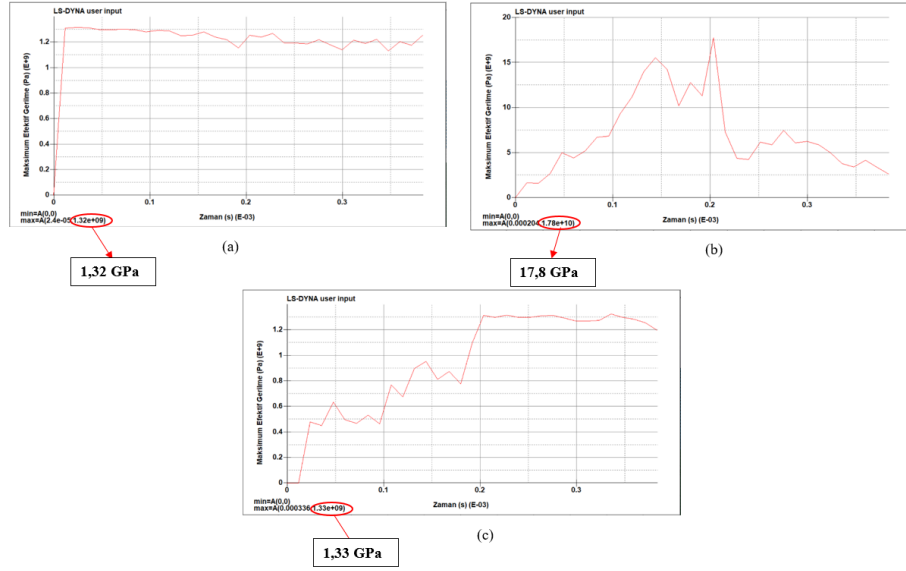


Şekil 4.20. Küçük Panel-2' nin Üstten Görünüşü



Şekil 4.21. Küçük Panel-2' nin Analiz Süresi Sonunda Penetratör Kinetik Enerjisi-Penetrasyon Derinliği Grafığı

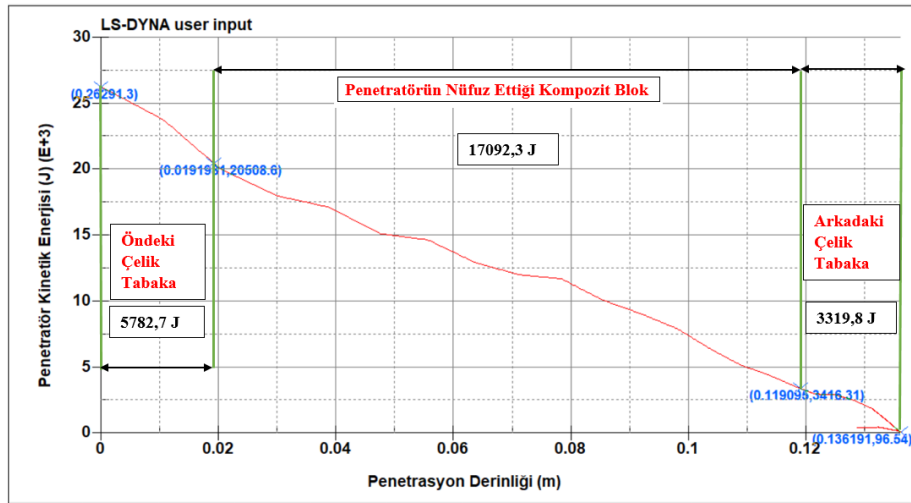
Küçük Panel-2' yi oluşturan tabakalarda atış sonrası meydana gelen maksimum efektif gerilme değerleri ise Şekil 4.22.' de verilmiştir.



Şekil 4.22. Atış Sonrasında Küçük Panel-2' yi Oluşturan Öndeki Çelik Tabakadaki (a), Kompozit Bloktaki (b) ve Arkadaki Çelik Tabakadaki (c) Maksimum Efektif Gerilme Değerleri

Küçük Panel-2' de öndeki ve arkadaki çelik tabakanın maksimum efektif gerilme değerleri hemen hemen aynı iken, ortadaki kompozit blokta oluşan maksimum efektif gerilme değeri 17,8 GPa' dır.

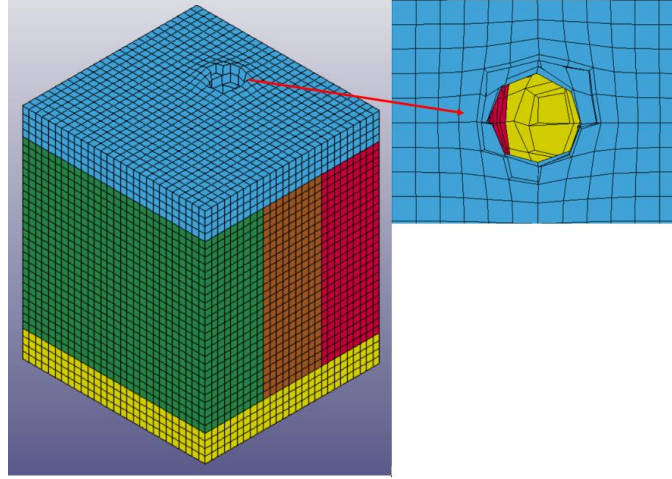
Küçük Panel-2' yi oluşturan tabakaların yaklaşık olarak absorbe ettikleri enerjiler Şekil 4.23.' te verilmiştir.



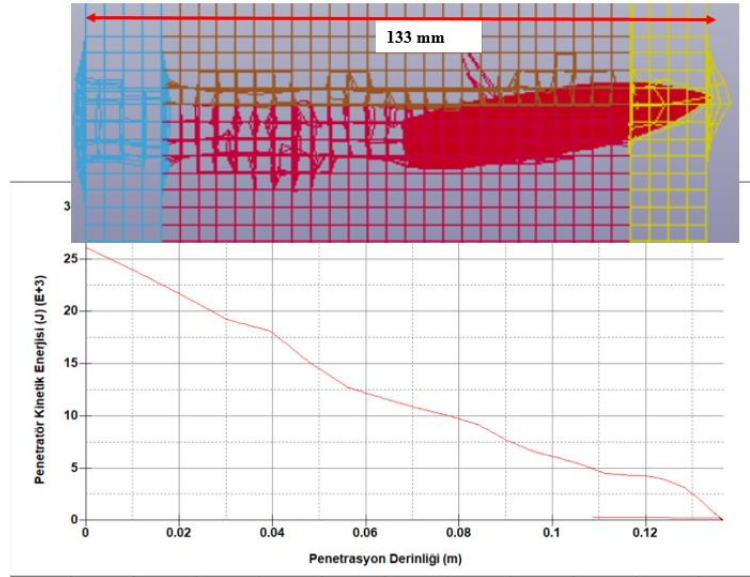
Şekil 4.23. Küçük Panel-2' yi Oluşturan Tabakaların Atış Sonrasında Absorbe Ettiği Enerji Grafiği

Şekil 4.23.' te görüldüğü üzere penetratörün nüfuz ettiği kompozit blok 17092,3 J enerji absorbe ederken, öndeki çelik tabaka 5782,7 J, arkadaki çelik tabaka ise 3319,8 J enerji absorbe etmiştir.

Şekil 4.24. ve Şekil 4.25.' te analiz süresi sonunda Küçük Panel-3' ün perfore olmadığı görülmüştür ve penetrasyon derinliği 133 mm' dir.

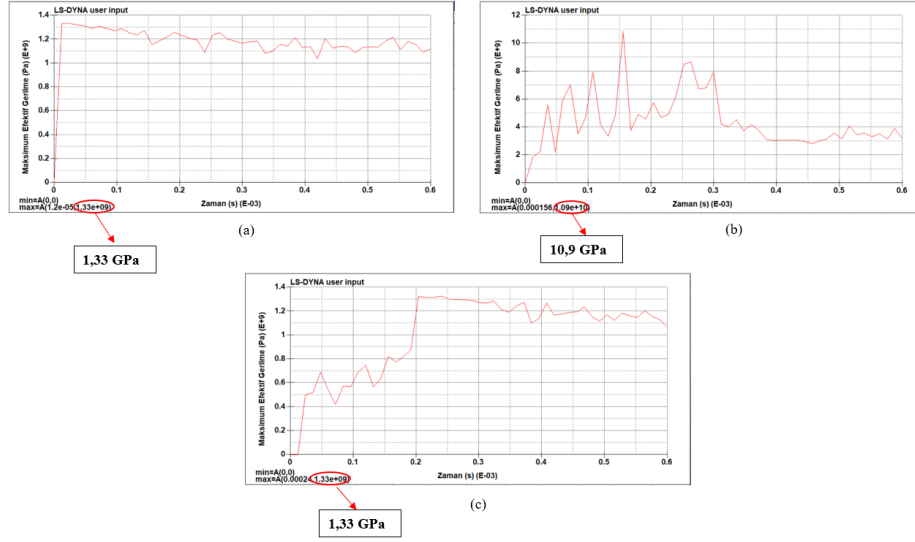


Şekil 4.24. Küçük Panel-3' ün Üstten Görünüşü



Şekil 4.25. Küçük Panel-3' ün Analiz Süresi Sonunda Penetratör Kinetik Enerjisi-Penetrasyon Derinliği Grafiği

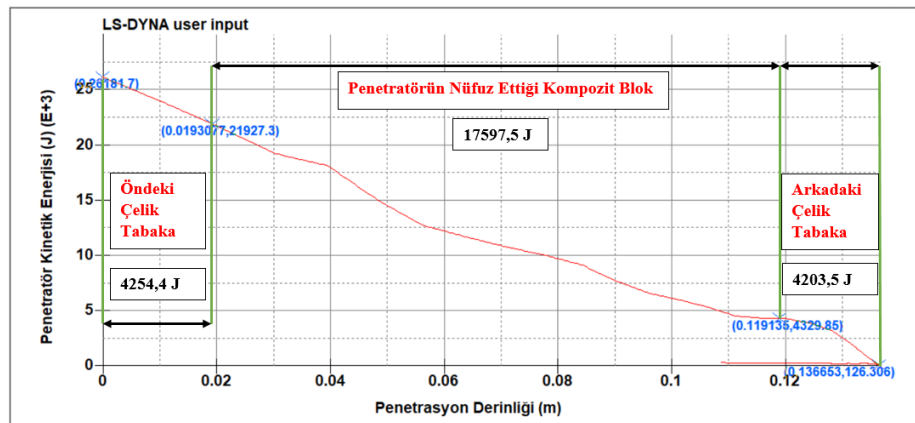
Küçük Panel-3' ü oluşturan tabakalarda atış sonrası meydana gelen maksimum efektif gerilme değerleri ise Şekil 4.26.' da verilmiştir.



Şekil 4.26. Atış Sonrasında Küçük Panel-3' ü Oluşturan Öndeki Çelik Tabakadaki (a), Kompozit Bloktaki (b) ve Arkadaki Çelik Tabakadaki (c) Maksimum Efektif Gerilme Değerleri

Küçük Panel-3' te öndeki ve arkadaki çelik tabakanın maksimum efektif gerilme değerleri aynı iken, ortadaki kompozit blokta oluşan maksimum efektif gerilme değeri 10,9 GPa' dır.

Küçük Panel-3' ü oluşturan tabakaların yaklaşık olarak absorbe ettikleri enerjiler Şekil 4.27.' de verilmiştir.

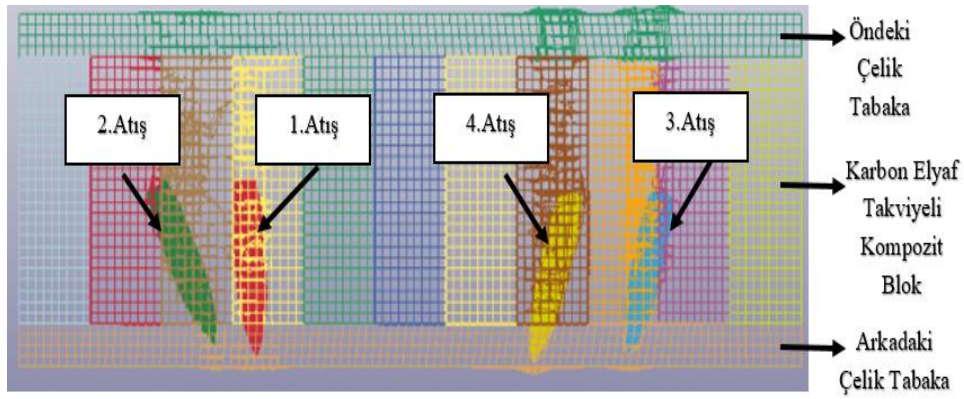


Şekil 4.27. Küçük Panel-3' ü Oluşturan Tabakaların Atış Sonrasında Absorbe Ettiği Enerji Grafığı

Şekil 4.27.' de görüldüğü üzere penetratörün nüfuz ettiği kompozit blok 17597,5 J enerji absorbe ederken, öndeki çelik tabaka 4254,4 J, arkadaki çelik tabaka ise 4203,5 J enerji absorbe etmiştir.

