

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TABAKALI HİBRİT KOMPOZİTLERİN BİREYSEL ZİRH MALZEMESİ
OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

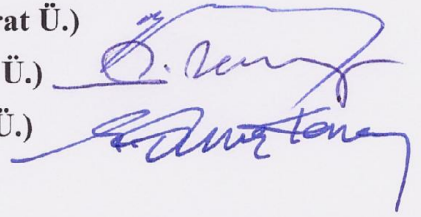
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cenk YANEN

(112120105)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15.12.2015
Tezin Savunulduğu Tarih : 04.01.2016

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ (Fırat Ü.)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ (Batman Ü.)
Doç. Dr. Mete Onur KAMAN (Fırat Ü.)



OCAK-2016

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyuncaengin bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, teşvik eden, bilgisi ve önerileriyle her zaman destek olan çok değerli hocam Sayın Doç. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ’ a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans ders dönemim boyunca ders alma fırsatı bulduğum kıymetli hocalarım Prof. Dr. Aydın TURGUT, Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜR ve Doç. Dr. Mete Onur KAMAN’ a teşekkür ederim. Tez süreci boyunca çalışmama yardımcı olan değerli meslektaşım Okan YILDIRIM’ a ve çalışma arkadaşım Arş. Gör. Celal KISTAK’ a teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmayı MF.13.18. kodlu FÜBAP projesi kapsamında destekleyen Fırat Üniversitesine imkân ve desteklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışmasının balistik deneyleri sırasında hiçbir yardımı esirgemeyen başta Kamil ÖZCAN ve Adem UYAN olmak üzere tüm Elazığ Özel Harekat Şube Müdürlüğü personeline çok teşekkür ederim.

Beni yetiştirip bugünlere gelebilmem için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan babam Hasan YANEN, annem Sultan YANEN ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen kardeşim Ceren YANEN’ e çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında iyi ve kötü günlerimde varlığıyla bana her zaman destek olan eşim Ruhan YANEN ’ e sonsuz teşekkür ederim.

Bu tez çalışması anneannem Muhlise ÖNAL’ a ithaf edilmiştir.

Cenk YANEN

Elazığ-2015

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	IX
TABLolar LİSTESİ	XV
KISALTMALAR VE SEMBOLLER LİSTESİ.....	XVII
1. GİRİŞ.....	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER	2
2.1. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları.....	3
2.1.1. Askeri ve Savunma Sanayi.....	3
2.1.2. Uzay ve Havacılık Sanayi.....	4
2.1.3. Otomotiv Sanayi.....	5
2.1.4. Elektrik ve Elektronik Sanayi.....	5
2.1.5. İş Makineleri.....	5
2.2. Kompozit Malzemelerin Bileşenleri.....	5
2.2.1. Takviye Elemanları	6
2.2.2.1. Dokuma Yapılar	6
2.2.2.2. Dokuma Olmayan Yapılar.....	8
2.2.2. Takviye Elemanları Çeşitleri.....	9
2.2.2.1. Bor Elyaf lar	9
2.2.2.2. Karbon Elyaf lar	9
2.2.2.3 Aramid Elyaf lar	10
2.2.2.4 Cam Elyaf lar.....	11
2.2.2. Matriks Malzemeleri.....	12
2.2.2.1. Reçine Sistemlerine Giriş	12
2.2.2.1.1. Reçine Sistemlerinin Mekanik Özellikleri	13
2.2.2.1.2. Reçine Sistemlerinin Yapışma Özellikleri	15
2.2.2.1.3. Reçine Sistemlerinin Dayanım Özellikleri.....	15
2.2.2.1.4. Reçine Sistemlerinin Çevresel Özellikleri	15
2.2.2. Polyester Reçine Sistemi	15
2.2.2.1. Kimyasal Yapı	15

2.2.2.2. Polyester Reçine Karışımı.....	16
2.2.2.3. Mekanik Özellikler	17
2.2.2.4. Termal Özellikler	17
2.2.2.5. Kimyasal Direnç	18
2.2.3. Epoksi Reçine Sistemi	18
2.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	19
2.3.1. Takviye Elemanlarına Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	20
2.3.1.1. Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler	20
2.3.1.2. Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler	20
2.3.1.3. Tabakalı Kompozit Malzemeler	21
2.3.1.4. Hibrit Kompozit Malzemeler	21
2.3.2. Matriks Elemanlarına Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	22
2.3.2.1. Metal Matriksli Kompozitler	23
2.3.2.2. Seramik Matriksli Kompozitler	23
2.3.2.3. Polimer Matriksli Kompozitler.....	24
2.3.2.3.1. Termoplastikler.....	24
2.3.2.3.2. Termosetler.....	24
2.3.2.3.2.1. Epoksi Reçine Matriksli Kompozitler	24
2.3.2.3.2.2. Polyester Reçine Matriksli Kompozitler	25
2.3.2.3.2.3. Vinilester Reçine Matriksli Kompozitler	25
2.3.2.3.2.4. Fenolik Reçine Matriksli Kompozitler.....	25
2.4. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	25
2.4.1. El Yatırması Yöntemi.....	26
2.4.2. Vakum İnfüzyon Yöntemi	27
2.4.3. Pultrüzyon Yöntemi.....	28
2.4.4. Püskürtme Yöntemi	29
2.4.5. Filaman Sarma Yöntemi.....	30
2.4.6. Otoklav Kalıplama Yöntemi.....	31
2.4.7. Reçine Transfer Metodu (RTM).....	31
3. BALİSTİK.....	34
3.1. İç Balistik.....	34
3.2. Dış Balistik	35
3.3. Terminal Balistik	35

3.4. Kompozit Malzemelerde Balistik Darbe	36
3.4.1. Balistik Performansa Etkiyen Parametreler.....	37
3.4.1.1. Hedefin Malzeme Özellikleri ve Yapısı	38
3.4.1.2. Merminin Özellikleri ve Yapısı.....	39
3.4.1.2.1. Mermi Ağırlığı.....	39
3.4.1.2.2. Mermi Uç Geometrisi.....	39
3.4.1.2.3. Çekirdek Sertliği.....	40
3.4.1.2.4. Mermi Hızı	40
3.4.1.2.5. Mermi Vuruş Açısı	40
3.4.2. Yüksek Hızlı Darbenin Oluşumu	41
3.4.3. Balistik Darbe Sonucu Oluşan Hasar Şekilleri.....	42
3.5. Balistik Koruyucu Ölçüm Standardı.....	46
3.5.1. NIJ- 0101.06 ‘ya Göre Koruma Seviyeleri.....	46
4. LİTERATÜR ÖZETİ	49
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	54
5.1. Hidrolik Pres Tasarımı ve Üretimi	54
5.2. Kompozit Numunelerinin Üretimi	57
5.2.1. Elle Yatırma Yöntemi ile Kompozit Üretimi	58
5.3. Kompozit Numunelerin Konfigürasyonu	66
5.3.1. [Karbon ₁₀ /Aramid ₁₀ /Cam ₁₀] 30 Tabakalı Hibrit Polyester Reçine Matriksli Numuneler 66	
5.3.1.1. [Karbon(45°) ₁₀ /Aramid(Plain) ₁₀ /Cam(45°) ₁₀] 30 Tabakalı Hibrit Polyester Reçine Matriksli Numune.....	66
5.3.1.2. [Karbon(0°) ₁₀ /Aramid(Plain) ₁₀ /Cam(0°) ₁₀] 30 Tabakalı Hibrit Polyester Reçine Matriksli Numune.....	68
5.3.1.3. [Karbon(Plain) ₁₀ /Aramid(Plain) ₁₀ /Cam(Plain) ₁₀] Plain 30 Tabakalı Hibrit Polyester Reçine Matriksli Numune.....	69
5.3.1.4. [Karbon(Twill) ₁₀ /Aramid(Plain) ₁₀ /Cam(Twill) ₁₀] 30 Tabakalı Hibrit Polyester Reçine Matriksli Numune.....	71
5.3.2. [Karbon ₇ /Aramid ₇ /Cam ₇] 21 Tabakalı Hibrit Polyester Reçine Matriksli Numuneler	72
5.3.2.1. [Karbon(45°) ₇ /Aramid(Plain) ₇ /Cam(45°) ₇] 21 Tabakalı Hibrit Polyester Reçine Matriksli Numune.....	72
5.3.2.2. Karbon(0°) ₇ /Aramid(Plain) ₇ /Cam(0°) ₇ 21 Tabakalı Hibrit Polyester Reçine Matriksli Numune	73

5.3.2.3. Karbon(Plain) ₇ /Aramid(Plain) ₇ /Cam(Plain) ₇ 21 Tabakalı Hibrit Polyester Reçine	
Matriksli Numune.....	75
5.3.2.4. [Karbon(Twill) ₇ /Aramid(Plain) ₇ /Cam(Twill) ₇] 21 Tabakalı Hibrit Polyester Reçine	
Matriksli Numune.....	76
5.4. Balistik Test Düzenegi	77
6. BULGULAR	80
6.1. [Karbon ₁₀ /Aramid ₁₀ /Cam ₁₀] 30 Tabakalı Numuneler.....	80
6.1.1. [Karbon(45°) ₁₀ /Aramid(Plain) ₁₀ /Cam(45°) ₁₀] 30 Tabakalı Numune.....	80
6.1.2. [Karbon(0°) ₁₀ /Aramid(Plain) ₁₀ /Cam(0°) ₁₀] 30 Tabakalı Numune.....	85
6.1.3. [Karbon(Plain) ₁₀ /Aramid(Plain) ₁₀ /Cam(Plain) ₁₀] 30 Tabakalı Numune	90
6.1.3. [Karbon(Twill) ₁₀ /Aramid(Plain) ₁₀ /Cam(Twill) ₁₀] 30 Tabakalı Numune	94
6.2. [Karbon ₇ /Aramid ₇ /Cam ₇] 21 Tabakalı Numuneler	99
6.2.1. [Karbon(45°) ₇ /Aramid(Plain) ₇ /Cam(45°) ₇] 21 Tabakalı Numune	99
6.2.2. [Karbon(0°) ₇ /Aramid(Plain) ₇ /Cam(0°) ₇] 21 Tabakalı Numune	104
6.2.3. [Karbon(Plain) ₇ /Aramid(Plain) ₇ /Cam(Plain) ₇] 21 Tabakalı Numune	109
6.2.4. [Karbon(Twill) ₇ /Aramid(Plain) ₇ /Cam(Twill) ₇] 21 Tabakalı Numune.....	113
7. SONUÇLAR.....	122
KAYNAKLAR.....	125
ÖZGEÇMİŞ.....	133

