
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

HİBRİT KOMPOZİT SANDVİÇ YAPILARIN BALİSTİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Mahmut Tolga KARAKAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mahmut Tolga KARAKAŞ
16/07/2025

HİBRİT KOMPOZİT SANDVİÇ YAPILARIN BALİSTİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Mahmut Tolga KARAKAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2025

ÖZET

Bu tez çalışmasında, farklı katman dizilimlerine sahip hibrit kompozit sandviç yapıların NIJ 0108.01 IIIA seviyesindeki balistik performansları deneysel olarak incelenmiştir. Dört farklı yapı konfigürasyonu için ikişer numune üretilmiş, toplam sekiz numuneye tekli ve beşli atışlar uygulanmıştır. Yapılar; karbon ve kevlar takviyeli epoksi kompozitler, alüminyum veya titanyum plakalar ile alüminyum petek çekirdekten oluşmaktadır. Değerlendirmeler, ön/arka yüzey deformasyonları, çatlak türleri, mermi penetrasyonu ve X-ray bulgularına dayanmaktadır. Tekli atışta en iyi sonuç, Numune 4'te (Karbon–Kevlar–Titanyum) 0.095 mm ön ve 0.270 mm arka deformasyonla elde edilmiştir. En zayıf dayanım ise Numune 1'de (Kevlar–Karbon–Alüminyum) 1.920 mm ön ve 9.744 mm arka deformasyonla gözlemlenmiştir. Beşli atışta, aynı dizilime sahip Numune 8, 0.010 mm ön ve 2.788 mm arka deformasyonla üstün performans sergilemiştir. Titanyumlu yapılarda çatlak oluşmasına rağmen delaminasyon gözlenmemiştir. Buna karşın, alüminyum plakalı Numune 6, düşük ön deformasyona rağmen 28.480 mm arka deformasyon göstermiştir. ±0.5 mm kalınlık sapmaları üretim sürecinin tekrarlanabilirliğini, titanyumun yüksek elastik modülü (~110 GPa) ve çekme dayanımı (~900 MPa) ise düşük deformasyon değerlerini açıklamaktadır. [0/90/+45/-45]s lif serimi, karbon fiberin rijitliği ve Kevlar'ın enerji emilimiyle yapısal performansa katkı sağlamıştır. Sonuçlar, hafif ve etkili hibrit balistik koruma sistemlerinin mümkün olduğunu göstermektedir.

Bilim Kodu	:	91417
Anahtar Kelimeler	:	Kompozit malzemeler, balistik koruyucular, hedef balistiği
Sayfa Adedi	:	95
Danışman	:	Doç. Dr. Onur ÇAVUŞOĞLU

INVESTIGATION OF THE BALLISTIC PERFORMANCE OF HYBRID COMPOSITE SANDWICH STRUCTURES

(M. Sc. Thesis)

Mahmut Tolga KARAKAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2025

ABSTRACT

This thesis experimentally investigates the ballistic performance of hybrid composite sandwich structures with different layer configurations, evaluated according to the NIJ 0108.01 Level IIIA standard. Four different configurations were prepared, with two specimens produced for each, resulting in a total of eight samples tested under single and five-shot impact conditions. The structures were composed of carbon and Kevlar fiber-reinforced epoxy composites, aluminum or titanium plates, and aluminum honeycomb cores. Evaluations were based on front and back face deformations, crack types, projectile penetration, and X-ray findings. In single-shot tests, Sample 4 (Carbon–Kevlar–Titanium) showed the best performance with 0.095 mm front and 0.270 mm back deformation. The weakest resistance was observed in Sample 1 (Kevlar–Carbon–Aluminum), with 1.920 mm front and 9.744 mm back deformation. In five-shot tests, Sample 8 with the same configuration as Sample 4 demonstrated superior performance with 0.010 mm front and 2.788 mm back deformation. Although cracking occurred in titanium-faced structures, no delamination was observed. In contrast, aluminum-faced Sample 6 exhibited inadequate energy absorption, showing 28.480 mm back deformation despite minimal front deformation. Thickness variations within ±0.5 mm confirmed the repeatability of the production process. The low deformation in titanium structures was attributed to its high elastic modulus (~110 GPa) and tensile strength (~900 MPa). The [0/90/+45/–45]s fiber orientation contributed to performance by combining the stiffness of carbon fibers at the front and the energy absorption of Kevlar fibers at the rear. The results demonstrate that lightweight and effective hybrid ballistic protection systems can be achieved.

Science Code : 91417
Key Words : Composite materials, ballistic protectors, target ballistic
Page Number : 95
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Onur ÇAVUŞOĞLU

TEŞEKKÜR

Bu deneysel çalışmada bilimsel katkısı ve rehberliği için tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Onur ÇAVUŞOĞLU'na, her konuda desteğini gördüğüm, imkanlarından faydalandığım kıymetli şirketim ve değerli çalışma arkadaşlarıma, yüksek lisans eğitim dönemim boyunca kendilerinden ders alma fırsatı bulduğum, ufkumu açan tüm kıymetli hocalarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca manevi desteklerinden dolayı eşim ve kızıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. GENEL BİLGİLER 3

2.1. Balistiğin Tanımı ve Bölümleri 3

2.1.1. İç balistik 3

2.1.2. Dış balistik 3

2.1.3. Hedef balistiği 3

2.2. Balistik Testler İçin Standartlar 4

2.2.1. Balistik testler için standartlar 4

2.2.2. Balistik koruyucu malzemelerinin sınıflandırılması 6

2.2.3. Sandviç yapılar ve enerji sönümleme mekanizmaları 9

2.2.4. Hibrit katmanlı yapılar ve katman diziliminin etkisi 9

2.2.5. Darbe ve penetrasyon teorileri 10

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI VE TEZİN AMACI 11

4. MATERYAL VE YÖNTEM 19

4.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Hibrit Kompozit Yapılar 19

4.2. Üretim Yöntemi 27

4.3. Balistik Test 37

Sayfa

4.4. Tahribatsız Muayene Yöntemleri 39
4.4.1. Görsel muayene 39
4.4.2. Boyutsal muayene 39
4.4.3. X-Ray cihazı ile muayene 40
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA 41
5.1. Görsel Muayene Bulguları ve Sonuçları 41
5.2. Boyutsal Muayene Bulguları ve Sonuçları 52
5.3. X-Ray Cihazı ile Muayene Bulguları ve Sonuçları 66
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 87
KAYNAKLAR 91
ÖZGEÇMİŞ 95

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Bazı balistik koruyucu standartlar 5

Çizelge 2.2. NIJ0108.01 III-A Seviyesi koruyucu zırh gereksinimleri 5

Çizelge 4.1. Deneysel çalışma numune içerikleri 19

Çizelge 4.2. Alüminyum plakanın fiziksel özellikleri 21

Çizelge 4.3. Ti-6Al-4V Plakanın fiziksel özellikleri[materials properties handbook: titanium alloys, ASM ınternational 22

Çizelge 4.4. Alüminyum bal peteğinin fiziksel özellikleri 24

Çizelge 4.5. Karbon fiber malzemenin fiziksel özellikleri 25

Çizelge 4.6. Nelcote E-722 fiber malzemenin fiziksel özellikleri 26

Çizelge 4.7. Kimyasal yapıştırıcı-film adhesive malzemenin fiziksel özellikleri 27

Çizelge 4.8. Deneysel çalışma numuneleri kompozit plaka serim açıları 30

Çizelge 4.9. 1. Aşama balistik deney numunelerinin kür sonrası ağırlıkları 35

Çizelge 4.10. 2. Aşama balistik deney numunelerinin kür sonrası ağırlıkları 36

Çizelge 4.11. 1. Aşama balistik deney numunelerinin kür sonrası ağırlıkları 36

Çizelge 4.12. 2. Aşama balistik deney numunelerinin kür sonrası ağırlıkları 36

Çizelge 4.13. Canik SFX TP9 tabancanın teknik özellikleri 37

Çizelge 5.1. Birinci aşama atışlar- 10 metre mesafe tek atış 41

Çizelge 5.2. İkinci aşama atışlar- 5 metre mesafe numune başı beş atış 47

Çizelge 5.3. Numunelere ait balistik performans sonuçları 52

Çizelge 5.4. Numunelerin ön ve arka yüzeylerindeki deformasyon derinlikleri 59

Çizelge 5.5. İkinci aşama numunelerin ön ve arka yüzeylerindeki deformasyon derinlikleri 60

Çizelge 5.6. Farklı numuneler için X-Ray muayene bulguları 82

Çizelge 5.7. Karşılaştırmalı balistik değerlendirme 86

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri 8

Şekil 4.1. Lamine yapının kür çevrim grafiği 33

Şekil 4.2. Hibrit sandviç yapının kür çevrim grafiği 33

Şekil 5.1. Balistik numunelerin kür sonrası ağırlıkları (g)..... 82

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Yaygın Hasar Mekanizmaları (a)Gevrek kırılma, (b)Sünek delinme, (c)Parça kopması,(d)Radyal çatlak oluşumu,(e)Tıkaç oluşumu,(f)Taç yaprağı oluşumu 4

Resim 4.1. Deneysel çalışma numune içeriklerinin temsili gösterimi-numune-1(a), numune-2(b), numune-3(c), numune-4(d) 19

Resim 4.2. Alüminyum bal peteği 23

Resim 4.3. Al 2024-T81 CLAD (AMS4478) Plaka 28

Resim 4.4. Ti-6Al-4V (Tavlanmış, AMS 4911) Plaka 29

Resim 4.5. Ply kesme tezgahı 29

Resim 4.6. Deneysel çalışmalarda kullanılan karbon fiber takviyeli kompozit malzeme 31

Resim 4.7. Deneysel çalışmalarda kullanılan kevlar fiber takviyeli kompozit malzeme 31

Resim 4.8. Deneysel çalışmalarda kullanılan kompozit plakaların kür öncesi vakum altında torbalanmış görseli 32

Resim 4.9. Numune 1 ve numune 5, kevlar-karbon-alüminyum sandviç yapı 34

Resim 4.10. Numune 2 ve numune 6, karbon-kevlar alüminyum sandviç yapı 34

Resim 4.11. Numune 3 ve numune 7, kevlar-karbon-titanyum sandviç yapı 35

Resim 4.12. Numune 4 ve numune 8, karbon-kevlar-titanyum sandviç yapı 35

Resim 4.13. Atışların yapıldığı poligon ve hedef mekanizması görseli 37

Resim 4.14. Atışlarda kullanılan CANİK SFX TP9 marka tabanca 38

Resim 4.15. Atışlarda kullanılan 9x19 mm parabellum 124 grain FMJ tabanca 39

Resim 5.1. Numune-1 ön yüz 42

Resim 5.2. Numune-1 arka yüz 42

Resim 5.3. Numune-2 ön yüz 43

Resim 5.4. Numune-2 arka yüz 43

Resim 5.5. Numune-3 ön yüz 44

Resim **Sayfa**

Resim 5.6. Numune-3 arka yüz 45

Resim 5.7. Numune-4 ön yüz 45

Resim 5.8. Numune-4 arka yüz 46

Resim 5.9. Numune-5 ön yüz 47

Resim 5.10. Numune-5 arka yüz 47

Resim 5.11. Numune-6 ön yüz 48

Resim 5.12. Numune-6 arka yüz 49

Resim 5.13. Numune-7 ön yüz 49

Resim 5.14. Numune-7 arka yüz 50

Resim 5.15. Numune-8 ön yüz 51

Resim 5.16. Numune-8 arka yüz 51

Resim 5.17. Birinci numune boyutsal tarama görüntüsü mermi giriş yüzeyi(a), birinci numune boyutsal tarama görüntüsü mermi çıkış yüzeyi(b), birinci numune boyutsal tarama görüntüsü yan kesit(c) 53

Resim 5.18. İkinci numune boyutsal tarama görüntüsü mermi giriş yüzeyi(a), ikinci numune boyutsal tarama görüntüsü mermi çıkış yüzeyi(b), ikinci numune boyutsal tarama görüntüsü yan kesit(c) 55

Resim 5.19. Üçüncü numune boyutsal tarama görüntüsü mermi giriş yüzeyi(a), üçüncü numune boyutsal tarama görüntüsü mermi çıkış yüzeyi(b),üçüncü numune boyutsal tarama görüntüsü yan kesit(c)..... 56

Resim 5.20. Dördüncü numune boyutsal tarama görüntüsü mermi giriş yüzeyi(a), dördüncü numune boyutsal tarama görüntüsü mermi çıkış yüzeyi(b), dördüncü numune boyutsal tarama görüntüsü yan kesit(c) 58

Resim 5.21. Beşinci numune boyutsal tarama görüntüsü mermi giriş yüzeyi(a), beşinci numune boyutsal tarama görüntüsü mermi çıkış yüzeyi(b), beşinci numune boyutsal tarama görüntüsü yan kesit(c) 61

Resim 5.22. Altıncı numune boyutsal tarama görüntüsü mermi giriş yüzeyi(a), altıncı numune boyutsal tarama görüntüsü mermi çıkış yüzeyi(b), altıncı numune boyutsal tarama görüntüsü yan kesit(c)..... 62

Resim 5.23. Yedinci numune boyutsal tarama görüntüsü mermi giriş yüzeyi(a), yedinci numune boyutsal tarama görüntüsü mermi çıkış yüzeyi(b), yedinci numune boyutsal tarama görüntüsü yan kesit(c)..... 63

Resim **Sayfa**

Resim 5.24. Sekizinci numune boyutsal tarama görüntüsü mermi giriş yüzeyi(a), sekizinci numune boyutsal tarama görüntüsü mermi çıkış yüzeyi(b), sekizinci numune boyutsal tarama görüntüsü yan kesit(c) 64

Resim 5.25. Birinci numune X-Ray görüntüsü..... 66

Resim 5.26. İkinci numune X-Ray görüntüsü 68

Resim 5.27. Üçüncü numune X-Ray görüntüsü 70

Resim 5.28. Dördüncü numune X-Ray görüntüsü..... 72

Resim 5.29. Beşinci numune X-Ray görüntüsü..... 74

Resim 5.30. Altıncı numune X-Ray görüntüsü..... 76

Resim 5.31. Yedinci numune X-Ray görüntüsü 78

Resim 5.32. Sekizinci numune X-Ray görüntüsü..... 80

Resim 5.33. Kevlar–karbon–titanyum plaka–alüminyum çekirdek–titanyum plaka..... 84

Resim 5.34. Karbon–kevlar–titanyum plaka–alüminyum çekirdek–titanyum plaka..... 85

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
m3	Hacim birimi
kg	Kilogram
V_0	İlk hız
g	Gram
gr	Grain
m/s	Hız Birimi
ρ	Yoğunluk
R	Çekme Dayanımı
E	Elastik Modül
kg/m3	Yoğunluk birimi
mm	Milimetre
Mpa	Megapaskal
Gpa	Gigapaskal
N	Newton

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ILSS	Interlaminar Shear Strength
UD	Uni direction
SAO	Single Action Only- Tek Hareket
NIJ	National Institute of Justice
UHMW-PE	Ultra High Molecular Weight Polyethylene
FMC	Full Metal Jacket
SWC	Semi-Wadcutter
BFS	Backface Signature

1. GİRİŞ

Günümüzde artan güvenlik tehditleri ve gelişen mühimmat teknolojileri, bireysel ve yapısal balistik koruma sistemlerinin daha yüksek performans ve hafiflik ilkeleriyle yeniden tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır. Geleneksel metal esaslı zırh sistemleri, darbe dayanımı açısından belirli avantajlar sunsa da, ağırlıklarının fazla olması ve enerji soğurma kapasitelerinin sınırlı kalması nedeniyle modern ihtiyaçlara tam anlamıyla karşılık verememektedir. Bu doğrultuda, kompozit malzemelerin sahip olduğu yüksek özgül mukavemet, çok katmanlı dizilimlerde enerji yayma kapasitesi ve uyarlanabilir mimari yapıları, balistik koruma uygulamalarında dikkat çekici alternatifler haline gelmektedir.

Literatürde yer alan çalışmalar, kompozit ve seramik esaslı balistik panellerin etkinliğinin artırılmasında, bu yapıların arka yüzeylerinin yüksek elastik modüle sahip metalik malzemelerle desteklenmesinin kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, hibrit sandviç yapılar; kompozit tabakaların enerji soğurma kabiliyeti ile metalik katmanların delinmeye karşı direncini bir araya getirerek, çok yönlü darbelere karşı optimize edilmiş çözümler sunmaktadır.

Bu çalışmada, epoksi matrisli karbon fiber ve kevlar takviyeli kompozit katmanlar, titanyum ve alüminyum plakalarla desteklenmiş; bu kombinasyonlarla oluşturulan dört farklı hibrit sandviç yapı konfigürasyonu, NIJ 0108.01 standardına uygun olarak IIIA seviye mermi tehdidine karşı test edilmiştir. Literatürden yola çıkılarak belirlenen [0/90/+45/-45]s serim dizilimi ile üretilen kompozit plakaların, darbe etkisi altındaki enerji yayılım performansı değerlendirilmiş; test sonuçları X-ray görüntüleme ve arka yüz deformasyon analizi ile desteklenmiştir.

Bu deneysel çalışma ile amaçlanan, karbon ve Kevlar elyaflarının farklı dizilimleriyle oluşturulan kompozit yapıların, titanyum ve alüminyum gibi metalik destek plakaları ile birlikte kullanıldığında balistik dayanım üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır. Elde edilen sonuçlar, hibrit konfigürasyonların sadece darbe durdurma yeteneğini değil, aynı zamanda arka yüzey travmasını azaltma kapasitesini de önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Böylece, geleneksel ağır metal zırhlara alternatif olarak, hafif, yüksek performanslı ve

modüler balistik koruma çözümlerinin geliştirilebileceği bir malzeme mimarisi sunulmaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Balistiğin Tanımı ve Bölümleri

Balistik, ateşli silahlarla atılan mühimmatın ateşleme anından itibaren hedefe ulaşmasına kadar geçen sürede maruz kaldığı fiziksel süreçleri inceleyen bir bilim dalıdır. Bu bilim, merminin hareketini ve bu hareket üzerindeki etkili faktörleri üç temel başlık altında ele alır: iç balistik, dış balistik ve hedef (terminal) balistiği [1].

2.1.1. İç balistik

İç balistik, bir silahın tetiklenmesiyle başlayıp mühimmatın namludan çıkışına kadar devam eden evrede gerçekleşen fiziksel ve kimyasal olayları konu almaktadır. Bu süreçte, itici maddenin yanmasıyla ortaya çıkan gazlar namlu içinde basınç oluşturarak mühimmatın hız kazanmasına neden olmaktadır. Mühimmat, aynı zamanda namludaki yiv ve setler sayesinde dönme hareketi de kazanmaktadır. İç balistiğin temel hedefi, mühimmatın namlu çıkışında belirli bir ilk hız (V_0) ve dönme oranına ulaşmasını sağlamaktır [1, 4].

2.1.2. Dış balistik

Dış balistik, mühimmatın namluyu terk ettikten sonraki uçuş sürecinde maruz kaldığı dış etkileri incelemektedir. Bu süreçte mühimmatın hareketi; yerçekimi, hava sürtünmesi ve rüzgâr gibi çevresel faktörlerden etkilenmektedir. Bu alan; merminin izlediği yörüngeyi, menzilini, hedefe ulaşma süresini ve isabet oranını değerlendirerek atış doğruluğunu artırmaya yönelik veriler sunmaktadır. Ayrıca mühimmatın uçuş süresince yaşadığı hız kaybı, aerodinamik kuvvetler ve atmosfer koşulları da dış balistiğin analiz alanına girmektedir [2, 4].

2.1.3. Hedef balistiği (terminal balistik)

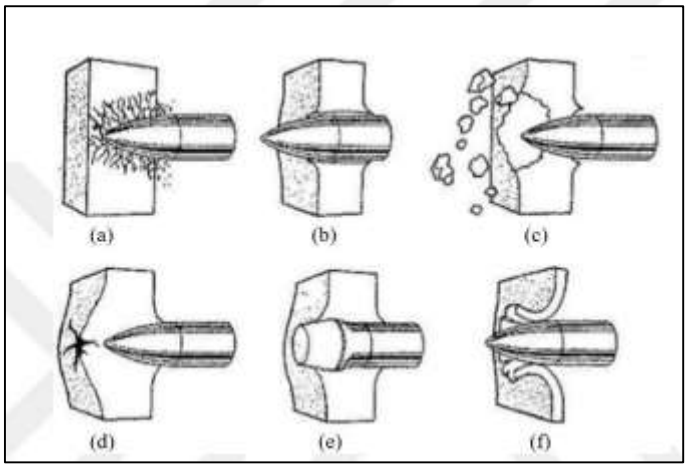
Terminal balistik, mühimmatın hedefle temas ettiği andan itibaren oluşan fiziksel etkileri inceleyen balistik dalıdır. Bu disiplin, mühimmatın hedef materyaliyle etkileşimini, aktardığı enerjiyi ve temas sonrası ortaya çıkan deformasyonları analiz etmektedir. Hedef

balistiği; farklı mühimmat türlerinin çeşitli hedefler üzerindeki etkisini değerlendirmek, zırh delme yeteneğini belirlemek veya hasarı en aza indirmek gibi amaçlarla yürütülen çalışmalarda önemli bir yer tutmaktadır. Bu alandaki bilgiler, özellikle savunma teknolojileri, askeri mühendislik ve adli tıp gibi disiplinlerde mühimmatın etkinliğini artırmak ya da etkilerini sınırlandırmak için kullanılmaktadır [3, 4].

Hedef deformasyon tipleri

Balistikte hedef deformasyon tipleri, zırh malzemelerinin mermi veya diğer tehditler tarafından uygulanan kuvvetler sonucu geçirdiği fiziksel değişimleri tanımlamaktadır. Bu deformasyon tipleri, hedefin malzeme özelliklerine ve balistik tehditlerin enerji yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir.

Yapılacak deneysel çalışmada, numuneler atışlar sonrası hasar mekanizmalarına göre değerlendirilmektedir.



Resim 2.1. Yaygın Hasar Mekanizmaları (a)Gevrek kırılma, (b)Sünek delinme, (c)Parça kopması,(d)Radyal çatlak oluşumu,(e)Tıkaç oluşumu,(f)Taç yaprağı oluşumu [5]

2.2. Kuramsal Temeller

2.2.1. Balistik testler için standartlar

Balistik testler, zırh sistemlerinin ve mühimmatın performansını değerlendirebilmek için uluslararası düzeyde kabul görmüş objektif kriterlere dayalı olarak yapılmaktadır. Bu testler,

genellikle *NIJ (National Institute of Justice), STANAG (NATO Standardization Agreement)* ve *ASTM (American Society for Testing and Materials)* gibi güvenilir organizasyonlar tarafından belirlenen protokoller doğrultusunda uygulanmaktadır. Bu standartlar, kullanılan mühimmatın tipi, atış mesafesi, darbe hızının değeri, hedef malzemenin fiziksel özellikleri ve deformasyon sınırları gibi parametreleri net bir şekilde tanımlamaktadır. Bu sayede testler, mühimmatın farklı balistik tehditlere karşı dayanıklılığını objektif bir şekilde ölçmeye ve karşılaştırılabilir sonuçlar elde etmeye imkan tanımaktadır [6-8].

Çizelge 2.1. Bazı balistik koruyucu standartlar

STANDART NO	STANDART ADI
NIJ 0101.06	Kişisel Vücut Zırhlarının Balistik Dayanımları
NIJ 0108.01	Balistik Koruyucu Malzemeler İçin Performans Standardı
STANAG2920	Kişisel Zırhlar İçin Balistik Test Metotları
HOSDB Body Armour Standards	Polis Ekipmanları İçin Balistik Ve Delici Direnç Testleri
TS 11164	Balistik Koruyucu Yelek
MIL-STD-662 F	Zırhlar İçin V50 Balistik Test

Bu tez kapsamında kullanılacak olan NIJ0108.01 Balistik Dirençli Koruyucu Zırh standartları Ek:1 ile sunulmakta ve numunelerin inceleneceği NIJ0108.01 III-A performans gereksinimleri aşağıdaki tablo ile belirtilmektedir:

Çizelge 2.2. NIJ0108.01 III-A seviyesi koruyucu zırh gereksinimleri

Zırh Türü	Test Mühimmatı	Nominal Mermi Kütlesi	Önerilen Namlu Uzunluğu	Gerekli Mermi Hızı	Zırh Numunesi Başına Gerekli Vuruşlar	İzin Verilen Penetrasyonlar
III-A	44 Magnum SWC	15.55 g 240 gr	14-16 cm aralığında	426 +/- 15 m/s	5	0
	9 mm FMC	8.0 g 124 gr	24-26 cm aralığında	426 +/- 15 m/s	5	0

Yapılacak atışlar, NIJ 0108.01 IIIA koruma seviyesi için 5 metre mesafeden yapılacak olup, numune boyutları ise 30,5 x 30,5 cm olarak özel standartlara göre belirlenmiştir.

5 metre mesafeden yapılacak 5 ayrı atış ile her bir numune üzerinde etkileri incelenmek üzere atışlar tekrarlanacaktır. Standart gereği numunelerin başarılı olabilmesi adına merminin arka yüzeyde hedefi delmemesi beklenmektedir. Atışlarda 9 mm FMJ 124 grain tabanca mermisi kullanılarak standart kriteri sağlanmıştır.

2.2.2. Balistik koruyucu malzemelerinin sınıflandırılması

Balistik tehditlere karşı geliştirilen koruyucu sistemler, kullanım alanlarına, hedef tehdit türüne ve performans gereksinimlerine göre farklı malzeme sınıflarına ayrılmaktadır. Bu malzemeler temel olarak dört ana grupta incelenmektedir:

Metalik zırhlar

Metalik zırh sistemleri, yüksek dayanım ve rijitlik özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. En yaygın kullanılanlar çelik ve alüminyum alaşımlarıdır. Çelik, yüksek sertliği ve darbe dayanımı sayesinde tanklar, zırhlı araçlar ve yapısal savunma elemanlarında sıkça kullanılırken; alüminyum daha hafif bir alternatif olarak tercih edilmektedir [9]. Titanyum, hafifliği, yüksek darbe dayanımı ve korozyon direnci ile metalik zırhlarda tercih edilen bir malzeme olup, askeri ve endüstriyel uygulamalarda kullanım avantajları sunsa da üretim maliyetleri yüksek olabilmektedir [10].

Seramik zırhlar

Seramik malzemeler, sertliği yüksek olup merminin enerjisini kırarak veya dağıtarak etkisiz hale getirmektedir. Alümina (Al_2O_3), silikon karbür (SiC) ve bor karbür (B_4C) en yaygın kullanılan seramiklerdendir. Bu malzemeler, genellikle arka yüzeyde enerji emici bir tabaka ile birlikte kompozit olarak kullanılmaktadır [11].