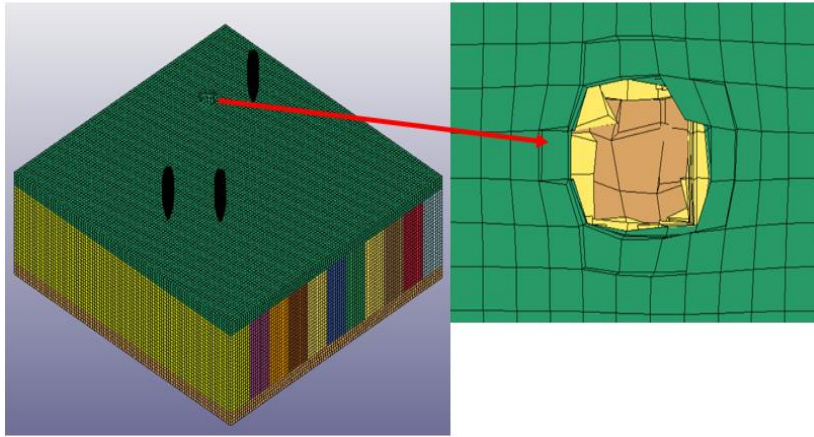
4.3. Büyük Panellerin Sayısal Analiz Sonuçları

Büyük panellerin sayısal analiz sonucunda hiçbir büyük panel perfore olmamıştır. Şekil 4.28.' de görüldüğü üzere Büyük Panel-1' e 4 atış yapılmıştır.

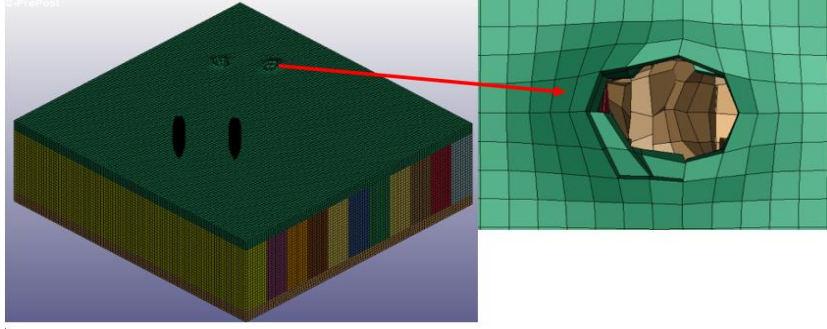


Şekil 4.28. Büyük Panel-1' in 4 Atışlı Sayısal Analizi

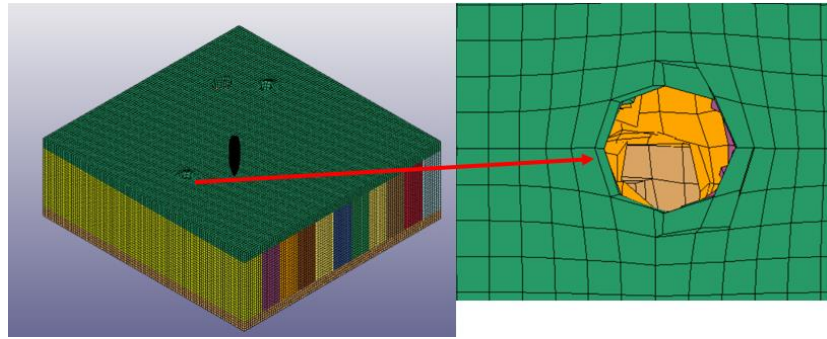
4 atışa sahip Büyük Panel-1' in sayısal analizi sonunda penetratörlerin vurdukları yerde test panelini delemediği görülmüştür (Şekil 4.29.-Şekil 4.32.).



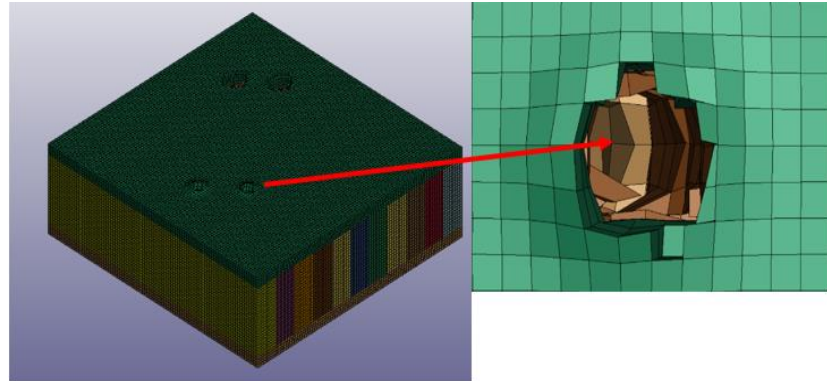
Şekil 4.29. Büyük Panel-1' in 1. Atış Sonrası Üstten Görünüşü



Şekil 4.30. Büyük Panel-1' in 2. Atış Sonrası Üstten Görünüşü

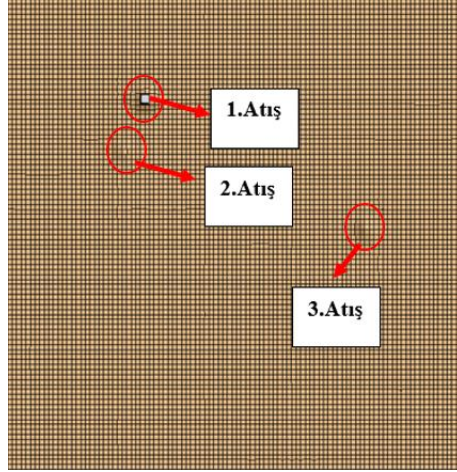


Şekil 4.31. Büyük Panel-1' in 3. Atış Sonrası Üstten Görünüşü



Şekil 4.32. Büyük Panel-1' in 4. Atış Sonrası Üstten Görünüşü

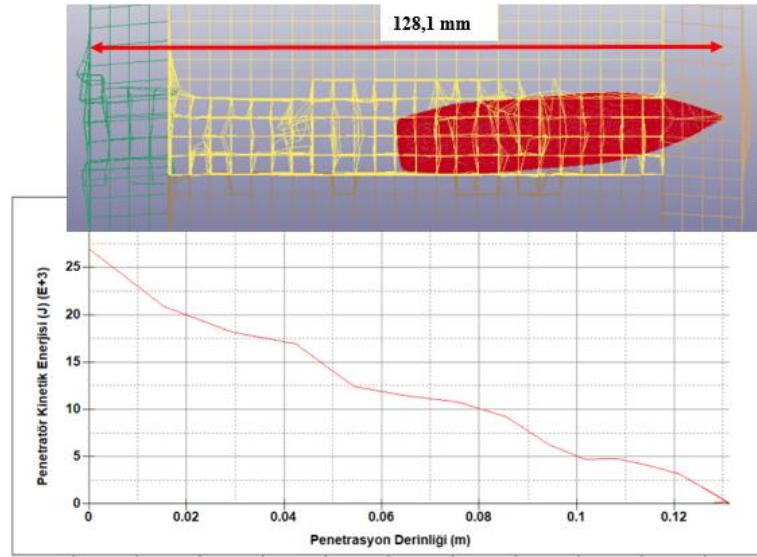
Büyük Panel-1' in 3. atışı yapıldıktan sonra 1. atışın yapıldığı yerde penetratör hareket etmediği halde panelin arka çelik tabakasında delinme meydana geldiği tespit edilmiştir (Şekil 4.33.).



Şekil 4.33. Büyük Panel-1' in 3. Atış Sonrası Arka Görüntüsü

Bu durumun 1.atışın yapıldığı yerdeki panelin arka tarafındaki zırh çeliğinin 1. ve 2. atış sonrasında çok fazla hasara uğramış olmasından dolayı olduğu düşünülmektedir.

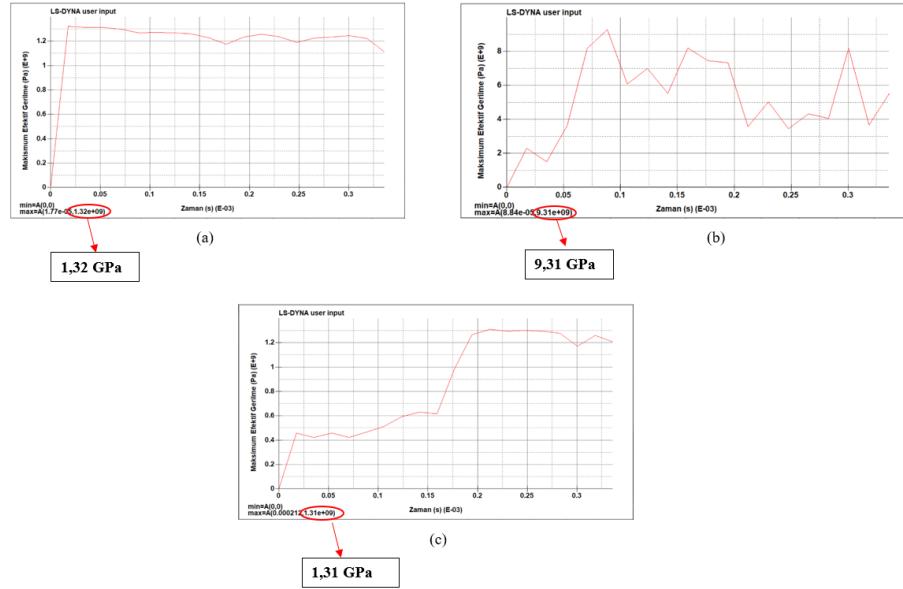
4 atış sonrasında atışlar tek tek incelendiğinde ise 1. atış sonrasında panelde meydana gelen penetrasyon derinliği Şekil 4.34.' te verilmiştir.



Şekil 4.34. Büyük Panel-1' in 1. Atış Analiz Süresi Sonunda Penetratör Kinetik Enerjisi- Penetrasyon Derinliği Grafığı

Şekil 4.34.' te görüldüğü üzere analiz süresi sonunda Büyük Panel-1 1. atış sonrasında perfore olmamıştır ve penetrasyon derinliği 128,1 mm' dir.

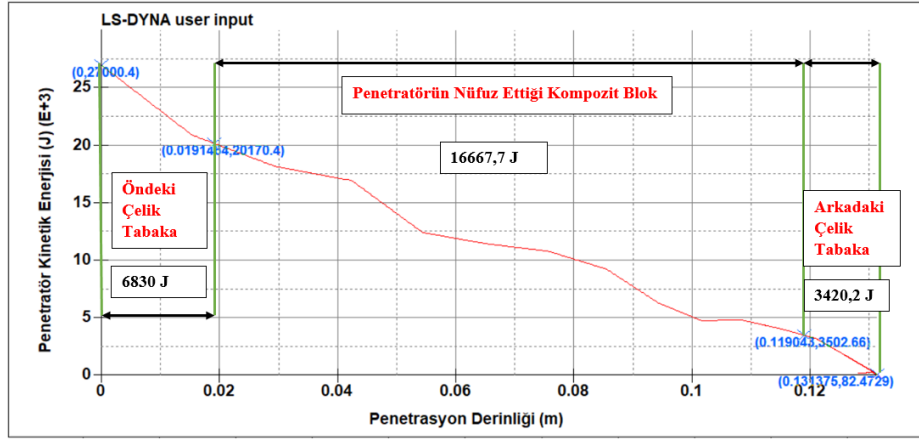
1. atış sonrası Büyük Panel-1' i oluşturan tabakalarda meydana gelen maksimum efektif gerilme değerleri ise Şekil 4.35.' te verilmiştir.



Şekil 4.35. 1. Atış Sonrasında Büyük Panel-1' i Oluşturan Öndeki Çelik Tabakadaki (a), Kompozit Bloktaki (b) ve Arkadaki Çelik Tabakadaki (c) Maksimum Efektif Gerilme Değerleri

1. atış sonrasında Büyük Panel-1' de öndeki ve arkadaki çelik tabakanın maksimum efektif gerilme değerleri hemen hemen aynı iken, ortadaki kompozit bloкта oluşan maksimum efektif gerilme değeri 9,31 GPa' dır.