ÖZET

Bu tez çalışmasında, tabakalı hibrit kompozitlerin bireysel zırh malzemesi olarak kullanılabilirliği deneysel olarak araştırılmıştır. Farklı fiber takviye açılarına, farklı tabaka sayılarına ve farklı kalınlıklara sahip Cam Fiber /Aramid Fiber/Karbon Fiber tabakalı kompozit plakaların balistik deneyleri yapılmış ve sonuçları incelenmiştir. Bu amaçla 200 mm x 200 mm boyutlarındaki 21 ve 30 tabakalı farklı kalınlıktaki 8 adet plaka elle yatırma yöntemiyle üretilmiştir. Farklı fiber takviye açılarının balistik performansının incelenebilmesi için 0°, 45°, plain ve twill kumaşlar kullanılmıştır. Üretimi yapılan tabakalı hibrit kompozit plakaların balistik testleri Elazığ Özel Harekat Şube Müdürlüğü atış poligonlarında Beretta marka tabanca ile 9 mm FMJ mermi kullanılarak yapılmıştır. Deneyler uluslararası standartlara uygun olarak (NIJ 0101-06) hazırlanan balistik test düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Balistik testlerde mermi hızları ve numunelerde oluşan çöküntü değerleri ölçülmüş ve hasarlar değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hibrit kompozit, Balistik performans, Zırh malzemesi

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE USABILITY OF LAMINATED HYBRID COMPOSITES AS A BODY ARMOR MATERIAL

In this thesis, usability of laminated hybrid composites as a body armor material has been investigated experimentally. As part of the study, ballistic tests of glass/aramid/carbon fiber laminated composite plates with different reinforcing angles, in different numbers and thicknesses have been carried out and the results are analyzed. To this end, 4 plates, each having different thicknesses and comprising 30 laminates in 200x200mm size are produced by hand lay-up method. 0°, 45°, plain and twill fabrics have been used to analyze ballistic performances of different fiber reinforcing angles. Ballistic tests of the laminated hybrid composite plates that are produced are carried out in Elazığ Special Operation Branch Office, using a Beretta gun loaded with 9mm FMJ bullets. Experiments made with an balistical test equipment that prepared in accordance with (NIJ 0101-06) international standards. During ballistic experiments, velocity and sag values of bullets measured and evaluated.

KeyWords: Hybrid composite, Ballistic performance, Armor material

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2. 1. Çelik, alüminyum ve kompozit malzemelerin farklı özellikler bakımından karşılaştırılması [3].	2
Şekil 2. 2. Kompozit malzemenin askeri alanda kullanımı	4
Şekil 2. 3. Kompozit malzemenin uzay sektöründe kullanımı	4
Şekil 2. 4. Kompozit malzemenin araç gövdesinde kullanımı	5
Şekil 2. 5. Kompozit malzemelerin temel bileşenleri.	6
Şekil 2. 6. Lif temel boyutlandırılması	7
Şekil 2. 7. Atkı ve çözgü gösterimi	7
Şekil 2. 8. Elyaf dokuma malzeme örnekleri.	8
Şekil 2. 9. 2 boyutlu ve 3 boyutlu elyaf dokuma örnekleri	8
Şekil 2. 10. a) 0° konumlu, b) 0°, ±45°, 90° konumlu dokuma olmayan yapılar.	9
Şekil 2. 11. Genel olarak bir reçineye ait gerilme-şekil değiştirme diyagramı [15].	14
Şekil 2. 12. Farklı malzemelere ait gerilme-şekil değiştirme diyagramının karşılaştırılması [15].	14
Şekil 2. 13. Takviye elemanlarına göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması	20
Şekil 2. 14. Tabakalı kompozit malzemelerin dizilimi [18].	21
Şekil 2. 15. Matriks elemanlarına göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması.	23
Şekil 2. 16. El yatırması yöntemi	26
Şekil 2. 17. Vakum infüzyon yöntemi	27
Şekil 2. 18. Pultrüzyon yöntemi	28
Şekil 2. 19. Püskürtme yöntemi.	29
Şekil 2. 20. Filaman sarma yöntemi	30
Şekil 2. 21. Otoklav cihazı.	31
Şekil 2. 22. Reçine transfer kalıplama yöntemi	32
Şekil 3. 1. Mermi üzerine etki eden kuvvetlerin gösterilmesi	35
Şekil 3. 2. Primer ve sekonder lifler [38].	42
Şekil 3. 3. Kompozit yapıda balistik darbe hasar şekilleri [43].	44
Şekil 3. 4. Tabakalı kompozit yapılarda hasar oluşumu – enerji sönümleme indeksi karşılaştırması a) kesme gerilmesi, b) fiber kopması, c) delaminasyon	45

Şekil 3. 5. Tabakalı kompozit bir yapıda a) tabakalar arası boşluğun fazla, b) tabakalar arası boşluğun ihmal edilebilir olduğu durumlarda balistik darbe.....	46
Şekil 5. 1. Hidrolik presin katı modeli	54
Şekil 5. 2. Hidrolik prese ait sistem şeması.....	55
Şekil 5. 3. Hidrolik prese ait resimler a) Ana gövde b) Elektrikli motor c) Kontrol ünitesi d) Sistem genel görünümü	56
Şekil 5. 4. Kumaş kesilmesi a) Karbon elyaf kesimi b) Aramid elyaf kesimi c) Cam elyaf kesimi.....	59
Şekil 5. 5. Robuso elektrikli fiber malzeme kesme makas seti	59
Şekil 5. 6. Terazinin kalibrasyonun yapılması ve kesilen kumaşların tartılması	60
Şekil 5. 7. Kalıp ayırıcı uygulanması	61
Şekil 5. 8. Karışımın hazırlanması.....	61
Şekil 5. 9. İlk kat kumaşın serilmesi.....	62
Şekil 5. 10. Numune üretiminde kullanılan kumaşların serilmesi ve reçine sürülmesi.....	63
Şekil 5. 11. Son katın serilmesi	63
Şekil 5. 12. Üst kalıbın kapatılması.....	64
Şekil 5. 13. Presleme işlemi	65
Şekil 5. 14. Kalıptan çıkan ürün	65
Şekil 5. 15. Karbon(45°) 10/Aramid(Plain)10/Cam(45°) 10 30 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numune a) ön görünüş b) arka görünüş c) kesit görünüş.....	66
Şekil 5. 16. Karbon(45°)10/Aramid(Plain)10/Cam(45°)10 30 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numunenin yapı şeması	67
Şekil 5. 17. Karbon(0°)10/Aramid(Plain)10/Cam(0°)10 30 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numune a) ön görünüş b) arka görünüş c) kesit görünüş	68
Şekil 5. 18. Karbon(0°)10/Aramid(Plain)10/Cam(0°)10 30 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numunenin yapı şeması	69
Şekil 5. 19. Karbon(Plain)10/Aramid(Plain)10/Cam(Plain)10 plain 30 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numune a) ön görünüş b) arka görünüş c) kesit görünüş	70
Şekil 5. 20. Karbon(Plain)10/Aramid(Plain)10/Cam(Plain)10 plain 30 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numunenin yapı şeması.....	70
Şekil 5. 21. Karbon(Twill)10/Aramid(Plain)10/Cam(Twill)10 Twill 30 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numune a) ön görünüş b) arka görünüş c) kesit görünüş	71

Şekil 5. 22. Karbon(Twill)10/Aramid(Plain)10/Cam(Twill)10 30 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numunenin yapı şeması.....	71
Şekil 5. 23. Karbon(45°)7/Aramid(Plain)7/Cam(45°)7 21 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numune a) ön görünüş b) arka görünüş c) kesit görünüş	72
Şekil 5. 24. Karbon(45°)7/Aramid(Plain)7/Cam(45°)7 21 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numunenin yapı şeması	73
Şekil 5. 25. Karbon(0°)7/Aramid(Plain)7/Cam(0°)7 21 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numune a) ön görünüş b) arka görünüş c) kesit görünüş.....	74
Şekil 5. 26. Karbon(0°)7/Aramid(Plain)7/Cam(0°)7 21 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numunelerin yapı şeması.....	74
Şekil 5. 27. Karbon(Plain)7/Aramid(Plain)7/Cam(Plain)7 21 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numune a) ön görünüş b) arka görünüş c) kesit görünüş	75
Şekil 5. 28. Karbon(Plain)7/Aramid(Plain)7/Cam(Plain)7 21 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numunenin yapı şeması	75
Şekil 5. 29. Karbon(Twill)7/Aramid(Plain)7/Cam(Twill)7 21 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numune a) ön görünüş b) arka görünüş c) kesit görünüş	76
Şekil 5. 30. Karbon(Twill)7/Aramid(Plain)7/Cam(Twill)7 21 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numunenin yapı şeması	77
Şekil 5. 31. Balistik test düzeneği şematik gösterimi	78
Şekil 5. 32. Chrony F1 kronograf.....	78
Şekil 5. 33. 9 mm mermi [69].....	79
Şekil 5. 34. Atışlarda kullanılan mermi.....	79
Şekil 6. 1. Balistik test düzeneği	80
Şekil 6.2. Karbon(45°)10/Aramid(Plain)10/Cam(45°)10 numunesinin balistik test sonucu fotoğrafı a) ön görünüş b) arka görünüş	81
Şekil 6.3. Karbon(45°)10/Aramid(Plain)10/Cam(45°)10 numunesine ait mermi hızı – çöküntü miktarı grafiği.....	82
Şekil 6.4. Karbon(45°)10/Aramid(Plain)10/Cam(45°)10 numunesine ait kinetik enerji – çöküntü miktarı grafiği.....	82
Şekil 6.5. B1 numunesinde 1 nolu atışa ait kesit fotoğrafı.....	83
Şekil 6.6. B1 numunesinde 2 nolu atışa ait kesit fotoğrafı.....	83
Şekil 6.7. B1 numunesinde 3 nolu atışa ait kesit fotoğrafı.....	84