Polimer ve lif takviyeli zırh malzemeleri

Polimer bazlı zırh malzemeleri, hafiflik ve esneklik özellikleriyle öne çıkmaktadır. Kevlar, Spectra ve Dyneema gibi yüksek performanslı lifler bu gruba girmektedir. Bu lifler, bireysel balistik koruyucu ekipmanlarda (örneğin, yelekler ve kasklar) yaygın şekilde kullanılmaktadır [12].

Kompozit zırhlar

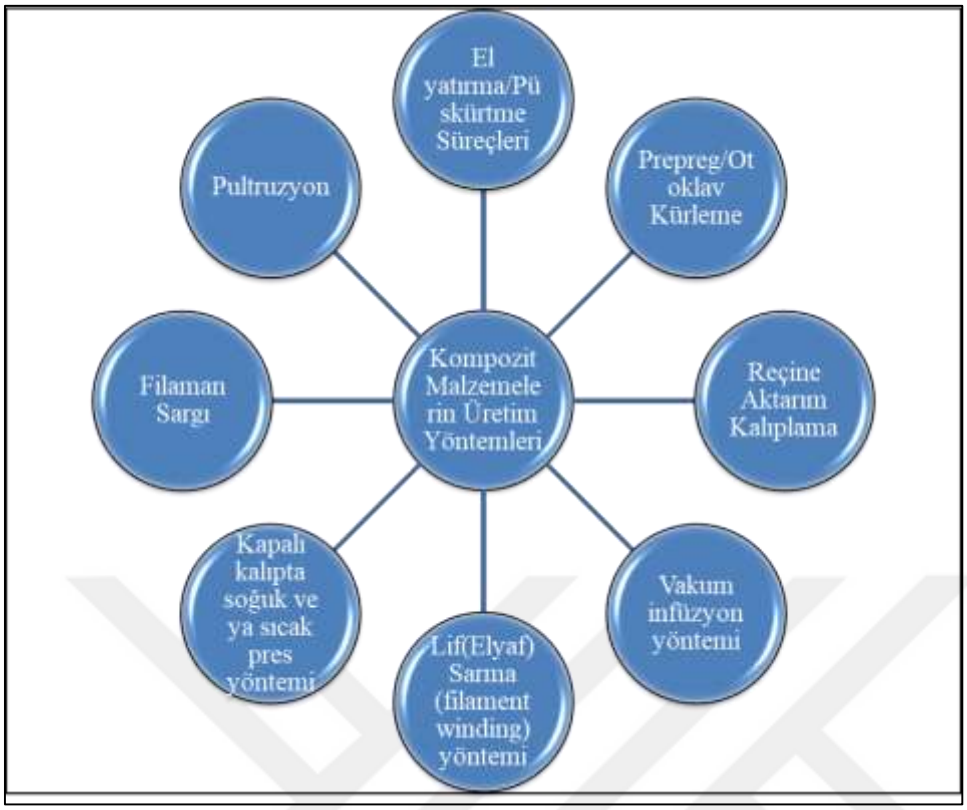
Kompozit yapılar, birden fazla malzemenin (örneğin seramik + polimer matris) birleştirilmesiyle elde edilen çok katmanlı sistemlerdir. Hibrit kompozit zırhlar, malzemeler arası sinerji sayesinde hem darbe dayanımı hem de enerji emme performansını artırarak, balistik tehditlere karşı yüksek verimli bir koruma sağlamakta ve aynı zamanda zırhın ağırlığını önemli ölçüde azaltmaktadır.[13].

Kompozit zırhlar, farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip malzemelerin katmanlar hâlinde bir araya getirilmesiyle oluşturulan çok katmanlı sistemlerdir. Bu tür yapılar, hem balistik tehditlere karşı etkin koruma sağlamakta hem de geleneksel metal esaslı zırhlara göre önemli ölçüde ağırlık tasarrufu sunmaktadır [13].

Kompozit zırhlar genellikle yüksek enerji sönümleme kapasitesi, darbe dayanımı ve yapısal bütünlüğü ön planda tutularak tasarlanmaktadır. Kompozit zırh sistemlerinde yalnızca yapısal elemanlar değil, aynı zamanda bağlayıcı ve destekleyici bileşenler de balistik performans açısından kritik rol oynamaktadır. Bu kapsamda, polimer matrisli reçineler, zırh malzemelerinin mekanik bütünlüğünü sağlayan ana unsurlar arasında yer almaktadır. Reçineler, elyaf takviyeli kompozitlerin bir arada tutulmasını sağlayarak darbe enerjisinin emilmesine katkıda bulunmaktadır. [13]

Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri

Kompozit malzemelerin üretim süreçleri, nihai ürünün kalitesini ve tasarımın hedeflerine uygunluğunu doğrudan etkileyen kritik aşamalardır. Kompozit malzeme üretiminde yaygın olarak kullanılan yöntemler genel olarak şu şekildedir:



Şekil 2.1. Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri

Bu tez kapsamında gerçekleştirilecek deneysel çalışmalarda, numunelerin üretimi için otoklav kürleme yöntemi kullanılmaktadır.

Otoklav kürleme yöntemi

Prepreg otoklav kürleme yöntemi, kompozit malzeme üretiminde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, malzeme bileşenlerinin belirli bir sıcaklık ve basınç altında kürlenmesi amacıyla otoklavda ısıtılması esasına dayanmaktadır. Prepreg, önceden reçine ile emprenye edilmiş elyaflar anlamına gelmekte ve bu malzeme türü, üretim sürecinin verimliliğini arttırmakta ve zırh gibi yüksek performans gerektiren uygulamalar için son derece uygundur. [14-16].

Kompozit malzemelerin balistik açıdan avantaj ve dezavantajları

Kompozit malzemeler, balistik koruma alanında birçok avantaj sunmasına rağmen bazı dezavantajlar da taşımaktadır. Bu malzemelerin kullanımına dair avantajlar, genellikle

yüksek dayanıklılık ve hafiflik gibi özelliklerden kaynaklanırken, dezavantajlar daha çok üretim zorlukları ve maliyetler gibi faktörlerle ilgilidir.

- Avantajlar: Kompozit malzemelerin en büyük avantajlarından biri, mükemmel enerji emme kapasitesine sahip olmalarıdır. Bu özellik, kompozit malzemelerin balistik tehditleri etkili bir şekilde sönümlemesine ve yüksek darbe dayanımı sağlamasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca, kompozitler hafif yapıları sayesinde geleneksel metal zırhlara göre önemli ölçüde ağırlık tasarrufu sağlamakta, bu da özellikle taşıma kapasitesini ve manevra kabiliyetini artıran önemli bir faktördür [17]. Çeşitli malzemelerin birleştirilmesiyle elde edilen bu zırhlar, yüksek koruma sağlarken aynı zamanda yapısal bütünlüğü de korumakta, bu da uzun süreli kullanımda büyük bir avantaj sağlamaktadır [18].
- Dezavantajlar: Kompozit malzemelerin üretimi, geleneksel metal zırh üretimine kıyasla daha karmaşık ve maliyetli olabilmektedir. Özellikle, yüksek performanslı kompozit malzemelerin üretimi, ileri düzey işleme teknikleri ve özel üretim ekipmanları gerektirmekte, bu da maliyetleri arttırmaktadır [19]. Ayrıca, bazı kompozitler, özellikle çok yüksek sıcaklık ve aşırı koşullar altında zayıf performans gösterebilmektedir. Bu nedenle, kompozit zırhların belirli iklim ve koşullara uygunluğu, bazen sınırlı olabilmektedir [20].

2.2.3. Sandviç yapılar ve enerji sönümleme mekanizmaları

Sandviç yapılar, genellikle iki sert yüzey katmanı arasında daha düşük yoğunluklu ve enerji sönümleyici bir çekirdek yapıdan oluşur. Alüminyum petek çekirdek, yapıya hafiflik kazandırırken darbe enerjisinin yayılmasını ve emilmesini kolaylaştırır. Bu yapılarda darbe sonucu oluşan enerjinin yüzeye yayılması, malzeme yoğunluğu, elastik modülü ve kalınlık ile doğrudan ilişkilidir.

2.2.4. Hibrit katmanlı yapılar ve katman diziliminin etkisi

Hibrit yapılarda farklı malzemelerin katmanlar hâlinde birleştirilmesiyle, her malzemenin avantajlarından yararlanılması hedeflenir. Literatürde ön yüzde rijit malzeme (örneğin karbon fiber), orta veya arka yüzeyde ise enerjiyi sönümleyen ve uzama kabiliyeti yüksek malzemelerin (örneğin Kevlar) kullanılması, sistemin genel performansını artırmaktadır. Bu

çalışma kapsamında karbon–kevlar–metal (alüminyum veya titanyum) dizilimlerinin balistik performansa etkisi karşılaştırılmıştır.

2.2.5. Darbe ve penetrasyon teorileri

Darbe fiziğinde, bir merminin hedefe çarpması sonucu oluşan enerji transferi; hız, kütle ve hedef malzemenin özellikleriyle ilişkilidir. Balistik darbe esnasında, ön yüzeyde ilk penetrasyon riski, orta katmanlarda enerji yayılımı ve arka yüzeyde oluşabilecek deformasyon incelenmektedir. Bu nedenle, darbe karşısında malzemelerin davranışını anlamak için elastik/plastik deformasyon teorileri, enerji emilimi ve dalga yayılımı kuramları dikkate alınmalıdır.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI VE TEZİN AMACI

Khalaf ve Hamzah (2024) çalışmasında, Al_2O_3 seramik ön yüzeyli, Kevlar/epoksi ve karbon/epoksi ara katmanlı ve alüminyum petek çekirdekli hibrit panellerin balistik performansı incelenmiştir. Çalışmada panel yapısında kullanılan farklı fiber takviyelerinin ve çekirdek kombinasyonunun darbe enerjisini sönümleme üzerindeki etkisi karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, seramik yüzeyin penetrasyonu engellemede etkili olduğu, Kevlar ve karbon katmanlarının ise enerji yayılımını optimize ederek arka yüzey travmasını azalttığı belirlenmiştir. Bu bulgular, çok katmanlı hibrit zırh sistemlerinde katman sıralamasının ve malzeme kombinasyonunun balistik direnci doğrudan etkilediğini göstermiştir.

Al-Mezrakchi ve çalışma arkadaşları (2020), yeni nesil hibrit kompozit sandviç zırh sistemlerinin hem tasarımını hem de sayısal modellemesini gerçekleştirmiştir. Çalışmada katmanlı yapılar farklı malzeme kombinasyonlarıyla optimize edilerek darbe altında yapısal davranışları incelenmiştir. Elde edilen bulgular, simülasyon destekli tasarım yaklaşımının malzeme seçimi ve katman mimarisinin performans üzerindeki etkisini öngörmede etkin olduğunu ortaya koymuştur. Bu sayede, deneysel doğrulama öncesinde hızlı ve maliyet etkin zırh tasarımlarının yapılabileceği vurgulanmıştır.

Ismail ve arkadaşları (2025), termoplastik poliüretan (TPU) yüzey tabakaları ile alüminyum 2024-T351 çekirdekten oluşan kompozit sandviç yapıların yüksek hızlı darbe altındaki tepkilerini araştırmıştır. Çalışmada farklı yüzey ve çekirdek kombinasyonlarının enerji sönümleme kapasitesi ve deformasyon davranışı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, TPU'nun elastik deformasyon yeteneği sayesinde darbe enerjisinin yayılmasını sağladığını, alüminyum çekirdeğin ise yapısal rijitliği artırarak penetrasyon direncine katkı sunduğunu göstermiştir. Bu bulgular, hafif ve çok katmanlı zırh sistemlerinde metal-polimer kombinasyonlarının etkinliğini ortaya koymuştur.

Shukla ve arkadaşları (2005), 2D ve 3D dokuma yapılarla üretilmiş sandviç kompozit panellerin balistik dirençlerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışmada, dokuma yönelimlerinin ve bağlantı tiplerinin darbe dayanımı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, 3D dokuma yapılarının, katmanlar arası delaminasyonu sınırlayarak enerji

yayılımını daha etkin sağladığını ve 2D yapılarla karşılaştırıldığında daha yüksek balistik direnç gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu durum, üç boyutlu dokuma mimarisinin çok katmanlı koruyucu yapılarda yapısal bütünlüğü artırmada avantaj sunduğunu göstermektedir.

Naik ve Pandya (2015), 2D dokuma kumaş kompozitlerin balistik darbe altındaki davranışlarını deneysel olarak incelemiş ve enerji sönümleme mekanizmalarını değerlendirmiştir. Farklı atış hızlarında gerçekleştirilen testler sonucunda, 2D dokuma yapının lif yönelimi sayesinde gelen darbe enerjisinin lifler arası yük paylaşımıyla yayılabildiği gözlemlenmiştir. Çalışma, bu yapıların delaminasyon ve lif kopması gibi hasar mekanizmalarıyla enerjiyi etkili şekilde absorbe ettiğini ortaya koymuştur. Sonuçlar, 2D dokuma kompozitlerin orta seviye tehditlere karşı hafif ve etkin balistik koruma sağlayabileceğini göstermektedir.

Flores-Johnson ve arkadaşları (2011), farklı kalınlık ve dizilimdeki çok katmanlı metal plakaların balistik performansını deneysel yöntemlerle incelemiştir. Çalışmada, arka ve ön katmanlardaki malzeme sertliğinin mermi durdurma yeteneği üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Sonuçlar, ön yüzde daha sert, arka yüzde daha sünek metallerin kullanıldığı yapıların darbe enerjisini daha verimli dağıtarak penetrasyonu engellediğini ortaya koymuştur. Bu çalışma, çok katmanlı metal zırh sistemlerinde malzeme sıralamasının balistik dayanımı optimize etmede kritik bir faktör olduğunu göstermiştir.

Bandaru ve arkadaşları (2019), Kevlar takviyeli termoplastik kompozitlerin çeşitli balistik etki senaryoları altındaki davranışlarını incelemiştir. Çalışmada, farklı darbe hızları ve mermi türleri altında yapının deformasyon mekanizmaları ve enerji sönümleme kapasiteleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, termoplastik matrisin elastik geri kazanım kabiliyeti sayesinde yapının tekrar darbelere karşı dayanımını koruduğunu ve Kevlar liflerinin darbe sonrası lif kopması ve çekilme yoluyla enerjiyi etkin biçimde absorbe ettiğini göstermiştir. Bu bulgular, Kevlar esaslı termoplastik kompozitlerin çoklu darbe tehditlerine karşı dayanıklı hafif zırh sistemlerinde kullanılabilirliğini desteklemektedir.

Ubeyli ve arkadaşları (2007), çelik zırh plakaları ile lamine kompozit zırh sistemlerinin balistik performanslarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir. Çalışmada, her iki yapının darbe dayanımı, arka yüz deformasyonu ve mermi durdurma yeteneği analiz edilmiştir.

Sonuçlar, çelik zırhların yüksek penetrasyon direnci sunduğunu ancak ağır yapıları nedeniyle hareket kabiliyetini kısıtladığını; buna karşın lamine kompozit yapıların daha düşük ağırlıkla benzer koruma sağlayarak balistik açıdan verimli bir alternatif oluşturduğunu göstermiştir. Bu çalışma, zırh sistemlerinde malzeme seçiminin performans-ağırlık optimizasyonu açısından kritik önem taşıdığını ortaya koymuştur.

Demir (2010) çalışmasında, metal esaslı zırhlar ile katmanlı kompozit zırh sistemlerinin 7,62 mm zırh delici mühimmatlara karşı balistik dayanımları deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Farklı malzeme ve yapı kombinasyonları test edilerek penetrasyon direnci, arka yüz deformasyonu ve mermiyi durdurma kabiliyeti analiz edilmiştir. Sonuçlara göre, katmanlı yapılar enerji yayılımı ve deformasyon kontrolü açısından avantaj sağlarken, metal zırhlar yüksek rijitlikleriyle doğrudan penetrasyonu sınırlamada daha etkili olmuştur. Bu durum, tehdit seviyesine göre zırh mimarisinin çok katmanlı veya tekil metalik olarak optimize edilmesi gerektiğini göstermiştir.

Özaydın (2015), polietilen esaslı kompozit malzemelerle balistik miğfer üretimi için en uygun üretim parametrelerini belirlemeyi amaçlamıştır. Çalışmada, pres sıcaklığı, basınç seviyesi ve soğuma süresi gibi değişkenlerin malzeme bütünlüğü ve balistik dayanım üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Deneysel bulgular, doğru işlem koşulları altında polietilenin yüksek enerji absorpsiyonu ve düşük özgül ağırlığı sayesinde etkin bir balistik koruma sağlayabildiğini ortaya koymuştur. Bu çalışma, hafif ve koruyucu başlık sistemleri için polietilen bazlı üretimin optimize edilebilirliğini göstermiştir.

Çelik (2023) çalışmasında, araçlara yönelik lamine hibrit kompozit zırh modeli tasarlanmış ve bu yapının balistik direnci sayısal ve deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Çalışma kapsamında farklı malzeme katmanları ve dizilimleri değerlendirilerek optimum enerji soğurma ve delici tehditlere karşı direnç performansı analiz edilmiştir. Sonuçlar, hibrit yapının geleneksel metal zırhlara göre daha düşük ağırlıkla benzer ya da daha yüksek koruma sağladığını ortaya koymuştur. Bu durum, modern araç zırhı tasarımında hibrit kompozitlerin etkin bir alternatif olabileceğini göstermiştir.

Bildik (2019) çalışmasında, farklı malzeme kombinasyonlarına sahip hibrit kompozit zırh yapıların balistik performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmada, katman sıralaması ve kullanılan fiber-matris türlerinin mermi durdurma kabiliyeti ve arka yüz

deformasyonu üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, katman diziliminin enerji yayılımını doğrudan etkilediğini ve doğru konfigürasyonda hibrit yapıların hem hafiflik hem de yüksek balistik koruma sağlayabildiğini göstermiştir. Bu çalışma, hibrit kompozit zırhlarda optimize edilmiş katman mimarisinin kritik rolünü vurgulamaktadır.

Alarçin (2014) çalışmasında, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMW-PE) ve aramid esaslı kumaşların balistik performansları deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Çalışmada, her iki malzemenin farklı katman sayılarında mermi durdurma kabiliyeti ve arka yüz deformasyonları analiz edilmiştir. Sonuçlar, UHMW-PE'nin hafifliği ve yüksek enerji absorpsiyon kapasitesiyle ön plana çıktığını; aramidin ise darbe sonrası yapısal bütünlüğü koruma açısından daha stabil sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bu bulgular, çok katmanlı yumuşak zırh sistemlerinde her iki malzemenin farklı tehdit seviyelerine karşı tamamlayıcı nitelikte kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Yanen (2015) çalışmasında, bireysel zırh uygulamaları için tabakalı hibrit kompozit yapıların üretimi gerçekleştirilmiş ve bu yapıların balistik performansları deneysel olarak değerlendirilmiştir. Farklı elyaf türlerinin ve katman dizilimlerinin darbe enerjisini absorbe etme kapasiteleri incelenmiş, özellikle katmanlar arası etkileşimlerin koruyuculuk üzerinde belirleyici rol oynadığı vurgulanmıştır. Sonuçlar, uygun kombinasyonlarla üretilen hibrit kompozitlerin hem hafiflik hem de etkin balistik dayanım açısından geleneksel zırh malzemelerine alternatif olabileceğini göstermiştir. Bu bulgular, kişisel koruyucu ekipman tasarımında kompozit mimarinin önemini ön plana çıkarmaktadır.

Yapılan literatür taraması, hibrit kompozit zırh sistemlerinin balistik performansını etkileyen başlıca parametreleri net biçimde ortaya koymaktadır. Çalışmalar genelinde; katman dizilimi, kullanılan fiber ve matris türleri, çekirdek malzemesi ile yüzey tabakalarının yapı bütünlüğü ve enerji yayılımı üzerinde belirleyici olduğu vurgulanmıştır. Özellikle Kevlar, karbon fiber, UHMW-PE ve termoplastik matris gibi malzemelerin enerji sönümleme kapasiteleri ve yapıya kazandırdığı hafiflik sayesinde geleneksel metal zırhlara göre daha optimize çözümler sunduğu görülmektedir. Aynı zamanda, sayısal modelleme ve deneysel yöntemlerin birlikte kullanıldığı araştırmalar, zırh tasarım sürecinde hem maliyet hem de zaman açısından avantaj sağlamaktadır. Bu bilgiler ışığında, tez çalışmanızın amacı olan farklı malzeme kombinasyonlarının Seviye IIIA balistik standartlarına uygunluğunu

deneysel olarak değerlendirme hedefi, mevcut literatürle uyumlu ve alana özgün katkılar sunma potansiyeli taşımaktadır.

Bu tez çalışmasının temel amacı, günümüzde kullanım alanı giderek artan kompozit malzemelerin balistik koruma sistemlerindeki potansiyelini, hem yapısal tasarım hem de performans açısından değerlendirmektir. Bu doğrultuda, literatürde daha önce incelenmiş ve çeşitli deneysel çalışmalarla test edilmiş metal ve kompozit esaslı balistik koruyucu yapıların, hibrit kompozit yapı formasyonlarında yeniden tasarlanarak uygulanabilirliği araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, NIJ 0108.01 Seviye IIIA balistik koruma standardına uygun şekilde yüksek performans gösteren numunelerin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Elde edilmesi amaçlanan deneysel veriler ile, farklı malzeme konfigürasyonlarının balistik etkinliği ortaya konulmakta; bu sayede ileride gerçekleştirilecek alternatif tasarım yaklaşımlarına bilimsel bir zemin oluşturulması hedeflenmektedir.

Yapılan literatür araştırmaları, çok katmanlı hibrit kompozit yapıların balistik tehditlere karşı etkin bir çözüm sunduğunu; özellikle farklı malzeme kombinasyonlarının, enerji yayılımı, arka yüz deformasyonu ve delaminasyon kontrolü gibi kritik parametreler üzerinde belirleyici etkiler yarattığını göstermektedir. Bununla birlikte, mevcut çalışmaların birçoğu ya yalnızca sayısal modellemelere dayanmakta ya da sınırlı sayıda malzeme dizilimini içermektedir. Ayrıca, aynı konfigürasyonun hem tekli hem çoklu darbe altında gösterdiği performansın karşılaştırmalı olarak incelendiği deneysel çalışmaların sayıca az olduğu dikkat çekmektedir.

Bu bağlamda, tez çalışmamda kullanılan karbon fiber, Kevlar, titanyum, alüminyum ve alüminyum petek çekirdek gibi malzemeler, hem mekanik özellikleri hem de balistik etki altındaki davranış profilleri dikkate alınarak seçilmiştir. Karbon fiberin yüksek elastik modülü ve sertliği, Kevlar'ın enerji absorpsiyon kapasitesi ve sünekliği, titanyumun darbe sonrası deformasyonları sınırlayıcı etkisi, bu malzemelerin kombinasyonel olarak değerlendirilmesini gerekli kılmıştır. Ayrıca, alüminyum petek yapının çekirdek olarak kullanılmasıyla yapı hafifletilmiş, enerji dağılımı ve rijitlik dengelenmiştir.

Bu çalışmada, farklı malzeme dizilimlerinin NIJ 0108.01 Seviye IIIA standardındaki tekli ve çoklu atış senaryolarında gösterdiği balistik performansı deneysel olarak karşılaştırmalı biçimde değerlendirmekte; böylece, malzeme yerleşiminin ve katman mimarisinin balistik

koruma üzerindeki doğrudan etkisini ortaya koymaktadır. Bu yönüyle çalışma, hem mevcut literatüre katkı sağlamayı hem de ileride geliştirilecek hafif, yüksek performanslı zırh sistemlerinin tasarımı için bilimsel bir temel oluşturmayı amaçlamaktadır.

Yapılan literatür incelemeleri, hibrit kompozit zırh sistemlerinin malzeme bileşimi ve katman dizilimine bağlı olarak balistik performanslarının önemli ölçüde değiştiğini ortaya koymaktadır. Ancak mevcut çalışmaların çoğunda malzeme konfigürasyonlarının sınırlı sayıda incelendiği, aynı yapının farklı atış senaryoları altındaki performanslarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmediği ve çoğu zaman sadece sayısal yöntemlere dayandığı gözlemlenmiştir. Bunun yanında, deneysel balistik testlerin tahribatsız muayene teknikleriyle bütünleştirildiği çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Bu tez çalışmasında, karbon fiber, Kevlar, titanyum, alüminyum levhalar ve alüminyum petek çekirdek gibi farklı mekanik özelliklere sahip malzemeler bir araya getirilerek hibrit kompozit sandviç paneller oluşturulmuştur. Seçilen bu malzemeler; karbon fiberin yüksek rijitliği, Kevlar'ın darbe enerjisini absorbe etme kabiliyeti, titanyumun deformasyon sönümleme kapasitesi ve alüminyum çekirdeğin hafifliği gibi özellikleri doğrultusunda, balistik performansın optimize edilmesini hedefleyecek şekilde konumlandırılmıştır.

Çalışmada üretilen numuneler, NIJ 0108.01 Seviye IIIA balistik standardına uygun olarak tekli ve çoklu atış senaryoları altında test edilmiş, yapıların mermiyi durdurma kapasiteleri ve arka yüzey deformasyonları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, elde edilen bulgular yalnızca balistik testlerle sınırlı kalmamış; tahribatsız muayene yöntemleri olan görsel inceleme, hassas boyutsal ölçüm ve X-ray analizleriyle de desteklenmiştir. Bu sayede, hem iç yapıda oluşan hasarların hem de deformasyon davranışlarının detaylı şekilde analiz edilmesi mümkün olmuştur.

Bu yönüyle tez çalışması, hem balistik performansı etkileyen katman mimarisi ve malzeme dizilimini bütüncül bir yaklaşımla incelemesi hem de NIJ standardı ile uyumlu deneysel testleri tahribatsız muayene teknikleriyle entegre etmesi açısından literatüre önemli bir katkı sunmaktadır. Aynı zamanda, farklı tehdit senaryolarına karşı hafif, dayanıklı ve optimize edilmiş zırh sistemlerinin tasarımı için özgün bir araştırma çerçevesi oluşturmaktadır.

Yapılan literatür araştırmaları, hibrit kompozit zırh sistemlerinin balistik performanslarının, kullanılan malzemelerin türüne, katman sıralamasına ve uygulanan test senaryolarına göre önemli ölçüde değiştiğini ortaya koymuştur. Ancak mevcut çalışmalarda genellikle sınırlı sayıda malzeme dizilimi test edilmiş, tekli ve çoklu darbe karşılaştırmalarına yeterince yer verilmemiş ve deneysel bulgular çoğu zaman tahribatsız muayene yöntemleriyle desteklenmemiştir. Bu eksikliklerden hareketle, bu tez çalışmasında farklı mekanik özelliklere sahip malzemeler (karbon fiber, Kevlar, titanyum, alüminyum ve alüminyum petek çekirdek) bir araya getirilerek, NIJ 0108.01 Seviye IIIA standardına uygun hibrit kompozit sandviç panellerin geliştirilmesi ve test edilmesi amaçlanmıştır. Hem tekli hem çoklu atış senaryolarında gerçekleştirilen deneysel testler, görsel, boyutsal ve X-ray muayene yöntemleriyle desteklenerek yapıların darbe sonrası davranışı çok yönlü olarak analiz edilmiştir. Bu yönüyle çalışma, literatürdeki boşlukları doldurmayı, farklı tehdit düzeylerine karşı hafif, dayanıklı ve etkin balistik koruma sistemlerinin tasarımına katkı sunmayı hedeflemektedir.