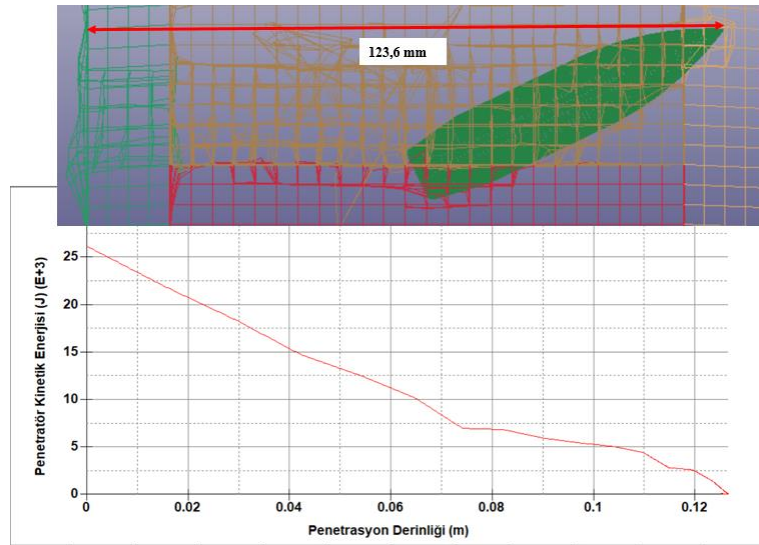
1. atış sonrasında Büyük Panel-1' i oluşturan tabakaların yaklaşık olarak absorbe ettikleri enerjiler ise Şekil 4.36.' da verilmiştir.



Şekil 4.36. Büyük Panel-1' i Oluşturan Tabakaların 1. Atış Sonrasında Absorbe Ettiği Enerji Grafiği

Şekil 4.36.' da görüldüğü üzere penetratörün nüfuz ettiği kompozit blok 16667,7 J enerji absorbe ederken, öndeki çelik tabaka 6830 J, arkadaki çelik tabaka ise 3420,2 J enerji absorbe etmiştir.

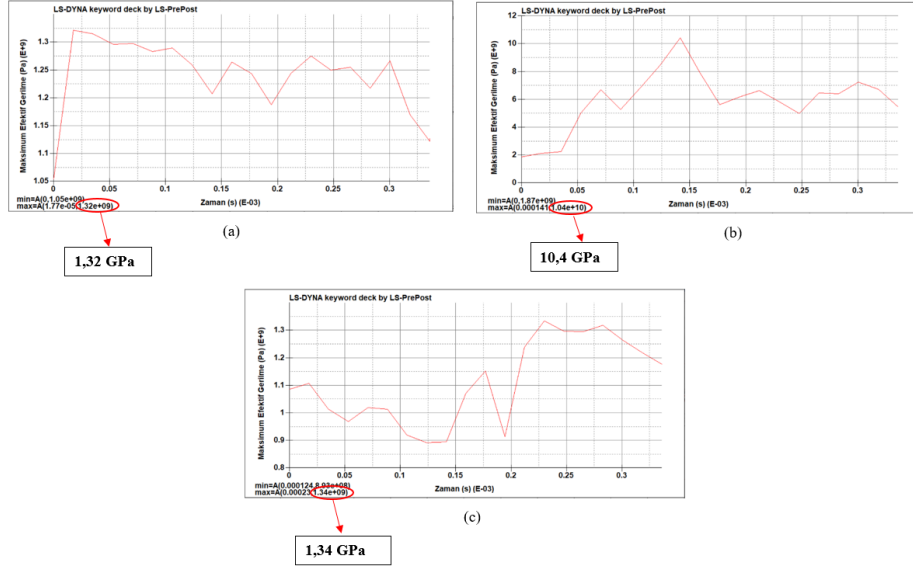
Büyük Panel-1' in 2. atışı sonrasında penetratörün kinetik enerjisine göre panelde meydana gelen penetrasyon derinliği Şekil 4.37.' de verilmiştir.



Şekil 4.37. Büyük Panel-1' in 2. Atış Analiz Süresi Sonunda Penetratör Kinetik Enerjisi- Penetrasyon Derinliği Grafiği

Şekil 4.37.' de görüldüğü üzere analiz süresi sonunda Büyük Panel-1 2. atış sonrasında da perfore olmamıştır ve penetrasyon derinliği 123,6 mm' dir.

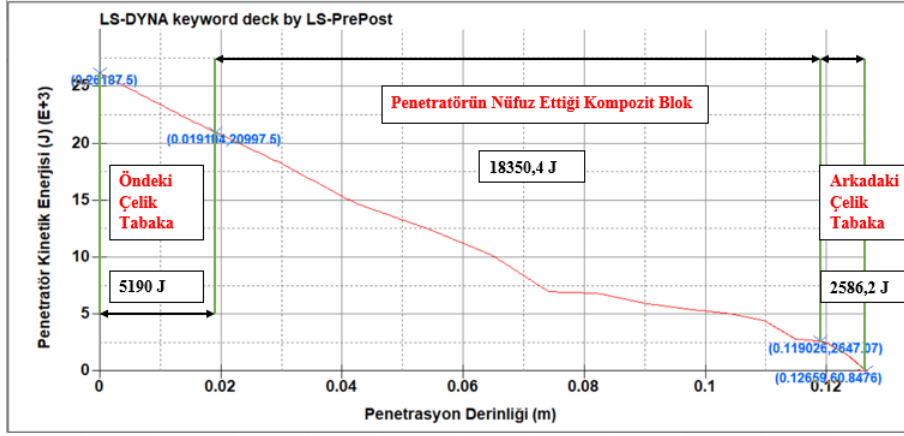
2. atış sonrası Büyük Panel-1' i oluşturan tabakalarda meydana gelen maksimum efektif gerilme değerleri ise Şekil 4.38.' de verilmiştir.



Şekil 4.38. 2. Atış Sonrasında Büyük Panel-1' i Oluşturan Öndeki Çelik Tabakadaki (a), Kompozit Bloktaki (b) ve Arkadaki Çelik Tabakadaki (c) Maksimum Efektif Gerilme Değerleri

2. atış sonrasında Büyük Panel-1' de öndeki ve arkadaki çelik tabakanın maksimum efektif gerilme değerleri hemen hemen aynı iken, ortadaki kompozit bloкта oluşan maksimum efektif gerilme değeri 10,4 GPa' dır.

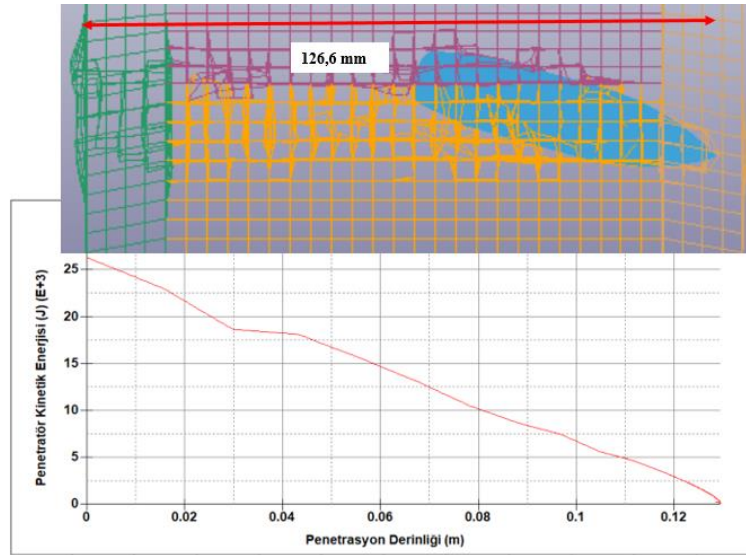
2. atış sonrasında Büyük Panel-1' i oluşturan tabakaların yaklaşık olarak absorbe ettikleri enerjiler ise Şekil 4.39.' da verilmiştir.



Şekil 4.39. Büyük Panel-1' i Oluşturan Tabakaların 2. Atış Sonrasında Absorbe Ettiği Enerji Grafiği

Şekil 4.39.' da görüldüğü üzere penetratörün nüfuz ettiği kompozit blok 18350,4 J enerji absorbe ederken, öndeki çelik tabaka 5190 J, arkadaki çelik tabaka ise 2586,2 J enerji absorbe etmiştir.

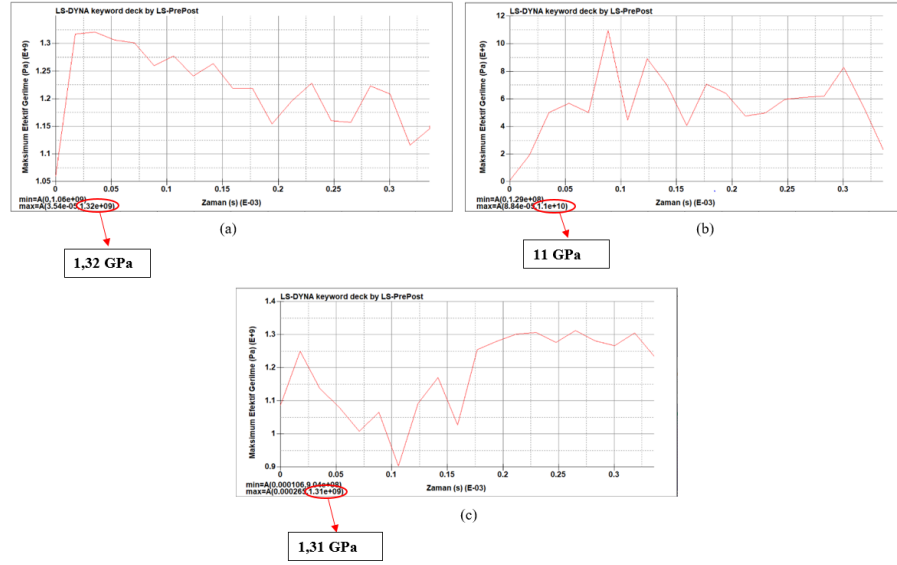
3. atış sonrasında penetratörün kinetik enerjisine göre panelde meydana gelen penetrasyon derinliği Şekil 4.40.' ta verilmiştir.



Şekil 4.40. Büyük Panel-1' in 3. Atış Analiz Süresi Sonunda Penetratör Kinetik Enerjisi-Penetrasyon Derinliği Grafiği

Şekil 4.40.' ta görüldüğü üzere analiz süresi sonunda Büyük Panel-1 3. atış sonrasında da perfore olmamıştır ve penetrasyon derinliği 126,6 mm' dir.

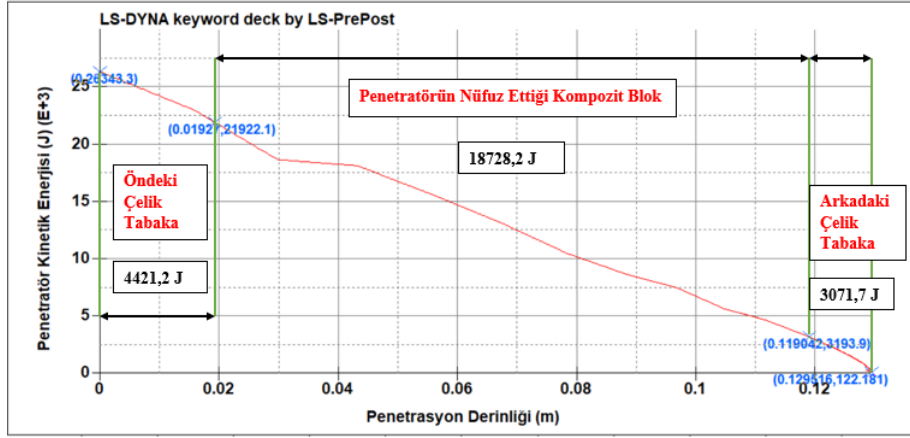
3. atış sonrası Büyük Panel-1' i oluşturan tabakalarda meydana gelen maksimum efektif gerilme değerleri ise Şekil 4.41.' de verilmiştir.



Şekil 4.41. 3. Atış Sonrasında Büyük Panel-1' i Oluşturan Öndeki Çelik Tabakadaki (a), Kompozit Bloktaki (b) ve Arkadaki Çelik Tabakadaki (c) Maksimum Efektif Gerilme Değerleri

3. atış sonrasında Büyük Panel-1' de öndeki ve arkadaki çelik tabakanın maksimum efektif gerilme değerleri hemen hemen aynı iken, ortadaki kompozit bloкта oluşan maksimum efektif gerilme değeri 11 GPa' dır.