Şekil 6.8. B1 numunesinde 4 nolu atışa ait kesit fotoğrafı	85
Şekil 6.9. Karbon(0°)10/Aramid(Plain)10/Cam(0°)10 numunenin balistik test sonucu fotoğrafı a) ön görünüş b) arka görünüş	85
Şekil 6. 10. Karbon(0°)10/Aramid(Plain)10/Cam(0°)10 numunesine ait mermi hızı – çöküntü miktarı grafiği	86
Şekil 6. 11. Karbon(0°)10/Aramid(Plain)10/Cam(0°)10 numunesine ait kinetik enerji – çöküntü miktarı grafiği.....	87
Şekil 6. 12. B2 numunesinde 1 nolu atışa ait kesit fotoğrafı	87
Şekil 6. 13. B2 numunesinde 2 nolu atışa ait kesit fotoğrafı	88
Şekil 6. 14. B2 numunesinde 3 nolu atışa ait kesit fotoğrafı	89
Şekil 6. 15. B2 numunesinde 4 nolu atışa ait kesit fotoğrafı	89
Şekil 6. 16. Karbon(Plain)10/Aramid(Plain)10/Cam(Plain)10 numunesinin balistik test sonucu fotoğrafı a) ön görünüş b) arka görünüş.....	90
Şekil 6. 17. Karbon(Plain)10/Aramid(Plain)10/Cam(Plain)10 numunesine ait mermi hızı – çöküntü miktarı grafiği.....	91
Şekil 6. 18. Karbon(Plain)10/Aramid(Plain)10/Cam(Plain)10 numunesine ait kinetik enerji – çöküntü miktarı grafiği	91
Şekil 6. 19. B3 numunesinde 1 nolu atışa ait kesit fotoğrafı	92
Şekil 6. 20. B3 numunesinde 2 nolu atışa ait kesit fotoğrafı	93
Şekil 6. 21. B3 numunesinde 3 nolu atışa ait kesit fotoğrafı	93
Şekil 6. 22. B3 numunesinde 4 nolu atışa ait kesit fotoğrafı	94
Şekil 6. 23. Karbon(Twill)10/Aramid(Plain)10/Cam(Twill)10 numunesinin balistik test sonucu fotoğrafı a) ön görünüş b) arka görünüş	95
Şekil 6. 24. Karbon(Twill)10/Aramid(Plain)10/Cam(Twill)10 numunesine ait mermi hızı – çöküntü miktarı grafiği	96
Şekil 6. 25. Karbon(Twill)10/Aramid(Plain)10/Cam(Twill)10 numunesine ait kinetik enerji – çöküntü miktarı grafiği.....	96
Şekil 6. 26. B4 numunesinde 1 nolu atışa ait kesit fotoğrafı	97
Şekil 6. 27. B4 numunesinde 2 nolu atışa ait kesit fotoğrafı	97
Şekil 6. 28. B4 numunesinde 3 nolu atışa ait kesit fotoğrafı	98
Şekil 6. 29. B4 numunesinde 4 nolu atışa ait kesit fotoğrafı	99
Şekil 6. 30. Karbon(45°)7/Aramid(Plain)7/Cam(45°)7 numunesinin balistik test sonucu fotoğrafı a) ön görünüş b) arka görünüş	100

Şekil 6. 31. Karbon(45°)7/Aramid(Plain)7/Cam(45°)7 numunesine ait mermi hızı – çöküntü miktarı grafiği.....	101
Şekil 6. 32. Karbon(45°)7/Aramid(Plain)7/Cam(45°)7 numunesine ait kinetik enerji – çöküntü miktarı grafiği.....	101
Şekil 6. 33. B5 numunesinde 1 nolu atışa ait kesit fotoğrafı.....	102
Şekil 6. 34. B5 numunesinde 2 nolu atışa ait kesit fotoğrafı.....	103
Şekil 6. 35. B5 numunesinde 3 nolu atışa ait kesit fotoğrafı.....	103
Şekil 6. 36. B5 numunesinde 4 nolu atışa ait kesit fotoğrafı.....	104
Şekil 6. 37. Karbon(0°)7/Aramid(Plain)7/Cam(0°)7 numunesinin balistik test sonucu fotoğrafı a) ön görünüş b) arka görünüş.....	105
Şekil 6. 38. Karbon(0°)7/Aramid(Plain)7/Cam(0°)7 numunesine ait mermi hızı – çöküntü miktarı grafiği.....	106
Şekil 6. 39. Karbon(0°)7/Aramid(Plain)7/Cam(0°)7 numunesine ait kinetik enerji – çöküntü miktarı grafiği.....	106
Şekil 6. 40. B6 numunesinde 1 nolu atışa ait kesit fotoğrafı.....	107
Şekil 6. 41. B6 numunesinde 2 nolu atışa ait kesit fotoğrafı.....	108
Şekil 6. 42. B6 numunesinde 3 nolu atışa ait kesit fotoğrafı.....	108
Şekil 6. 43. B6 numunesinde 4 nolu atışa ait kesit fotoğrafı.....	109
Şekil 6. 44. Karbon(Plain)7/Aramid(Plain)7/Cam(Plain)7 numunesinin balistik test sonucu fotoğrafı a) ön görünüş b) arka görünüş.....	110
Şekil 6. 45. B7 numunesinde 1 nolu atışa ait kesit fotoğrafı.....	111
Şekil 6. 46. B7 numunesinde 2 nolu atışa ait kesit fotoğrafı.....	112
Şekil 6. 47. B7 numunesinde 3 nolu atışa ait kesit fotoğrafı.....	112
Şekil 6. 48. B7 numunesinde 4 nolu atışa ait kesit fotoğrafı.....	113
Şekil 6. 49. Karbon(Twill)7/Aramid(Plain)7/Cam(Twill)7 numunesinin balistik test sonucu fotoğrafı a) ön görünüş b) arka görünüş.....	114
Şekil 6. 50. Karbon(Twill)7/Aramid(Plain)7/Cam(Twill)7 numunesine ait mermi hızı – çöküntü miktarı grafiği.....	115
Şekil 6. 51. Karbon(Twill)7/Aramid(Plain)7/Cam(Twill)7 numunesine ait kinetik enerji – çöküntü miktarı grafiği.....	115
Şekil 6. 52. B8 numunesinde 1 nolu atışa ait kesit fotoğrafı.....	116
Şekil 6. 53. B8 numunesinde 2 nolu atışa ait kesit fotoğrafı.....	117
Şekil 6. 54. B8 numunesinde 3 nolu atışa ait kesit fotoğrafı.....	117

Şekil 6. 55. B8 numunesinde 4 nolu atışa ait kesit fotoğrafı	118
Şekil 6. 56. Ağırlık – Çöküntü miktarı grafiği	119
Şekil 6. 57. Kalınlık – Çöküntü miktarı grafiği	119
Şekil 6. 58. Özgül çöküntü grafiği.....	121

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2. 1. Bazı karbon elyafların mekanik özellikleri	10
Tablo 2. 2. Bazı kevlarların mekanik özellikleri	11
Tablo 2. 3. Bazı kompozitler ve metallerin karşılaştırmaları	12
Tablo 2. 4. Polyester reçinelerin bazı mekanik özellikleri [16].....	17
Tablo 2. 5. Genel amaçlı bir polyester sistemi için bazı termal özellikler [16].....	18
Tablo 3. 1. Mermi ve hedef bakımından balistik performans parametreleri	37
Tablo 3. 2. Uluslararası balistik koruyucu standartları.....	46
Tablo 3. 3. NIJ 0101.06'ya göre koruma seviyelerini belirleyen mermi özellikleri	47
Tablo 5. 1. Hidrolik presin teknik özellikleri	55
Tablo 5. 2. Deneyde kullanılan takviye malzemeleri	57
Tablo 5. 3. Deneylerde kullanılan Hexion MGS L326 marka polyester reçinenin özellikleri	57
Tablo 5. 4. Deneylerde kullanılan Hexion H265 marka sertleştiricinin özellikleri.....	58
Tablo 5. 5. Hexion MGS L326 marka polyester reçine ve Hexion H265 marka sertleştiricinin karışım oranları	58
Tablo 5. 6. B2 numunesine ait malzeme özellikleri	69
Tablo 5. 7. B3 numunesine ait malzeme özellikleri	70
Tablo 5. 8. B4 numunesine ait malzeme özellikleri	72
Tablo 5. 9. B5 numunesine ait malzeme özellikleri	73
Tablo 5. 10. B6 numunesine ait malzeme özellikleri	74
Tablo 5. 11. B7 numunesine ait malzeme özellikleri	76
Tablo 5. 12. B8 numunesine ait malzeme özellikleri	77
Tablo 5. 13. 9 mm standart mermi özellikleri	79
Tablo 6. 1. Karbon(45°) ₁₀ /Aramid(Plain) ₁₀ /Cam(45°) ₁₀ numunesinin balistik testlerine ait mermi hızı, mermi kinetik enerjisi ve çöküntü değerleri.....	81
Tablo 6. 2. Karbon(0°) ₁₀ /Aramid(Plain) ₁₀ /Cam(0°) ₁₀ numunesinin balistik testlerine ait mermi hızı, mermi kinetik enerjisi ve çöküntü değerleri.....	86