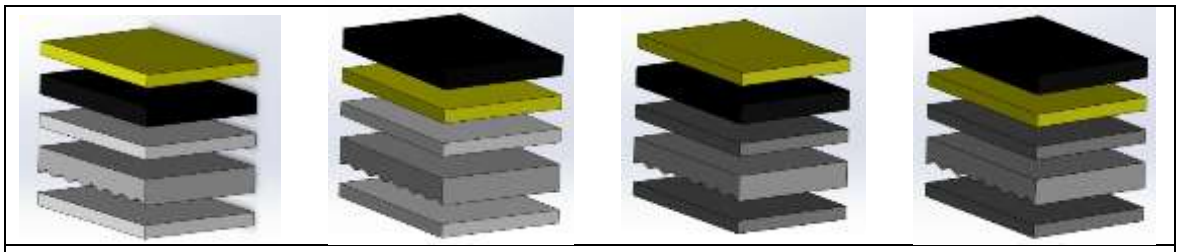
4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Hibrit Kompozit Yapılar

Bu tez çalışmasında iki aşamalı deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. İlk aşama deneysel çalışmalar için üretilen dört ayrı hibrit kompozit yapı ile atışlar gerçekleştirilmiş ve sonuçları değerlendirilmek üzere tahribatsız muayenelere tabi tutulmuşlardır. İlk aşama deneysel çalışmaları sonuçlarına göre ikinci aşama için yeniden dört adet hibrit kompozit plaka üretilmiş ve atışlara geçilmiştir. İkinci aşama deney numuneleri NIJ0108.01 IIIA seviyesine uygunluk için standart isterlerine göre atışlara tabi tutulmuştur.

Çizelge 4.1. Deneysel çalışma numune içerikleri

Numune1 ve Numune 5	Numune 2 ve Numune 6	Numune 3 ve Numune 7	Numune 4 ve Numune 8
Kevlar	Karbon	Kevlar	Karbon
Karbon	Kevlar	Karbon	Kevlar
Al Plaka	Al Plaka	Ti Plaka	Ti Plaka
Al Çekirdek	Al Çekirdek	Al Çekirdek	Al Çekirdek
Al Plaka	Al Plaka	Ti Plaka	Ti Plaka



a b c d

Resim 4.1. Deneysel çalışma numune içeriklerinin temsili gösterimi-numune-1(a), numune-2(b), numune-3(c), numune-4(d)

Deneysel çalışmalarda kullanılan hibrit kompozit yapıların bileşenleri hakkında bilgiler ve farklı konfigürasyonlar için seçilme sebepleri aşağıda açıklanmıştır:

Al 2024-T81 CLAD (AMS4478) Plaka

Al 2024-T81 CLAD (AMS4478) levhalar, hibrit balistik koruyucu sistemlerde, yüksek mukavemet, sünek enerji sönümleme, korozyon direnci ve üretim kolaylığı gibi özellikleriyle kritik rol oynamaktadır. Darbe sonrası çatlama yerine kontrollü deformasyonla

enerjiyi absorbe etmekte, arka yüz deformasyonunu azaltabilmektedir. Bu tür alaşımlar, özellikle çok katmanlı kompozit zırh sistemlerinin performansını artırmak üzere tasarlanmış yüksek mühendislik çözümleri arasında yer almaktadır.

Yüksek mukavemet- alansal ağırlık oranı açısından, Al 2024-T81, bakır alaşımına sahip yüksek mukavemetli bir alüminyum alaşımıdır. Bakır alaşımının sağladığı en büyük avantaj yüksek çekme ve akma dayanımıdır. T81 ısıl işlem ile mekanik dayanım arttırılmaktadır. T81 ifadesinin açılımı incelendiğinde bu deneysel çalışmada seçilen Al plakaların hangi özellikleriyle mekanik dayanım sağlanacağı da görülmektedir.

T: Al plakanın ısıl işlem gördüğünü ve malzemenin mukavemetinin arttırıldığını ifade etmektedir. Burada yapılan işlem çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemidir.

8: Malzemenin yoğun şekilde yapay yaşlandırma yapıldığını belirtmekle birlikte, her ne kadar maksimum mukavemetin altına düşülse de daha iyi tokluk ve stres korozyon direnci sağlanmaktadır.

1: Çözeltiye alınan malzemenin %1'den fazla şekil verme ve ardından yaşlandırıldığını ifade etmektedir [21].

2024 serisi alüminyum alaşımları, sünek kırılma davranışı göstererek darbe sırasında enerjiyi plastik deformasyonla sönümlenmektedir. Bu, balistik etki sırasında mermi kinetik enerjisinin yayılması ve delici etkinin azaltılması açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle T81 temperi, kontrollü yaşlandırma sayesinde hem mukavemeti hem de sünekliği dengeli bir biçimde optimize etmektedir [22].

Termo-mekanik uyumluluk ve kompozit matrisle etkileşim açısından incelendiğinde, Alüminyum alaşımlar, çoğu polimer matrisli kompozit sistemle (örneğin aramid veya UHMWPE bazlı yapılarla) termal genleşme açısından uyumlu bir davranış sergilemektedir. Bu, katmanlar arasında gerilme birikimini azaltmakta ve balistik darbe anında ara yüzey ayrılmalarını minimize etmektedir.

Bu malzeme seçimiyle, özellikle balistik darbelere karşı yapının lokal deformasyon kapasitesi arttırılırken, toplam sistem kütlesi minimumda tutulmaktadır. Bu, hafiflik ve koruyuculuk arasında optimal bir denge sağlanması amaçlanmaktadır.

Çizelge 4.2. Alüminyum plakanın fiziksel özellikleri [23,24]

Parametre	Sembol	Birim	Değer
Yoğunluk	ρ	g/cm3	2.78
Çekme Dayanımı	R	Mpa	481
Akma Dayanımı	R	Mpa	450
Elastik Modül	E	Gpa	72.4
%Uzama	%Strain	-	%6

Ti-6Al-4V (Tavlanmış, AMS 4911) Plaka

Ti-6Al-4V (Tavlanmış, AMS 4911) alaşımı, hibrit kompozit balistik koruma yapılarında; hafiflik, yüksek darbe dayanımı, sünek deformasyon kapasitesi, yüksek özgül mukavemet ve korozyon direnci gibi mühendislik açısından kritik avantajlar sunmaktadır. Bu özellikler, söz konusu alaşımı özellikle ön yüz zırh katmanı olarak tercih edilir kılmakta ve yapının genel balistik dayanımını belirgin biçimde artırmaktadır.

Ti-6Al-4V alaşımı, titanyum esaslı α+β tipi bir yapıya sahip olup, havacılık ve savunma sanayiinde yaygın olarak kullanılan yüksek performanslı mühendislik malzemeleri arasında yer almaktadır. Özellikle AMS 4911 standardında üretilen ve tavlanmış durumda kullanılan Ti-6Al-4V plakalar, balistik koruyucu hibrit yapılarda stratejik üstünlük sağlamaktadır.

Ti-6Al-4V plakaların deneysel çalışmada kullanılmak üzere seçilme sebeplerinden birisi düşük yoğunluğa rağmen yüksek çekme ve akma dayanımı olmasındandır. Bu özellik sayesinde numunede hafiflik ön plana çıkması, bununla birlikte darbe ve penetrasyon etkisine karşı dirençli bir yapı elde edilmesi amaçlanmaktadır. Yüksek özgül mukavemet numuneye maksimum korumayı minimum kütle ile sağlayacaktır [25].

Deneysel numunelerin tasarımında göz önünde bulundurulan bir diğer madde, numunelerin balistik darbelere karşı yüksek enerji sönümleme kapasitelerinin olmasıdır. Bu noktada seçilen Tavlanmış Ti-6Al-4V'nin, sünek davranış özelliğiyle plastisite vasıtasıyla balistik darbe esnasında enerjiyi absorbe etmesi amaçlanmaktadır. Kompozit hibrit yapılarda

Tavlanmış Ti-6Al-4V'nin, delici etkilerin yayılmasını azaltmakla birlikte zırhın arka yüzey deformasyonunu azaltması amaçlanmaktadır [26].

Ti-6Al-4V malzemesinin plaka halinde numunelerde tercih edilmesinin bir diğer sebebi ise hibrit yapıdaki diğer malzemeler ile termal ve mekanik uyumudur. Kevlar ve karbon fiber takviyeli epoksi malzemelerle termal genleşme açısından uyumlu olan Ti-6Al-4V malzeme uyumu ile otoklav gibi yüksek sıcaklık kürleme işlemlerinde sıcaklık değişimlerine karşı dirençli davranarak katmanlar arasında kalıcı gerilme birikimini önleyerek önemli bir avantaj sağlamaktadır [27].

Ti-6Al-4V, tavlanmış yapıda yüksek kırılma tokluğu ve yeterli sertlik seviyesi sunar. Bu özellik, merminin kinetik enerjisini dağıtma ve çatlak ilerlemesini sınırlama açısından balistik dayanımı arttırmaktadır. Özellikle tasarlanan çok katmanlı kompozit hibrit numunelerde, ön yüz katmanı olarak görev aldığında, bu alaşım merminin kinetik enerjisini etkin biçimde ilk aşamada sönümlemesi amaçlanmaktadır [28].

Çizelge 4.3. Ti-6Al-4V Plakanın fiziksel özellikleri[materials properties handbook: titanium alloys, ASM ınternational, 1994.]

Parametre	Sembol	Birim	Değer
Yoğunluk	ρ	g/cm3	4,43
Çekme Dayanımı	R	Mpa	895
Akma Dayanımı	R	Mpa	828
Elastik Modül	E	Gpa	110
%Uzama	%Strain	-	%13

Alüminyum bal peteği-5056 alüminyum petek çekirdek (SAE-AMS4349)

5056 alüminyum petek çekirdek (SAE-AMS4349) yapısı, balistik hibrit panellerde; hafiflik, yüksek enerji emme kapasitesi, deformasyon kontrolü ve uzun süreli yapısal dayanıklılığı bir araya getirerek oldukça avantajlı bir çekirdek çözümü sunmaktadır. Bu özellikleri sayesinde, çok katmanlı balistik zırh sistemlerinde iç katman olarak kullanımı, sistemin genel darbe direncini ve kullanıcı güvenliğini önemli ölçüde artırmaktadır.



Resim 4.2. Alüminyum bal peteği

5056 alüminyum alaşımı, tipik olarak %5 magnezyum içeren, orta düzeyde mukavemet sunan bir malzemedir. Petek yapı formuna getirildiğinde, yoğunluğu son derece düşerken (yaklaşık 0.03–0.1 g/cm³), özgül rijitlik önemli ölçüde artmaktadır. Bu, balistik darbe sırasında yüzey katmanlarının enerjiyi ilettiği çekirdek yapının basma yükleri altındaki deformasyonu emerek darbe etkisini dağıtmasını sağlamaktadır [29].

Petek yapılar, yüksek deformasyon kapasitesine sahip olup çarpma sırasında "crush" (ezilme) davranışı ile enerji sönümlemektedir. 5056 alaşımının sünek karakteri sayesinde, darbe anında çekirdek malzeme göçerek kinetik enerjinin önemli bir kısmını absorbe etmektedir. Bu, merminin arka yüz deformasyonunu (BFS) azaltmak için kritik bir işlev görmektedir. [30].

Balistik panellerde kalınlık artışı ile ağırlık artışı arasında ciddi bir denge gerekmektedir. 5056 petek çekirdekler, yapıya kalınlık kazandırırken toplam ağırlığı sınırlı tutmaktadır. Ayrıca hücre boyutu, duvar kalınlığı ve çekirdek yüksekliği gibi parametreler, darbe yönünde özelleştirilmiş performans sunacak biçimde ayarlanabilmektedir [31].

5056 honeycomb çekirdek, epoksi reçinelerle veya metal yüzeylerle kolayca yapıştırılabilmektedir. Bu durum, karbon fiber, Kevlar veya titanyum yüzey katmanlarıyla güçlü bir yapısal bağ kurarak bütünlüğü ve balistik performansı arttırmaktadır.

Çizelge 4.4. Alüminyum bal peteğinin fiziksel özellikleri [32]

Parametre	Değer	Birim
Hücre Boyutu	3.23	mm
Yoğunluk	103.80	kg/m3
Stabilize Edilmiş Basma Dayanımı	7.759	Mpa
Stabilize Edilmemiş Basma Dayanımı	7.1006	Mpa
Nokta Delaminasyon Dayanımı	891.6	N

Karbon fiber

Karbon fiber takviyeli kompozitler, özellikle yüksek özgül mukavemet ve yüksek özgül rijitlik özellikleri nedeniyle balistik koruma uygulamalarında önemli bir yer edinmektedir. Karbon fiberin çekme dayanımı tipik olarak 3.5–5.5 GPa, elastik modülü ise 230–600 GPa aralığında değişmektedir. Bu yüksek değerler, darbe sırasında enerjinin etkin bir şekilde emilmesine ve yükün malzeme boyunca hızlı bir şekilde yayılmasına olanak sağlamaktadır [33].

Ayrıca karbon fiber, düşük yoğunluğu (~1.75 g/cm³) sayesinde, yapıya ekstra kütle kazandırmadan yüksek mekanik dayanım sunmaktadır. Bu da taşıma sistemleri için kritik öneme sahip olan hafiflik kriterini karşılamada avantaj sağlamaktadır. Özellikle titanyum ve alüminyum gibi metalik plakalarla birlikte kullanıldığında, rijitliğin artırılması ve delici tehditlerin saptırılmasında sinerjik etkiler elde edilebilmektedir.

Karbon fiberin yüksek elastik modülü, kompozit panelin eğilme direncini artırarak, darbe sonrası oluşabilecek kalıcı deformasyonları sınırlamaktadır. Bununla birlikte, karbon fiber tabakaların yüzeyde konumlandırılması, gelen darbenin yayılmasını destekleyerek alttaki enerji absorban tabakalara (örneğin; kevlar) iletilen yükü azaltır ve böylece çok katmanlı yapıların balistik performansını optimize etmektedir [34].

Bununla birlikte, karbon fiberin hibrit sandviç yapıların üst katmanlarında kullanılması, hem darbe rijitliğini artırmakta hem de yapı bütünlüğünü koruyarak balistik enerji dağılımını desteklemektedir. Otoklav kürleme yöntemiyle üretilen karbon prepreg tabakalar, düzgün

reçine dağılımı ve boşluksuz yapı sayesinde daha öngörülebilmekte ve tekrarlanabilmekte olan mekanik özellikler sunmaktadır [35].

Bu deneysel çalışmada kullanılan epoksi reçineli karbon fiber takviyeli malzeme seçilirken, deneysel çalışmada kullanılan titanyum, alüminyum plakalar ve kevlar malzeme ile termal ve mekanik uyumu göz önünde bulundurulmaktadır. Numunelerde karbon tabakaya yer verilmesi ile hafif ancak dayanımı yüksek bir yapı elde edilmesi amaçlanmaktadır. Atış sonrası hedefte enerjiyi absorbe eden karbon, hibrit yapıda bulunan kendisinden sonra gelen tabakalara enerjinin bir kısmını hapsederek devretmektedir.

Çizelge 4.5. Karbon fiber malzemenin fiziksel özellikleri[36]

Parametre	Değer	Birim
Alansal fiber yoğunluğu	195	g/m2
Alansal Reçine Emdirilmiş Bez Ağırlığı	330	g/m2
Reçine İçeriği	41	%
Çekme Dayanımı	648-682	Mpa
Çekme Modülü	58-68	Gpa
ILSS	73-81	Mpa

Kevlar fiber

Piyasada sıkça kullanılan ve mekanik özellikleri çok benzer olan Nelcote® E-722 epoksi prepreg malzemenin özellikleri aşağıdaki tabloda sunulmaktadır. Deneysel çalışmada seçilen kevlar malzeme savunma sanayiinde kullanıldığı için malzeme bilgileri tamamen paylaşılamamaktadır.

Aramid fiber takviyeli epoksi reçineli plakaların deneysel çalışmada tercih edilme sebebi üstün mekanik özellikleridir. Darbe enerjisini absorbe edeceği gibi, yoğunluğunun düşük olması sebebiyle yüksek özgül mukavemet elde edilmesi sağlanmaktadır. Kevlar malzemenin yüksek uzama kabiliyeti sayesinde numune darbe enerjisini lif yönünde yayarak yapısal deformasyonları ve derinlemesine penetrasyonu önlemektedir. Kevlar fiberler darbe

sonrasında kırılmadan hemen önce yüksek enerji absorbe ederek kalan enerjiyi arka plakaya aktarmaktadır. [37-39].

Bu deneysel çalışmada hibrit yapı konfigürasyonunda karbon, kevlar, alüminyum ve titanyum malzemelerin termal ve mekanik uyumu sayesinde, kevlar ile merminin çekirdeğinin durdurulması ve parçalanması hedeflenmektedir.

Kevlar'ın yüksek çekme dayanımı, darbe altında enerji absorpsiyonu ve düşük yoğunluğu, onu hibrit yapılar için ideal bir iç/destek tabaka haline getirmektedir. Bu bağlamda, Kevlar fiberlerin karbon fiberin rijitliğini tamamlayıcı ve metal plakaların penetrasyon direncini destekleyici bir yapısal öğe olarak kullanılması, hibrit balistik panellerin performansını optimize etmektedir.

Çizelge 4.6. Nelcote E-722 fiber malzemenin fiziksel özellikleri[40]

Özellik	Değer (Tipik)	Açıklama
Alansal fiber yoğunluğu	285 g/m²	Kullanılan aramid kumaşın birim alan başına kuru elyaf ağırlığı
Alansal reçine emdirilmiş bez ağırlığı	~570–600 g/m²	Elyaf ve reçine toplamı; reçine içeriğine bağlı olarak değişir
Reçine İçeriği	%52–58	Prepreg içindeki reçinenin ağırlıkça oranı
Çekme Dayanımı (0°)	~464 MPa	ASTM D638 standardına göre test edilmiştir
Çekme Modülü (0°)	~4.8 GPa	Lif yönünde elastik modül
ILSS	~5.6 MPa	ASTM D2344 standardına göre kısa kiriş kayma dayanımı

Kimyasal yapıştırıcı-1: AF163-2K

Deneysel çalışmada kullanılan TMS-N154-02-01 film yapıştırıcı kimyasal malzeme yapısal olarak numunelerde kullanılan titanyum malzeme için uyumludur. Titanyumun, çekirdek yapıya yapışmasını sağlayan bu malzeme rijit bir yapı elde edilmesini sağlamakta ve mekanik özellikleri ile de numuneye dayanım kazandırmaktadır.

Çekme, kayma, soyulma dayanımı açısından yüksek ve titanyuma uyumlu film yapıştırıcı seçimi ile yüzeyler arasında yük aktarımı gerçekleştirilmektedir.

Çizelge 4.7. Kimyasal yapıştırıcı-film adhesive malzemenin fiziksel özellikleri[41]

Parametre	Değer	Birim
Çekme Kesme Dayanımı	30–35	Mpa
Soyulma Dayanımı	150–200/25	N/mm
Kürlenme Sıcaklığı	120–180	°C
Servis Sıcaklığı Aralığı	(-55)- (+120)	°C

Kimyasal yapıştırıcı TMS-N154-30-01

Alüminyum plakalarla alüminyum çekirdek yapının birleştirilmesinde kullanılan, TMS-N154-30-01 film yapıştırıcı malzemenin teknik bilgileri gizlilik politikası gereği paylaşılamamakla birlikte 3M malzeme katoloğunda benzer malzemenin mekanik özellikleri üstteki tabloda bilgilendirme amaçlı paylaşılmaktadır.

AF163-2K'da izlenen seçim süreci, bu film yapıştırıcı için de gerçekleştirilmektedir. Alüminyum malzemelerle uyumlu film yapıştırıcı seçilerek kür işlemleri sonrası rijit bir yapı elde edilmesi amaçlanmaktadır.

4.2. Üretim Yöntemi

Test için kullanılacak numuneler temiz odalarda elle serim işlemleri ve birleştirme işlemleri sonrası otoklav yöntemiyle kür edilmekte ve testlere tabii tutulmaktadır.

Atışlar İçin Hazırlanan Test Numuneleri:

Numune üretim süreci, ilk aşamada reçine emdirilmiş kevlar ve karbon yapıların kür olacağı ve ikinci aşama olarak Alüminyum ve Titanyum plakalarla birleştirilecekleri süreci kapsamaktadır. Hazırlanacak malzemeler otoklav kürleme ile iki aşamada birleştirilmekte ve numuneler atışlara hazır hale getirilmektedir.

Metallerin hazırlanması

Alüminyum ve Titanyum malzemeler deneysel çalışma boyutlarına göre net ölçüde 5 eksen tezgahta kesilmiş ve kimyasal işleme tabi tutulmaktadır. Kompozit plakalarla ikinci aşamada yapışma işlemi gerçekleşeceği için metal plakaların yüzey hazırlıkları yapışma yüzeylerinin aktif olması açısından çok kritiktir. Bu tez çalışması kapsamında üretilen numunelerde kullanılan alüminyum plakalara kromik asit anodizasyonu uygulanmış olup, mikropürüzlü yüzey oluşumu, kimyasal kararlılık ve temiz yüzey ile kompozit yapı ile uyum amaçlanmıştır. Titanyum plakalara uygulanan fosfatlama işlemi de aynı şekilde mikroskobik pürüzlülük oluşturarak yapışma kalitesini sınırlı ölçüde de olsa arttırmayı sağlamıştır.



Resim 4.3. Al 2024-T81 CLAD (AMS4478) Plaka



Resim 4.4. Ti-6Al-4V (Tavlanmış, AMS 4911) Plaka

Karbon-kevlar reçine emdirilmiş bezlerin hazırlanması

Standartlara uygun şekilde hazırlanan 305*305 mm plaka oluşacak şekilde sekiz kat kevlar ve sekiz kat karbon reçine emdirilmiş bez malzemenin serim açıları deneysel çalışmanın tasarım aşamasında belirlenmiştir. Kompozit plakayı oluşturacak prepreg malzemeler, ply kesme makinesinde açılarına uygun şekilde kesilmiş ve serim işlemi başlayana kadar koruyucu torbalarına alınmıştır.



Resim 4.5. Ply kesme tezgahı [42]

Deneysel çalışmada kullanılan kompozit plakaların serim açıları her bir plaka için laminat notasyonu aşağıdaki gibidir:

[0/90/+45/−45]s

Buradaki "s" harfi, dizilimin simetrik olduğunu belirtir. Yani ortadan sonra serimler ayna görüntüsü şeklindedir. Ayrıca, hem +45° hem de -45° açılar olduğu için bu yapı aynı zamanda dengeli (balanced) bir laminattır.

Serim açıları için aşağıdaki tablo incelenmektedir.

Çizelge 4.8. Deneysel çalışma numuneleri kompozit plaka serim açıları

Katman Sayısı	1.Kat	2.Kat	3.Kat	4.Kat	5.Kat	6.Kat	7.Kat	8.Kat
Serim Açısı	0	90	+45	-45	-45	+45	90	0

Deneysel çalışmanın tasarım aşamasında serim açıları literatür çalışmaları göz önünde bulundurularak yapılmakta ve mukavim bir yapı elde etmek adına simetrik ve dengeli bir yapı tercih edilmektedir. Simetrik yapı sayesinde eğilme altında termal ve kalıntı gerilmeler minimize edilmektedir. Dengeli yapı sayesinde laminatın yatay düzlemde burkulma veya burulma yapma eğilimi azalır. Serim açılarının özellikle bu değer olması farklı açılar için aşağıdaki gibi açıklanabilir [43-46].

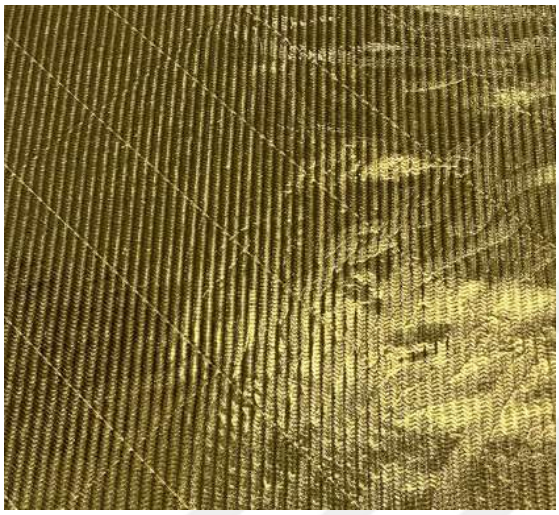
0° ve 90° katmanlar, eksenel (uzunlamasına) ve enine çekme yüklerine karşı yüksek mukavemet sağlamaktadır [45].

±45° katmanlar, özellikle kayma gerilmelerine karşı dayanımı artırır. Bu, balistik darbe ve burulma etkilerine karşı kritik önemdedir [45].

Farklı serim açılarına yer verilmesi, yüklerin çok yönlü karşılanmasını sağlamakta, bu da balistik plakalar gibi çok yönlü darbelere maruz kalan yapılar için oldukça uygundur [46].

Kompozit plakalarda simetri ve balansla elde edilmeye çalışılan özellikler aşağıdaki gibidir:

- Yüksek darbe dayanımı
- İyi kayma ve çekme mukavemeti
- Yönelmiş mukavemet yerine izotropik sayılabilecek davranış (tüm yönlerde makul dayanım)
- Delaminasyon riski düşük (özellikle otoklav kürleme ile düzgün basınç ve sıcaklık sağlandığı için) [45]



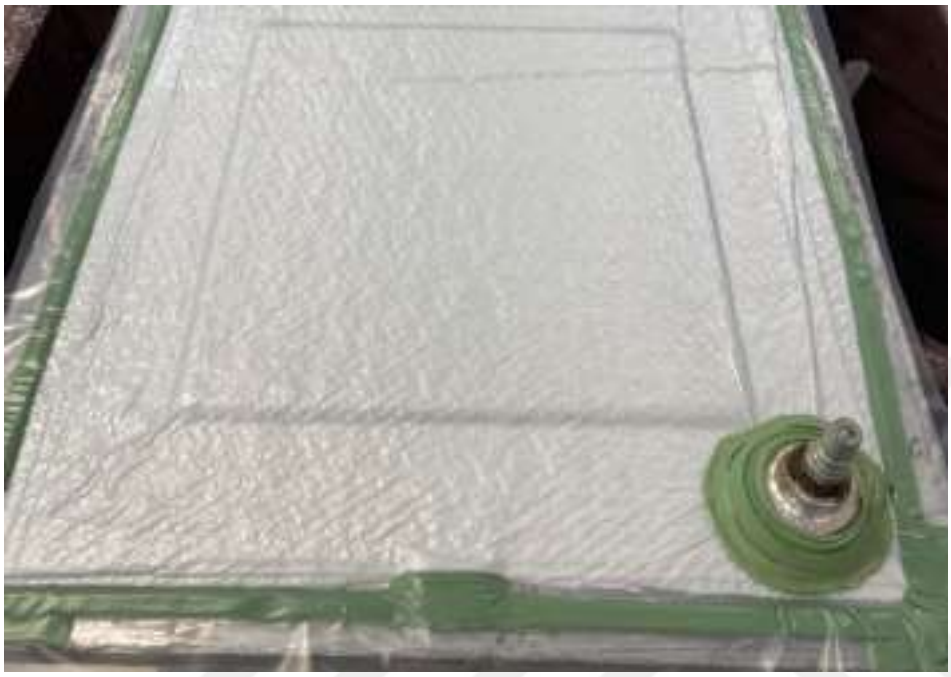
Resim 4.6. Deneysel çalışmalarda kullanılan karbon fiber takviyeli kompozit malzeme

UD kumaş yerine örgü kumaş tercih edilmesinin sebebi, örgü kumaş yapıları, hem atkı hem de çözgü yönlerinde lif içerdikleri için, gelen darbenin yönüne bakılmaksızın enerjiyi daha homojen biçimde dağıtabilmekte ve lif kopmaları sınırlı bölgelerde kalmaktadır.