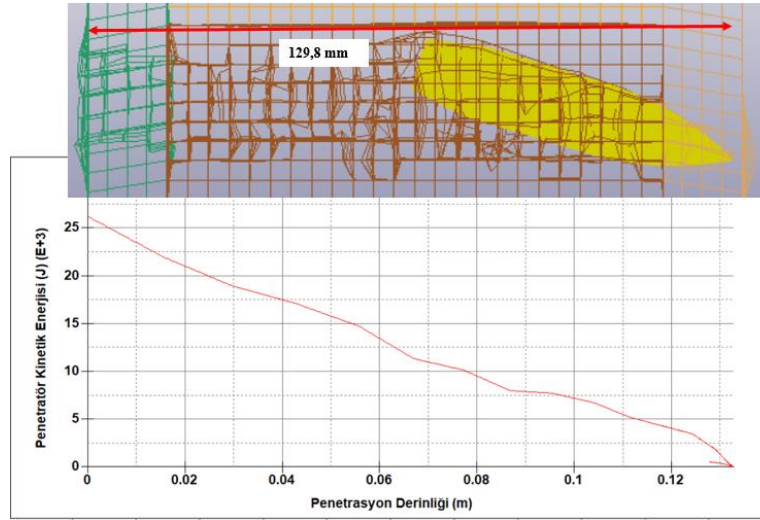
3. atış sonrasında Büyük Panel-1' i oluşturan tabakaların yaklaşık olarak absorbe ettikleri enerjiler ise Şekil 4.42.' de verilmiştir.



Şekil 4.42. Büyük Panel-1' i Oluşturan Tabakaların 3. Atış Sonrasında Absorbe Ettiği Enerji Grafığı

Şekil 4.42.' de görüldüğü üzere penetratörün nüfuz ettiği kompozit blok 18728,2 J enerji absorbe ederken, öndeki çelik tabaka 4421,2 J, arkadaki çelik tabaka ise 3071,7 J enerji absorbe etmiştir.

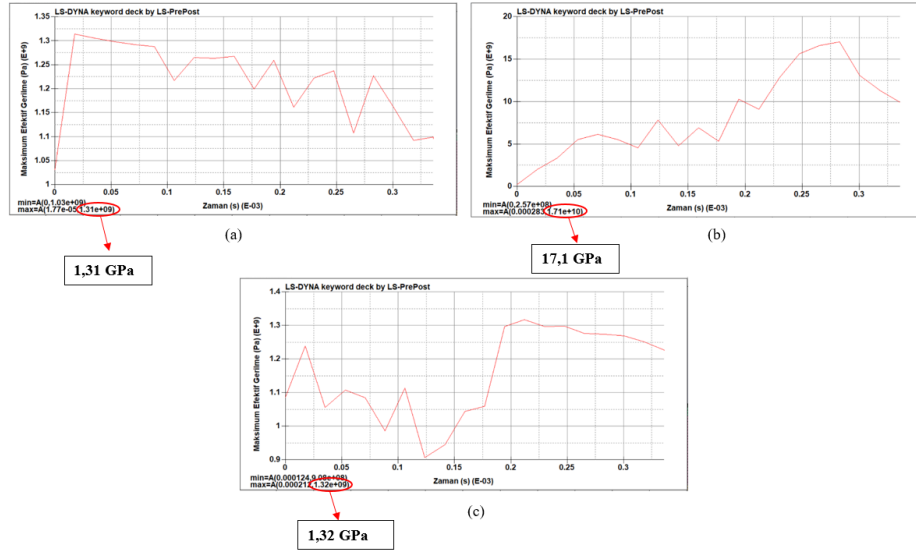
4. atış sonrasında penetratörün kinetik enerjisine göre panelde meydana gelen penetrasyon derinliği Şekil 4.43.' te verilmiştir.



Şekil 4.43. Büyük Panel-1' in 4. Atış Analiz Süresi Sonunda Penetratör Kinetik Enerjisi-Penetrasyon Derinliği Grafığı

Şekil 4.43.' te görüldüğü üzere analiz süresi sonunda Büyük Panel-1 4. atış sonrasında da perfore olmamıştır ve penetrasyon derinliği 129,8 mm' dir.

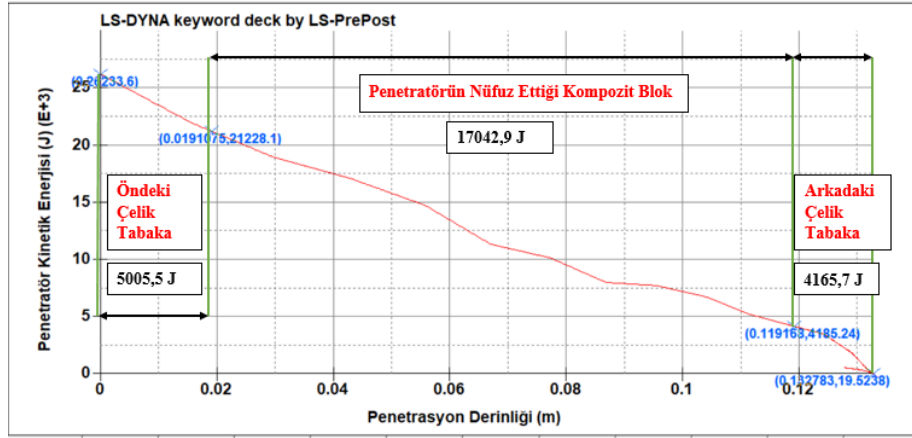
4. atış sonrası Büyük Panel-1' i oluşturan tabakalarda meydana gelen maksimum efektif gerilme değerleri ise Şekil 4.44.' te verilmiştir.



Şekil 4.44. 4. Atış Sonrasında Büyük Panel-1' i Oluşturan Öndeki Çelik Tabakadaki (a), Kompozit Bloktaki (b) ve Arkadaki Çelik Tabakadaki (c) Maksimum Efektif Gerilme Değerleri

4. atış sonrasında Büyük Panel-1' de öndeki ve arkadaki çelik tabakanın maksimum efektif gerilme değerleri hemen hemen aynı iken, ortadaki kompozit bloкта oluşan maksimum efektif gerilme değeri 17,1 GPa' dır.

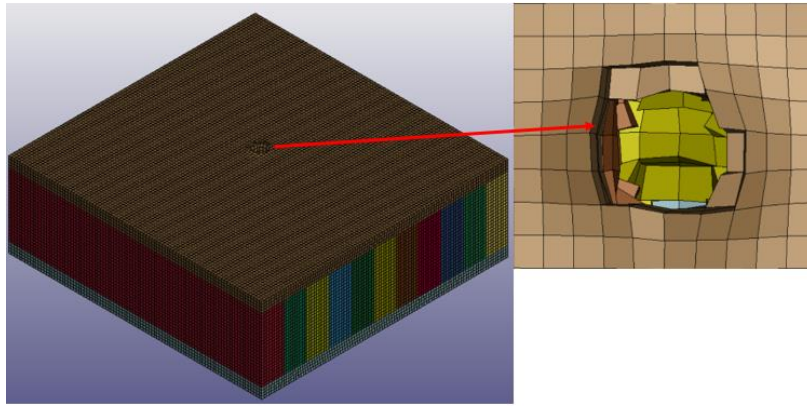
4. atış sonrasında Büyük Panel-1' i oluşturan tabakaların yaklaşık olarak absorbe ettikleri enerjiler ise Şekil 4.45.' te verilmiştir.



Şekil 4.45. Büyük Panel-1' i Oluşturan Tabakaların 4. Atış Sonrasında Absorbe Ettiği Enerji Grafiği

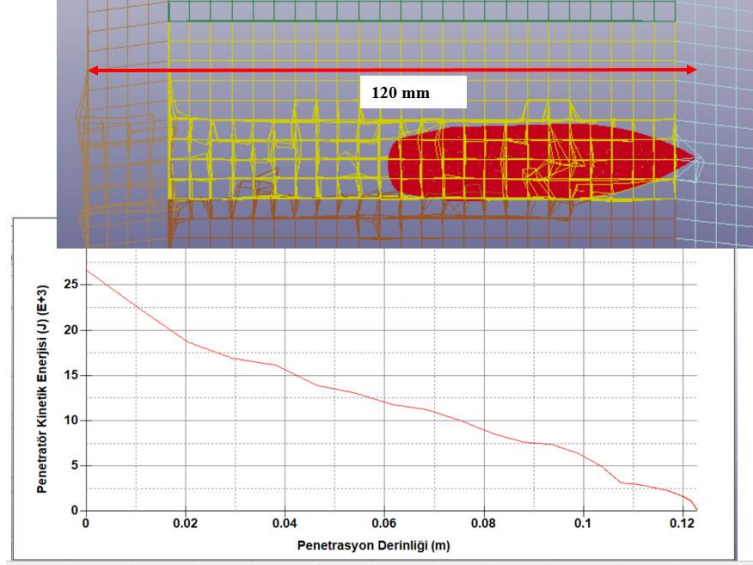
Şekil 4.45.' te görüldüğü üzere penetratörün nüfuz ettiği kompozit blok 17042,9 J enerji absorbe ederken, öndeki çelik tabaka 5005,5 J, arkadaki çelik tabaka ise 4165,7 J enerji absorbe etmiştir.

Büyük Panel-2' nin sayısal analizi sonunda penetratörün test panelini delemediği görülmüştür (Şekil 4.46.).



Şekil 4.46. Büyük Panel-2' nin Atış Sonrası Üstten Görünüşü

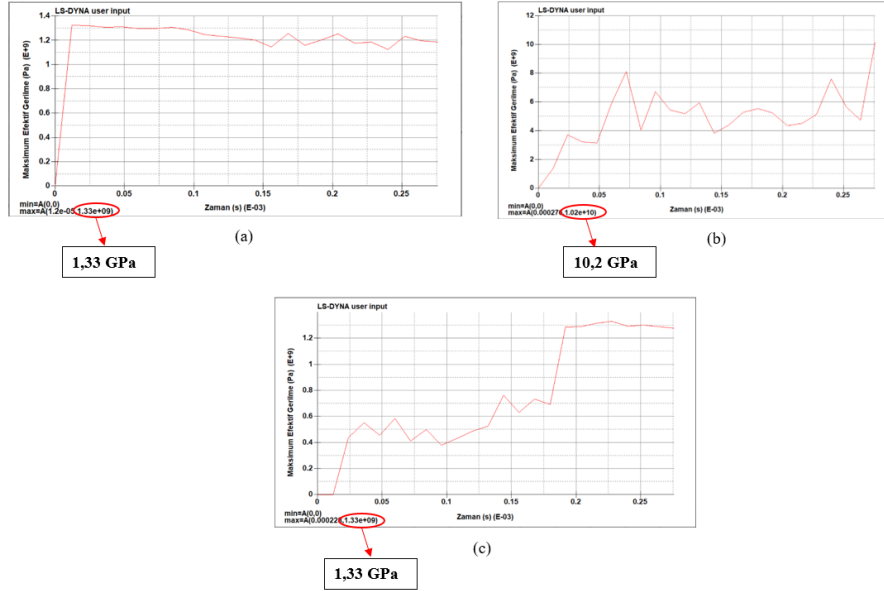
Atış sonrasında penetratörün kinetik enerjisine göre panelde meydana gelen penetrasyon derinliği Şekil 4.47.' de verilmiştir.



Şekil 4.47. Büyük Panel-2' nin Analiz Süresi Sonunda Penetratör Kinetik Enerjisi-Penetrasyon Derinliği Grafiği

Şekil 4.47.' de görüldüğü üzere analiz süresi sonunda Büyük Panel-2 perfore olmamıştır ve penetrasyon derinliği 120 mm' dir.

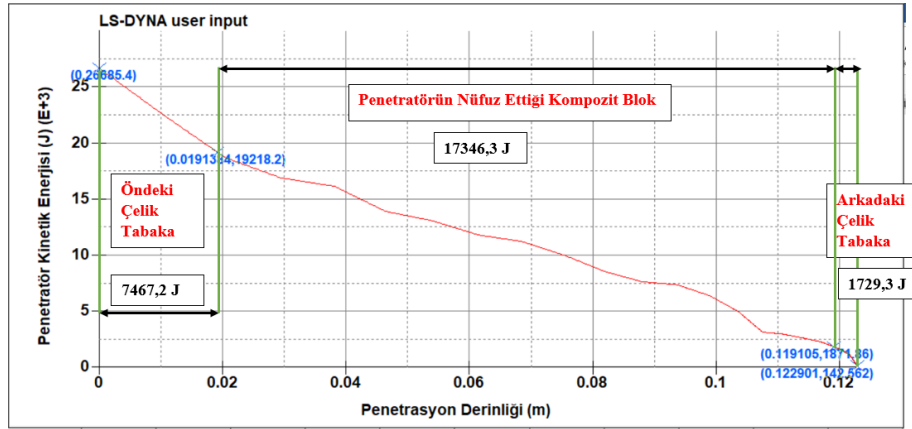
Atış sonrası Büyük Panel-2' yi oluşturan tabakalarda meydana gelen maksimum efektif gerilme değerleri ise Şekil 4.48.' de verilmiştir.