Tablo 6. 3. Karbon(Plain) ₁₀ /Aramid(Plain) ₁₀ /Cam(Plain) ₁₀ numunesinin balistik testlerine ait mermi hızı, mermi kinetik enerjisi ve çöküntü değerleri.....	90
Tablo 6. 4. Karbon(Twill) ₁₀ /Aramid(Plain) ₁₀ /Cam(Twill) ₁₀ numunesinin balistik testlerine ait mermi hızı, mermi kinetik enerjisi ve çöküntü değerleri.....	95
Tablo 6. 5. Karbon(45°) ₇ /Aramid(Plain) ₇ /Cam(45°) ₇ numunesinin balistik testlerine ait mermi hızı, mermi kinetik enerjisi ve çöküntü değerleri.....	100
Tablo 6. 6. Karbon(0°) ₇ /Aramid(Plain) ₇ /Cam(0°) ₇ numunesinin balistik testlerine ait mermi hızı, mermi kinetik enerjisi ve çöküntü değerleri	105
Tablo 6. 7. Karbon(Plain) ₇ /Aramid(Plain) ₇ /Cam(Plain) ₇ numunesinin balistik testlerine ait mermi hızı, mermi kinetik enerjisi ve çöküntü değerleri.....	110
Tablo 6. 8. Karbon(Twill) ₇ /Aramid(Plain) ₇ /Cam(Twill) ₇ numunesinin balistik testlerine ait mermi hızı, mermi kinetik enerjisi ve çöküntü değerleri.....	114
Tablo 7. 1. Malzeme konfigürasyonu, mermi hızları ve değerlendirme	122

KISALTMALAR VE SEMBOLLER LİSTESİ

me	: Numunenin elyaf kütlesi
mm	: Numunenin matriks kütlesi
mt	: Numunenin toplam kütlesi
ve	: Numunenin elyaf hacmi
vt	: Numunenin matriks hacmi
vm	: Numunenin toplam hacmi
de	: Numunenin elyaf yoğunluğu
dm	: Numunenin matriks yoğunluğu
dt	: Numunenin toplam yoğunluğu
B1	: [Karbon(45°) ₁₀ /Aramid(plain) ₁₀ /Cam(45°) ₁₀] 30 tabakalı hibrit kompozit
B2	: [Karbon(0°) ₁₀ /Aramid(plain) ₁₀ /Cam(0°) ₁₀] 30 tabakalı hibrit kompozit
B3	: [Karbon(plain) ₁₀ /Aramid(plain) ₁₀ /Cam(plain) ₁₀] 30 tabakalı hibrit kompozit
B4	: [Karbon(twill) ₁₀ /Aramid(plain) ₁₀ /Cam(twill) ₁₀] 30 tabakalı hibrit kompozit
B5	: [Karbon(45°) ₇ /Aramid(plain) ₇ /Cam(45°) ₇] 21 tabakalı hibrit kompozit
B6	: [Karbon(0°) ₇ /Aramid(plain) ₇ /Cam(0°) ₇] 21 tabakalı hibrit kompozit
B7	: [Karbon(plain) ₇ /Aramid(plain) ₇ /Cam(plain) ₇] 21 tabakalı hibrit kompozit
B8	: [Karbon(twill) ₇ /Aramid(plain) ₇ /Cam(twill) ₇] 21 tabakalı hibrit kompozit

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilmesiyle yeni bir malzemenin elde edilmesi olarak tanımlanabilir. Burada amaç, kullanılan malzemelerin birbirlerinin zayıf kalan yönlerini iyileştirmek ve istenilen yönde daha üstün özellik sağlayan bir malzeme elde etmektir.

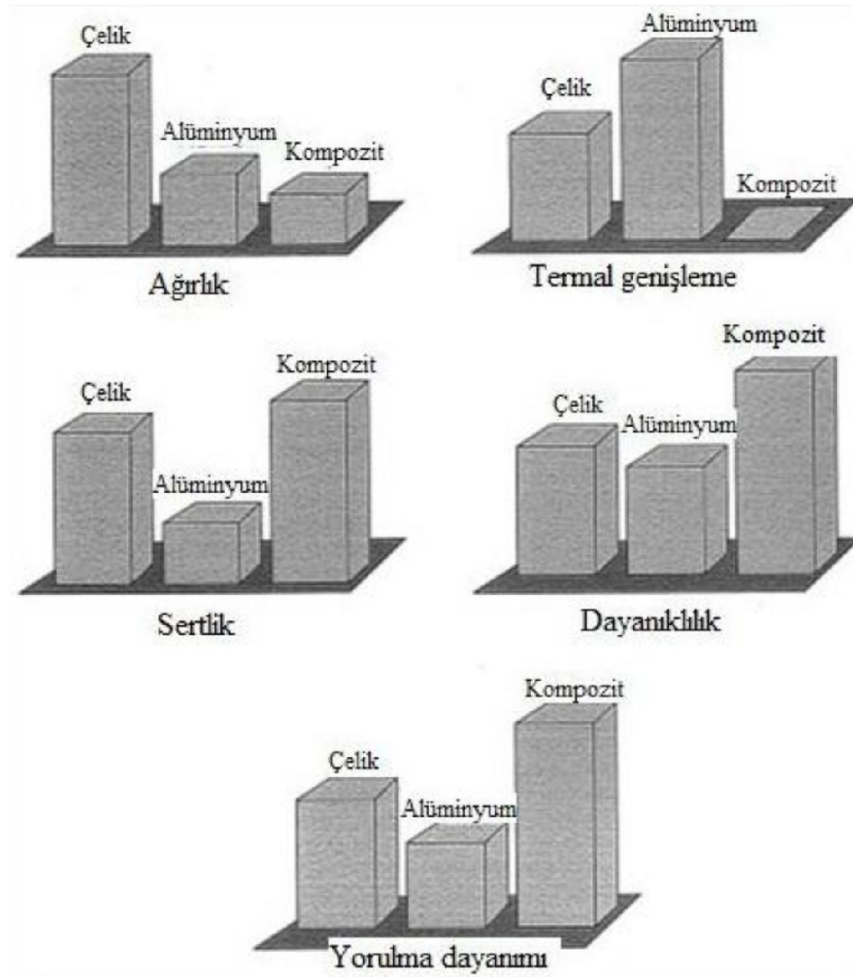
İnsan, hayatta kalma içgüdüleriyle tarih boyunca her zaman kendini koruma ihtiyacı içinde olmuştur. Gerek günlük hayatta gerekse savaş alanlarında olsun insanoğlu bu içgüdüyle sürekli çalışmıştır. Kendini savunmak için taş ve sopaların kullanımı ile başlayan silahları geliştirmiştir. Silahlanmanın genişlemesiyle birlikte savunma için koruyucu zırh ve kalkanlar kullanılmaya başlanmıştır. 13. yüzyılda kılıçla savaşan ya da kendisini koruyan insanoğlu yine bu dönemde tüm vücudunu saran çelik elbiseleri tehlikelere karşı kalkan olarak kullanmıştır [1].

Hızla gelişen silah teknolojisi barutun ve ateşli silahların icadıyla yeni bir boyut kazanmıştır. Silahların ağırlığı azalıp boyutları küçülürken etki ve menzilleri artmıştır. Buna paralel olarak gerek bina ve araç, gerekse personel zırhında yüksek dayanım ve düşük yoğunluk ihtiyacı kaçınılmaz olmuştur. Tüm tarihsel gelişme boyunca hafif ve esnek malzemeler araştırılarak, daha hafif vücut zırh sistemleri ile mobilitayı artırmak ve aynı zamanda belirli tehditlere karşı koruma sağlamak hedeflenmiştir. Bu gelişmelerin bir sonucu olarak, daha hafif vücut zırh malzemeleri kullanımının artmasına neden olmuştur [2]. Bu noktada kompozit malzemelerin savunma sanayinde zırh malzemesi olarak kullanılması büyük önem taşır. Günümüz teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak kompozit malzemelerin zırh malzemesi olarak kullanımı ile ilgili araştırmalarda yoğunlaşmaktadır. Zira; geleneksel malzemelere göre kompozit malzemelerde hasar çok daha çeşitli ve karmaşıktır.

Bu çalışmada savunmada kullanılan bireysel koruyucu zırhların, hibrit kompozit plakalar kullanılarak geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmalar neticesinde kişisel koruyucu zırhların, daha hafif ve koruma özelliği yüksek olması için yapılacak uygulamalara deneysel altyapı sağlanmış ve yeni hazırlanacak zırh kombinasyonları için farklı fikirler ortaya konulmuştur.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler birden fazla malzemenin makro boyutlarda birleştirilmesi ile elde edilen üstün özellikli malzemelerdir. Bu işlemin amacı karışıma giren malzemelerin istenen özelliklerinin bir arada olması nedeniyle daha üstün özellikli ve daha yararlı bir malzeme ortaya çıkarmaktır. Kompozit malzemelerin diğer malzemelerden üstünlükleri Şekil 2.1.' de verilmiştir.



Şekil 2. 1. Çelik, alüminyum ve kompozit malzemelerin farklı özellikler bakımından karşılaştırılması [3].