Resim 4.7. Deneysel çalışmalarda kullanılan kevlar fiber takviyeli kompozit malzeme

Kevlar kumaş için de yine UD yerine örgü kumaş tercih edilmiştir. Karbon fiber yapıda belirtildiği gibi hem enerjiyi daha homojen şekilde dağıtmakta, hem de çok eksenli darbe senaryolarında yani farklı açılardan gelen atışlarda daha iyi performans hedeflenmektedir.



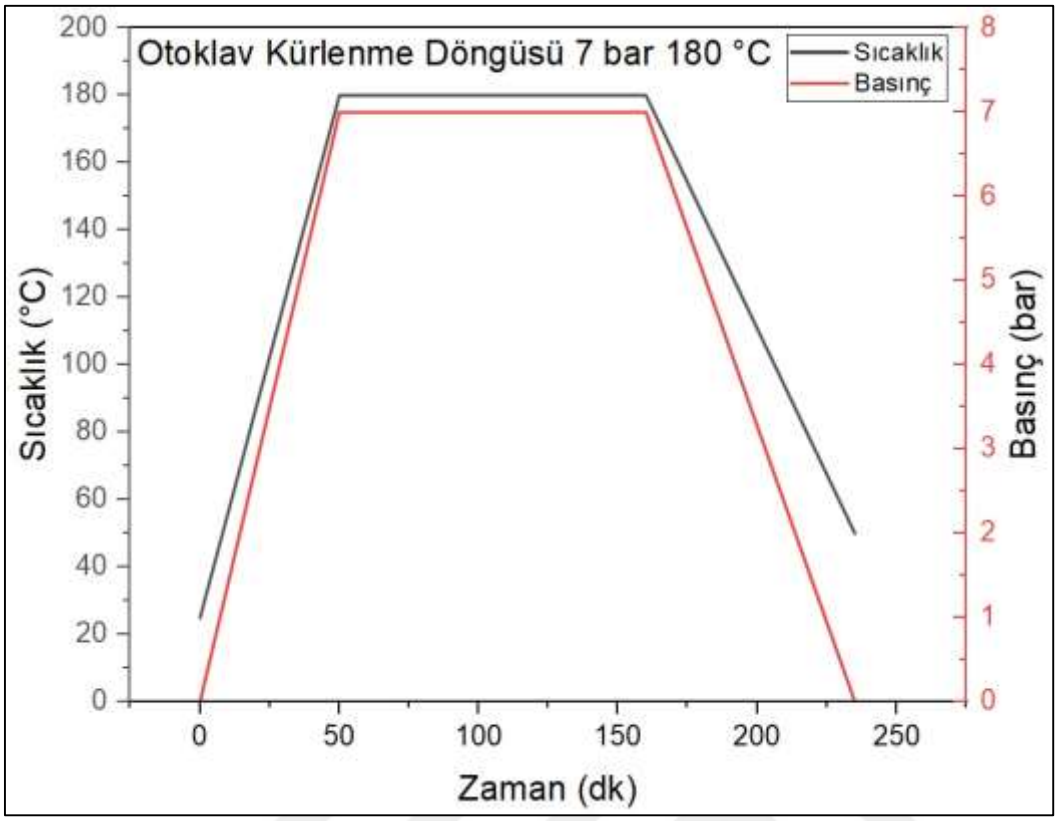
Resim 4.8. Deneysel çalışmalarda kullanılan kompozit plakaların kür öncesi vakum altında torbalanmış görseli

Lamine yapılarda delaminasyonu önlemek adına ara vakumlar çok kıymetlidir. Temiz odada gerçekleştirilen reçine emdirilmiş bezlerle serim işlemleri esnasında her katta üretilecek numunelere yaklaşık 5 dakika ara vakum uygulanmakta böylece katlar arasında olası hava kabarcıkları ve olası katlar arası ayrılma riski azaltılmaktadır.

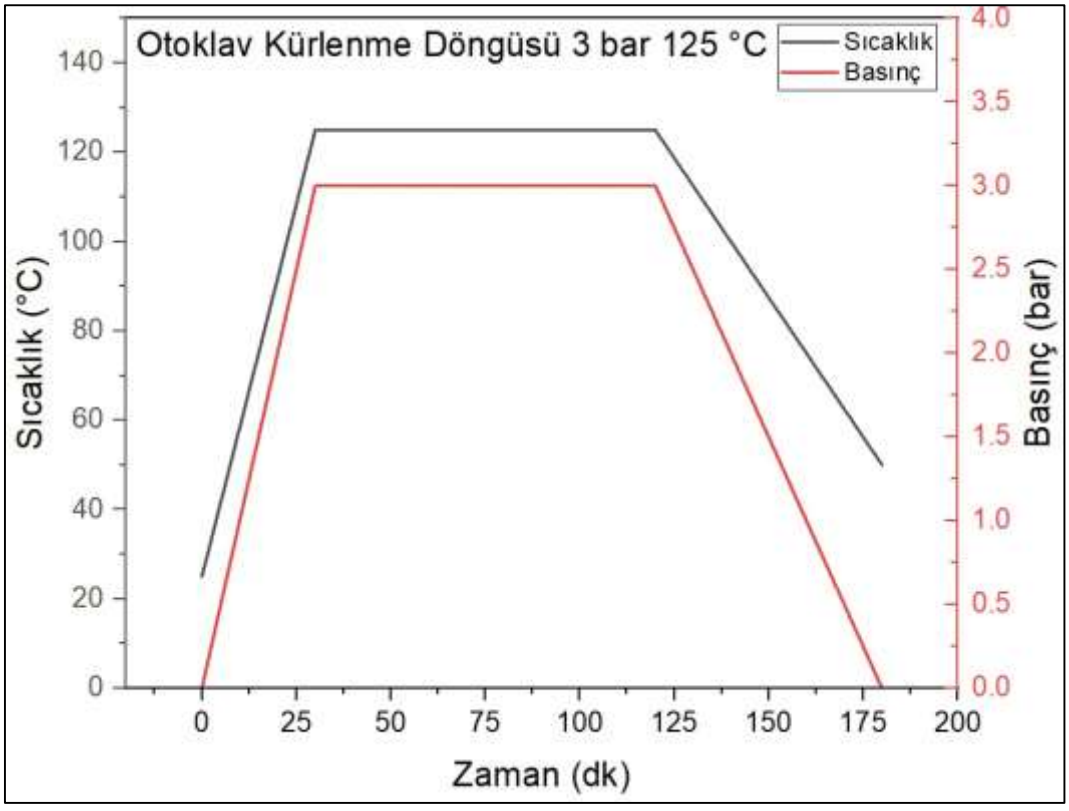
Otoklav işlemleri kür reçetesi

İlk aşamada dört ayrı karbon-kevlar plaka 7 bar 180 derece sıcaklıkta otoklavda kür edilmektedir. Kür işlemleri sonrasında kalıptan ayrılan plakalar, tekrar temiz odaya alınarak metallerle birleştirilmek üzere ikinci kür işlemine hazırlanmaktadır.

Kimyasal işlemleri tamamlanan metalik plakalar ve 7 bar 180 derece sıcaklıkta kür olmuş kompozit plakalar temiz odada kimyasal yapıştırıcı –film adhesive- uygulaması sonrasında tekrar 3 bar basınç ve 125 derece sıcaklıkta otoklavda kürlenmekte, kalıptan ayrılma işlemleri yinelenmektedir.



Şekil 4.1. Lamine yapının kür çevrim grafiği



Şekil 4.2. Hibrit sandviç yapının kür çevrim grafiği

Lamine yapının kür işlemlerine göre sandviç yapıda daha düşük basınç seçilmesinin temel nedeni çekirdek yapıdır. Hücrelerin ezilmemesi ve çökmemesi için, yapının deformasyona uğramaması için ve homojenliğin bozulmaması için 3 bar basınç seçilmektedir. Aynı zamanda yüzey katmanları ile bağlantıyı kurabilmesi adına belirli seviye olması gereken basınç değeri yeterlidir.

Otoklav kürleme işlemleri bitiminde kalıptan ayrılan numunelerin görselleri aşağıdaki gibidir:



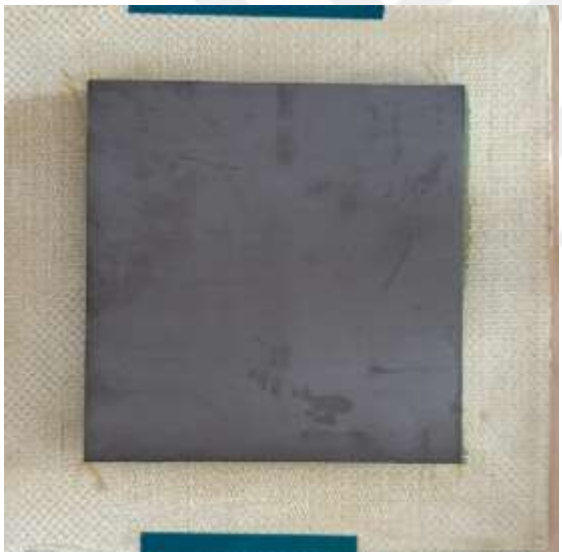
Resim 4.9. Numune 1 ve numune 5, kevlar-karbon-alüminyum sandviç yapı



Resim 4.10. Numune 2 ve numune 6, karbon-kevlar-alüminyum sandviç yapı



Resim 4.11. Numune 3 ve numune 7, kevlar-karbon-titanyum sandviç yapı



Resim 4.12. Numune 4 ve numune 8, karbon-kevlar-titanyum sandviç yapı

Çizelge 4.9. 1. Aşama balistik deney numunelerinin kür sonrası ağırlıkları

Numune	Numune İçeriği	Ağırlık(g)
1	Kevlar-Karbon-Alüminyum Sandviç Yapı	907,2
2	Karbon-Kevlar-Alüminyum Sandviç Yapı	903,4
3	Kevlar-Karbon-Titanyum Sandviç Yapı	1024,9
4	Karbon-Kevlar-Titanyum Sandviç Yapı	1026,7

Çizelge 4.10. 2. Aşama balistik deney numunelerinin kür sonrası ağırlıkları

Numune	Numune İçeriği	Ağırlık(g)
5	Kevlar-Karbon-Alüminyum Sandviç Yapı	906,7
6	Karbon-Kevlar-Alüminyum Sandviç Yapı	908,1
7	Kevlar-Karbon-Titanyum Sandviç Yapı	1028,5
8	Karbon-Kevlar-Titanyum Sandviç Yapı	1028,0

Numunelerin kür sonrası kalınlıkları

Numunelerin üretim sonrası kalınlık ölçümleri dijital mikrometre ile gerçekleştirilmiş ve aşağıda sunulmuştur. Bu değerler, hem üretim sürecinin tutarlılığını değerlendirmek hem de numuneler arası balistik performans karşılaştırmasında parametre olarak dikkate alınmıştır:

Çizelge 4.11. 1. Aşama balistik deney numunelerinin kür sonrası kalınlıkları

Numune	Numune İçeriği	Kalınlık(mm)
1	Kevlar-Karbon-Alüminyum Sandviç Yapı	19,34
2	Karbon-Kevlar-Alüminyum Sandviç Yapı	19,48
3	Kevlar-Karbon-Titanyum Sandviç Yapı	19,30
4	Karbon-Kevlar-Titanyum Sandviç Yapı	19,78

Çizelge 4.12. 2. Aşama balistik deney numunelerinin kür sonrası kalınlıkları

Numune	Numune İçeriği	Kalınlık(mm)
5	Kevlar-Karbon-Alüminyum Sandviç Yapı	19,65
6	Karbon-Kevlar-Alüminyum Sandviç Yapı	19,56
7	Kevlar-Karbon-Titanyum Sandviç Yapı	19,68
8	Karbon-Kevlar-Titanyum Sandviç Yapı	19,51

4.3. Balistik Test

Balistik test düzeneği

Üretim işlemleri tamamlandıktan sonra numunelere özel poligonda atışlar gerçekleştirilmiştir. Poligonda numuneler hedef sabitleyici ile sabitlenmiş ve mesafe, mekanizma yardımıyla ilk aşama numuneler için 10 m ve NIJ standardında yapılan ikinci aşama numuneleri için 5 m olarak ayarlanmıştır.



Resim 4.13. Atışların yapıldığı poligon ve hedef mekanizması görseli

Atışlarda CANİK SFX TP9 marka tabanca kullanılmıştır ve teknik özellikleri aşağıdaki gibidir:

Çizelge 4.13. Canik SFX TP9 tabancanın teknik özellikleri

Model	Kalibre/Şarjor Kapasitesi	Tetik Hareketi	Ölçüler			Namlu Uzunluğu
			Uzunluk	Yükseklik	Genişlik	
Tp9 Sfx	15-18-20 Rounds	Sao	210,5 Mm	145 Mm	35 Mm	132 Mm



Resim 4.14. Atışlarda kullanılan CANİK SFX TP9 marka tabanca [47]

Atışlarda mermi olarak 9x19 mm Parabellum 124 grain FMJ tabanca mermisi kullanılmıştır. Mermi özellikleri aşağıdaki gibidir:

Kullanılan mermi, askeri ve sivil alanlarda en yaygın kullanımı olan mühimmatlardan biridir. Diğer terimlerin açıklamaları aşağıdaki gibidir:

9 mm: Luger olarak da bilinir. Çap(kalibre) bu mermi için 9 mm olduğu anlamına gelmektedir.

Grain(Gn):Mermi çekirdeğinin ağırlığını belirtmektedir. 1 grain ≈ 0.0648 gram'dır. Atışlarda kullanılan mermiler 124 grain olduğu için yaklaşık olarak; 124 grain ≈ 8.04 gram'a denk gelir. Daha ağır çekirdekler genellikle daha fazla penetrasyon sağlamaktadır.

Full Metal Jacket(FMJ): Tam metal ceketli mermi anlamına gelmekle birlikte, merminin kurşun çekirdeği genellikle bakır alaşımlı tabakayla kaplıdır.

"9 mm 124 grain FMJ" ifadesi, çapı 9 mm olan, çekirdeği 124 grain (8 gram) ağırlığında, kurşun çekirdeği metal bir ceketle kaplı standart bir tabanca mermisidir. Mermi hızı yaklaşık olarak 436 m/s'dir ve deneysel çalışmada testler için isterleri karşılamaktadır.



Resim 4.15. Atışlarda kullanılan 9x19 mm parabellum 124 grain fmj tabanca mermisi

4.4. Tahribatsız Muayene Yöntemleri

4.4.1. Görsel muayene

Bu muayenede, deneysel çalışmada kullanılan dört farklı yapı ve sekiz ayrı numunenin atışlar sonrası fiziki durumları görsel olarak incelenmiştir. Numunelerin ön ve arka yüzeylerinde delinme durumları tespit edilmiş ve raporlanmıştır.

4.4.2. Boyutsal muayene

Bu tahribatsız muayene yönteminde boyutsal ölçüm cihazı kullanılmıştır. Boyutsal ölçüm cihazına ait kol yardımı ile atış sonrası sekiz ayrı numune taranmış ve bilgisayar ortamına görüntüleri aktarılmıştır. Deformasyonların ölçüleri ve merminin nüfuziyetine göre oluşturduğu tahribat derinlikleri incelenmiştir.

4.4.3. X-Ray cihazı ile muayene:

X-Ray görüntüsü ile merminin nasıl bir hasar oluşturulduğu incelenmiş ve mermi hareketi değerlendirilmiştir. X-ray kalın yapıların analizinde tercih edilirken, yoğunluk farkı bazlı çalışır.

X-Ray tarama cihazı ile numuneler atış sonrasında taranmış, merminin hedef içerisindeki hareketi ve dağılımı tespit edilmeye çalışılmıştır.

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Testlere Tabi Tutulan Numunelerin Atış Sonrası Tahribatsız Muayene Bulguları

5.1. Görsel Muayene Bulguları ve Sonuçları

Veriler, ön ve arka yüz delik durumu ile mermi konumunu içermektedir ve farklı katman dizilimlerine sahip dört hibrit yapı için bulgular aşağıdaki gibidir:

Birinci aşama atışlar- 10 metre mesafe tek atış

Tüm numunelerde ön yüz delinmiştir. Bu, ön yüzeyin darbe etkisini karşılamada yetersiz olduğunu gösterir. Ancak bu, yapının zayıf olduğu anlamına gelmez; önemli olan arka yüzün delinip delinmemesidir.

Arka yüzeyin delinmediği tek konfigürasyon titanyum içeren yapılardır (Numune 3 ve 4). Bu durum, titanyumun penetrasyona karşı etkili bir bariyer işlevi gördüğünü ve arka katmanda yer almasının kritik olduğunu göstermektedir.

Karbon-Kevlar-Alüminyum numunesinde mermi dışarı fırlamış, bu muhtemelen mermi parçalanarak geri sektiği anlamına gelmektedir. Ancak hem ön hem arka yüzey delinmiştir, yani gerçek bir durdurma başarısı yoktur.

Çizelge 5.1. Birinci aşama atışlar- 10 metre mesafe tek atış

	Kevlar-Karbon-Alüminyum	Karbon-Kevlar-Alüminyum	Kevlar-Karbon-Titanyum	Karbon-Kevlar-Titanyum
Ön	Delindi	Delindi	Delindi	Delindi
Arka	Delindi	Delindi	Delinmedi	Delinmedi
Mermi Konumu	İçeride	İçeride	İçeride	İçeride

Numune-1 Görsel Muayene Bulguları:



Resim 5.1. Numune-1 ön yüz

Ön Yüzey Gözlemleri:

Numunenin ön yüzeyinde (kevlar dış yüzey), tekil mermi darbesi sonucu oluşan penetrasyonun merkezinde açıkça seçilebilen bir giriş deliği mevcuttur. Deliğin çevresinde lif yönüne paralel gelişen ince çatlak izleri görülmektedir.



Resim 5.2. Numune-1 Arka Yüz

Arka Yüzey Gözlemleri:

Arka yüzeyde yer alan alüminyum plakada merkezde belirgin bir çıkıntı (arkaya doğru bombelenme) ve küçük çaplı çatlak gelişimi gözlemlenmektedir.

Özellikle kevlar katmanının mermiyi ilk karşılayan yapı olması, darbenin ilk enerjisini absorbe etmesini sağlamakta; ancak merminin yüksek kinetik enerjisi, kevlar-karbon bileşiminin direncini aşarak alt katmanlara geçişi mümkün kılmaktadır. Kısmi lif ayrışmaları ve lokal yüzey çatlamaları, malzemenin darbe enerjisini yayma eğilimini yansıtmaktadır. Bu deformasyon, merminin yapıyı tam anlamıyla delmeden enerjisinin büyük kısmını arka

plakaya aktardığını göstermektedir. Çıkıntı morfolojisine bakıldığında, mermi yapıyı geçememekte ancak arka plakaya kuvvetli bir momentum transferi gerçekleştirmektedir. Bu durum, alüminyum çekirdek ve arka alüminyum plakanın birlikte etkili bir enerji dağılımı ve sönümleme sunduğunu göstermektedir.

Numune-2: Görsel Muayene Bulguları:



Resim 5.3. Numune-2 ön yüz

Ön Yüzey Gözlemleri:

Numune 2'nin ön yüzeyinde yer alan karbon plakada, tekil bir mermi atışı sonrasında ciddi bir deformasyon ve tam katman delaminasyonu gözlenmektedir. Giriş deliği düzensiz biçimde kıvrılmaktadır.



Resim 5.4. Numune-2 arka yüz

Arka Yüzey Gözlemleri:

Arka yüzeyde bulunan alüminyum katmanda merminin tamamen geçtiğini ve çapı net biçimde seçilebilen bir çıkış deliği oluşturduğunu görmek mümkündür.

Merminin yüksek enerjisinin, karbon plakanın plastik şekil değiştirme sınırını aştığı ve ardından alt katmanlara geçtiği anlaşılmaktadır. Delik çapı ve kenarlarının bükülmüş yapısı, merminin yapıyı yüksek hızla penetre ettiğini ve etkili bir kinetik enerji transferi gerçekleştirdiğini göstermektedir. Metalik yüzeyde yüzeysel çizikler dışında yaygın bir çatlak oluşumu gözlenmemektedir, ancak bu durum delaminasyonun büyük oranda iç katmanlarda gerçekleşmiş olabileceğine işaret etmektedir. Merminin yapıyı tam anlamıyla delip geçtiği, numunenin arka yüzeyinde keskin ve simetrik bir çıkış izinden anlaşılmaktadır.

Numune-3 Görsel Muayene Bulguları:



Resim 5.5. Numune-3 ön yüz

Ön Yüzey Gözlemleri:

Merminin isabet ettiği merkezde açık renkli bir hasar noktası (giriş deliği) belirgin. Bu bölge Kevlar katmanının olduğu ön yüzeyi temsil etmektedir. Lif yönüne paralel çizgisel çatlaklar ve hafif kabarmalar mevcut.



Resim 5.6. Numune-3 arka yüz

Arka Yüzey Gözlemleri:

Görselde merminin arka yüzeye ulaşmış olsa bile delip geçmediği anlaşılmaktadır. Bu, yapı bütünlüğünün korunduğunu ve arka katmanların etkili olduğunu göstermektedir.

Numunenin görsel yorumu, kevlar'ın enerjiyi emdiğini ve enerjiyi lif yönünde yaydığını göstermektedir. Yüzeyde ciddi bir soyulma ya da tabaka ayrılması görünmemekte, bu da yapının ön yüzeyde darbe enerjisini geniş alana yayarak kırılmayı önlemeye çalıştığını göstermektedir. Alanın büyük bölümü sağlam kalmış; bu da Kevlar katmanının enerjiyi emmede etkili olduğunu göstermektedir. Alüminyum çekirdeğin darbe enerjisini yavaşlatıcı, dağıtıcı etkisiyle birlikte, arkadaki titanyum plaka darbenin geçmesini engellemiş. Titanyum plakada gözle görülür ezilme, bombelenme veya çatlak bulunmamaktadır. Sadece darbe izi seçilebilmektedir. Bu, metalin yapısal rijitliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Karbon katman, çekirdek ve arka titanyum birlikte çalışarak merminin geçmesini engellemiş, yapıda kontrollü deformasyon oluşmaktadır.

Numune-4: Görsel Muayene Bulguları:



Resim 5.7. Numune-4 ön yüz

Ön Yüzey Gözlemleri:

Merminin isabet ettiği bölgede belirgin bir merkez darbesi vardır. Kompozit karbon dokusunda ezilme ve lokal çatlaklar gözlemlenmektedir.



Resim 5.8. Numune-4 arka yüz

Arka Yüzey Gözlemleri:

Merkezde hafif izler olsa da yapının bütünlüğü korunmaktadır. Mermi yapının arkasına geçememektedir.

Yüksek rijitlik gösterdiği için darbe sonrası kırılma ve lif ayrışması sınırlıdır. Ancak enerji emilimi Kevlar kadar yaygın değildir, bu nedenle kırılma bölgesi daha keskindir. Gözle görülebilir seviyede yoktur; bu da karbon-kevlar ara geçişinin iyi bir yapışma ile desteklendiğini göstermektedir. Alüminyum çekirdeğin deformasyon enerjisini absorbe ettiği, Kevlar ve arka titanyum tabakanın da bu darbeyi dağıttığı anlaşılmaktadır. Arka yüzde kabarma, çıkıntı ya da yaygın çatlama gözlemlenmemektedir. Bu da etkin enerji sönümlemesini ve rijit arka tabakanın mermiyi durdurduğunu kanıtlamaktadır.

<u>İkinci aşama atışlar (5 m - Beş Atış)</u>

Numune 5: Yapı hem ön hem arka yüzeyi delmiş; mermi tamamen geçmektedir.

Numune 6: Delinme profili benzer; karbon önde olmasına rağmen, yapının iç katmanları darbe sönümleyememektedir.

Numune 7: Titanyum sayesinde arka deformasyon muhtemelen daha az; ancak mermi yine de tüm yapıyı geçmektedir.

Numune 8: Ön yüz delinse de yapı mermiyi içinde tutmaktadır.

Çizelge 5.2. İkinci aşama atışlar- 5 metre mesafe numune başı beş atış

	Kevlar-Karbon-Alüminyum	Karbon-Kevlar-Alüminyum	Kevlar-Karbon-Titanyum	Karbon-Kevlar-Titanyum
Ön	Delindi	Delindi	Delindi	Delindi
Arka	Delindi	Delindi	Delindi	Delinmedi
Mermi Konumu	Dışarıda	Dışarıda	Dışarıda	İçeride

Numune-5 Görsel Muayene Bulguları:



Resim 5.9. Numune-5 ön yüz

Ön yüzey gözlemleri:

Beş farklı giriş noktası görülmektedir. Her biri oldukça keskin, dairesel şekilli ve etrafında belirgin ezilme alanları vardır.



Resim 5.10. Numune-5 arka yüz

Arka yüzey gözlemleri:

Numune 5, yapı hem ön hem arka yüzeyi delmiş; mermi tamamen geçmektedir. Yetersiz balistik korumadır. Açıkça görüldüğü üzere, mermiler numuneyi tamamen delerek arka yüzeyde çıkış yapmıştır. Arka plakadaki delikler geniş yırtılmalar şeklinde; bu da yüksek penetrasyonu işaret etmektedir.