Şekil 4.48. Atış Sonrasında Büyük Panel-2' yi Oluşturan Öndeki Çelik Tabakadaki (a), Kompozit Bloktaki (b) ve Arkadaki Çelik Tabakadaki (c) Maksimum Efektif Gerilme Değerleri

Büyük Panel-2' de öndeki ve arkadaki çelik tabakanın maksimum efektif gerilme değerleri aynı iken, ortadaki kompozit blokta oluşan maksimum efektif gerilme değeri 10,2 GPa' dır.

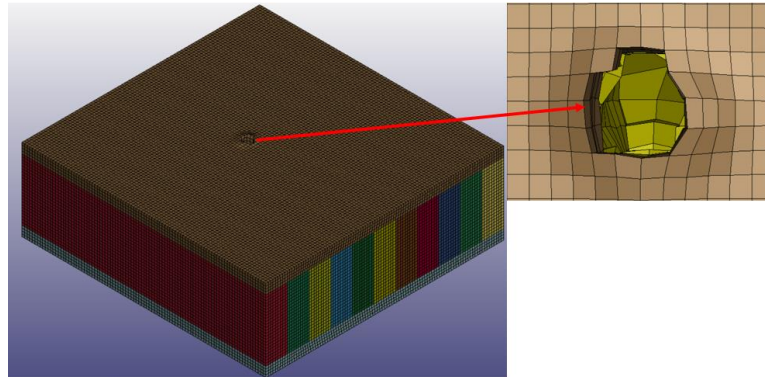
Atış sonrasında Büyük Panel-2' yi oluşturan tabakaların yaklaşık olarak absorbe ettikleri enerjiler ise Şekil 4.49.' da verilmiştir.



Şekil 4.49. Büyük Panel-2' yi Oluşturan Tabakaların Atış sonrasında Absorbe Ettiği Enerji Grafığı

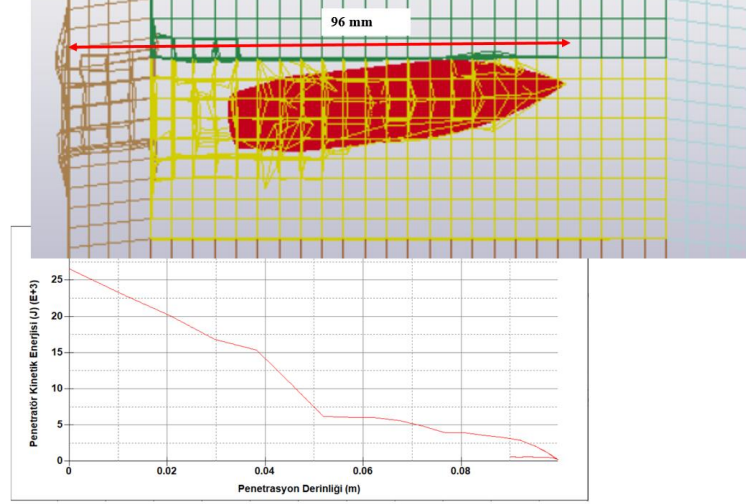
Şekil 4.49.' da görüldüğü üzere penetratörün nüfuz ettiği kompozit blok 17346,3 J enerji absorbe ederken, öndeki çelik tabaka 7467,2 J, arkadaki çelik tabaka ise 1729,3 J enerji absorbe etmiştir.

Büyük Panel-3 diğer panellerde olduğu gibi atış sonrasında perfore olmamıştır (Şekil 4.50.).



Şekil 4.50. Büyük Panel-3' ün Atış Sonrası Üstten Görünüşü

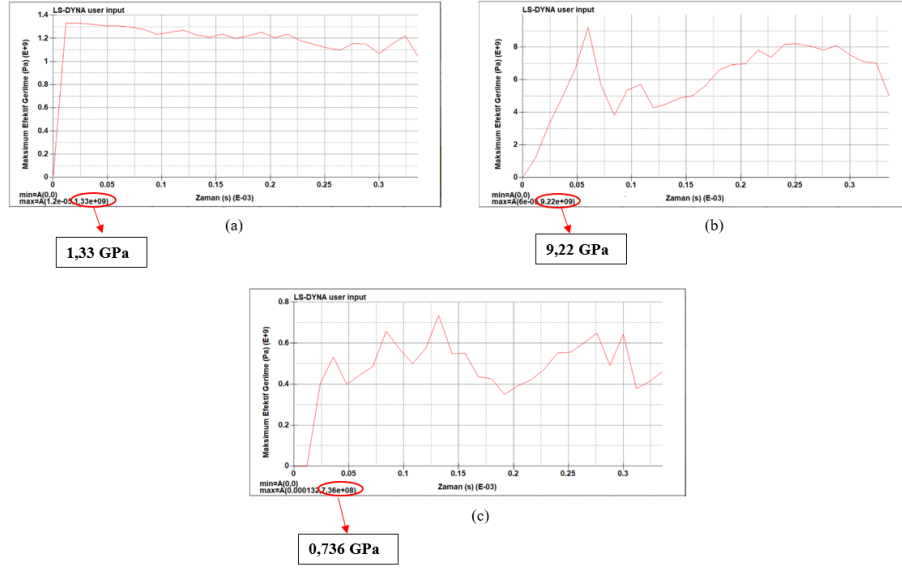
Atış sonrasında penetratörün kinetik enerjisine göre panelde meydana gelen penetrasyon derinliği Şekil 4.51.' de verilmiştir.



Şekil 4.51. Büyük Panel-3' ün Analiz Süresi Sonunda Penetratör Kinetik Enerjisi-Penetrasyon Derinliği Grafiği

Şekil 4.51.' de görüldüğü üzere analiz süresi sonunda Büyük Panel-3 perfore olmamıştır ve penetrasyon derinliği 96 mm' dir.

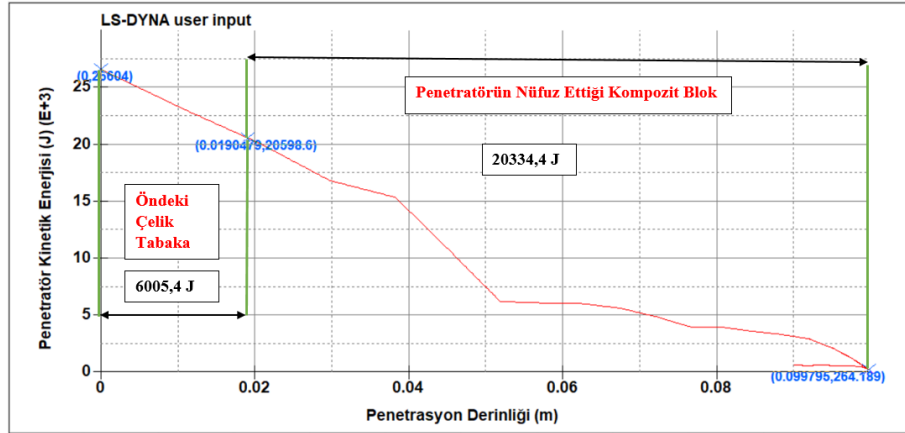
Atış sonrası Büyük Panel-3' ü oluşturan tabakalarda meydana gelen maksimum efektif gerilme değerleri ise Şekil 4.52.' de verilmiştir.



Şekil 4.52. Atış Sonrasında Büyük Panel-3' ü Oluşturan Öndeki Çelik Tabakadaki (a), Kompozit Bloktaki (b) ve Arkadaki Çelik Tabakadaki (c) Maksimum Efektif Gerilme Değerleri

Büyük Panel-3' te öndeki çelik tabakanın maksimum efektif gerilme değeri 1,33 GPa iken, arkadaki çelik tabakanın maksimum efektif gerilme değeri 0,736 GPa' dır. Ortadaki kompozit blokta oluşan maksimum efektif gerilme değeri ise 9,22 GPa' dır.

Atış sonrasında Büyük Panel-3' ü oluşturan tabakaların yaklaşık olarak absorbe ettikleri enerjiler ise Şekil 4.53.' te verilmiştir.



Şekil 4.53. Büyük Panel-3' ü Oluşturan Tabakaların Atış sonrasında Absorbe Ettiği Enerji Grafiği

Şekil 4.53.' de görüldüğü üzere penetratörün nüfuz ettiği kompozit blok 20334,4 J enerji absorbe ederken, öndeki çelik tabaka 6005,4 J absorbe etmiştir.

Büyük ve küçük panellerin yüksek hızlı atış sayısal analizleri sonucunda panelleri oluşturan tabakaların giriş enerjileri ile yaklaşık olarak absorbe ettikleri enerjiler Tablo 4.3.' te verilmiştir.

Tablo 4.3. Sayısal Analiz Sonucunda Merminin Panellerdeki Tabakalara Giriş Enerjisi ile Panellerdeki Tabakaların Absorbe Ettikleri Enerjiler

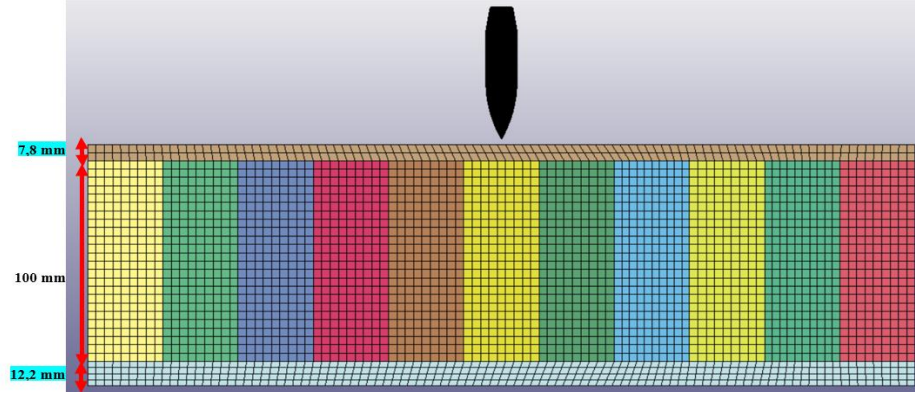
| Paneller | | Merminin Tabakaya Giriş Enerjisi (J) | Tabakanın Absorbe Ettiği Enerji (J) | |
|---------------|---|---|-------------------------------------|---------|
| Küçük Panel-1 | Öndeki Çelik Tabaka | 26331,7 | 4383,4 | |
| | Penetratörün Nüfuz Ettiği Kompozit Blok | 21948,3 | 19041,3 | |
| | Arkadaki Çelik Tabaka | 2906,9 | 2813,6 | |
| Küçük Panel-2 | Öndeki Çelik Tabaka | 26291,3 | 5782,7 | |
| | Penetratörün Nüfuz Ettiği Kompozit Blok | 20508,6 | 17092,3 | |
| | Arkadaki Çelik Tabaka | 3416,31 | 3319,8 | |
| Küçük Panel-3 | Öndeki Çelik Tabaka | 26181,7 | 4254,4 | |
| | Penetratörün Nüfuz Ettiği Kompozit Blok | 21927,3 | 17597,5 | |
| | Arkadaki Çelik Tabaka | 4329,85 | 4203,5 | |
| Büyük Panel-1 | 1. Atış | Öndeki Çelik Tabaka | 27000,4 | 6830 |
| | | Penetratörün Nüfuz Ettiği Kompozit Blok | 20170,4 | 16667,7 |
| | | Arkadaki Çelik Tabaka | 3502,66 | 3420,2 |
| | 2. Atış | Öndeki Çelik Tabaka | 26187,5 | 5190 |
| | | Penetratörün Nüfuz Ettiği Kompozit Blok | 20997,5 | 18350,4 |
| | | Arkadaki Çelik Tabaka | 2647,07 | 2586,2 |
| | 3. Atış | Öndeki Çelik Tabaka | 26343,3 | 4421,2 |
| | | Penetratörün Nüfuz Ettiği Kompozit Blok | 21922,1 | 18728,2 |
| | | Arkadaki Çelik Tabaka | 3193,9 | 3071,7 |

Tablo 4.3. devam ediyor.

| | | | | |
|---------------|---------|---|---------|---------|
| | 4. Atış | Öndeki Çelik Tabaka | 26233,6 | 5005,5 |
| | | Penetratörün Nüfuz Ettiği Kompozit Blok | 21228,1 | 17042,9 |
| | | Arkadaki Çelik Tabaka | 4185,24 | 4165,7 |
| Büyük Panel-2 | | Öndeki Çelik Tabaka | 26685,4 | 7467,2 |
| | | Penetratörün Nüfuz Ettiği Kompozit Blok | 19218,2 | 17346,3 |
| | | Arkadaki Çelik Tabaka | 1871,86 | 1729,3 |
| Büyük Panel-3 | | Öndeki Çelik Tabaka | 26604 | 6005,4 |
| | | Penetratörün Nüfuz Ettiği Kompozit Blok | 20598,6 | 20334,4 |
| | | Arkadaki Çelik Tabaka | - | - |