Elimizde olan veriler gösteriyor ki kompozit malzemeler aslında prensip olarak uzun yıllar önce kullanılmaya başlanmıştır. Örneğin bilhassa Anadolu'da tarih boyunca kullanılan kerpiç; kilin dayanıklılığı artırmak amacı ile saman ve bitkisel liflerle karıştırılarak elde edilmiştir. Ya da günümüzde en çok kullanılan kompozitlerden biri olan

betonu örnek gösterebiliriz; betonda çimento ve kumdan meydana gelen matriks çelik çubuklar ile takviyelendirilmektedir [4].

İlk modern sentetik plastikler 1900'lerin başında geliştirilmeye başlanmıştır. 1930'ların sonuna gelindiğinde ise artık bu kompozitler diğer malzeme çeşitleri ile rekabet edecek düzeye ulaşmıştır. Rakiplerine göre kolay biçim verilebilir olmaları, düşük yoğunlukta olmaları, üstün yüzey kalitesi ve korozyona karşı dayanımı gibi avantajları plastiklerin kullanımının artmasındaki en önemli özelliklerdir. Bu gibi avantajlarının yanı sıra sertlik ve dayanıklılık özelliklerinin düşük olması plastik malzemelerin güçlendirilmesi gerekliliğini doğurmuştur. Bu bağlamda 1950'lilerde polimer esaslı kompozit malzemeler geliştirilmiştir [4].

Kompozitler, özellikle polimer kompozitler nerdeyse metaller kadar dayanıklı ve sert olmalarının yanında çok da hafiftirler. Yüksek mukavemet, boyut ve termal kararlılık, sertlik, aşınmaya karşı dayanıklılık gibi özellikleriyle pek çok avantajları bulunmaktadır [4].

2.1. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Günlük hayatta pek çok yerde karşımıza çıkan kompozit malzemeler balıkçılık sektöründe kullanılan oltalardan insan vücudunda eksik parçaların bir taklidi olan protezlere kadar birçok yerde kullanım alanı bulmaktadır. Bunun dışında spor gereçleri, yer altı boruları, teleferikler, müzik aletleri, banyolarda kullanılan küvetler, kurşungeçirmez yelekler, mutfak gereçleri gibi örnekler kompozit malzemelerin kullanım yerlerine verebileceğimiz örneklerdendir. Kompozit malzemeler sektörel olarak otomotiv, uçak, havacılık, savunma sanayi, tıp, kimya sektörlerinde sıkça kullanılmaktadır.

2.1.1. Askeri ve Savunma Sanayi

Kompozit malzemelerin; üstün balistik performans, düşük yoğunluk, hafiflik ve kimyasallara üstün dayanım özelliklerinden dolayı zırh, silah, roket ve mühimmat üretiminde çokça kullanıldığını görmekteyiz [4]. Şekil 2.2. de kompozit malzemelerin askeri alandaki kullanımına bazı örnekler verilmiştir.



Şekil 2. 2. Kompozit malzemenin askeri alanda kullanımı

2.1.2. Uzay ve Havacılık Sanayi

Kompozit malzemeler uzay ve havacılık sanayinde hafiflik ve sağlamlık gibi nitelikleri sayesinde öne çıkmaktadır. Uzay ve havacılıkta öncelikli amaç daha az yakıt harcamak, daha yüksek hıza ulaşmak ve verimliliği sağlamaktır. Bununla beraber maddi kazancın yanında stratejik performanslar da dikkate alındığında yine kompozit malzeme kullanımı avantaj sağlamaktadır. Kompozit malzemelerin titreşim, yorulma ve ısı dayanımı gibi nitelikleri uzay ve havacılık sanayinde birleşik malzemelerin kullanılmasını avantajlı hale getirmektedir. Kompozit malzemeler her geçen gün artan kaliteleri ile uzay ve havacılık araçlarında daha çok yer bulmaktadır. Şekil 2.3.' de uzayda çalışan uyduda kompozit malzeme kullanımına bir örnek olarak gösterilebilir.



Şekil 2. 3. Kompozit malzemenin uzay sektöründe kullanımı

2.1.3. Otomotiv Sanayi

Bu alanda kullanılan kompozitlere başlıca örnek olarak; otomobil kaportası parçaları, iç donanımı, bazı motor parçaları, tamponlar ve oto lastikleri verilebilir.



Şekil 2. 4. Kompozit malzemenin araç gövdesinde kullanımı

2.1.4. Elektrik ve Elektronik Sanayi

Bu alanda elektriksel izolasyon ilk kullanım alanı olmak üzere kompozit malzemeler her tür elektrik ve elektronik malzemenin yapımında kullanılmaktadır.

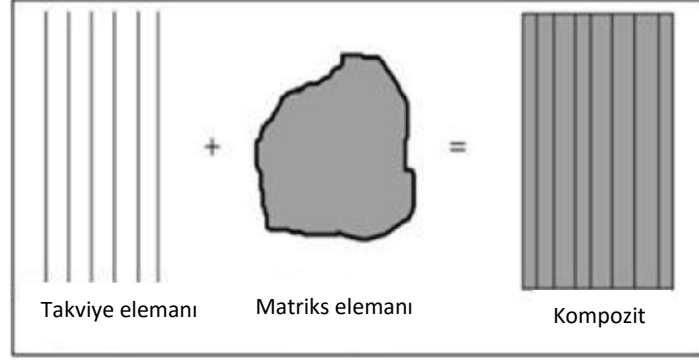
2.1.5. İş Makineleri

İş makinelerinin kapakları ve çalışma kabinleri yapımında da kompozit malzemeler karşımıza çıkmaktadır. Buradaki amacı üretimde kullanılan parça sayısını azaltılabilmek ve tek parça üretim yapabilmektir. Ayrıca bu makinelerin elektrik izolasyonunda da karşımıza çıkmaktadır.

2.2. Kompozit Malzemelerin Bileşenleri

Kompozit malzemeler esas olarak takviye elemanı ve matriks elemanı olmak üzere iki bileşenden meydana gelmektedir. Takviye malzemesi kompozitin mekanik özelliklerini istenilen düzeye getirmek amacı ile kullanılan malzemedir. Matriks malzeme ise takviye

malzemelerini bir arada tutan ana yapıyı oluşturmak amacı ile kullanılır. Şekil 2.5.' de kompozit malzemelerin oluşum mantığı verilmektedir.



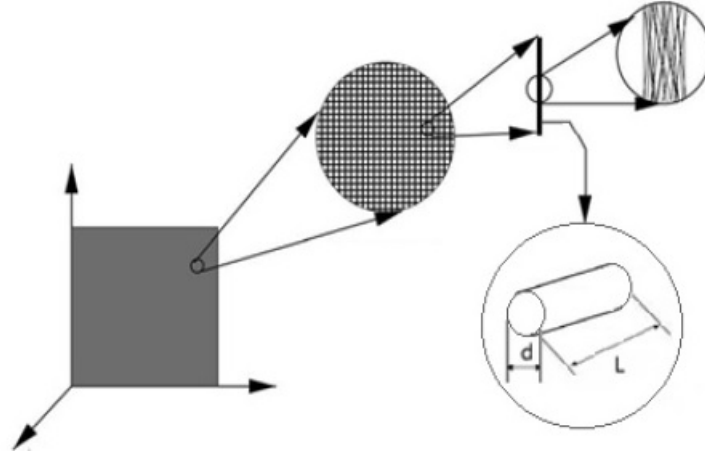
Şekil 2. 5. Kompozit malzemelerin temel bileşenleri

2.2.1. Takviye Elemanları

Kompozit malzemelerin takviye elemanları dokuma yapılar ve dokuma olmayan yapılar olarak iki ana gruba ayrılmaktadır.

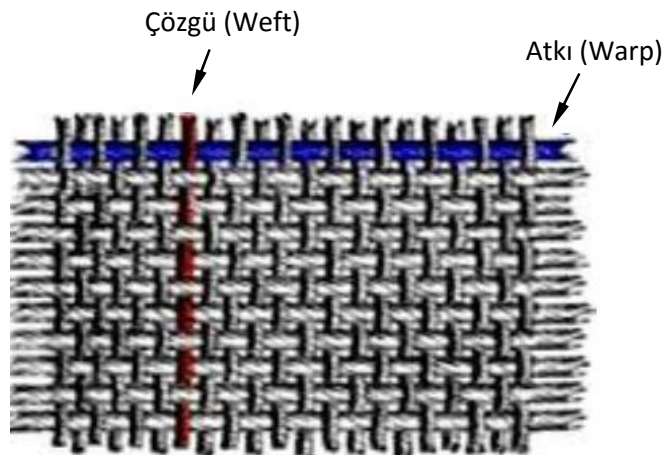
2.2.2.1. Dokuma Yapılar

Lif kelimesinin çoğulu olan “elyaf” kelimesi daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Liflerin çapının ortalama 0,01 mm mertebesinde olduğu bilinmektedir. Narinlik oranının ise 10000’e kadar çıkabildiği bilinmektedir. ($L/d \leq 104$). Lifler farklı kaynaklardan elde edilmektedir ve değişik özellikleriyle büyük çeşitlilik göstermektedir. Şekil 2.6.’da şematik olarak lif temel boyutlandırılması, Şekil 2.8.’de ise dokuma elyaf malzeme örneklerinin resimleri sunulmuştur [5,6].