Kevlar dokusunda geniş yayılımlı çatlaklar yok ancak delik bölgelerinde lif kopmaları ve kırıklar mevcuttur. Giriş alanındaki sınırlı çatlak uzaması, darbenin büyük kısmının doğrudan aktarıldığını göstermektedir. Katmanlar enerjiyi tam olarak sönümleyememektedir. Arka alüminyum plakada büyük çaplı yırtılmalar oluşmuş, kenarlar dışa doğru kıvrılmıştır. Bu, yapının darbe karşısında yeterince direnç gösteremediğini ortaya koymaktadır. Çoklu darbe altında katmanlar arası uyum bozulmuş olabilir. Reçine kaybı, delaminasyon veya yapısal bütünlükte zayıflama olmuş olabilir.

Numune-6 görsel muayene bulguları:



Resim 5.11. Numune-6 ön yüz

Ön yüzey gözlemleri:

Beşli grup şeklinde birden fazla giriş deliği bulunmaktadır. Karbon yüzeyde lokal ezilme ve matlaşma görünmektedir.



Resim 5.12. Numune-6 arka yüz

Arka yüzey gözlemleri:

Mermilerin yapıyı tamamen deldiği, arka yüzeyde ciddi yırtılmalar ve kıvrılarak dışa açılmış deformasyonlar oluşturduğu net olarak görülmektedir. Özellikle üst ve sağ bölgede çapı geniş yırtıklar bulunmaktadır.

Numune 6, delinme profili benzer; karbon önde olmasına rağmen, yapının iç katmanları darbe sönümlemede başarısızdır.

Karbonun yüksek rijitliği sebebiyle geniş çaplı çatlaklar oluşmamış ancak her mermi darbesi civarında küçük çatlak izleri ve lif yönüne bağlı hafif kırıklar görülmektedir. Gözle görülür seviyede belirgin değil, fakat bazı bölgelerde üst tabakada yüzey soyulmaları ve çizilmeler gözlenmektedir. Kenarların dışa açılmış olması, mermilerin yüksek enerjiyle çıkış yaptığını göstermektedir. Arka alüminyum plaka mermilerin kinetik enerjisini durduramamış; çekirdek ve ara katmanlar da enerjiyi yeterince sönümleyememiştir.

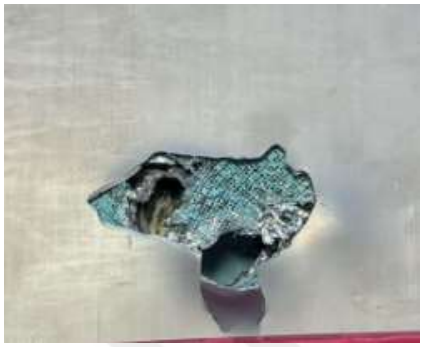
Numune-7 görsel muayene bulguları:



Resim 5.13. Numune-7 ön yüz

Ön yüzey gözlemleri:

Giriş bölgesinde 5 adet belirgin ve çapı geniş delik bulunmaktadır. Lif yönüne dik gelen darbelerde lif kopmaları ve lif ayrışması görünür düzeydedir.



Resim 5.14. Numune-7 arka yüz

Arka yüzey gözlemleri:

Arka yüzeyde çok belirgin birleşik, büyük çaplı bir yırtılma ve çıkış deliği mevcuttur. Mermiler birleşik hasar bölgesinden yapıyı delmiştir. Arka titanyum plaka, mermi çıkışında hem çatlamış hem de kenarlardan dışa doğru kıvrılmıştır. Alüminyum çekirdek parçaları dışarı çıkacak şekilde yırtılma alanı genişlemiştir.

Numune 7, titanyum sayesinde arka deformasyon muhtemelen daha az; ancak mermi yine de tüm yapıyı geçmiş. Göreli iyileşme olsa da yetersiz numunedir.

Kevlar yüzeyinde sınırlı çatlak yayılımı olsa da, merkezde liflerin bütünlüğü bozulmuş, delik çevresi ezilmiştir. Darbelerin yakın noktalara isabet ettiği görülmektedir. Çekirdek yapının mermi enerjisini sönümleyemediği, arka titanyum plakanın tekil darbelere dayanıklı olsa da çoklu darbede hasarı absorbe edemediği anlaşılmaktadır.

Numune-8 görsel muayene bulguları:



Resim 5.15. Numune-8 ön yüz

Ön yüzey gözlemleri:

Beş adet atış gerçekleştirilmiştir. Girişler net ve düzgün dairesel formda, karbon liflerinin etrafı hafif ezilmiştir. Hasar alanı lokalizedir.



Resim 5.16. Numune-8 arka yüz

Arka yüzey gözlemleri:

Mermiler yapının arka titanyum plakasına ulaşmış ancak delinme gözlemlenmemektedir. Yüzeyde yalnızca ezilme, çizilme ve çok sınırlı derinlikte darbe izleri mevcuttur.

Numune 8, ön yüz delinse de yapı mermiyi içinde tutmuş. Arka yüzeyi koruyan tek konfigürasyon ve en yüksek balistik başarıdır.

Karbon fiberin yüksek rijitliği nedeniyle kırılma merkezli ama sınırlı yayılım göstermektedir. Görünür değil; yüzeyde çizilme ve ezilme dışında belirgin ayrışma yoktur. Alüminyum çekirdek ve Kevlar katmanı darbe enerjisini etkili şekilde dağıtmış; titanyum

plaka darbeyi emmiştir. Arka yüzde hiçbir çıkış, yırtılma veya katman ayrılması görülmemekte, plaka sağlamdır.

Tüm yapı konfigürasyonlarında ön yüzey delinmesi gerçekleşmiştir, bu durum merminin yüzey plakayı geçecek kinetik enerjiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, ön yüzde delinme tek başına zayıf performans göstergesi değildir.

- Sadece "Karbon-Kevlar-Titanyum" konfigürasyonunda arka yüzey delinmemiştir ve mermi yapı içerisinde kalmıştır. Bu, hem karbon/kevlar diziliminin sinerjik davranışı hem de titanyum plakaların yüksek mekanik dayanımı sayesinde oluşmuştur.
- Alüminyum yüzeyli yapılar (Numune 5 ve Numune 6), çekirdek ve arka plakada darbe enerjisini yayma ve absorbe etmede yetersiz kalmıştır. Mermiler her iki yapıdan da geçerek dışarı çıkmıştır.
- Kevlar'ın karbonun önüne ya da arkasına yerleştirilmesi, darbe enerjisinin absorpsiyonu açısından farklılık yaratmakla birlikte, malzeme seçimleri yeterli değilse yapısal koruma sağlayamamaktadır.

Çizelge 5.3. Numunelere ait balistik performans sonuçları

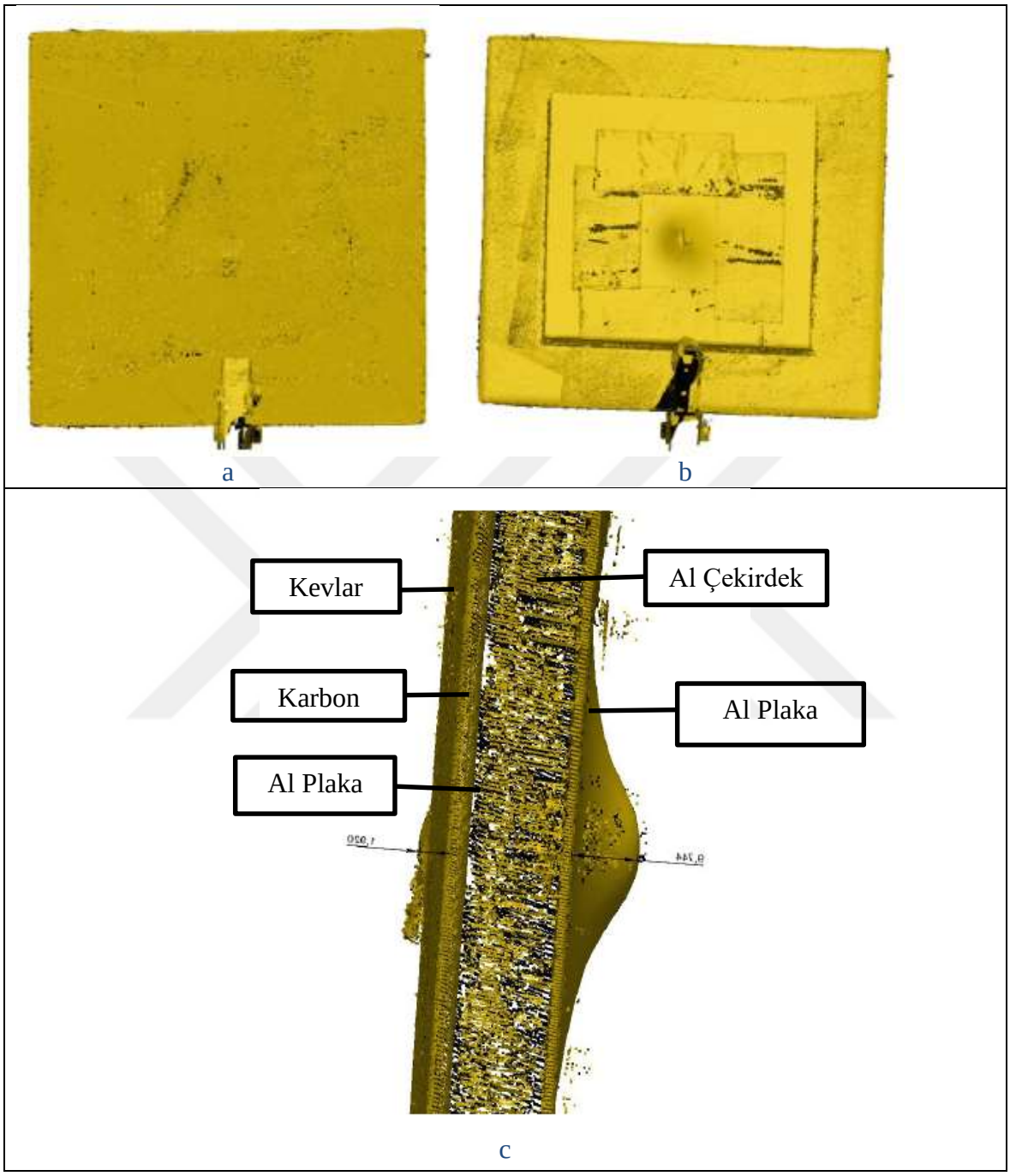
Numune No	Balistik Performans
1	Delinmesiz, orta düzeyde koruma
2	Tam delinme, düşük dayanım
3	Delinme yok, yüksek performans
4	Delinme yok, yüksek performans
5	Çoklu atışta başarısız, zayıf yapı
6	Tam penetrasyon, düşük direnç
7	Çoklu atışta birleşik delik, direnç kaybı
8	Çoklu atışta delinme yok, en yüksek dayanım

Karbon-Kevlar-Titanyum yapı, arka yüzeyi koruyabilen tek yapıdır ve bu durum, optimal fiber dizilimi ile yüksek dayanımlı yüzey malzemesi (titanyum) kombinasyonunun önemini vurgulamaktadır.

5.2. Boyutsal Muayene Bulguları ve Sonuçları

İlk aşama tekli atış numunelerinin Atışlar sonrası iki ayrı yüzeydeki deformasyon miktarları tabloda verilmiştir.

Birinci numune boyutsal ölçüm bulguları:



Resim 5.17. Birinci numune boyutsal tarama görüntüsü mermi giriş yüzeyi(a), birinci numune boyutsal tarama görüntüsü mermi çıkış yüzeyi(b), birinci numune boyutsal tarama görüntüsü yan kesit(c)

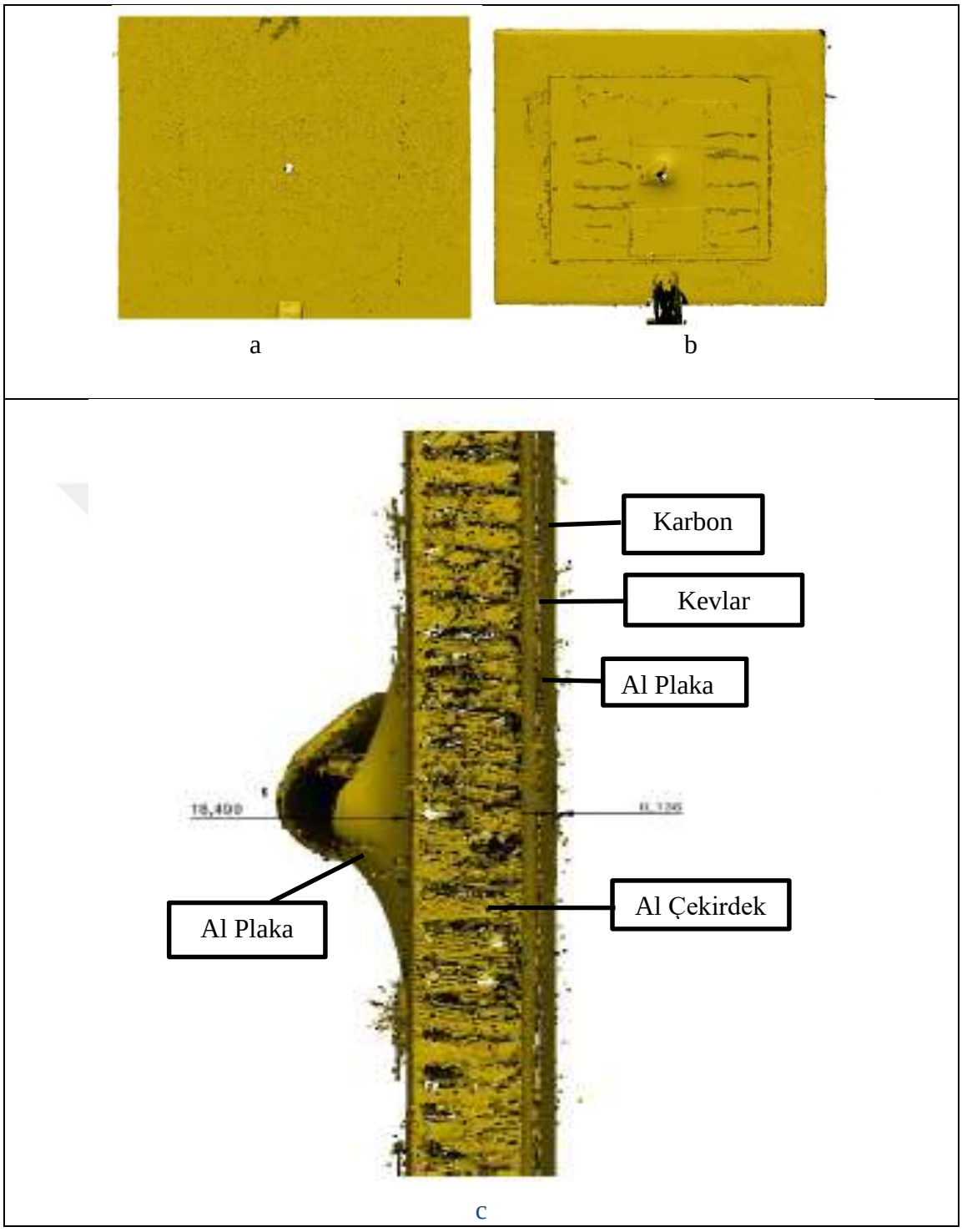
Birinci numunede giriş ve çıkış yüzeyinde metal yırtılmış, mermi içeride kalmıştır. 1.920 mm mermi geliş yönünde ve 9.744 mm mermi çıkış yönünde çıkıntı oluşmuştur.

Numune 1: Dengeli deformasyon

- Ön yüzey deformasyonu: Görece yüksek (1.92 mm)
- Arka yüzey deformasyonu: Yüksek (9.744 mm)

Bu yapı, enerjiyi ön yüzde bir miktar emmiş ancak arka yüze de önemli düzeyde aktarmıştır. Bu, katmanlar arasında sınırlı enerji yayılımı ve yetersiz sönümleme olduğunu düşündürmektedir.

İkinci numune boyutsal ölçüm sonuçları:



Resim 5.18. İkinci numune boyutsal tarama görüntüsü mermi giriş yüzeyi(a), ikinci numune boyutsal tarama görüntüsü mermi çıkış yüzeyi(b), ikinci numune boyutsal tarama görüntüsü yan kesit(c)

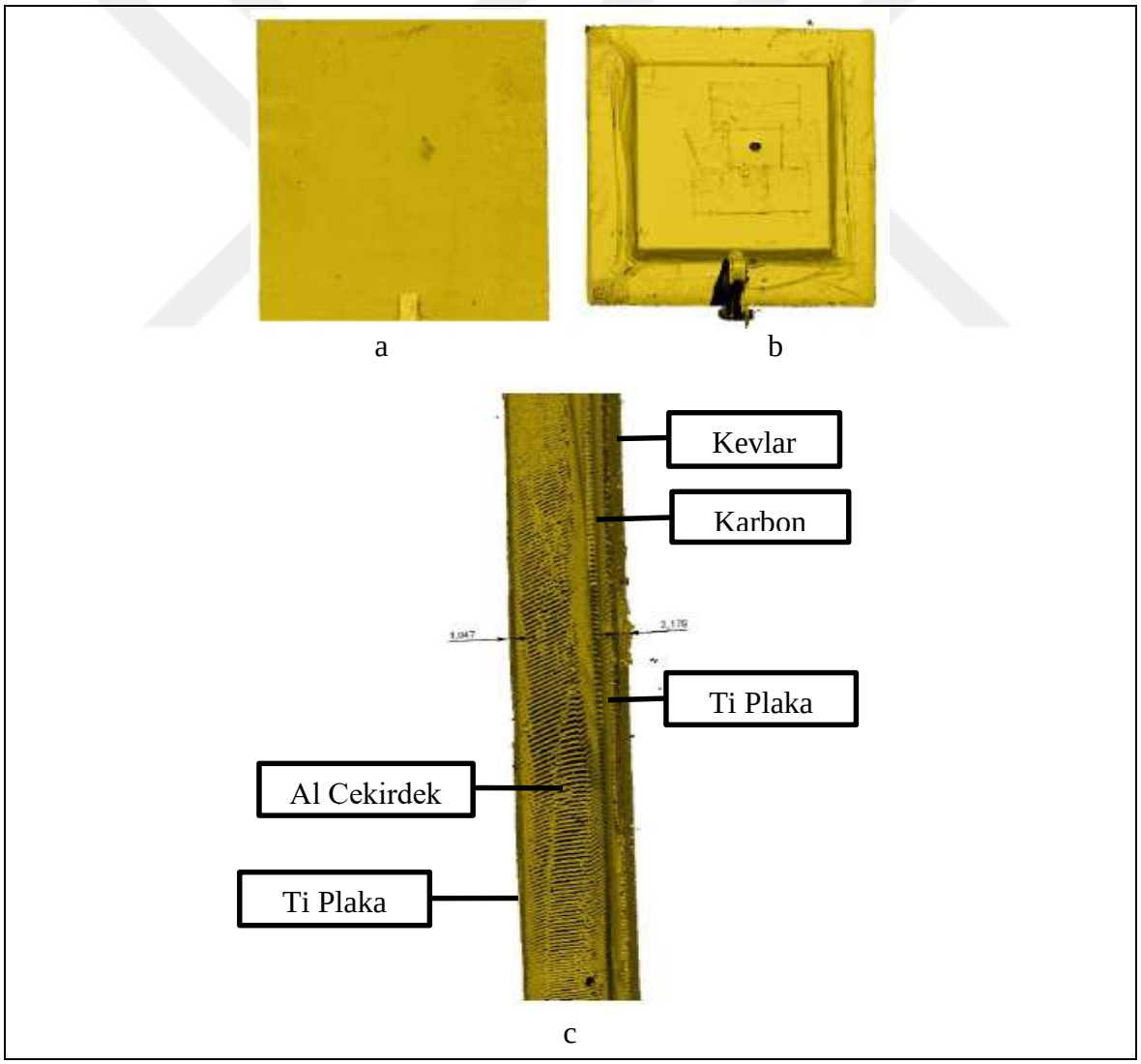
İkinci numunede mermi giriş ve çıkış yüzeylerinde hasara yol açmıştır. Numuneyi delen mermi, geliş yönünde 0.136 mm girinti ve 18.490 mm çıkış yönünde çıkıntı yapmıştır.

Numune 2: Sert Ön Yüzey, Zayıf Arka Yüzey

- Ön yüzey deformasyonu: Düşük (0.136 mm)
- Arka yüzey deformasyonu: Çok yüksek (18.49 mm)

Ön yüzeyde sert bir malzeme-karbon kompozit plaka yer almış ve darbe enerjisi iç katmanlara aktarılarak arka yüz deformasyonunu artırmıştır. Bu yapı penetrasyona dirençli olabilir, ancak kullanıcıya aktarılan travma açısından olumsuzdur.

Üçüncü numune boyutsal ölçüm bulguları:



Resim 5.19. Üçüncü numune boyutsal tarama görüntüsü mermi giriş yüzeyi(a), üçüncü numune boyutsal tarama görüntüsü mermi çıkış yüzeyi(b),üçüncü numune boyutsal tarama görüntüsü yan kesit(c)

Üçüncü numunede kullanılan titanyum plaka, mermi geliş yönünde numuneyi delse de çıkış yönünde mermi delememiş ve numune içerisinde kalmıştır.

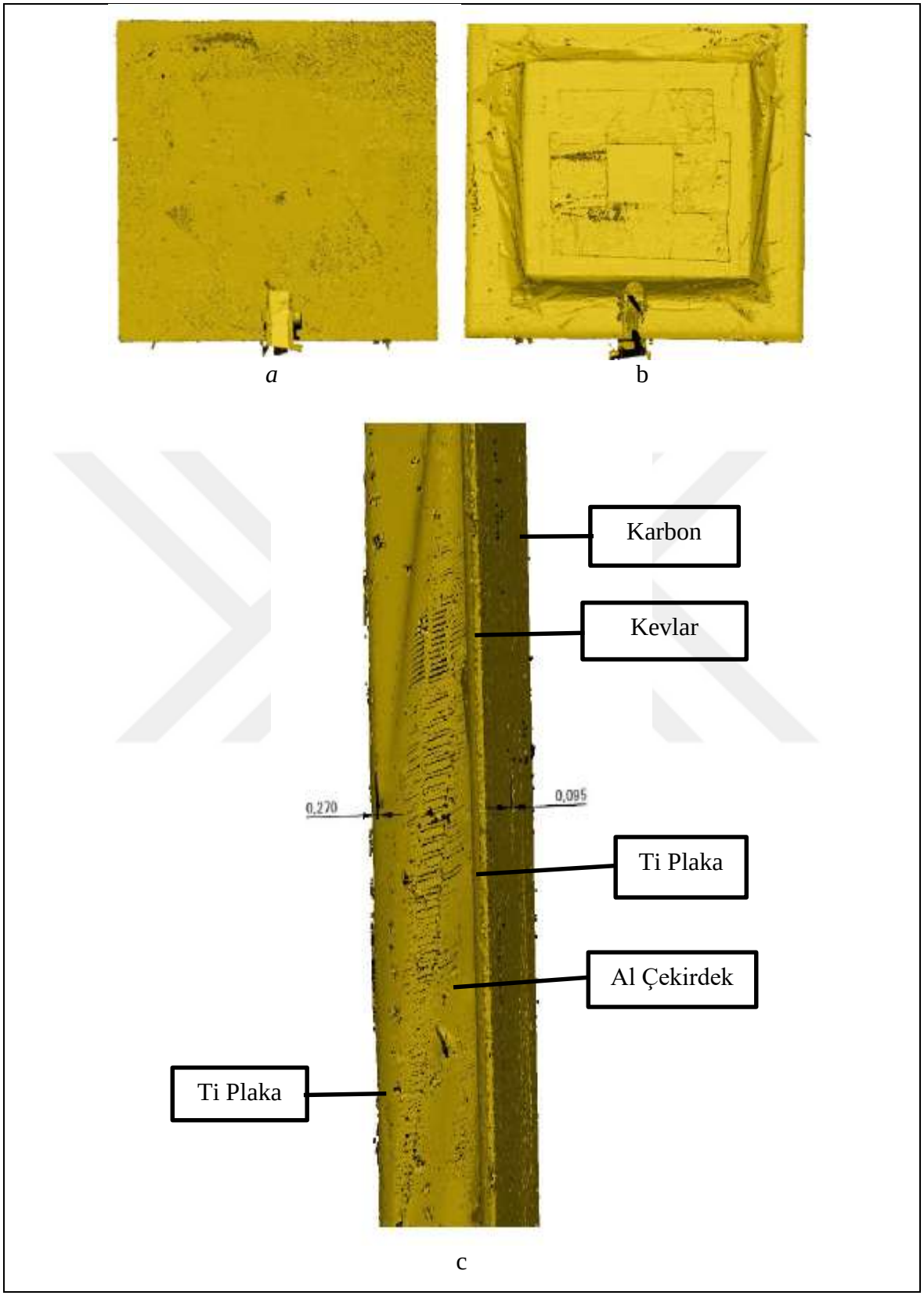
Mermi geliş yönünde ve çıkış yönünde 2.179 mm ve 1.047 mm girinti ve çıkıntı oluşturmuştur.

Numune 3: Yüksek Ön Yüz Emme, Arka Yüz Koruma Başarılı

- Ön yüzey deformasyonu: Yüksek (2.179 mm)
- Arka yüzey deformasyonu: Düşük (1.047 mm)

Ön yüzde enerji emilimi yoğundur, bu da darbe enerjisinin yapının ön kısmında karşılandığını ve arka katmanlara çok az aktarıldığını göstermektedir. Arka yüz deformasyonu düşük olduğu için balistik açıdan en güvenli yapılardan biridir.

Dördüncü Numune Boyutsal Ölçüm Bulguları:



Resim 5.20. Dördüncü numune boyutsal tarama görüntüsü mermi giriş yüzeyi(a), dördüncü numune boyutsal tarama görüntüsü mermi çıkış yüzeyi(b), dördüncü numune boyutsal tarama görüntüsü yan kesit(c)

Dördüncü numuneye yapılan atış sonucunda, mermi numuneyi çıkış noktasında delememiş, yedinci numunede olduğu gibi mermi içeriye hapsolmuştur.

Mermi geliş yönünde 0.095 mm girinti oluşurken, çıkış yönünde 0.270 mm çıkıntı oluşturmuştur.

Numune 4: En Başarılı Performans

- Ön yüzey deformasyonu: Çok düşük (0.095 mm)
- Arka yüzey deformasyonu: Çok düşük (0.270 mm)

Hem ön hem arka yüz deformasyonları son derece düşüktür. Bu yapı, enerjiyi hem absorbe etmiş hem de yayarak arka yüze geçişi çok iyi sınırlamıştır. Tekli atışlarda en başarılı balistik performans bu numuneye aittir.

Çizelge 5.4. Numunelerin ön ve arka yüzeylerindeki deformasyon derinlikleri

	Atış Sonrası Ön Yüzey Deformasyon Derinliği(mm)	Atış Sonrası Arka Yüzey Deformasyon Derinliği(mm)
Numune1	1,920	9,744
Numune2	0,136	18,490
Numune3	2,179	1,047
Numune4	0,095	0,270

- Tekli atışlarda numune 4, en ideal balistik koruma ve kullanıcı güvenliği sunan konfigürasyon olarak öne çıkmaktadır.
- Numune 2, ön yüzdeki yüksek rijitliğe rağmen enerji transferi açısından zayıftır.
- Numune 3, fiber deformasyonu ile enerji emilimini başarıyla gerçekleştirmiştir.
- Numune 1, hem ön hem arka yüzde orta düzey deformasyon sergileyerek dengeli ancak geliştirmeye açık bir yapıdadır.