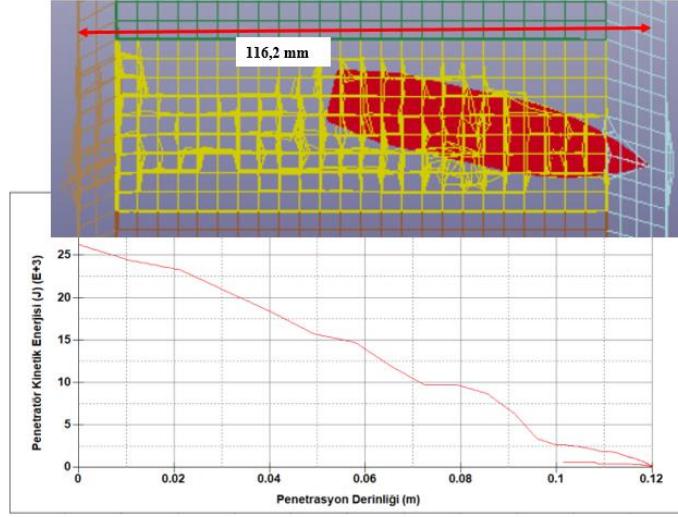
4.4. Alan Yoğunluğu Düşürülmüş Panelin Sayısal Analizleri

Büyük panellerin yüksek hızlı çarpma testleri sonuçları ile sayısal analiz sonuçlarının uyumlu görülmesi ile (sayısal ve deneysel verilerin uyumluluğuna ilişkin ayrıntılar 5. Bölümde verilmiştir) 132 mm kalınlığındaki (16 mm zırh çeliği + 100 mm karbon elyaf takviyeli kompozit blok + 16 mm zırh çeliği) panelin sadece ön ve arka kısmında bulunan zırh çeliklerinin kalınlıkları değiştirilmiş ve alan yoğunluğu düşürülmüş panellerin STANAG 4569 Seviye-4 korumasını sağlayıp sağlamadığına sayısal analizleri yapılarak bakılmıştır. Sayısal analizlere öncelikle öndeki zırh çeliğinin kalınlığı (16 mm) sabit tutulup arkadaki zırh çeliğinin kalınlığı değiştirilerek başlanmıştır. Daha sonra arkadaki zırh çeliğinin kalınlığı (16 mm) sabit tutulup, öndeki zırh çeliğinin kalınlığı azaltılarak analizlere devam edilmiştir. Arkadaki zırh çeliğinin 16 mm öndeki zırh çeliğinin 8 mm olduğu konfigürasyonun sayısal analiz sonucunda panelin STANAG 4569 Seviye-4 korumasını sağlaması üzerine delinmeyecek en düşük ön ve arka tabakanın kalınlığını bulmak için ön ve arka zırh çeliklerinin kalınlıklarının toplamı 17 mm, 17,6 mm, 18 mm ve 20 mm olacak şekilde çeşitli konfigürasyonlar oluşturularak alan yoğunluğu düşürülmüş panelin sayısal analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucunda toplam kalınlığı 120 mm olan kompozit zırhın öndeki zırh çeliği kalınlığı 7,8 mm ve arkadaki zırh çeliği kalınlığı 12,2 mm olan konfigürasyonun olması durumunda Seviye-4 korumasını sağladığı tespit edilmiştir (Şekil 4.54.).



Şekil 4.54. STANAG 4569 Seviye-4 Korumasını Sağlamış Toplam Kalınlığı 120 mm Olan Kompozit Zırh

Şekil 4.54.' te görüldüğü üzere atış sonrasında panel perfore olmamıştır. Penetratörün kinetik enerjisi sıfıra eriştiğinde çok tabakalı zırhtaki penetrasyon derinliği 116,2 mm olmuştur (Şekil 4.55.).



Şekil 4.55. Toplam Kalınlığı 120 mm olan Kompozit Zırhın Analiz Süresi Sonunda Penetratörün Kinetik Enerjisi-Penetrasyon Derinliği Grafiği

4.5. Bulgular ve Tartışma

Sayısal çalışmalar sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir;

1) STANAG 4569 Seviye-4 için kullanılan penetratörün yüksek hızlı çarpma testleri yapılan büyük ve küçük panelleri perfore edemediği (Şekil 4.16., Şekil 4.20., Şekil 4.24., Şekil 4.29. - Şekil 4.32., Şekil 4.46. ve Şekil 4.50.) görülmüştür.

2) Atış sonrasında küçük ve büyük panelleri oluşturan bütün tabakalardaki gerilme değerleri incelenecek olunursa; en yüksek efektif gerilme değeri penetratörün nüfuz ettiği karbon fiber ile takviye edilmiş kompozit blokta olduğu görülmektedir (Şekil 4.18., Şekil 4.22., Şekil 4.26., Şekil 4.35., Şekil 4.38., Şekil 4.41., Şekil 4.44., Şekil 4.48 ve Şekil 4.52.). Tabakalarda oluşan bu gerilme değerleri tabakaların penetratöre göstermiş oldukları dirençleri temsil ettiği için en yüksek gerilmenin orta kısımda bulunan penetratörün nüfuz ettiği kompozit blokta (karbon fiber ile takviye edilmiş kompozit) olması istenen bir sonuçtur.

3) Küçük ve büyük panelleri oluşturan tabakaların yaklaşık olarak absorbe ettikleri enerjilere bakılacak olursa; en fazla enerjiyi penetratörün nüfuz ettiği kompozit bloğun ve en az enerjiyi ise arkadaki çelik tabakanın absorbe ettiği görülmektedir (Tablo 4.3.). Bu durum kompozit blok içerisinde aynı yönde oryente edilmiş karbon fiberlerin darbe yönünde dirençli olduğunun göstergesidir ve dolayısıyla penetratörün kinetik enerjisinin büyük bir kısmının kompozit blok tarafından absorbe edilerek panelin perfore olmasının engellendiği tespit edilmiştir.

4) Sayısal analizde küçük panellerdeki penetrasyon derinliğinin büyük panellere oranla daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durumun boyut etkisinden (“size effect”) kaynaklandığı düşünülmektedir.

5) Yüksek hızlı çarpma testlerinde mermilerin arkadaki zırh çelik tabakasına ulaşamaması nedeniyle ön ve arka zırh çelik tabakaların kalınlığı düşürülerek çok tabakalı karbon fiber takviyeli epoksi kompozit zırh/çelik hibrid yapısının sayısal analiz sonucunda zırhın perfore olmayıp STANAG 4569 Seviye-4 korumasını sağladığı görülmüştür ve bu durum geliştirilen bu zırh paketinin eş değer koruma sağlayan RHA’ dan hemen hemen %16 daha hafif olduğu anlamına gelmektedir. Dolayısıyla bu yeni konfigürasyonun aynı seviye korumasını sağlayan fakat alan yoğunluğu itibari ile RHA’ a göre %16 daha düşük olan bir zırh paketi olarak RHA’ nın yerine kullanılabileceği düşünülmektedir.

5. SAYISAL VE DENEYSEL SONUÇLARIN KIYASLANMASI VE İRDELENMESİ

Sayısal analizler ile yüksek hızlı çarpma deneyleri sonunda panellerde oluşan penetrasyon bölgesi görsel olarak incelenmiş ve penetratörün rijit kalabildiği durumlardaki penetrasyon derinliğinin ölçülmesi ile sayısal ve deneysel penetrasyon derinliklerinin mukayesesi yapılabilmektedir (Tablo 5.1.).

Tablo 5.1. Yüksek Hızlı Çarpma Testlerinin Sayısal ve Deneysel Karşılaştırması

| Paneller | Hız (m/s) | Sayısal Analiz Sonucu Penetrasyon Derinliği (mm) | Deneysel Sonucu Penetrasyon Derinliği (mm) | % Hata | Deneysel Sonucu Hasar | AY (kg/m ²) Ön ve Arkada 16 mm Zırh Çeliği Tabakası Olduğu Durumda | AY (kg/m ²) Önde 7,8 mm, Arkada 12,2 mm Zırh Çeliği Tabakası Olduğu Durumda | |
|----------|-----------|--|--|-----------------------|-----------------------|--|---|-----|
| KP-1 | 911,4 | 130 | Penetratör Parçalandı | - | KPE | 388,1 | 293,9 | |
| KP-2 | 910,7 | 128,6 | Penetratör Parçalandı | - | KPE | | | |
| KP-3 | 908,8 | 133 | Penetratör Parçalandı | - | KPE | | | |
| BP-1 | 1. Atış | 922,9 | 128,1 | 127,8 | % 0,23 | | | KPE |
| | 2. Atış | 908,9 | 123,6 | Penetratör Parçalandı | - | | | KPE |
| | 3. Atış | 911,6 | 126,6 | Penetratör Parçalandı | - | | | KPE |
| | 4. Atış | 909,7 | 129,8 | Penetratör Parçalandı | - | | | KPE |
| BP-2 | 917,5 | 120 | 123,7 | % 2,99 | PL | | | |
| BP-3 | 916,1 | 96 | Penetratör Parçalandı | - | KPE | | | |

Tablo 5.1.’ de KP ve BP sırasıyla Küçük Panel ve Büyük Panel, AY alan yoğunluğu, KPE ve PL sırasıyla Kısmi Penetrasyon ve “Plugging” anlamına gelmektedir.

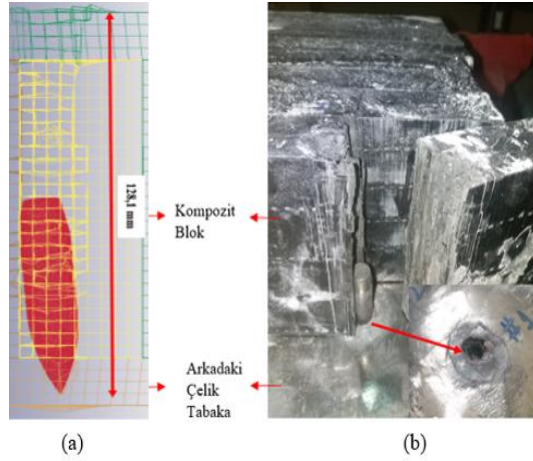
Bu kıyaslama sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1) Yüksek hızlı çarpma testleri ve sayısal analizler sonucunda hiçbir büyük ve küçük panel perfore olmayıp STANAG 4569 Seviye-4 koruması sağlanmıştır.

2) Tablo 5.1.’ den görüldüğü üzere çoğu penetratör yüksek hızlı test sonrasında panel içinde parçalanmıştır. Yüksek hızlı atış sonrasında panel içinde rijit kalabilen 2 penetratör ise Büyük Panel-1’ in 1. atışı için kullanılan ile Büyük Panel-2’ nin atışı için kullanılan penetratördür. Bu penetratörlerin panellerde oluşturduğu penetrasyon derinlikleri incelendiğinde sayısal analiz ile yüksek hızlı test sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

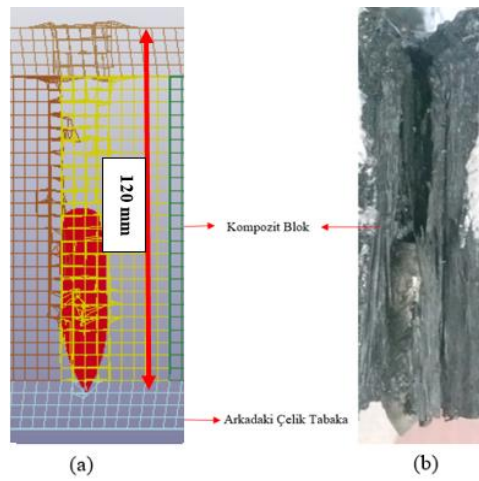
3) Panellerin penetrasyon davranışları incelendiğinde;

- Büyük Panel-1' in 1. atışının hem sayısal (Şekil 5.1.(a)) hem de deneysel çalışması (Şekil 5.1.(b)) sonucunda penetratörün panelin arka tarafında bulunan çelik tabakaya kadar nüfuz ettiği fakat paneli perfore edemediği görülmüştür.