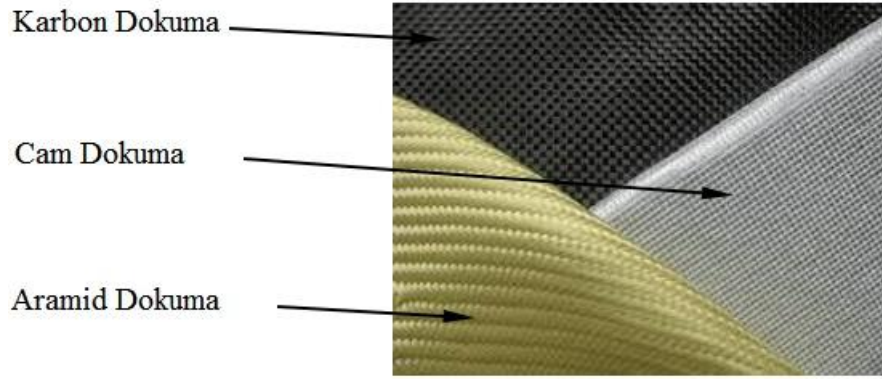


Şekil 2. 6. Lif temel boyutlandırılması

Elyaf dokuma yapılar 2 boyutlu ve 3 boyutlu olmak üzere iki temel gruba ayrılırlar. 2 boyutlu elyaf dokuma bir yapı, 90° olarak iç içe geçmiş atkı ve çözgü liflerinden oluşmaktadır (Şekil 2.7.). Bunlar plain, twill ve basket olarak sınıflara ayrılırlar. Birim alanda atkı ve çözgü yoğunluğu, diğer bir ifadeyle lifler arasındaki bağlantı noktalarının çokluğu darbe enerjisinin daha hızlı ve kolay yayılabilmesini sağlar [7]. Basket tipi dokuma plain tip dokumaya benzemekle birlikte bu dokuma tipinde hem atkı yönünde hem de çözgü yönünde 2 veya daha fazla lif birlikte örülmüştür. Twill tipi dokumanın da basket tipi örgüye benzer bir yapıya sahip olmakla birlikte bu dokuma tipinde ikişerli atkı ve çözgü lif çiftlerinden bir seferde bir adet lif dokunmuştur. Balistik koruyucu uygulamalarında en yaygın kullanılan dokuma şekilleri plain ve basket tipi olanlardır [8].

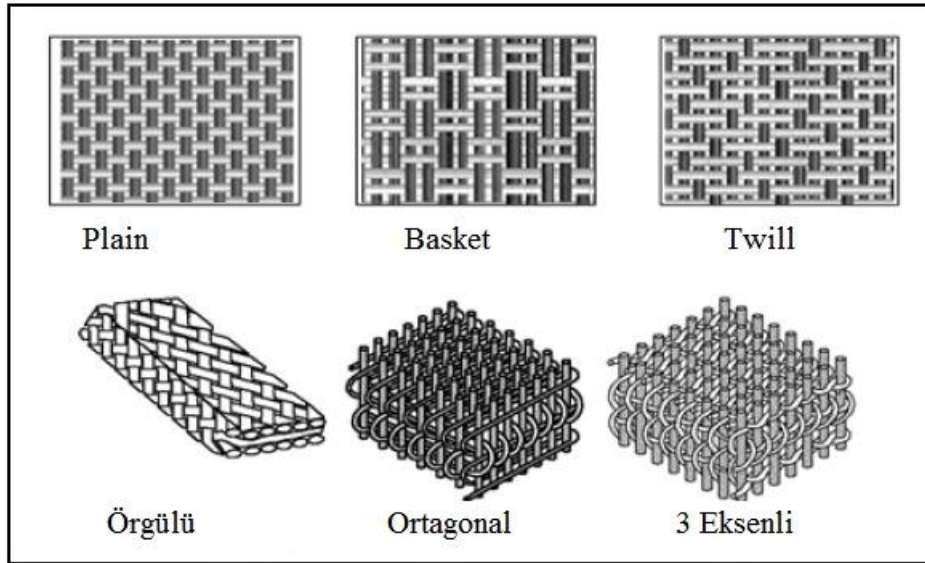


Şekil 2. 7. Atkı ve çözgü gösterimi



Şekil 2. 8. Elyaf dokuma malzeme örnekleri

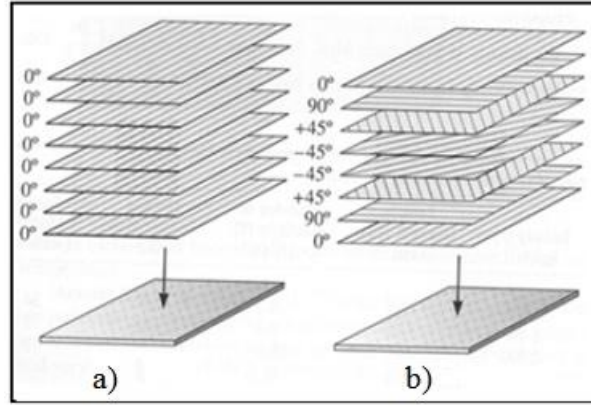
3 boyutlu dokuma çeşitleri temel olarak; örgülü, ortogonal, üç eksenli yapılar olarak sınıflandırılabilirler. Darbeye karşı dirençleri yüksek olmakla birlikte diğer kompozit zırh sistemlerine göre daha ince yapıda olan balistik koruyucu yeleklerin enerji sönmleme kabiliyetlerinin 2 boyutlu sistemler kadar verimli olmadığı bilinmektedir. Şekil 2.9.'da 2 boyutlu ve 3 boyutlu elyaf dokuma örneklerinin resimleri verilmiştir [9].



Şekil 2. 9. 2 boyutlu ve 3 boyutlu elyaf dokuma örnekleri

2.2.2.2. Dokuma Olmayan Yapılar

Dokuma olmayan fiber yapılar bir tabakanın aynı özellikli diğer bir tabaka ile Şekil 2.10.'da gösterildiği gibi birbirlerine 0° , 45° veya 90° konumda veya bunların birleşimi olacak şekilde bir reçine bağlayıcı kullanılarak birleştirilmesiyle üretilen yapılardır [10].



Şekil 2. 10. a) 0° konumlu, b) 0°/ 90°/ ±45° konumlu dokuma olmayan yapılar

2.2.2. Takviye Elemanları Çeşitleri

2.2.2.1. Bor Elyafı

Bor elyafı, ilk olarak 1960'lı yılların başlarında üretilmeye başlanmıştır. Yüksek dayanımlı ancak pahalı bir malzeme olan bor lifi, günümüzde özellikle metal matriks elemanlarıyla birlikte sıkça kullanılmaktadır. Oldukça kalın lif özelliği gösteren bor lifi, yüksek çekme dayanımına ve yüksek elastiklik modülüne sahip bir kompozittir. Bor elyafının silisyum karbür veya bor karbür ile kaplanmasıyla, yüksek sıcaklıklara dayanımında da artış sağlanır. Özellikle bor karbür kaplanmasıyla, çekme dayanımı önemli ölçüde artırılabilirdiği gözlemlenmiştir. Bor elyafının ergime sıcaklıklarının 2040°C civarında olduğu bilinmektedir [11].

Üstün mekanik özelliklere sahip olan bor elyafı, genelde uçak yapılarında kullanılmaktaydılar ancak maliyetinin çok yüksek olması nedeniyle günümüzde karbon elyafı kullanılmaktadır.

2.2.2.2. Karbon Elyafı

Karbon elyafının en önemli özelliği; düşük yoğunluklarının yanı sıra yüksek darbe dayanımı ve tokluk değerlerini sayabiliriz. Aynı zamanda sürünme, aşınma ve yorulma dayanımlarının da yüksek olduğu bilinmektedir.

Askeri ve sivil uçakların imalatında yaygın olarak kullanılan karbon elyaflar, çeşitli plastik matrikslerle ve genel olarak da epoksi reçinelerle birlikte kullanım alanı bulmaktadır. Ayrıca, alüminyum ve magnezyum gibi metal matrikslerle de kullanıldığı bilinmektedir [12].

Karbon elyaflar yüksek sıcaklıklara dayanabilmektedir ve yine üretimdeki son işlem sıcaklığına bağlı olarak özellikleri değişmektedir. Bazı karbon elyafların mekanik özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir [13].

Tablo 2. 1. Bazı karbon elyafların mekanik özellikleri

Ürün Kodu	Çekme Dayanımı [N/mm ²]	Elastiklik Modülü [GPa]	Yoğunluk [g/cm ³]
T300 3K	3650	231	1,76
T650/35 3K	4550	241	1,77
Thornel P25	1400	160	1,90
Thornel P75	930	320	1,70

Karbon elyafların dezavantajı liflerinin sınırlı uzama özellikleri nedeniyle darbe dayanımı sorunlarına neden olmasıdır. Bu dezavantajı yok etmek amacıyla daha yüksek uzama özellikli elyaf ürünleri geliştirildiği bilinmektedir.

2.2.2.3 Aramid Elyaflar

Aramid elyaf, camdan daha hafif ve daha rijittir. Aramid elyaflar; düşük basma dayanımları nedeniyle, karbon elyaflarla birlikte uçak imalatında hibrit kompozit olarak da kullanım alanı bulmaktadır. Basma dayanımlarının düşük olmasıyla birlikte kevlar takviyeli, epoksi matriksli kompozitlerin nem tutma özellikleri de düşüktür [11]. Yaygın kullanılan bazı kevlarlara ait mekanik özellikler Tablo 2.2’de verilmiştir [13].

Tablo 2. 2. Bazı kevlarların mekanik özellikleri

Aramid Türü	Çekme Dayanımı [N/mm ²]	Elastik Modül [GPa]	Uzama [%]	Yoğunluk [g/cm ³]
Kevlar 29	2920	70	3,6	1,44
Kevlar 49	3000	112	2,4	1,44
Kevlar 149	3450	179	2	1,47

2.2.2.4 Cam Elyafı

Cam elyafın esasını silisyum dioksit (SiO₂) oluşturmaktadır. Bununla birlikte belirli oranlarda sodyum, kalsiyum, alüminyum, bor ve demir gibi elementlerin oksitlerini de içerebilmektedir. Plastik esaslı kompozitlerde yaygın olarak kullanılır ve ucuz bir takviye malzemesidir [14]. Çeşitli matriks malzemeleriyle kullanılmaktadır fakat, temel kullanım alanı cam takviyeli plastik (CTP) endüstrisidir. Cam elyafın ticari olarak ilk üretimi 1930'lu yıllarda İngiltere'de başlamış, 1950'lerin başından itibaren de plastik malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılmaya devam etmiştir.