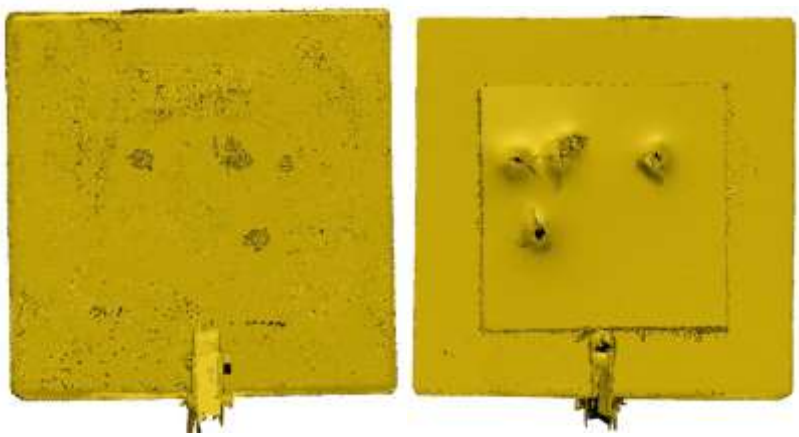
İkinci aşama numunelerin atışlar sonrası iki ayrı yüzeydeki deformasyon miktarları tabloda verilmiştir.

Çizelge 5.5. İkinci aşama numunelerin ön ve arka yüzeylerindeki deformasyon derinlikleri

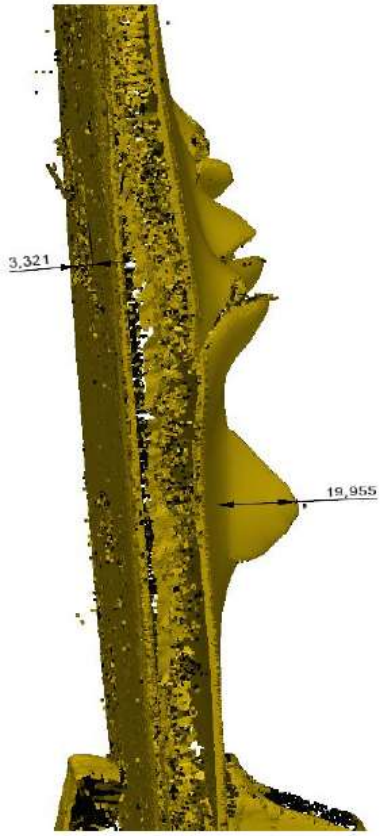
	Atış Sonrası Ön Yüzey Deformasyon Derinliği(mm)	Atış Sonrası Arka Yüzey Deformasyon Derinliği(mm)
Numune5	3,321	19,955
Numune6	0,010	28,480
Numune7	2,682	18,750
Numune8	0,010	2,788

- Her bir yapı konfigürasyonuna uygulanan mermi atışları sonrası, ön ve arka yüzeyde oluşan deformasyon derinlikleri ölçülmüş; ayrıca yapının delinme durumu ve mermi konumu değerlendirilmiştir. Elde edilen nicel ve nitel bulgular, malzeme özellikleri ve yapısal kombinasyonların balistik dayanım üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koymaktadır.

Beşinci numune boyutsal ölçüm bulguları:



a b



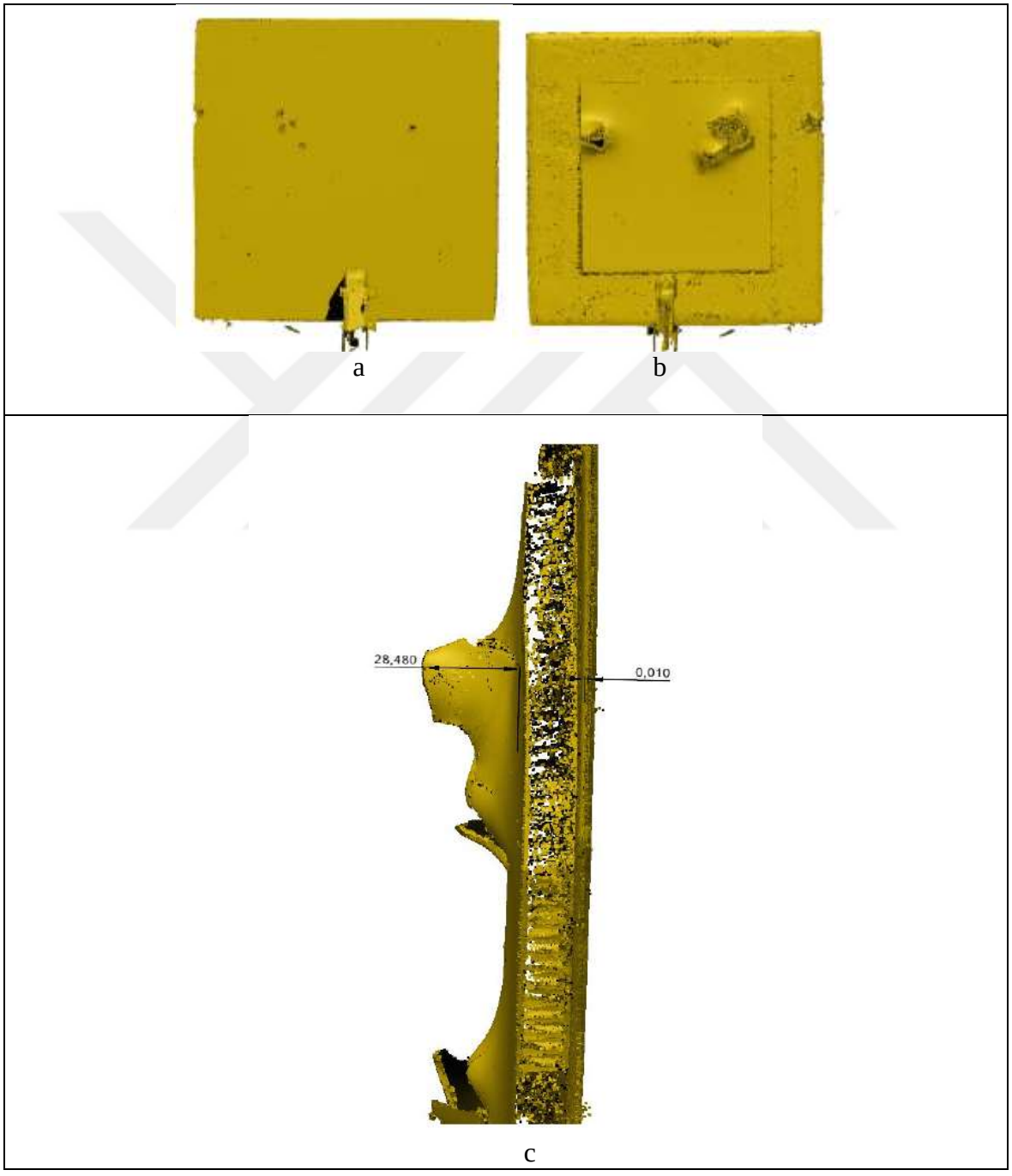
c

Resim 5.21. Beşinci numune boyutsal tarama görüntüsü mermi giriş yüzeyi(a), beşinci numune boyutsal tarama görüntüsü mermi çıkış yüzeyi(b), beşinci numune boyutsal tarama görüntüsü yan kesit(c)

Numune 5'te, merminin hedefe çarpması sonrası ön yüzeyde 3.321 mm ve arka yüzeyde 19.955 mm deformasyon ölçülmüştür. Hem ön hem de arka yüzeyde delinme meydana gelmiş, mermi yapıyı tamamen geçerek dışarı çıkmıştır. Bu yapı, Kevlar ve karbon fiberin darbe enerjisini yayma kabiliyetine sahip olmasına rağmen, alüminyum plaka ve

çekirdeklerin sınırlı enerji sönümleme kapasitesi nedeniyle etkili bir balistik direnç gösterememiştir. Arka yüzeydeki yüksek deformasyon ve delinme, bu yapı konfigürasyonunun balistik performans açısından yetersiz olduğunu göstermektedir.

Altıncı numune boyutsal ölçüm bulguları:



Resim 5.22. Altıncı numune boyutsal tarama görüntüsü mermi giriş yüzeyi(a), altıncı numune boyutsal tarama görüntüsü mermi çıkış yüzeyi(b), altıncı numune boyutsal tarama görüntüsü yan kesit(c)

Bu yapı, ön yüzeyde yalnızca 0.010 mm gibi ihmal edilebilir bir deformasyon sergilemiş olmasına karşın, arka yüzeyde 28.480 mm ile en yüksek deformasyon değerine ulaşmıştır. Hem ön hem arka yüzey delindiği gibi, mermi de yapıdan çıkmıştır. Karbon fiberin yüksek rijitliği darbenin ön yüzde etkisini sınırlamış, ancak bu enerjinin iç katmanlara iletilerek arka yüzde yoğun deformasyona neden olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuç, yapının enerji yayılımında başarısız olduğunu ve arka koruma açısından ciddi zafiyet taşıdığını ortaya koymaktadır.

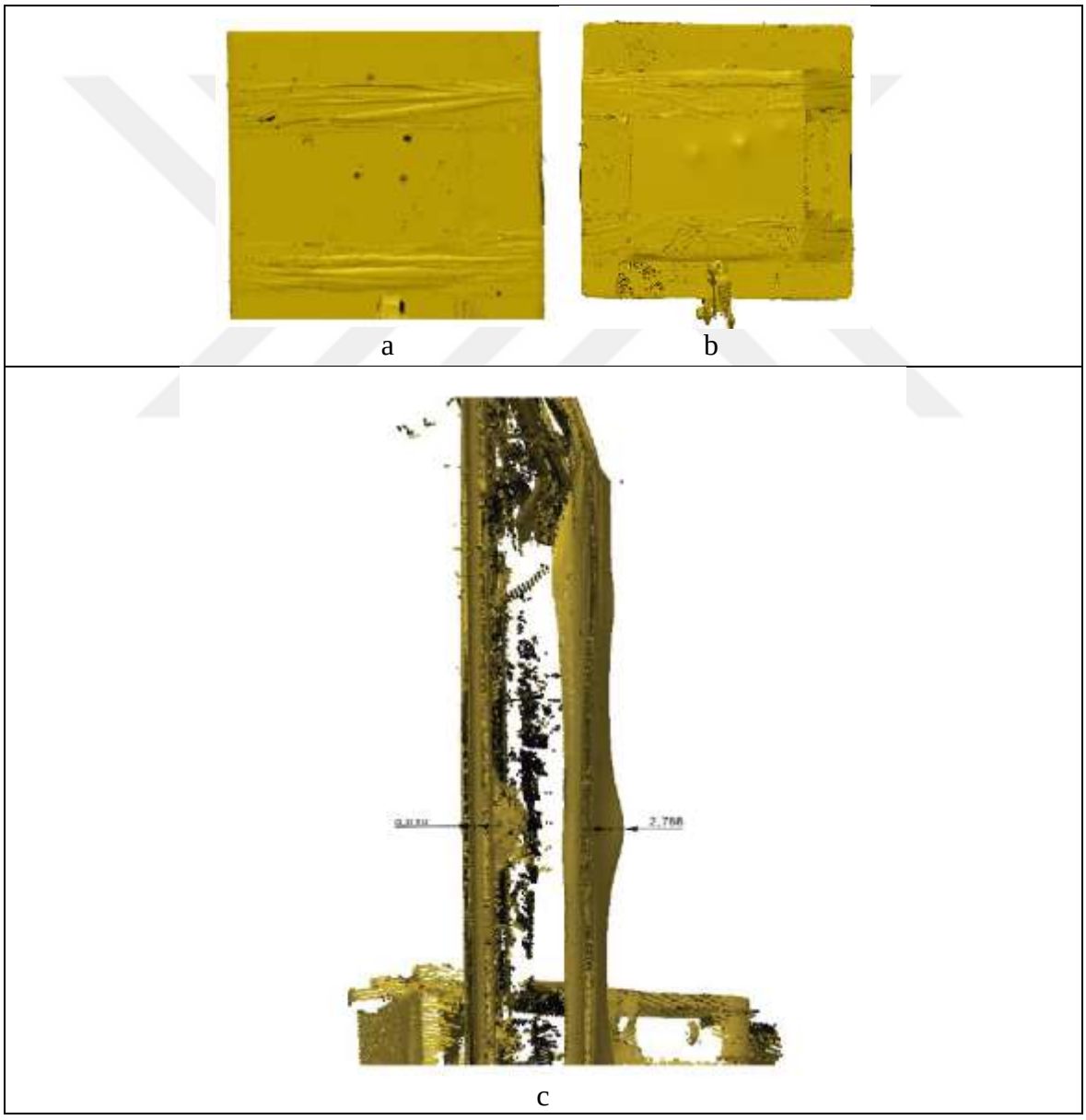
Yedinci numune boyutsal ölçüm bulguları:



Resim 5.23. Yedinci numune boyutsal tarama görüntüsü mermi giriş yüzeyi(a), yedinci numune boyutsal tarama görüntüsü mermi çıkış yüzeyi(b), yedinci numune boyutsal tarama görüntüsü yan kesit(c)

Numune 7’de ön yüzeyde 2.682 mm, arka yüzeyde ise 18.750 mm deformasyon meydana gelmiştir. Ön ve arka yüzeyin delindiği ve merminin dışarı çıktığı tespit edilmiştir. Titanyum plakaların yüksek sertliği sayesinde deformasyon derinlikleri alüminyum yüzeyli numunelere kıyasla daha düşük seviyede kalmıştır. Ancak, çekirdekte kullanılan alüminyum yapının darbe enerjisini yeterli ölçüde sönümleyememiş ve delinme oluşmuştur. Yapı, balistik direnç açısından göreli bir iyileşme sağlasa da tam koruma sunamamıştır.

Sekizinci numune boyutsal ölçüm bulguları:



Resim 5.24. Sekizinci numune boyutsal tarama görüntüsü mermi giriş yüzeyi(a), sekizinci numune boyutsal tarama görüntüsü mermi çıkış yüzeyi(b), sekizinci numune boyutsal tarama görüntüsü yan kesit(c)

Test edilen tüm yapı konfigürasyonları içerisinde en iyi balistik performans Numune 8 tarafından sergilenmiştir. Ön yüzeyde yalnızca 0.010 mm, arka yüzeyde ise yalnızca 2.788 mm deformasyon gözlenmiş; arka yüzey delinmemiş ve mermi yapı içerisinde hapsolmuştur. Bu sonuç, karbon-kevlar diziliminin darbe yönünde sinerjik bir enerji yayılımı sağladığını ve titanyum plakaların yüksek özgül mukavemeti ile etkili bir bariyer oluşturduğunu göstermektedir. Merminin yapıyı terk edememesi, bu konfigürasyonun darbe enerjisini hem dağıtma hem de absorplama bakımından üstün bir başarıya sahip olduğunu ortaya koymuştur.

İkinci aşama çoklu atış sonuçlarına göre dört yapı arasında gerçekleştirilen karşılaştırmalı analiz neticesinde:

- Tüm numunelerde ön yüzey delinmesi gerçekleşmiş olup yalnızca Numune 8 arka yüzeyi koruyabilmiş ve mermiyi yapı içinde tutabilmiştir.
- Numune 6, ön yüzdeki düşük deformasyona rağmen arka yüzdeki yüksek deformasyonla yetersiz enerji sönümlemesi sergilemiştir.
- Titanyum yüzeyli yapılarda (Numune 7 ve 8) deformasyonlar belirgin şekilde daha düşüktür; bu da titanyumun yüksek mekanik dayanımı ile ilişkilidir.
- Numune 8, hem delinme direnci hem de düşük deformasyon seviyeleri ile en yüksek balistik başarıyı göstermiştir.

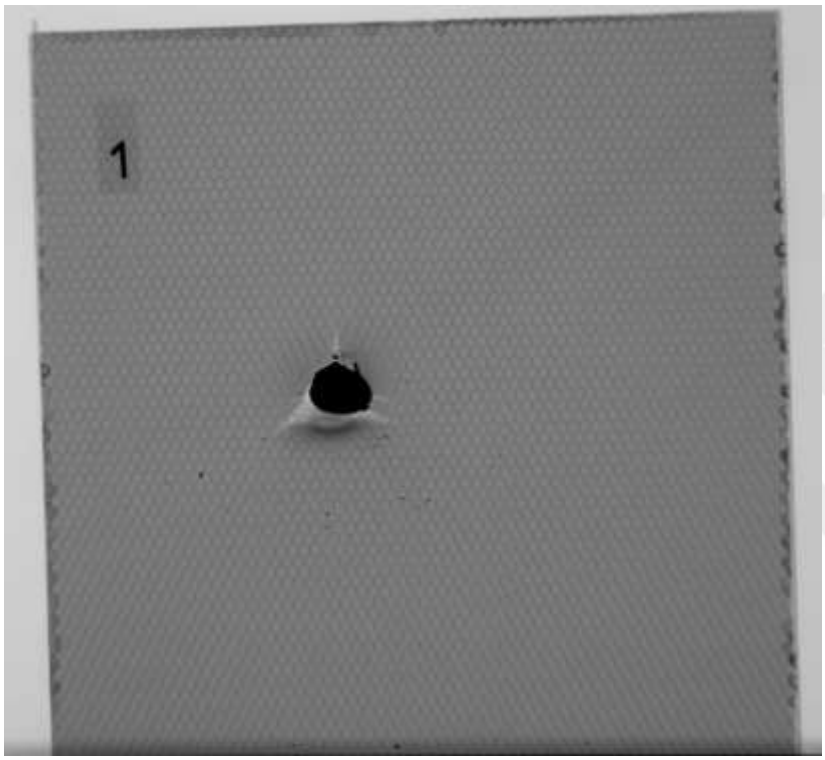
Numunelerin kür sonrası kalınlıklarının deneysel açıdan değerlendirilmesi

Numuneler arasında görülen küçük kalınlık farkları ($\leq \pm 0.5$ mm), üretim sürecinin yüksek tekrarlanabilirlikte olduğunu göstermektedir. Ancak özellikle titanyum içerikli numunelerde, daha yüksek kalınlık ölçümlerinin daha düşük penetrasyon ve artan deformasyon sönümleme kapasitesi ile ilişkili olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, kalınlığın doğrudan balistik direnç ile bağlantılı olduğunu ve katman sayısı sabit tutulsa dahi malzeme yerleşimi ve toplam yapı kalınlığının nihai performansı etkileyebileceğini ortaya koymaktadır.

5.3. X-Ray muayene bulguları ve sonuçları

Tez çalışması kapsamında balistik atış sonrası elde edilen X-ray görüntüleri, hasar tespiti ve katmanlar arası deformasyon analizi açısından kritik öneme sahiptir.

Birinci numune X-Ray bulguları:



Resim 5.25. Birinci numune X-Ray görüntüsü

Gözlemsel bulgular:

- Görüntüde merkezde net bir giriş ve çıkış deliği tespit edilmiştir.
- Delik çevresinde simetrik olmayan ancak belirgin çatlak uzamaları ve radyal çatlama izleri yer almaktadır.
- Yapının alt katmanında yer alan alüminyum petek çekirdek yapısı, merminin geçtiği bölgede çökme ve ezilme göstermiştir.
- Delik etrafındaki koyu halkalar, enerjinin çevre malzemeye dağıldığını ancak yoğun lokal hasar oluştuğunu göstermektedir.

Malzeme davranışı açısından bulguların değerlendirilmesi

Kevlar ve karbon fiber takviyeli kompozitlerin ön yüzde darbe enerjisini yayma potansiyeline sahip olmalarına rağmen, bu numunede gözlenen tam delik oluşumu, yapının enerjiyi absorplama ve dağıtma kapasitesinin yetersiz kaldığını göstermektedir. Mermi, hem ön hem arka yüzeyi geçerek çekirdek bölgeyi delmiştir. Bu durumda:

- Kevlar katmanının enerji absorpsiyonu ve gerilimi dağıtması sınırlı kalmıştır.
- Karbon fiber, yüksek rijitliği ile darbe yönünde enerjiyi yansıtmaktan çok iç katmanlara iletmiş olabilir.
- Alüminyum çekirdek, darbe anında yerel çökmeye uğramış, bal peteği yapısı ezilerek yapısal bütünlüğünü kaybetmiştir.

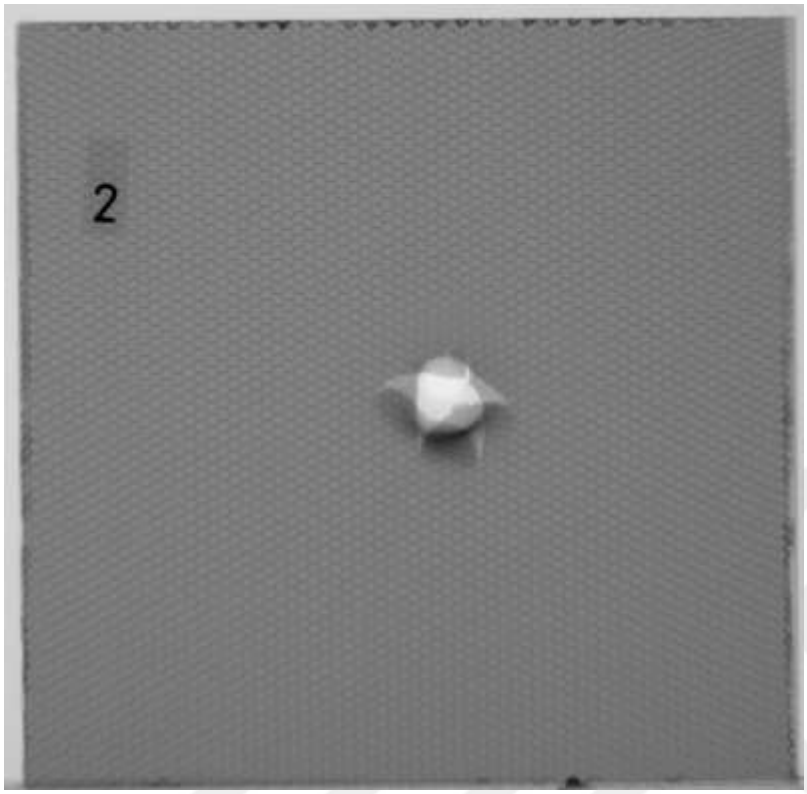
Balistik performans açısından bulguların değerlendirilmesi

Bu numunenin mermiyi durduramadığı ve yapının önemli ölçüde delinmeye uğradığını açıkça ortadadır. Özellikle enerji yayılımının lokalize kalması, katmanlar arasında etkin bir şok dağılımı ve delaminasyon önleyici etkileşim oluşmadığı görülmektedir.

Genel bulgular:

- Bu numune için “tam penetrasyon” durumu olduğu, deformasyonla birlikte çekirdek kırılması ve enerji emilim eksikliği gözlemlenmektedir.
- Karbonun, kevlar fiber arkasında konumlandırılması enerji absorbsiyonunu azaltırken, dış plakaların alüminyum olması darbe direncini azaltmıştır.
- Görüntü, yapının merkezi odaklı zayıfladığını ve çoklu darbelere karşı direnç kapasitesinin düşük olacağını göstermektedir.

İkinci numune X-Ray bulguları:



Resim 5.26. İkinci numune X-Ray görüntüsü

Gözlemsel bulgular:

- Görüntünün merkezinde büyük, parlak ve yoğun bir kütle tespit edilmiştir; bu, merminin çekirdeği veya büyük parçasının hedef yapının içinde parçalandığını göstermektedir.
- Giriş bölgesinde çapraz çatlak oluşumları mevcuttur ve bu çatlaklar radyal olarak çekirdek petek yapıya doğru ilerlemektedir.
- Delik çevresinde belirgin bir delaminasyon izi ya da tabakalar arası ayrılma görülmemektedir.
- Alüminyum petek yapısı, merminin temas ettiği bölgede lokal ezilme göstermektedir, ancak genel yapısal bütünlüğünü koruduğu izlenmektedir.

Malzeme davranışı açısından bulguların değerlendirilmesi

Bu numunede mermi, yapıya nüfuz etmiş ancak parçalanmıştır. Bu durum aşağıdaki şekilde yorumlanabilir:

- Karbon fiber, darbe yönünde yüksek rijitlik gösterdiğinden, enerjinin arka katmanlara doğrudan iletilmesini önlemiştir.
- Kevlar, karbonun hemen arkasında yer alarak darbe enerjisinin dağılımında ve merminin yavaşlatılmasında etkili rol oynamıştır.
- Alüminyum plakalar ve çekirdek, mermiyi tam olarak durduramasa da, enerjiyi absorbe ederek merminin sistem içinde parçalanmasını sağlamıştır.
- Merminin içeride parçalanması özellikle Kevlar tabakasının şok absorpsiyon kapasitesinin etkili biçimde kullanıldığını düşündürmektedir.

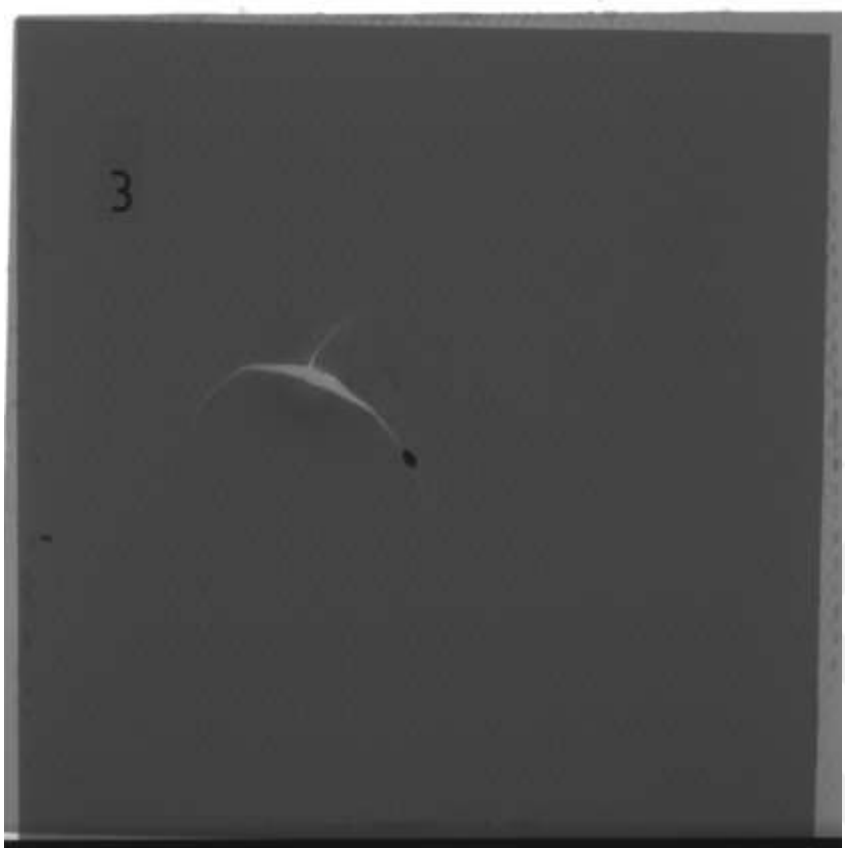
Balistik performans açısından bulguların değerlendirilmesi

Numune 2, X-ray görüntüsünde deliğin tam oluşmadığı ancak merminin dışarı çıktığı bir tablo sergilemektedir. Bu durum, önceki Numune 1'e kıyasla daha yüksek enerji sönümleme kapasitesine işaret etmektedir. Merminin hedef içinde parçalanması, yapının yapısal olarak daha dengeli davrandığını ve darbenin lokalize edildiğini göstermektedir.