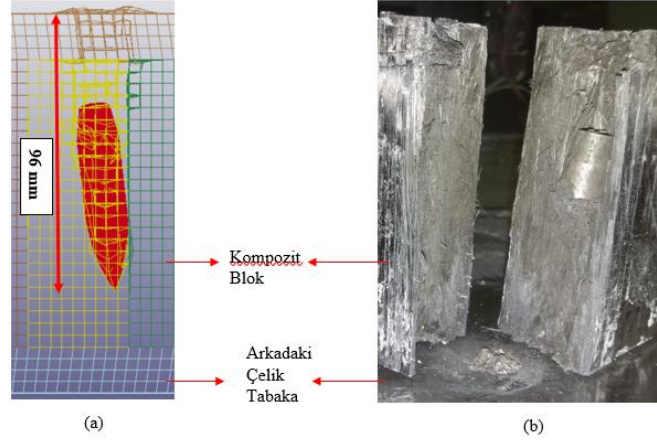
Şekil 5.1. Büyük Panel-1' de 1.Atış sonrası Oluşan Penetrasyon Bölgesi (a) Sayısal ve (b) Deneysel

- Büyük Panel-2' nin yüksek hızlı çarpma testleri sonunda “plugging” mekanizması ile hasar gördüğü fakat penetratörün panel içinde kaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 5.2.(b)). Sayısal analiz çalışmasında (Şekil 5.2.(a)) ise penetratörün arkadaki çelik tabakaya kadar nüfuz ettiği fakat paneli perfore edemeyip panel içinde kaldığı görülmüştür.



Şekil 5.2. Büyük Panel-2' de Oluşan Penetrasyon Bölgesi (a) Sayısal ve (b) Deneysel

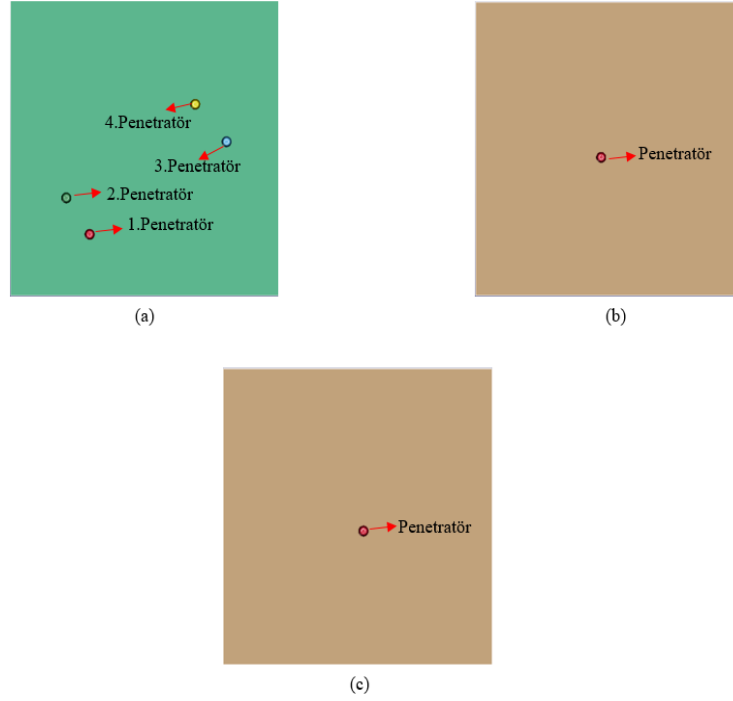
- Büyük Panel-3' ün sayısal analiz çalışmasında (Şekil 5.3.(a)) penetratörün arkadaki çelik tabakaya ulaşmadığı ve kompozit bloğun içinde kaldığı görülmektedir. Diğer yandan, deneysel çalışmada ise penetratörün arkadaki çelik tabakaya ulaşmadığı ve penetratörün kompozit blok içinde kırıldığı görülmüştür (Şekil 5.3.(b)).



Şekil 5.3. Büyük Panel-3' te Oluşan Penetrasyon Bölgesi (a) Sayısal ve (b) Deneysel

4) Büyük panellerin sayısal analizlerinde ve deneysel çalışmalarında hemen hemen aynı hızda ve aynı tip penetratör kullanılmasına rağmen nispeten küçük ama farklı penetrasyon derinliği elde edilmesinin temel sebebinin penetratörün kompozit blok ile ilk temas ettiği yerin kompozit blokları birleştiği ara yüz bölgesi veya kompozit bloğun tam hedeflendiği gibi orta noktası olması ile açıklanabilir.

5) Büyük Panel-2 ve Büyük Panel-3' teki penetrasyon derinliği Büyük Panel-1' de oluşan penetrasyon derinliklerinden daha azdır. Bunun sebebi penetratör Büyük Panel-2 ve Büyük Panel-3' te panelin orta kısmına isabet etmişken, Büyük Panel-1' de panelin merkezinden uzakta panel kenarına yakın bölgelere isabet etmiştir (Şekil 5.4.). Dolayısıyla paneller arasındaki penetrasyon derinliğinde sınır koşullarının da etkisi olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.4. Penetratörlerin Panellerdeki Konumları (a) Büyük Panel-1, (b) Büyük Panel-2 ve (c) Büyük Panel-3

6) Büyük Panel-2 ve Panel-3' e atılan penetratörlerin hızları hemen hemen aynı olmasına rağmen Büyük Panel-3' e atış yapılan penetratör fiber takviyeli kompozit blokların birleşme yerlerine daha uzak isabet ettiği için bu paneldeki penetrasyon derinliği Büyük Panel-2' deki penetrasyon derinliğinden daha azdır.

7) Penetratörlerin çarptığı noktadan itibaren yüzeye dik doğrultuda ilerleyememiş olması (Şekil 5.1. ve Şekil 5.3.) da yüzeye dik doğrultudaki penetrasyon derinliğini değiştirilebilmektedir. Yapılan bu değerlendirmeler hem sayısal hem de deneysel çalışmalarda açıkça görülmektedir. Bu bağlamda; çok tabakalı kompozit zırhın perfore olup olmaması ve penetrasyon derinlikleri bakımından sayısal analiz sonuçları ile deneysel sonuçlarının tam bir uyum içinde olduğu görülmektedir.

8) Büyük ve küçük panellerin alan yoğunluğu incelendiğinde; üretimi yapılan ve test edilerek STANAG 4569 Seviye-4 tam koruma sağlayan çok tabakalı karbon fiber takviyeli epoksi kompozit zırh çelik hibrid yapısının ($388,1 \text{ kg/m}^2$) alan yoğunluğu, aynı koruma seviyesi ($14,5 \times 114 \text{ mm B32 AP mermi STANAG 4569 Tehdit Seviyesi-4}$) için RHA zırhının alan yoğunluğundan ($348,9 \text{ kg/m}^2$) [62] daha yüksek görülmektedir. Ancak, mermilerin arkadaki zırh çelik tabakasına ulaşamaması nedeniyle ön ve arka zırh çelik plakanın kalınlıkları düşürülerek

çok tabakalı karbon fiber takviyeli epoksi kompozit zırh çelik hibrid yapısının alan yoğunluğu tekrar hesaplanmış ($293,9 \text{ kg/m}^2$) ve sayısal analizi yapılmıştır. Böylece geliştirilen bu zırh paketinin (toplam kalınlığı 120 mm olan kompozit zırhın öndeki zırh çeliği kalınlığı 7,8 mm ve arkadaki zırh çeliği kalınlığı 12,2 mm olmak üzere) eş değer koruma sağlayan RHA' dan hemen hemen %16 daha hafif olarak STANAG 4569 Seviye-4 korumasını sağladığı ortaya konmuştur.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu tez özellikle yüksek kinetik enerjili mermiye maruz kalan tek yönlü oryente edilmiş ve darbe yönüne paralel olarak konumlandırılmış karbon fiber takviyeli/epoksi blokların zırh çelik plakaları ile sandviç edilerek yüksek hızlı darbe karşısında davranışını araştırmayı amaçlamıştır. Bu amaçla, tasarlanan ve üretilen zırh test örneklerinin yapılan sayısal analiz ve deneysel testlerle yüksek hızlı darbe karşısında perfore olup olmayacağı deneysel ve sayısal olarak kanıtlanmaya çalışılmıştır. Testler, uluslararası kabul gören bir standart olan STANAG 4569' a uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Söz konusu standartta yer alan koruma seviyelerinden en üst seviyelerden biri olan Seviye-4 test prosedürüne göre atışlı testler yapılmış ve sayısal analizde STANAG 4569' un gerektirdiği mermi hızı, mermi kütlesi, mermi tipi gibi değerler kullanılmıştır. Kompozit zırhın sayısal analizinde ANSYS LS-DYNA ve LS-Prepost programları kullanılmıştır. Kompozit zırhın yapılan yüksek hızlı çarpma testleri sonucunda karbon fiberlerin darbe yönüne paralel yerleştirilmesi ile yüksek basma mukavemetinin yeterli penetrasyon direnci ve fiberlerin merminin kompozit blok içerisinde yönünün değişmesini sağlayarak kompozit zırhın perforasyonunu engellediği, dolayısıyla STANAG 4569 Seviye-4 korumasını sağladığı, ayrıca eş değer koruma sağlayan RHA' dan %16 daha hafif olduğu ve kara araç zırhlandırılmasında RHA yerine kullanılabileceği ispatlanmıştır. Bunun yanı sıra modern zırhlı araçlardaki “tak-çıkâr (add on armor)” zırhlar için daha uygun maliyetli çok tabakalı karbon fiber takviyeli epoksi kompozit bloklar, aynı koruma seviyesine sahip seramiğe alternatif olarak kullanılabileceği bu tez çalışması ile gösterilmiştir.

6.2. Öneriler

1) Merminin bazı panellerde orta kısımda bulunan karbon fiber takviyeli kompozit blokların birleşme yerlerine isabet etmesinden dolayı mermi panel içerisinde daha fazla ilerleyip panellerin arkada bulunan çelik tabakasında hasara sebebiyet vermiştir. Bu durum karbon fiber

takviyeli kompozit blokların kalınlıkları arttırılıp bloklar arası daha az bağlantı sağlanarak giderilebilir.

2) Denev alışmaları sırasında “Data Logger” aracılığı ile alınan gerinim değerlerinin belirli bir seviyeden sonra sabit kaldığı, buna elde edilen gerinim değerlerinin “Data Logger” ayarlarındaki üst limitinin üzerine çıkılmasının neden olduğu değerlendirilmiş ve istenen değerleri vermediği düşünölerek gerinim ölçer ile elde edilen veriler ile sayısal analizin verdiği deformasyon büyüklüğu mukayese edilememiştir. Bu durum sensörlerden aktarılabcek olan gerinim değerlerini ölçebilecek gerinim aralığına sahip yüksek kapasiteli “Data Logger” ın kullanılması ile aşılabilir. Böylece arpma deneyleri yapılırken üretimi yapılan kompozit yapının içine gömölü olan sensörlerden gerinimler (deformasyonlar) elde edilerek, bu değerler yardımıyla geliştirilen bir algoritma üzerinden akıllı kompozit zırh hasar tolerans kriterleri çerçevesinde monitör edilebilir. Böylece yüksek hızlı çarpmaların sebep olduğu gözle görölabilen veya görölmeyen hasarları mevcut kullanım yerinde algılayarak hasar toleranslarını belirleyerek kullanıcıya darbe almış yapıyı güvenli bir şekilde ne kadar süre daha kullanabileceğini, hangi zaman sürecinde değiştirmesi gerektiğini ya da depo bakım yerine gitmesi gerektiğini ikaz eden akıllı kompozit zırhların üretimi yapılabilir. Dolayısıyla bu yapıların hem maddi hem de can güvenliği açısından getirebileceği kazanımlar sayesinde çeşitli alanlarda özellikle savunma sistemleri için daha güvenli kullanım ortamı sağlanabilecek ve kullanım oranı arttırılabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] R. M. Jones, "Introduction the Composite Materials," in *Mechanics of Composite Materials*, 2nd Ed., USA: Taylor & Francis Inc., 1999, Ch. 1, pp. 2, 11.
- [2] E. Eryıldız ve A. Akdoğan Eker, "Savunma Sanayinde Kullanılan İleri Kompozit Malzemeler ve Uygulama Alanları," *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 7, no. 4, 2015.
- [3] E. Sözen, G. Gündüz ve E. İmren, "Balistik Panel ve Koruyucu Zırh Üretiminde Kullanılan Lif ve Kompozit Malzemeler," *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, vol. 18, no. 2, pp. 194-204, 2016.
- [4] T. Deniz, "Ballistic Penetration of Hardened Steel Plates," M.S. thesis, Dept. Mech. Eng., M. E. T. U., Ankara, Türkiye, 2010.
- [5] D. E. Carlucci and S. S. Jacobson, "Ballistic Disciplines," in *Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition*, 3rd Ed, Boca Raton, USA: CRC Press., 2018, Sec 1, pp. 4.
- [6] C. L. Farrar and D. W. Leeming, "Military ballistics. A Basic Manual," 1st Ed., Exeter, UK: A. Wheaton & Co. Ltd, 1983.
- [7] J. A. Zukas, "Impact Dynamics: Theory And Experiment," Technical Report ARBRL-TR-02271, Us Army Armament Research and Development Command, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Maryland, Oct.,1980.
- [8] C. Pirvu and L. Deleanu, "Ballistic Testing of Armor Panels Based on Aramid," in *Ballistics*, Charles Osheku, London, UK: IntechOpen Limited, 2019, DOI: 10.5772/intechopen.78315.
[Online]. Available: <https://www.intechopen.com/books/ballistics/ballistic-testing-of-armor-panels-based-on-aramid>
- [9] K. Akella and N. K. Naik, "Composite Armour—A Review," *J. Indian Inst. Sci.*, vol. 95, no. 3, pp. 297-312, 2015.