Cam elyafın çekme dayanımı ve birim ağırlık başına düşen dayanımının çelikten daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Isıl dayanımları ise çeliklerden düşüktür. Kimyasallara karşı dayanımları yüksektir. Nem alma özellikleri düşüktür ancak cam elyaf takviyeli kompozitlerde matriks ile cam elyaf arasında nemin etkisi ile bir ayrılma olabildiği görülmüştür. Elektrik yalıtımının gerekli olduğu yerlerde, elektrik iletkenliklerinin düşük olması nedeniyle kullanılır. İlk üretimlerinde, cam elyafın üretiminde alkali cam (A-camı) kullanılmıştır. Fakat daha sonraları çok az alkali içeren ve çok üstün elektriksel ve mekanik özelliklere sahip bir borsilikat camı olan E-camı kullanılmaya başlamıştır. Hali hazırda E-camı, uygulamalarda en çok kullanılan takviye malzemelerinden biridir.

Yapılan araştırmalar ışığında, matriks malzemelerinin değişik amaçlara yönelik kullanılması sonucu birçok cam elyaf çeşidi geliştirilmiştir. Bunlardan biri de S-camıdır. Alüminyum ve magnezyum oksit miktarı E-camına göre daha yüksek olan bir türdür ve mekanik özellikleri de diğerlerinden daha yüksektir. Epoksi matriksli, S-cam elyaf ve E-cam elyaf takviyeli kompozitlerin, epoksi matriksli başka elyaf malzeme takviyeli kompozitlerle ve bazı metal malzemelerle karşılaştırmaları Tablo 2.3. 'te verilmiştir. Camın türü, işlem sıcaklığı, vizkozitesi ve çekme hızı gibi parametreler değiştirilerek, farklı çaplarda cam elyaf üretilmektedir.

Tablo 2. 3. Bazı kompozitler ve metallerin karşılaştırmaları

	Epoksi /S-cam Elyaf	Epoksi /E-cam Elyaf	Epoksi /Karbon Elyaf	Alüminyum (7075T6)	Titanyum (6Al-4V)	Çelik (4130)
Çekme Dayanımı [N/mm ²]	1751	1103	1482	572	1103	1300
Elastiklik Modülü [GPa]	59	52	145	69	114	207
Yoğunluk [g/cm ³]	1,99	1,99	1,55	2,76	4,43	8,01

2.2.2. Matriks Malzemeleri

2.2.2.1. Reçine Sistemlerine Giriş

Kompozit malzemelerde kullanılacak olan herhangi bir reçine sisteminden aşağıdaki özellikler beklenmektedir:

- İyi mekanik özellikler
- İyi yapışma özellikleri
- İyi dayanım özellikleri
- Çevresel etkenlere karşı direnç.

Fiber takviyeli kompozitlerde kullanılan reçineler, bazen ‘polimerler’ olarak adlandırılmaktadır. Tüm polimerler, birbirini tekrar eden basit birimlerin uzun zincir moleküllerinden oluşma özelliğine sahip olan bu yaygın karakteristiği sergiler. İnsan yapımı olan polimerler genel olarak ‘sentetik reçine’ veya basit olarak ‘reçine’ olarak adlandırılır. Polimerler, ısının özelliklerine etkisi bakımından, temel olarak ‘termoplastik’ ve ‘termoset’ olarak iki gruba sınıflandırılabilir [15].

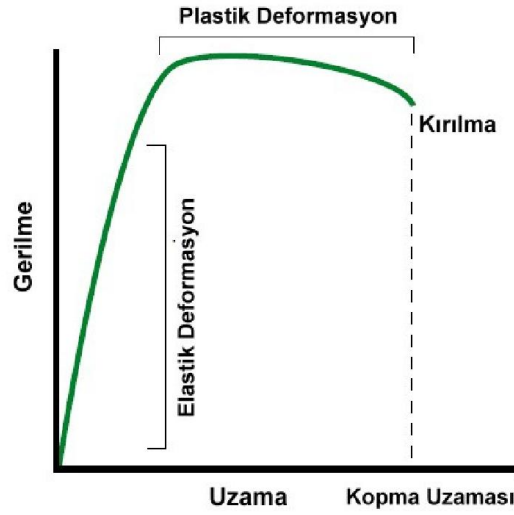
Termoplastikler, metaller gibi ısıyla birlikte yumuşar ve sonunda eriyip soğutma ile birlikte yeniden katılaşır. Sıcaklık skalasındaki bu yumuşama veya ergime noktasının geçilmesi prosesi istenildiği kadar, malzemenin her iki durumundaki özelliklerini fark edilebilir ölçüde etkilemeden tekrarlanabilir. Tipik termoplastiklere naylon ve polipropilen örnek olarak gösterilebilir ve bunlar da kısa cam fiberleri ile takviyelendirilerek kullanılabilir [15].

Termoset malzemeler, reçine ile sertleştiricinin veya reçine ile bir katalizörün karıştırıldığı ve ardından tersinir olmayan bir kimyasal reaksiyon sonucu sert ve ergimez

bir ürün haline getiren, kimyasal reaksiyonlar yardımıyla oluşturulmaktadır. Bazı termosetlerde, fenolik reçineler gibi, uçucu bazı maddeler yan ürün olarak oluşmaktadır (bir kondensasyon reaksiyonu). Polyester ve epoksi gibi reçineler ise, herhangi bir uçucu yan ürün çıkarmayan bir kür mekanizması ile oluşturulmakta ve böylece işlenmesi çok daha kolay olmaktadır. Termosetler kür edildikten sonra ısıtıldıklarında bir daha sıvı hale gelmezler, fakat belirli bir sıcaklığın üzerinde mekanik özellikleri önemli ölçüde değişecektir. Bu sıcaklık camsı geçiş sıcaklığı olarak bilinmekte (T_g) ve geniş ölçüde kullanılan reçine sistemine, kür derecesine ve doğru şekilde karıştırılmış olmasına dayanmaktadır. T_g sıcaklığının üzerinde termoset malzemenin moleküler yapısı, rijit kristalinden daha esnek olan, amorf yapıya doğru değişim gösterir. Bu değişim T_g sıcaklığının altına soğutma işleminde tersinir olmaktadır. T_g sıcaklığının üzerinde, reçine modülü gibi özellikler, sert bir şekilde düşer ve bunun bir sonucu olarak sıkıştırma ile kesme gerilimleri sonucu kompozit malzemelerinki de düşer. Suya karşı direnç ve renk stabilitesi gibi diğer özellikler de, reçinenin T_g sıcaklığı üzerinde fark edilebilir ölçüde düşer. Bunun yanı sıra bir çok farklı reçine çeşidi kompozit endüstrisinde kullanılmakta olup, yapısal parçaların büyük kısmında üç temel reçine sistemi tercih edilmektedir: Polyester, vinilester ve epoksi.

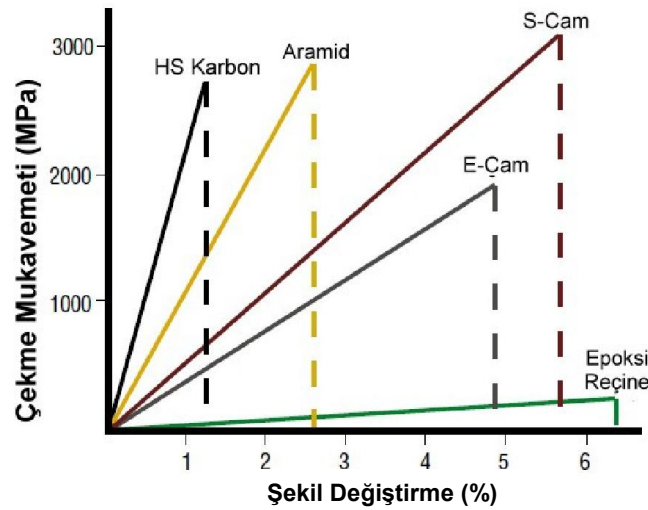
2.2.2.1.1. Reçine Sistemlerinin Mekanik Özellikleri

Şekil 2.11’de ‘ideal’ reçine sistemleri için gerilme-şekil değiştirme eğrisi görülmektedir. Bu eğrideki reçine için yüksek mukavemet, yüksek rijitlik (eğri eğiminden) ve yüksek kırılma uzaması gibi özellikler sıralanabilmektedir. Bu eğriden bu reçinenin öncelikli olarak rijit, fakat aynı zamanda kırılman olmadığı yorumu çıkarılabilmektedir.



Şekil 2. 11.Genel olarak bir reçineye ait gerilme-şekil değiştirme diyagramı [15].

Bir kompozit yapı gerilmeye maruz kaldığında, fiber bileşenin tam mekanik özelliklerine ulaşabilmek için, reçine sisteminin de en az fiber kadar deforme olabilme kabiliyetine sahip olması gerekir. Şekil 2.12.' de çeşitli malzemeler için gerilme-şekil değiştirme diyagramı verilmiştir (diyagram malzemelerin kompozit hallerine ait değildir). Buradan örneğin bir S-cam fiber'in kopmadaki uzaması % 5.3 olduğunda, maksimum çekme özelliklerine ulaşılabilmesi için, kopmadaki uzama değeri en az bu değer olan bir reçine sistemine ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 2. 12. Farklı malzemelere ait gerilme-şekil değiştirme diyagramının karşılaştırılması [15].

2.2.2.1.2. Reçine Sistemlerinin Yapışma Özellikleri

Reçine ile fiber takviye arasında, her reçine sisteminde yüksek yapışma olmalıdır. Bu iyi yapışma özellikleri sayesinde, kompozit malzemeye uygulanan çeşitli yüklerin etkili bir biçimde transfer edildiği garanti altında alınarak kırılma veya fiber/reçine ayrışması önlenmiş olur.