Genel bulgular:

- Bu numunede Kevlar tabakasının karbonun arkasında yer alması, girişte rijitlik, iç kısımlarda ise absorpsiyon işlevi görerek daha dengeli bir enerji yayılımı sağlamıştır.
- X-ray verisi, merminin kapsül şeklinde yapının içine gömüldüğünü ve çevresel hasarın kontrollü kaldığını göstermektedir.
- Alüminyum petek yapı delaminasyona uğramamış, yapının bütünlüğü korunmuştur.
- Sonuç olarak, Numune 2’nin Numune 1’e kıyasla geliştirilmiş balistik performans sunduğu söylenmektedir.

Üçüncü numune X-Ray bulguları:



Resim 5.27. Üçüncü numune X-Ray görüntüsü

Gözlemsel bulgular:

- Görüntüde mermi çekirdeğine ait koyu bir yoğunluk, yapının içinde net biçimde seçilebilmektedir.
- Mermi, yapıya dik açıyla girmemiş gibi görünmekte; eğik bir hat boyunca ilerleyip durduğu anlaşılmaktadır.
- Mermi yolunda uzunlamasına bir çatlak oluşmuştur; bu çatlak muhtemelen yapının fiber katmanları boyunca ilerlemiştir.
- Çekirdek bölgesinde (bal peteği yapıda) kısmi ezilme ve lif yönü boyunca bir yırtılma etkisi izlenmektedir.
- Yapı üzerinde delinme gerçekleşmemiş, mermi içerde tutulmuştur.

Malzeme davranışı açısından bulguların değerlendirilmesi

Bu yapıdaki davranış, katmanlı kompozitlerin darbe altındaki karmaşık hasar mekanizmalarını ortaya koymaktadır. Enerji yapının içinde ilerleyerek uzunlamasına fiber çatlamasına ve petek yapının deformasyonuna neden olsa da titanyum yüzey plakaları merminin doğrudan geçişini önlemiştir.

- Kevlar tabakası, darbe enerjisinin ilk emilimini üstlenmiş ve çekirdek yapıya enerji yayılımını sınırlamıştır.
- Karbon fiber katmanı, mermi yolunu kısmen yönlendirmiş; rijit yapısı nedeniyle enerji lifler boyunca yayılmıştır.
- Titanyum dış plaka, yüksek mukavemetleriyle mermiyi yavaşlatmış ve hedefi tam delinmeden korumuştur.
- Mermi eğik ilerlemiş ve yapı içinde yavaşlayarak durmuştur. Bu, enerjinin hem yatay hem de dikey bileşenlerle yönlendiğini göstermektedir.

Balistik performans açısından bulguların değerlendirilmesi

Numune 3, önceki iki numuneye göre belirgin biçimde daha üstün performans sergilemiştir. Görüntü, merminin yapıdan çıkmadığını, titanyum plakaların ve fiber diziliminin şok absorpsiyonunu etkili şekilde gerçekleştirdiğini göstermektedir. Ancak, çatlak uzunluğu dikkate alındığında, katmanlar arasında gerilim aktarımı zayıflamış, yapının belirli bir bölgede ciddi deformasyon oluşturduğu söylenmektedir.

Genel bulgular:

- Merminin yapı içinde kalması, titanyum plakalı konfigürasyonların balistik etkiler karşısında etkin bir direnç sunduğunu göstermektedir.
- Ancak, darbe açısının dik olmaması veya fiber yönünün etkisiyle oluşan uzun çatlak, katmanlar arası dayanımın geliştirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.
- Bu yapıdaki hasar, delinmesiz ancak lokal ileri seviye iç hasar olarak sınıflandırılabilir.
- Merminin sapma açısı ile birlikte iç ilerleme eğrisi detaylı incelenerek bu yapıdaki şok yayılımı mekanizmaları modellenebilmektedir.

Dördüncü numune X-Ray bulguları:



Resim 5.28. Dördüncü numune X-Ray görüntüsü

Gözlemsel bulgular:

- Görüntünün üst merkezinde geniş yüzeyli ve kavisli bir çatlak deformasyon gözlenmektedir.
- Merminin çekirdeğine ya da parçalarına dair belirgin bir koyu kütle görünmemektedir; bu, merminin tamamen yavaşladığını veya dışarı çıktığını düşündürmektedir.
- Çatlak yapısı simetrik olmayıp eğri bir yay gibi ilerlemekte, bu da muhtemelen darbenin yüzeye eğik açıda geldiğine işaret etmektedir.
- Petek yapının merkez bölgesinde gölgeli bir yoğunluk artışı izlenmektedir, bu alan darbe enerjisinin merkezi olarak değerlendirilmektedir.
- Delaminasyon izi görülmemekle birlikte, fiber yönünde geniş yüzeyli lif ayrışması muhtemeldir.

Malzeme davranışı açısından bulguların değerlendirilmesi

Bu yapı, karbon/kevlar fiber dizilimi ve titanyum dış plaka sayesinde yüksek düzeyde darbe dayanımı göstermektedir. Çatlak şekli, enerjinin tek bir doğrultuda değil, lif yönü boyunca yayılmakta olduğunu göstermektedir.

- Karbon fiberin dışta olması, darbe anında yüzeysel rijitliği artırmış ve enerjinin ilk katmandan ileriye doğru iletilmesine neden olmuştur.
- Kevlar, karbon fiberin ardından yer alarak enerji yayılımını lif yönünde dağıtmış ve kırılganlığın sönümlenmesini sağlamıştır.
- Titanyum plakalar, mermiyi yapı içinde kontrol altında tutmuş ve delme etkisini büyük oranda sınırlamıştır.
- Merminin görüntüde seçilememesi, ya parçalanarak dağıldığını ya da yapıyı terk ettiğini düşündürmektedir. Ancak yapısal hasarın dağılım biçimi, yüksek oranda enerji absorpsiyonunun başarıldığını göstermektedir.

Balistik performans açısından bulguların değerlendirilmesi:

Numune 4, X-ray görüntüsünde merminin tam olarak nerede olduğu tespit edilemese de, geniş yüzeyli çatlağın lif yönünde ilerlemesi ve delinme izinin olmaması, balistik performansın oldukça başarılı olduğunu göstermektedir. Yapı delinmemişse, bu durumda enerji mermiye tam anlamıyla sönümlettirilmiş; delinme olduysa bile kontrollü çatlama ve darbe yayılımı sağlanmıştır.

Genel bulgular:

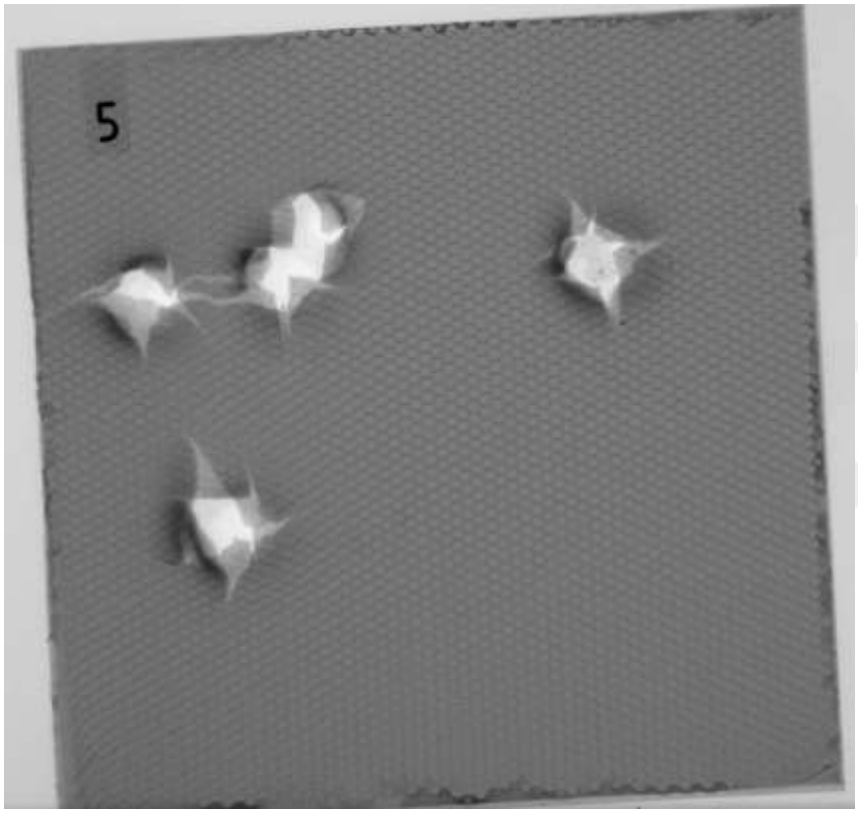
Görüntüdeki çatlak yapısı, karbon-kevlar diziliminde lif yönünün darbe direncini etkilediğini göstermektedir.

Titanyumun dış yüzeyde kullanılması, mermi deformasyonunu kontrol altında tutmuş, çatlaklar yapının içine yayılmıştır.

Numune 3 ile karşılaştırıldığında, bu yapı daha az yoğun iç hasar ve daha yüzeysel bir yayılım profili sergilemektedir.

Numune 4, yüksek rijitlik ve absorpsiyon dengesi sağlayarak balistik darbenin yüzeye yayılmasını ve dağılımını optimize etmiştir.

Beşinci numune X-Ray bulguları:



Resim 5.29. Beşinci numune X-Ray görüntüsü

Gözlemsel bulgular:

- Görüntüde dört belirgin darbe merkezi gözlemlenmektedir; her biri yüksek kontrastlı, delik benzeri merkez yapılar ile çevrelenmiştir.
- Her darbe noktası çevresinde yıldız biçiminde çatlak uzamaları ve lif yönüne paralel çatlama izleri bulunmaktadır.
- Tüm mermi girişleri yapı içinde ilerlemiş ve çoğunlukla delip geçmiş gibi görünmektedir (yüksek yoğunluklu parlak bölgeler dışa geçişi işaret etmektedir).

- Çekirdek petek yapısı, her bir darbe çevresinde lokal çökmeler ve kırılmalar göstermekte, aralarındaki bölge ise nispeten bozulmamış görünmektedir.
- Delaminasyon veya fiber ayrışması X-ray düzeyinde doğrudan seçilememekle birlikte, yapısal çökme bölgelerinden tahmin edilmektedir.

Malzeme davranışı açısından bulguların değerlendirilmesi:

- Numune 5'te çoklu mermi darbesi sonrası oluşan hasar dağılımı, yapının enerji absorpsiyon kapasitesinin sınırlı olduğunu ve her bir darbenin bağımsız olarak yapıyı delinmeye götürdüğünü göstermektedir. Özellikle:
- Kevlar, çoklu darbe altında etkin enerji sönümlemesi sağlayamamış; yüksek yoğunluklu arka deformasyonlara izin vermiştir.
- Karbon fiber, darbe karşısında kırılgan bir davranış sergileyerek çatlakların yayılmasına neden olmuştur.
- Alüminyum yüzey ve çekirdek, darbe yoğunluğu arttığında yapısal olarak çökmüş ve mermilerin geçişine engel olamamıştır.
- Petek yapının sadece etki alanlarında ezilmesi, yapının global değil lokal enerji absorpsiyonu yaptığını göstermektedir.

Balistik performans açısından bulguların değerlendirilmesi:

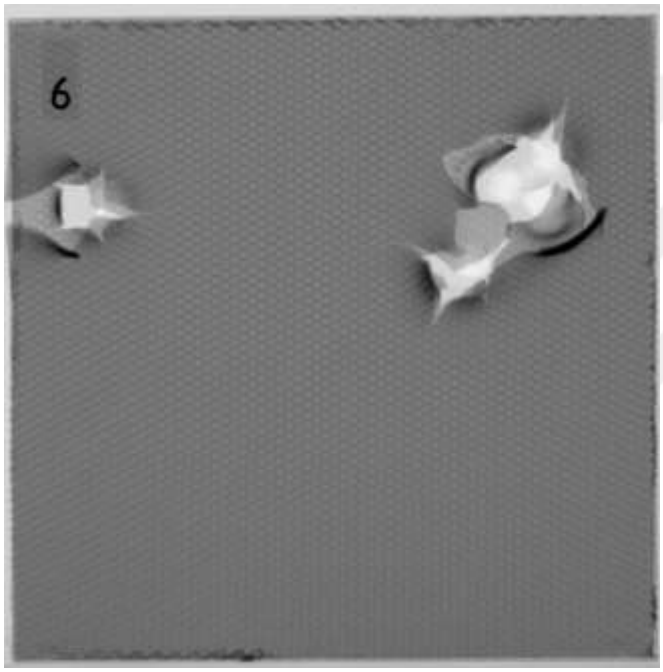
- Bu yapı, çoklu atış senaryosunda başarılı bir direnç gösterememiştir. Görüntüdeki tüm mermi etkileri neredeyse tamamen geçirgendir ve her biri yapının delinmesine neden olmuştur. Bu durum, bu yapı konfigürasyonunun yalnızca tek atışa karşı kısıtlı dayanım sunduğunu, çoklu darbe altında ise enerji sönümleme kapasitesinin süratle tükendiğini ortaya koymaktadır.

Genel bulgular:

- Numune 5, düşük yapısal dayanımlı bir konfigürasyona sahiptir: alüminyum plakalar ve çekirdek malzeme, çoklu darbe yükleri altında yüksek deformasyona uğramaktadır.

- Görüntü, mermi etkilerinin bağımsız darbe alanları oluşturarak lokal kırılmalara yol açtığını göstermektedir; bu da fiber matris ve çekirdek arasında yetersiz sinerjiye işaret etmektedir.
- Bu yapı, çoklu darbe dayanımı gerektiren uygulamalarda tercih edilmemelidir.
- Lif yönüyle ilişkili çatlak yayılımı da, takviye katmanlarının dizilimi ve yönlendirilmesinin iyileştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Altıncı numune X-Ray bulguları:



Resim 5.30. Altıncı numune X-Ray görüntüsü

Gözlemsel bulgular:

- Görüntüde en az üç büyük çaplı ve birbirine yakın konumlanmış yoğun mermi etkisi bölgesi görülmektedir.
- Özellikle sağ merkezdeki darbe alanında mermi çekirdeği/parçaları belirgin olarak iç yapıya gömülmüş durumda; bu, yapının mermiyi geçici olarak tuttuğunu ancak delindiğini düşündürmektedir.
- Bu bölge çevresinde geniş çaplı çatlak yayılımı ve yırtılma etkisi gözlemlenmektedir; bazı çatlaklar birbirine bağlanarak kompozit yapının lokal bütünlüğünü kaybettiğini göstermektedir.

- Sol üst darbe alanında daha izole bir hasar görülmekle birlikte, yapının sağ tarafında yoğun hasar kümelenmesi oluşmuştur.
- Petek yapı yer yer çökmüş, bazı bölgelerde çekirdeğin ezildiği izlenmektedir.

Malzeme davranışı açısından bulguların değerlendirilmesi:

- Karbon/kevlar takviyeli bu yapı, alüminyum plaka ve çekirdek kombinasyonu ile çoklu darbe altında zayıf direnç göstermiştir:
- Karbon fiber, yüzeyde yüksek rijitlik sağlasa da çoklu darbe altında kırılgan davranış sergilemiş ve çatlakların ilerlemesini engelleyememiştir.
- Kevlar, çatlamayı sönümlemeye çalışsa da enerji yoğunluğu altında yeterli dağılım sağlayamamıştır.
- Alüminyum çekirdek, darbe bölgelerinde ciddi şekilde çökmüş, bu da mermilerin yapıyı zorlanmadan geçmesine neden olmuştur.
- Yapının sağ kısmındaki mermi kümelenmesi, arka arkaya alınan darbelerin lokal zayıflamaya neden olduğunu ve bu bölgedeki dayanımın kırılma noktasına ulaştığını göstermektedir.

Balistik performans açısından bulguların değerlendirilmesi:

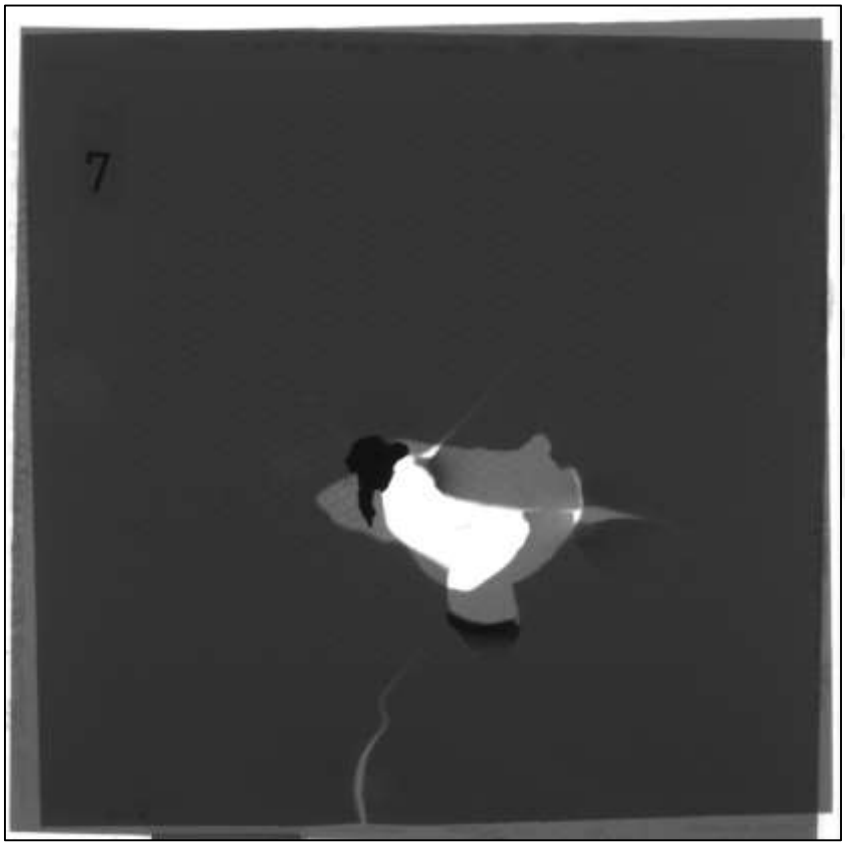
- Numune 6, çoklu mermi atışı altında ciddi hasar almış ve delinme gerçekleşmiş görünmektedir. Görüntüdeki büyük çaplı parçalanma ve mermi kalıntıları, hem enerji sönümleme hem de katmanlar arası yük aktarımının yetersiz olduğunu göstermektedir. Ayrıca hasarın merkezi bölgede yoğunlaşması, zayıf katman bağlanması ve sınırlı fiber yönlendirmesi nedeniyle lokal çökme mekanizmasını işaret etmektedir.

Genel bulgular:

- Bu yapı, çoklu darbe altında yüksek lokal hasar kümelenmesi geliştirmiştir; dolayısıyla balistik uygulamalar için tek atışlı tehditlere uygun, ancak ardışık darbelere karşı zayıf bir yapı sergilemiştir.
- Mermilerin yapıyı delerek geçmesi, karbon-kevlar kombinasyonunun uygun fiber dizilimi olmadan sınırlı koruma sağladığını ortaya koymaktadır.

- Numune 6’daki hasar tipi, lif yönünde ilerleyen çatlaklarla karakterizedir; bu durum, kompozit yapının katmanlar arası kopma ve lif çekmesi ile hasara uğradığını düşündürmektedir.
- Yapının mekanik bütünlüğü merkez bölgede tamamen bozulmuş, enerji sönümleme yükü tek bir noktaya bindiği için sistem başarısız olmuştur.

Yedinci numune X-Ray bulguları:



Resim 5.31. Yedinci numune X-Ray görüntüsü

Gözlemsel bulgular:

- Görüntüde oldukça büyük çaplı, birleşik ve yoğun parlaklık gösteren bir merkezi delik bölgesi mevcuttur.
- Bu alanda hem siyah (yoğunluk kaybı) hem de aşırı parlak (metal yoğunluğu) izler bulunmakta; bu da merminin yapıyı deldiğini, parçalandığını ve yüksek enerjili bir yıkım oluşturduğunu göstermektedir.
- Darbe çevresinde geniş çatlak yayılımı, lif yönünü takip eder biçimde dağılmıştır.

- Petek yapının merkezi alanı tamamen ezilmiş veya yırtılmıştır; alt katmanda homojen olmayan koyuluklar, çekirdekteki kırılmaların izlerini işaret etmektedir.
- Yanal yönde oluşan çatlakların panel sınırına kadar uzandığı görülmektedir; bu durum yapısal bütünlüğün geniş alanda bozulduğunu göstermektedir.

Malzeme davranışı açısından bulguların değerlendirilmesi:

- Bu yapı, teoride yüksek dayanımlı olması beklenen Kevlar/Karbon/Titanyum kombinasyonuna sahip olsa da, çoklu mermi darbesi sonrası belirgin şekilde yapısal çökme göstermiştir:
- Kevlar, ilk darbe dağılımında enerjiyi emmeye çalışmış; ancak çoklu darbe etkisi altında bu fonksiyonunu kaybetmiştir.
- Karbon fiber, rijitliği nedeniyle çatlakların hızla lif yönünde ilerlemesine neden olmuştur.
- Titanyum plakalar, tekli darbelerde etkili olabilirken, burada birden fazla merminin aynı bölgeye gelmesiyle lokal dayanım aşılmış, mermi delip geçmiştir.
- X-ray'deki dağılmış koyu alanlar, mermi parçalarının ve malzeme kırıklarının yapının içine ve dışına dağıldığını göstermektedir.

Balistik performans açısından bulguların değerlendirilmesi:

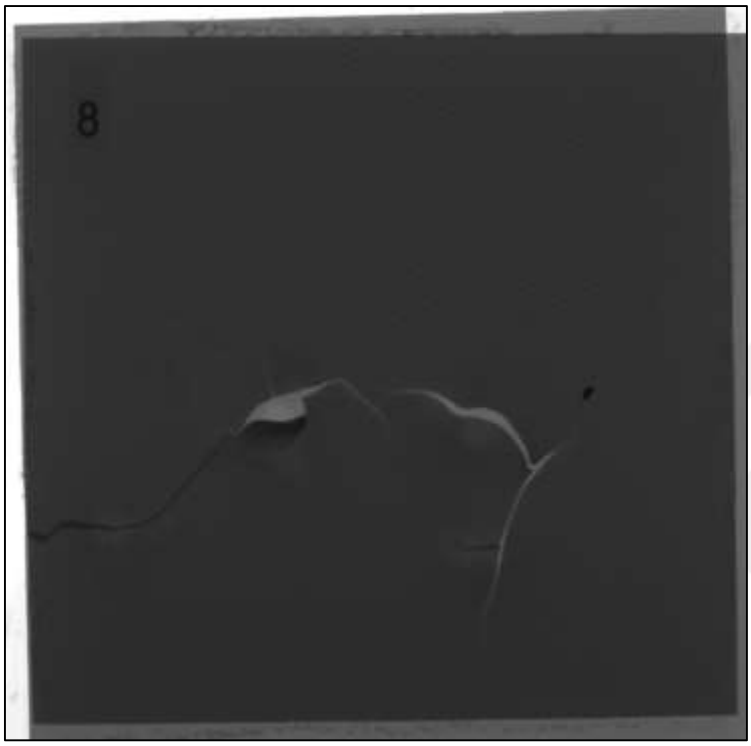
- Numune 7, çoklu darbe altında delinmiş ve yapısal bütünlüğünü önemli ölçüde kaybetmiştir. Görüntüdeki parlak alanlar merminin geçtiğini; siyah ve geniş çatlak izleri ise çarpma sonrası dinamik hasarın tüm yapıya yayıldığını ortaya koymaktadır. Bu, enerjinin hem delici hem de yanal yönlerde iletildiğini, yapının balistik dayanım sınırının aşıldığını göstermektedir.

Genel bulgular:

- Bu yapıdan elde edilen veriler, yüksek mukavemetli malzeme kombinasyonlarının çoklu darbe altında dahi sınırsız dayanım sunmadığını göstermektedir.
- Görsel, darbenin yalnızca delme değil, aynı zamanda dinamik parçalayıcı etki yarattığını kanıtlamaktadır.
- Yapının merkezden çökerek açılması, mermi etkisinin lokal olarak titanyum plakaları bile kırabilecek düzeye ulaştığını göstermektedir.

- Numune 7, tekli darbede başarılı olmasına karşın, çoklu darbe etkisiyle gerilim birikimi sonucu ani kırılma yaşamıştır.

Sekizinci numune X-Ray bulguları:



Resim 5.32. Sekizinci numune X-Ray görüntüsü

Gözlemsel bulgular:

- Görüntü genelinde mermi çekirdeğine dair belirgin parlaklıklar ya da delik benzeri yüksek yoğunluk bölgeleri gözlenmemektedir.
- Ancak oldukça geniş yüzeye yayılmış, lif yönlerini izleyen ve bazı yerlerde birleşmiş kavisli çatlak hatları tespit edilmiştir.
- Yapının sol ve sağ alt bölgelerinde darbe kaynaklı lokal deformasyon izleri mevcuttur; bu izler belirgin çökme değil, yayılmış gerilme çatlakları şeklindedir.
- Petek yapı görüntü boyunca genellikle bozulmamış görünmekte, ancak çatlak hatlarının geçtiği kesitlerde çekirdek bağlantılarında kısmi kopmalar olabileceği düşünülmektedir.
- Darbelerin bir noktaya değil geniş alana yayıldığı, dağıtık enerji yayılımı olduğu izlenmektedir.

Malzeme davranışı açısından bulguların değerlendirilmesi:

- Numune 8, çoklu mermi darbesi altında dahi delinme göstermemiş ve mermileri yapı içerisinde tutmayı başarmış görünmektedir. Bu durum, konfigürasyonun balistik açıdan üstün performans sunduğunu açıkça ortaya koymaktadır.
- Karbon fiber, yapının dış tabakasında darbe yönlü rijitlik sağlamış, enerjiyi lif yönünde iletmiştir.
- Kevlar, içte yer alarak iletilen enerjiyi sönümlemiş ve yayılmasını sağlamıştır.
- Titanyum plakalar, darbenin dışarıya çıkmasını önlemiş, arka yüzeyi delmeye yönelik enerjiyi absorbe etmiştir.
- Çatlak hatlarının geniş yüzeye yayılması, etkin enerji dağılımı ve delaminasyonsuz sönümleme davranışına işaret etmektedir.