- [10] Ş. Karagöz, H. Atapek ve A. Yılmaz, “Su Verilmiş ve Temperlenmiş Çeliğin Alaşım ve Isıl İşlem Doğrultusunda Zırh Malzemesi Olarak Geliştirilmesi,” IV. Demir-Çelik Kongresi Bildiriler Kitabı, IV. Demir – Çelik Kongresi, 1-3 Kasım, 2007, Karabük Üniv., pp. 63-68.
- [11] “Günümüzde Kullanılan Zırhlar, Çeşitleri ve Malzemeleri,” savunmasanayi.org. <https://www.savunmasanayi.org/gunumuzde-kullanilan-zirhlar-ve-cesitleri/>
- [12] M. Yıldırım, “Poliüre Kaplı Metal Levhaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi ve Zırh Malzemesi Olarak Kullanımının Değerlendirilmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Kimya Müh. A.B.D., Yıldız Teknik Üniv., İstanbul, Türkiye, 2019.
- [13] M. V. Silva, D. Stainer, H. A. Al-Qureshi, O. R. K. Montedo, and D. Hotza, “Alumina-Based Ceramics for Armor Application: Mechanical Characterization and Ballistic Testing,” *Journal of Ceramics*, vol. 2014, 2014.
- [14] B. Bitlisli ve M. Yazıcı, “Araç Zırhlamada Kullanılan Kompozit Malzemelerin Balistik Performanslarının İncelenmesi,” *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 24, Sayı 1, 2019, DOI: 10.17482/uumfd.494262.
- [15] N. Yumak, Y. Pekbey ve K. Aslantaş, “Zırh Tasarımında Kullanılan Kompozit Malzemelerin Deformasyon Karakteristiğinin Araştırılması,” *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, cilt 10, no. 4, pp. 1-21, 2013.
- [16] S. K. Mazumdar, “Composites Product Fabrication,” in *Composites Manufacturing Materials, Product, and Process Engineering*, USA: CRC Press LLC, 2002.
- [17] D. Numata, K. Ohtani, M. Anyoji, K. Takayama, K. Togami, and M. Sun, “HVI tests on CFRP laminates at low temperature,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 35, pp. 1695–1701, Dec., 2008.
- [18] K. Fujii, M. Aoki, N. Kiuchi, E. Yasuda, and Y. Tanabe, “Impact perforation behavior of CFRPs using high-velocity steel sphere,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 27, pp. 497–508, May, 2002.

- [19] W. Xie, W. Zhang, N. Kuang, D. Li, W. Huang, Y. Gao, N. Ye, L. Guo, and P. Ren, "Experimental investigation of normal and oblique impacts on CFRPs by high velocity steel sphere," *Composites Part B*, vol. 99, pp. 483-493, Aug., 2016.
- [20] W. J. Cantwell and J. Morton, "Comparison of the low and high velocity impact response of CFRP," *Composites*, vol. 20, pp. 545-551, Nov., 1989.
- [21] A. Shimamoto, R. Kubota, and K. Takayama, "High-velocity impact characteristic of carbon fiber reinforced plastic composite at low temperature," *J. Strain Anal. Eng. Des.*, vol. 47, no.7, pp. 471-479, Oct., 2012.
- [22] P. J. Hazell, G. Kister, C. Stennett, P. Bourque, and G. Cooper, "Normal and oblique penetration of woven CFRP laminates by a high velocity steel sphere," *Composites Part A*, vol. 39, pp. 866-874, May, 2008.
- [23] Y. Tanabe, M. Aoki, K. Fujii, H. Kasano, and E. Yasuda, "Fracture behavior of CFRPs impacted by relatively high-velocity steel sphere," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 28, pp. 627-642, July, 2003.
- [24] J. Pernas-Sánchez, J. A. Artero-Guerrero, D. Varas, and J. López-Puente, "Experimental analysis of normal and oblique high velocity impacts on carbon/epoxy tape laminates," *Composites Part A*, vol. 60, pp. 24-31, May, 2014.
- [25] A. Francesconi, C. Giacomuzzo, S. Kibe, Y. Nagao, and M. Higashide, "Effects of high-speed impacts on CFRP plates for space applications," *Adv. Space Res.*, vol. 50, pp. 539-548, Sept., 2012.
- [26] S. Yashiro, K. Ogi, T. Nakamura, and A. Yoshimura, "Characterization of high-velocity impact damage in CFRP laminates: Part I – Experiment," *Composites Part A*, vol. 48, pp. 93-100, May, 2013.
- [27] E. Tang, X. Zhang, and Y. Han, "Experimental research on damage characteristics of CFRP/aluminum foam sandwich structure subjected to high velocity impact," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, pp. 4620-4630, Sept.-Oct., 2019.

- [28] E. Medvedovski, "Lightweight ceramic composite armour system," *Adv. Appl. Ceram.*, vol. 105, no. 5, pp. 241-245, Oct., 2006.
- [29] A. M. Diederer, J. P. F. Broos, and M. C. P. Peijen, "Modern armour configurations against 14.5 mm AP," In: *Lightweight Armour Systems Symposium*, RMCS Shrivenham, United Kingdom, Nov. 10-12, 1999.
- [30] B. A. Roeder and C. T. Sun, "Dynamic penetration of alumina/aluminum laminates: experiments and modeling," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 25, pp. 169-185, Feb., 2001.
- [31] S. Yadav and G. Ravichandran, "Penetration resistance of laminated ceramic/polymer structures," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 28, pp. 557-574, May, 2003.
- [32] H. L. Gower, D. S. Cronin, and A. Plumtree, "Ballistic impact response of laminated composite panels," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 35, pp. 1000-1008, Sept., 2008.
- [33] A. A. Ramadhan, A. R. Abu Talib, A. S. Mohd Rafie, and R. Zahari, "High velocity impact response of Kevlar-29/epoxy and 6061-T6 aluminum laminated panels," *Mater. Des.*, vol. 43, pp. 307-321, Jan., 2013.
- [34] B. A. Gama, J. W. Gillespie Jr, T.A. Bogetti, and B. K. Fink, "Innovative design and ballistic performance of lightweight composite integral armor," SAE Technical Paper, 2001, DOI:10.4271/2001-01-0888.
- [35] J. Radin and W. Goldsmith, "Normal Projectile Penetration and Perforation of Layered Targets," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 7, no. 2, pp. 229-259, 1988.
- [36] P. K. Pradhan, N. K. Gupta, S. Ahmad, P. P. Biswas, and Dayanand, "Numerical Investigation of Spherical Projectile Impact on 4mm Thick Mild Steel Plate," *Procedia Eng.*, vol. 173, pp. 109-115, 2017.
- [37] N. Kılıç and B. Ekici, "Ballistic resistance of high hardness armor steels against 7.62 mm armor piercing ammunition," *Mater. Des.*, vol. 44, pp. 35-48, Feb., 2013.

- [38] K. Krishnan, S. Sockalingam, S. Bansal, and S. D. Rajan, "Numerical Simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact," *Composite Part: B*, vol. 41, pp. 583-593, Dec., 2010.
- [39] A. Rashed, M. Yazdani, A. A. Babaluo, and P. Hajizadeh Parvin, "Investigation on high-velocity impact performance of multi-layered alumina ceramic armors with polymeric interlayers," *J. Compos. Mater.*, vol. 50, no. 25, pp. 3561-3576, 2016.
- [40] D. Downes, A. Bouamoul, and M. N. Ensan, "Three Dimensional Analysis of Induced Detonation of Cased Explosive," 13th International LS-DYNA Users Conference," Dearborn, MI, USA, 2014.
- [41] S. Feli and M. R. Asari, "Finite element simulation of ceramic/composie armor under ballistic impact," *Composite Part: B*, vol. 42, pp. 771-780, June, 2011.
- [42] D. Mohotti, M. Ali, T. Ngo, J. Lu, P. Mendis, and D. Ruan, "Out of plane impact resistance of aluminium plates subjected to low velocity impacts," *Mater. Des.*, vol. 50, pp. 413-426, Sept., 2013.
- [43] E. Palta, F. Hongbing, and D. C. Weggel, "Finite element analysis of the Advanced Combat Helmet under various ballistic impacts," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 112, pp. 125-143, Feb., 2018.
- [44] M. M. Shokrieh and G. H. Javadpour, "Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armor," *Compos. Struct.*, vol. 82, pp. 269-276, 2008.
- [45] E. Palta, M. Gutowski, and H. Fang, "A numerical study of steel and hybrid armor plates under ballistic impacts," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 136-137, pp. 279-294, Apr., 2018.
- [46] R. Mikulikova, R. Ridky, S. Rolc, and J. Krestan, "Influence of Impact Velocity and Steel Armour Hardness on Breakage of Projectile 14.5 X 114 API/B32," *Advances in Military Technology*, vol. 13, no. 1, pp. 59-69, 2018.

- [47] L. J. Deka, S. D. Bartus and U. K. Vaidya, "Damage evolution and energy absorption of E-glass/polypropylene laminates subjected to ballistic impact," *J Mater Sci*, vol. 43, pp. 4399–4410, 2008.
- [48] S. Wang, H. T. Nam Le, L. H. Poh, H. Feng, and M. H. Zhang, "Resistance of high performance fiber-reinforced cement composites against high-velocity projectile impact," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 95, pp. 89-104, Sept., 2016.
- [49] J. H. Ahn, K. H. Nguyen, Y. B. Park, J. H. Kweon, and J. H. Choi, "A Numerical Study of the High-Velocity Impact Response of a Composite Laminate Using LS-DYNA," *Int. J. Aeronaut. Space Sci.*, vol. 11, pp. 221-226, Sept., 2010.
- [50] M. Zmindak, Z. Pelagic, and M. Bvoc, "Analysis of High Velocity Impact on Composite Structures," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 617, pp. 104-109, 2014.
- [51] K. R. Jagtap, S. Y. Ghorpade, A. Lal, and B. N. Singh, "Finite Element Simulation of Low Velocity Impact Damage in Composite Laminates," *Mater. Today: Proc.*, vol. 4, pp. 2464–2469, 2017.
- [52] S. Choudhary, P. K. Singh, S. Khare, K. Kumar, P. Mahajan, and R. K. Verma, "Ballistic impact behaviour of newly developed armour grade steel: An experimental and numerical study," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 140, June 2020.
- [53] Nato Standard, Aep-55 Volume 1 Procedures for Evaluating the Protection Level of Armoured Vehicles - Kinetic Energy and Artillery Threat Edition C Version 1, Apr. 2014.
- [54] Ls-Dyna® Keyword User's Manual Volume II Material Models, Ls-Dyna R9.0, Aug. 2016.
- [55] G. R. Johnson and W. H. Cook, "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures," *Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics*, Apr. 1983, pp. 541-547.

- [56] Y. Cao, H. S. Di, R. D. K. Misra, and J. Zhang, “Hot Deformation Behavior of Alloy 800H at Intermediate Temperatures: Constitutive Models and Microstructure Analysis,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 23, pp. 4298–4308, Sep., 2014.
- [57] G. R. Johnson and W. H. Cook, “Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 21, no. 1, pp. 31-48, 1985.
- [58] R. G. Barsoum, “Elastomeric Polymers with High Rate Sensivity: Applications in Blast, Shockwave, and Penetration Mechanics,” Elsevier Inc., 2015.
- [59] M. Grujicic, S. Ramaswami, J. S. Snipes, C. -F. Yen, B.A. Cheeseman, and J. S. Montgomery, “Multiphysics Modeling and Simulations of Mil A46100 Armor-Grade Martensitic Steel Gas Metal Arc Welding Process,” *J Mater. Eng. Perform.*, vol. 22, pp. 2950-2969, May, 2013.
- [60] S. M. Zakir, S. Tao, L. Yulong, A. Sohail, D. U. Ahmed, and R. M. Farrukh, “Numerical Studies of Penetration in Light Armor, Concrete and Brick-Wall Targets,” *RevistaMateria*, vol. 23, no. 3, 2018.
- [61] I. M. Daniel and O. Ishai, “Engineering Mechanics of Composite Materials,” 2nd Edition, Oxford University Press, Inc., New York, USA, 2006.
- [62] Big Book of Warfare (BBOW). Estimating AFV Protection Levels, https://www.alternatewars.com/BBOW/Ballistics/Term/Estimating_AFV_Protection.htm (2016, erişim Mart 2020).