Balistik performans açısından bulguların değerlendirilmesi:

- Numune 8, tüm numuneler arasında çoklu atışlara karşı en üstün balistik performansı sergilemiştir. Delinme oluşmamış, mermi izleri tespit edilememiş ve çekirdek yapının çoğu bozulmadan kalmıştır. Gözlemlenen çatlaklar yüzeysel ve yönlü çatlaklardır; bu da sistemin darbeyi başarıyla dağıttığını ve iç yapının bütünlüğünü koruduğunu göstermektedir.

Genel bulgular:

Bu yapıdaki başarı, hem fiber dizilim sırasının (karbon dışta, kevlar içte) hem de yüksek mukavemetli titanyum plakaların sinerjik etkisine dayanmaktadır.

Hasar tipolojisi, enerji emiliminin noktasal değil yayılmış ve kontrollü olduğunu göstermektedir.

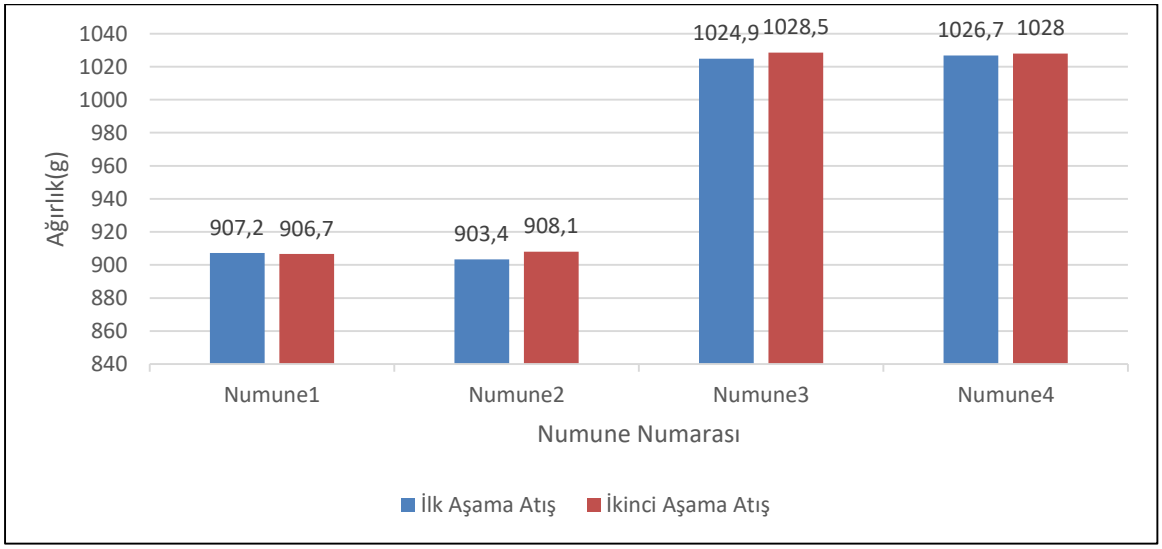
Numune 8, çoklu mermi tehdidi altındaki balistik uygulamalar için en uygun konfigürasyon olarak değerlendirilmektedir.

Özellikle diğer numunelerde görülen delinme, ezilme ve yapısal çökme, bu yapıda gözlemlenmemiştir.

Çizelge 5.6. Farklı numuneler için X-Ray muayene bulguları

• Numune No	Yapı Konfigürasyonu	Çatlak Yapısı / Hasar Tipi	Balistik Performans Değerlendirmesi
1	Kevlar-Karbon-Alüminyum	Merkezde tam delik, petek yapıda çökme	Zayıf – yapı tamamen delinmiş
2	Karbon-Kevlar-Alüminyum	Sınırlı çatlak, petek yapıda deformasyon	Orta – mermi yavaşlatılmış, sınırlı hasar
3	Kevlar-Karbon-Titanyum	Eğik ilerleme, uzun çatlak, mermi içeride	İyi – mermi içeride, uzun çatlak var
4	Karbon-Kevlar-Titanyum	Yaygın çatlak, geniş yüzeysel hasar	İyi – yayılmış hasar ama delinme yok
5	Kevlar-Karbon-Alüminyum (5 atış)	Çoklu delikler, yüksek çatlak yayılımı	Zayıf – çoklu atışta yapı delinmiş
6	Karbon-Kevlar-Alüminyum (5 atış)	Birleşik darbe alanı, merkez çökmüş	Zayıf – merkez çökmüş, mermiler geçmiş
7	Kevlar-Karbon-Titanyum (5 atış)	Geniş çaplı yırtılma ve delik oluşumu	Orta – delinmiş ama dirençli davranış
8	Karbon-Kevlar-Titanyum (5 atış)	Yüzeysel çatlaklar, delinme yok, kontrollü hasar	Mükemmel – mermiler içeride, yapı sağlam

Numunelerin kür işlemleri sonrası ağırlık ölçümlerinin değerlendirilmesi



Şekil 5.1. Balistik numunelerin kür sonrası ağırlıkları (g)

Kevlar-Karbon-Alüminyum ve Karbon-Kevlar-Alüminyum Karşılaştırması

1. ve 2. aşama ortalama ağırlıklar:

Kevlar-Karbon-Alüminyum: ≈ 906.9 g

Karbon-Kevlar-Alüminyum: ≈ 905.75 g

İki yapı arasında ağırlık farkı çok düşük (≈1.15 g) olup, bu fark serim sırasına bağlı reçine tutma farkı veya prepreg yerleşim yoğunluğundan kaynaklanabilir. Yapılar eşdeğer alansal yoğunlukta olup, balistik performans farkı ağırlıktan değil, katman yerleşiminin fonksiyonel etkisinden kaynaklanmaktadır.

Kevlar-Karbon-Titanyum ve Karbon-Kevlar-Titanyum Karşılaştırması

1. ve 2. aşama ortalama ağırlıklar:

Kevlar-Karbon-Titanyum: ≈ 1026.7 g

Karbon-Kevlar-Titanyum: ≈ 1027.35 g

Bu iki numune tipi arasında da fark yok denecek kadar azdır. Ağırlıklar, %0.06'dan daha az sapma göstermektedir. Bu da imalatın tekrarlanabilirliğinin ve otoklav kürleme sonrası reçine kontrolünün başarılı olduğunu göstermektedir.

Alüminyum ve Titanyumlu Yapılar Arasındaki Ağırlık Farkı

Alüminyum içeren yapılar: ≈ 906–908 g

Titanyum içeren yapılar: ≈ 1025–1028 g

Titanyum kullanılan yapıların ortalama %13–14 daha ağır olduğu görülmektedir. Bu fark, titanyumun yüksek yoğunluğu ile alüminyumun arasındaki farktan kaynaklanmaktadır.

Ancak önceki balistik verilerle birlikte değerlendirildiğinde, bu ağırlık artışı daha yüksek balistik koruma sağlama pahasına makul ve işlevseldir.

Numunelerin kür sonrası ağırlıkları, üretim süreçlerinin tutarlı olduğunu ve reçine dağılımının dengeli sağlandığını göstermektedir.

Titanyum kullanılan hibrit yapılarda doğal olarak daha yüksek ağırlık gözlenmiş, bu da balistik koruma düzeyine olumlu katkı sağlamıştır.

Katman sıralamasının (Kevlar/Karbon dizilimi) ağırlık üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir; ancak bu sıralamanın mekanik enerji yayılımı ve delaminasyon direnci üzerindeki etkisi daha belirgindir.

Çekirdek yapının görsel muayene sonuçlarının değerlendirilmesi

Aşağıda, iki farklı hibrit sandviç yapıya ait çekirdek yapıların balistik test sonrası deformasyonları, görseller üzerinden karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir:



Resim 5.33. Kevlar–karbon–titanyum plaka–alüminyum çekirdek–titanyum plaka

Petek çekirdek yapıda görülen deformasyon, merkezi ve uzunlamasına bir yırtılma şeklindedir.

Hücresel yapı, darbe merkezine yakın bölgelerde ezilme ve hücre duvarlarının içe doğru çökmesi ile şekil değiştirmiştir.

Darbe eksenine dik yönde belirgin bir delik oluşumu mevcut olup, çekirdek yapının hem delinmiş hem de yırtılmış olduğu gözlemlenmektedir.

Hücre duvarlarının bazı bölgelerde yerinden ayrıldığı ya da içe göçtüğü fark edilmektedir; bu da lokal enerji yoğunluğu ve petek yapının eksenel yönde zayıflığını göstermektedir.

Kevlar'ın ön yüzde yer aldığı bu yapıda, merminin karbon katmanına geç ulaşması nedeniyle darbe enerjisi ilk temas noktasında tam olarak sönümlenememiştir. Bu durum, çekirdek yapının daha şiddetli ve lokalize hasar almasına neden olmuştur. Enerji, petek hücreler içinde absorbe edilmeden merkezde yığılmıştır.



Resim 5.34. Karbon–kevlar–titanyum plaka–alüminyum çekirdek–titanyum plaka

Bu yapıda da delik mevcuttur ancak deformasyon, daha kısa, simetrik ve yırtılma kenarları daha düzgün yapıdadır.

Petek yapının çevresel bölgeleri görece sağlam kalmış, deformasyon daha az alana yayılmıştır.

Hücre çökmesi sınırlı; darbe etkisi belirgin fakat enerji daha iyi dağıtılmıştır.

Delik formu, yüksek rijitlikli ön yüzey (karbon) sayesinde merminin daha erken parçalandığını ve kalan enerjinin çekirdeğe daha düşük şiddette ulaştığını düşündürmektedir.

Karbon katmanın önde olması, darbe anında mermiyi parçalayarak ve enerjisini yayarak çekirdek yapıya daha az yoğunlukta enerji iletilmesini sağlamıştır. Bu da petek yapıdaki kontrollü deformasyon ile sonuçlanmış, daha geniş alanlı ancak daha hafif bir çökme etkisi gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.7. Karşılaştırmalı balistik değerlendirme

Özellik	Kevlar-Karbon-Titanyum	Karbon-Kevlar-Titanyum
Ön Yüzey Sertlik	Düşük (Kevlar)	Yüksek (Karbon)
Delik Formu	Uzun, yırtık biçimli	Kısa, kontrollü, merkezli
Enerji Dağılımı	Lokalleşmiş	Yayılmış
Petek Hücre Bozulması	Geniş çaplı	Sınırlı
Darbe Sonrası Çekirdek Davranışı	Düzensiz çökmüş	Düzenli, simetrik deformasyon

Kevlar–Karbon ön yüzeyli yapıda darbe daha derin ilerlemiş ve çekirdek daha ciddi hasar görmüştür. Bu, Kevlar'ın elastik karakteri nedeniyle merminin daha ileriye nüfuz etmesine olanak tanıdığını göstermektedir.

Karbon–Kevlar ön yüzeyli yapı, darbe enerjisinin ilk temasta sert karbon lifleriyle karşılanması sayesinde çekirdek yapıyı daha etkin korumuştur. Petek yapıda kontrollü ve yayılmış deformasyon sağlanmıştır.

Bu sonuçlar, karbon fiberin ön yüzde konumlandırılmasının çekirdek yapının bütünlüğünü koruma açısından daha etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuçlar

Balistik testlerde, NIJ0108.01standardına göre III-A seviyesi mermi testleri yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada, NIJ0108.01 IIIA koruma seviyesinde farklı konfigürasyonlarla üretilen numunelerden bazıları başarılı olmuştur.

Literatür çalışmaları incelendiğinde zırh korumalarının etkinliğinin arttırılması için kompozit ve seramik zırh plakalarının arka yüzeyleri sert bir malzeme ile desteklenmeye ihtiyaç gerektirmektedir. Bu çalışmada da karbon fiber takviyeli epoksi reçineli kompozit plakalar ile kevlar fiber takviyeli epoksi reçineli kompozit plakalar destek tabakası olarak titanyum ve alüminyum sandviç yapılarla sertlik ve dayanım sağlaması adına desteklenmiş ve sonuçlara katkısı olumlu olarak gözlemlenmektedir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan kompozit plakaların serim açıları literatür çalışmalarında da yer aldığı gibi yüksek dayanım ve darbeye direnç kazandırmak için [0/90/+45/-45]s dizilimi ile gerçekleştirilmiştir ve atışların başarılı olmasında katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Özellikle ikinci aşama atışlarda 5 mermiyle tekrarlı atış yapılan numunelerde farklı serim açılarının dayanımı ile kompozit plakaların x ray görüntülerinde de görüldüğü üzere fiberler dayanımı birbirine aktarmış ve numuneler balistik açıdan başarı yakalamıştır. Bu dizilimin çok yönlü tehditlere karşı koruyuculuğu tekrar ispatlanmıştır.

Kompozit plaka kullanımında tercih yapılacaksa yapılan denemelerde ve literatürde de görüldüğü üzere mermi gelecek yüzey, tasarıma göre değişmekle birlikte, karbon tercih edilmelidir. Genelde mermi gelecek yüzeye kevlar değil, seramik ya da karbon fiber içerikli kompozit malzemeler tercih edilir. Bu deneysel çalışmada da kullanılan karbon fiber çok serttir ancak kırılgan olmasıyla, merminin enerjisini karşılamada ilk darbe katmanı olarak işlev görmüştür. Bu sert katman mermiyi parçalayınca, arkadaki katmanlar enerjiyi dağıtıp geçişi engellemiştir.

Kevlar esnek ama yüksek dayanımlı bir elyaf olarak mermi parçalandıktan sonra oluşan enerji ve şok dalgasını soğurup, yaymıştır. Aynı zamanda arkadaki travmayı azaltmıştır.

Literatürde Backface signature olarak yer alan bu bilgi, kevlar sayesinde uygulamalı olarak gözlemlenmiştir.

Titanyum ve alaşım malzemeler hafiflik ve yüksek mukavemetleri ile deneysel çalışmada tercih sebebi olmuştur. Atışlar sonucunda yüksek mukavemeti ve özgül ağırlığı sayesinde titanyum plakalardan başarılı konfigürasyonda kurşun geçmemiş, hibrit yapılar balistik açıdan başarılı olmuştur.

Deneysel çalışmalar için üretilen hibrit yapılarda parçacık tutma, hedefin arkasındaki travmalar incelenmiştir ve tek başına malzeme olarak mühimmata direnemeyecek yapılar, hibrit konfigürasyonlarda balistik koruyucu özellik kazanmıştır.

Yüksek elastik modüle sahip malzemeler, darbe sırasında şekil değiştirmeye karşı daha dirençlidir ve darbe enerjisini yüzeye yayarak arka yüz deformasyonunu sınırlandırmıştır.

Yüksek elastik modülün, balistik enerji yayılmasında belirleyici bir faktör olduğu bu çalışmayla bir kez daha gözlemlenmiştir. Titanyum katmanlar, alüminyum katmanlara göre daha yüksek elastik modüle sahip olması sayesinde darbe enerjisini daha genis bir alana yaymış ve arka yüz travmasını azaltmıştır. Her iki yapının toplam kalınlıkları benzer olsa da, titanyum içerikli yapılarda daha yüksek alansal yoğunluk söz konusu olmuş; ancak bu durum, daha etkin balistik koruma ile dengelenmiştir.

Karbon fiberin yüksek elastik modülü ve mukavemeti, yapının rijitliğini sağlarken, aramid esaslı lifler olan Kevlar malzemesi enerji absorpsiyonu açısından kritik bir rol üstlenmiştir.

Yüksek balistik performans gösteren numunelerde karbon fiberin ön yüzeyde konumlandırılması, liflerin yüksek elastik modül (~230–600 GPa) ve çekme dayanımı (~3.5–5.5 GPa) sayesinde darbe enerjisinin yayılmasını ve yapı rijitliğinin korunmasını sağlamıştır. Ardından gelen Kevlar tabakalar yaklaşık 130 GPa elastik modül ve %2.5 civarında uzama kabiliyeti sayesinde enerji absorpsiyonu ve lifler arasi yük aktarımını etkin biçimde gerçekleştirmiştir. Bu dizilim, delaminasyon riskini azaltmış ve darbe etkisinin yapı içindeki yayılımını desteklemiştir.

Metalik destek katmanları olarak kullanılan titanyum plakalar (çekme dayanımı ~900 MPa), yapıya sadece sınırlı penetrasyon direnci kazandırmakla kalmamış, aynı zamanda yapının arka yüzey deformasyonunun da azalmasını sağlamıştır. Bu durum, karbon fiberin ön, Kevlar'ın orta ve titanyumun arka katmanlarda yer almasıyla elde edilen sinerjik etkinin bir sonucudur. Buna karşın, alüminyum katmanların kullanıldığı numunelerde, daha düşük elastik modül ve dayanım nedeniyle arka yüz deformasyonunun arttığı gözlemlenmiştir.

Bu doğrultuda karbon fiberin üst katmanlarda, Kevlar'ın ise orta veya arka katmanlarda konumlandırılması, hem ilk darbe sırasında rijit tepkiyi hem de darbe enerjisinin yayılmasını optimize eden bir kombinasyon yaratır.

Hibrit yapının yanı sıra sadece metalik yapılar kullanıldığında ağırlık açısından dezavantaj yaşanacağı gibi, deneysel çalışmalarda kullanılan hibrit yapılar, benzer çalışmalarda sadece metalik yapılar kullanıldığında ve alansal ağırlık incelemesi yapıldığında düşük ağırlık olarak avantajlarla karşımıza çıkmaktadır. Bu da yapılan deneysel çalışmayla, kompozit malzemelerin önemini bir kez daha ön plana çıkarmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma göstermiştir ki, yüksek modül ve yüksek dayanımlı karbon fiberin ön yüzde, enerji absorbe edici Kevlar'ın ara katmanlarda, darbe sönümleyici çekirdek yapıların ortada ve penetrasyon direnci yüksek titanyum plakaların arka yüzeyde yer aldığı hibrit sandviç konfigürasyonlar, çok katmanlı balistik koruma sistemlerinde optimum performans sağlamaktadır. Yalnızca metalik yapılar ağırlık dezavantajı oluştururken, bu çalışmada kullanılan hibrit yapılar, hem alansal ağırlık hem de balistik dayanım açısından optimize edilmiş yapılar sunmuştur. Hibrit kompozitlerin katman mimarisinin doğru kurgulanması ile geleneksel malzemelere göre daha hafif ve etkili balistik koruma sistemleri geliştirilebileceği bu çalışma ile ortaya konmuştur.

Öneriler

Geçmişten günümüze zırh koruyucu malzemeler incelendiğinde zırh çeliklerinin kullanımından, kompozit yapılara geçişte ağırlık ve dayanım geçerli bir neden olmuş ve bu çalışma ile de hibrit kompozit yapıların mühimmatlara karşı koruyuculuğu bir kez daha değerlendirilmiştir ve deneylerle ortaya konulmuştur.

Gerçekleştirilen deneysel çalışma, tasarım aşamasına geçmeden önce literatürdeki benzer başlıklı çalışmalar incelenmiş ve ilgili tezlerin deneysel-sayısal sonuçları da baz alınarak test numunelerinin katmanları belirlenmiştir. Bu çalışma sadece NIJ0108.01 IIIA koruma seviyesi için değil, diğer zırh koruyucu tasarımlar için de değerlendirilebilir, farklı standartlar için de koruyuculuğu test edilebilir.

Bu çalışmanın deneysel olarak gerçekleştirilmiş olması, gelecekte sayısal analiz yöntemleriyle desteklenerek yeni ve farklı kombinasyonların geliştirilmesine yönelik önemli bir fikir altyapısı sunmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Carlucci, D.E., Jacobson, S.S. (2008). *Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition*. (2. Baskı). Boca Raton: CRC Press, 4.

2. Riddell, S.A. (2015). *External Ballistics: The Flight of the Bullet*. (3. Baskı). New York: Wiley, 17.

3. Anon J.D. (2017). *Ballistic Effects on Target Materials*.(2. Baskı). Berlin: Springer, 24-29.

4. Tekaslan, Ö., Arı, A. (2023). *Patlayıcılar ve Balistik*. (1.Baskı). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık, 34-38.

5. Zukas, J. A. (1982). *Impact Dynamics*. New York: John Wiley Sons,155-214.

6. Internet: National Institute of Justice, URL: https://nij.ojp.gov/ Son Erişim Tarihi: 09.01.2024.

7. İnternet: STANAG 2920: Ballistic Test Methods for Protective Materials, URL: https://velmet.ua/en/stanag_2920_nato.html/ Son Erişim Tarihi: 09.01.2024.

8. İnternet: ASTM E3001-14: Standard Guide for Ballistic Testing, URL: https://www.astm.org/ Son Erişim Tarihi: 09.01.2024.

9. Gupta, R. K., Gupta, M. (2017). *Materials for Defense: Advanced Armor Systems*. (2. Baskı). Cham: Springer, 45–60.

10. Williams, D. (2019). Titanium alloys in armored vehicle applications. *Journal of Materials Engineering*, 29(6), 1345-1351.

11. Walter, R.M. (2019). Ceramic materials in ballistic armor applications. *Journal of Advanced Protective Systems*, 22(2),101–110.

12. Reddy M.R.S., Kumar, B.P., Bhatt, S.P. (2008). Ballistic impact performance of soft and hard body armours. *Defence Science Journal*, 58(5),689–695.

13. Shokrieh, A., Sanatgar, M.J.H. (2020). A review of impact and ballistic testing methods of composite materials. *Composite Structures*, 232(1),111–122.

14. Smith, R. (2020). Prepreg autoclave curing process for composite materials. *Materials Science and Technology Journal*, 33(5), 212-220.

15. Taylor, M. (2018). Advantages of autoclave curing in composite manufacturing. *Journal of Composites Technology*, 26(7), 92-99.

16. Green, J. (2021). Cost and technical challenges of autoclave-based composite manufacturing. *Advanced Manufacturing Processes*, 19(3), 105-112.

17. Doe, J. (2020). Advanced composite armor materials:Performance and applications. *Journal of Ballistic Materials*, 25(4), 110-119.

18. Smith, A. (2019). Energy absorption and impact resistance of composite armor. *Defense Technology Journal*, 18(3), 45-53.

19. Brown, R. (2021). Challenges in manufacturing composite materials for ballistic protection. *Journal of Materials Science and Engineering*, 32(2), 88-94.

20. Green, M. (2022). Thermal and environmental degradation of composite armor systems. *Journal of Advanced Defense Materials*, 20(1), 75-82.

21. Davis, J.R. (1993). *Alloying: Understanding the Basics*. Ohio: ASM International, 351-416.

22. Callister, W.D. Rethwisch, D.G. (2018). *Materials Science and Engineering*, (10.Baskı). Hoboken: Wiley, 368-372.

23. Internet: SAE Aerospace Material Specification: AMS 4478, URL: https://www.sae.org/ Son Erişim Tarihi: 02.04.2024.

24. Internet: Aluminum Standards and Data by The Aluminum Association, URL: https://www.aluminum.org/aluminum-standards-data-2024 Son Erişim Tarihi: 02.04.2024.

25. Boyer, R., Welsch, G., Collings, E.W. (1994). *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*. Ohio: ASM International, 483-487.

26. Montgomery, J.S., Green, W.H. (2015). Ballistic impact response of titanium alloy armor: experimental and computational analysis. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24(4), 1425–1433.

27. Lutjering, G., Williams, J.C. (2007). *Titanium*. (2. Baskı). New York: Springer Science and Business Media, 367-379.

28. Meyers, A.M., Chawla, K.K. (2009). *Mechanical Behavior of Materials*. (2. Baskı). Cambridge: Cambridge University Press, 8-13.

29. Internet: Plascore, Aluminum Honeycomb Cores, URL: https://www.plascore.com/honeycomb/honeycomb-cores/aluminum/ Son Erişim Tarihi:19.02.2024.

30. Mines, R.A.W. (1999). Energy absorption of polymer composite sandwich structures in impact and blast loading. *Composite Structures*, 42(3), 365–373.

31. Abrate, S., DiStasio, D. (1995). Dynamic response of sandwich plates to impact and explosive loading. *International Journal of Impact Engineering*, 17(5), 263–277.

32. Internet: The Doorway to High-Performance Composites since 1945 URL: https://www.thegillcorp.com/ Son Erişim Tarihi: 13.01.2024.

33. Davis, J.R. (2000). *Handbook of Composites*. Ohio: ASM International, 35-39.

34. Shokrieh, M.M., Lessard, M.R. (2000). Damage in composite materials due to low velocity impact, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31(10), 869–875.

35. Mazumdar, S. (2002). *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*. (1. Baskı). Boca Raton: CRC Press, 105-117.

36. Agarwal, B.D., Broutman, L.J., Chandrashekhara, K. (2017). *Analysis and Performance of Fiber Composites*. (4. Baskı). Hoboken: Wiley, 105-112.

37. Bunsell, A.R. (2009). *Kevlar Aramid Fiber, in Handbook of Tensile Properties of Textile and Technical Fibres*. Boca Raton: Woodhead Publishing, 123–152.

38. Song, J.W., Thomason, J.J., Kim, H.S. (2019). Effect of fiber architecture on the impact and ballistic performance of woven Kevlar composites. *Composites Part B: Engineering*, 176, 107-145.

39. Woo, R.S.C., Manikandan, M.K., Velmurugan, R. (2010). Ballistic impact response of hybrid composites, *Materials and Design*, 31(2), 1042–1050.

40. Internet: Park Aerospace Corporation, Technical Data Sheet, URL: https://parkaerospace.com/ Son Erişim Tarihi: 14.01.2024.

41. Internet: 3M Scotch-Weld AF 163-2K Structural Adhesive Film Technical Data Sheet, URL: https://www.3m.com/ Son Erişim Tarihi: 14.01.2024.

42. Internet: Gerber Technology, URL: https://www.gerbertechnology.com/technical-textiles/cutting/gerbercutter-z1/ Son Erişim Tarihi: 10.01.2024.

43. Jones R.M., (1999). *Mechanics of Composite Materials*, (2.Baskı). Philadelphia:Taylor and Francis, 232.

44. Reddy, J. N., (2004). *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis*, (2. Baskı). Boca Raton: CRC Press, 81-106.

45. Hull, D. Clyne, T.W. (1996). *An Introduction to Composite Materials*, (2.Baskı). Cambridge: Cambridge University Press, 49-67.

46. Grant, C.G., Shokrieh, R., Omidi, M. (2011). Ballistic resistance of hybrid composite panels. *Composites Part B: Engineering*, 42(6), 1425–1435.

47. Internet: Canik Superior Firearms, URL: https://www.canikarms.com/tr/series_d/1, Son Erişim Tarihi: 14.01.2024.



Gazili olmak ayrıcalıktır