2.2.2.1.3. Reçine Sistemlerinin Dayanım Özellikleri

Dayanım bir malzemenin kırılmaya karşı gösterdiği direncin ölçüsüdür. Fakat bir kompozit malzeme içerisinde bunun kesin bir biçimde ölçülmesi oldukça zor olabilmektedir. Bununla birlikte, bir reçine sisteminin gerilme-şekil değiştirme eğrisi tek başına malzemenin dayanımı hakkında bazı ip uçları vermektedir. Genel olarak reçine kırılma öncesi ne kadar çok deformasyon kabul ederse, o ölçüde dayanımı ve kırılma direnci de yükselecektir.

2.2.2.1.4. Reçine Sistemlerinin Çevresel Özellikleri

Çevreye, suya ve diğer agresif maddelere karşı toplam direnç ile birlikte, sürekli çevrimsel gerilime karşı dayanım özellikleri herhangi bir reçine sisteminin temel bileşenleridir. Bu özellikler, spesifik olarak deniz ortamında büyük bir önem kazanmaktadır.

2.2.2. Polyester Reçine Sistemi

Polyester reçineler en yaygın biçimde kullanılan reçine sistemleri olup, özellikle deniz endüstrisinde tercih edilmektedir. Polyester reçineler ‘doymamış’ tiplerdir. Doymamış polyester reçine, doğru koşullara maruz bırakıldığında sıvı veya katı durumdan kür edilebilen bir termosettir.

2.2.2.1. Kimyasal Yapı

Polyester reçinelerin sınırlı bir raf ömrü vardır, çünkü uzunca bir sürenin sonunda

kendi kendilerine jelleşmeye başlarlar. Bir çok kez bu jelleşmeyi yavaşlatmak için, üretim prosesi süresince belirli miktarda inhibitörler kullanılır.

2.2.2.2. Polyester Reçine Karışımı

Bir reçinenin kalıplama amaçlı olarak kullanılabilmesi için ilave olarak bazı yardımcı maddelere ihtiyaç vardır. Bunlar genellikle:

- Katalizör
- Hızlandırıcı
- Katkılar: Tikotropik, pigment, dolgular, kimyasal/ateşe karşı direnç

Reçineler kalıpcının ihtiyaçları doğrultusunda formüle edilerek, basitçe katalizörün kalıplama öncesi ilave edilmesiyle, hazır hale getirilebilmektedir. Bir reçine yeterli süre bekletilirse, doymamış bir polyester reçine kendi kendine jelleşmeye başlayacaktır. Bu şekilde gerçekleşen bir polimerizasyonun hızı, pratik amaçlı kullanımda çok yavaş olmaktadır ve bu nedenle, katalizör ve hızlandırıcılar kullanılarak, reçinenin uygun bir zaman periyodu içerisinde polimerizasyonuna ulaşılır. Katalizörler, hemen kullanımdan önce reçine sistemine ilave edilerek, polimerizasyon reaksiyonun başlatılması sağlanır. Katalizör kimyasal reaksiyonda yer almaz ancak sadece basitçe prosesi aktive eder. Bir hızlandırıcı ise, katalize edilmiş bir reçineye ilave edilerek, reaksiyonun atölye koşullarında ve sıcaklıklarında gerçekleşmesine olanak sağlar veya daha yüksek hızlarda ilerlemesine izin verir. Hızlandırıcıların katalizörün yokluğunda reçine üzerine çok az miktarda etkileri olduğundan, bazen polyester üreticisi tarafından reçineye ilave edilerek bir ‘ön-hızlandırılmış’ reçine üretilir [15].

Kalıplama öncesi reçine karışımı çok dikkatli olarak hazırlanmalıdır. Reçine ve tüm katkılar, katalizör ilave öncesinde eşit dağılım sağlamak üzere dikkatli bir şekilde karıştırılmalıdır. Bu karıştırma işlemi mükemmel ve dikkatli bir şekilde yapılmalıdır, çünkü reçine karışımına herhangi bir hava girişi olması durumunda, kalıplama kalitesini büyük ölçüde etkileyecektir. Özellikle takviye edici malzeme tabakaların bulunması durumunda, hava kabarcıkları nihai lamine yapının içerisine yerleşerek yapıyı zayıflatır. Aynı zamanda en iyi malzeme özelliklerini elde edebilmek için ilave edilen katalizör ile hızlandırıcı miktarı çok dikkatli ölçülerek ilave edilmeli ve böylece polimerizasyon kontrol

altında tutulmalıdır. Fazla miktarda katalizör katkısı jelasyon süresini hızlandırırken az miktardaki katkısı ise kür işleminin tam olarak gerçekleşmemesine neden olacaktır [15].

2.2.2.3. Mekanik Özellikler

Polyester'in mekanik özellikleri büyük ölçüde formülasyonuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Döküm ile üretilerek hazırlanmış olan rijit reçinelerin sınırlı verilerinden 69 ile 76 MPa arasında değişen maksimum çekme dayanımında % 2.0 şekil değiştirme tespit edildiği görülmüştür. Buna karşı burkulma dayanımı 110 ile 117 MPa arasında ve yaklaşık 4137 MPa'lık bir elastisite modülü kaydedilmiştir. Daha esnek reçine sistemleri için % 8.0'den daha yüksek şekil değiştirmeler ile beraber daha düşük çekme dayanımları, esnekliğe bağlı olarak gözlemlenmiştir. Genel amaçlı polyester reçine sistemleri için bazı mekanik özelliklere ait veriler Tablo 2.4.'de sunulmuştur.

Tablo 2. 4. Polyester reçinelerin bazı mekanik özellikleri [16].

Özellikler	Rijit Döküm
Burkulma Dayanımı (MPa)	115
Burkulma Modülü (GPa)	4.76
Çekme Dayanımı (MPa)	72.4
Kırılmada Uzama (%)	1.8
Basma Dayanımı (MPa)	155
Darbe Dayanımı (Nm/m)	21.4
Su absorpsiyonu (24 h, %)	0.21
1.8 MPa yük altında sıcaklık sapması (C°)	90
Termal Genleşme, 10-52C° arası (cm/cm C°)	6.3×10^{-5}
Sertlik (Barcol)	48

2.2.2.4. Termal Özellikler

Tablo 2.5.'de genel amaçlı polyester reçine sistemleri için termal özelliklere ait bazı değerler verilmiştir.

Tablo 2. 5. Genel amaçlı bir polyester sistemi için bazı termal özellikler [16].

Özellik	Rijit Döküm
1.8 MPa yük altında ısııl ayrılma (C°)	194
Termal genleşme katsayısı (10-52 C° aralığında, cm/cm C°)	6×10^{-5}

2.2.2.5. Kimyasal Direnç

Polyesterin kimyasal direnci geniş ölçüde kimyasal yapısı doğrultusunda değişmektedir. Yüksek derecede direnç vinilesterler ve izoftalik polyesterler ile elde edilmektedir. Vinilesterler (veya kombinasyonları), asit, halojene edilmiş organikler, kostikler ve belirli solventlerin de dahil olduğu bir çok uygulamada kullanılabilmektedir.

2.2.3. Epoksi Reçine Sistemi

Geniş epoksi reçine yelpazesi, günümüz reçine sistemleri arasında en yüksek performansı sergileyen bazı tipleri ile temsil edilmektedir. Epoksiler çoğunlukla mekanik özellikler ve çevresel bozulmaya karşı direnç karakteristikleri açısından bir çok reçine tipine üstünlük sergileyerek, havacılık sanayiinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Lamine edici bir reçine olarak, yüksek yapışma özellikleri ve su ile ayrışmaya karşı direnci, bu reçinenin gemi inşaatında kullanılmasını ideal hale getirmektedir. Burada epoksiler geniş ölçüde birincil konstrüksiyon malzemesi olarak yüksek performans gemilerinde veya ikincil bir uygulama olarak kabuğu soyulmuş kısımların kaplanması, su nedeniyle ayrılmış polyester reçinelerin yerine veya jel kaplama olarak kullanılabilmektedir.

Genellikle kahverengi veya koyu sarı rengi ile tanımlanabilen epoksi reçineler çok sayıda yararlı özelliklere sahiptir. Hem sıvı reçine hem de kür katkıları düşük viskoziteli ve kolayca proses edilebilen bir sistem oluşturmaktadır. Epoksi reçineler kür katkısına bağlı olarak, 5 C° ile 150 C° arasındaki sıcaklıklarda kolay ve hızlı olarak kür edilebilmektedir. Epoksi reçinelerinin büyük avantajlarından biri olan ve aynı zamanda yapının iç stresini minimize eden özellik, kür işlemi süresince gösterdikleri düşük büzülme oranlarıdır.

Yüksek yapışma mukavemeti ve yüksek mekanik özellikler de aynı zamanda yüksek elektriksel yalıtım ve çok iyi kimyasal dayanım ile daha da arttırılmaktadır. Epoksiler yapıştırıcı, mühürleyici birleşen, döküm bileşeni, cila, boya ve bir çok endüstriyel uygulama için lamine edici reçine olarak kullanım bulmaktadır.

Epoksi reçineler uzun bir molekül zincir yapısından, vinilestere benzer olarak, her iki

uçta reaktif kısımlar ile şekillendirilmektedir. Ancak epoksi reçinelerde bu reaktif taraflar, ester grupları yerine epoksi grupları tarafından oluşturulmaktadır. Ester gruplarının olmaması, epoksi reçinenin oldukça yüksek su dayanımına sahip olduğunu göstermektedir. Epoksi molekülleri merkezlerinde hem mekanik hem de termal stresleri lineer gruplardan daha iyi absorplayan ve böylece epoksi reçineye çok iyi rijitlik, tokluk ve ısı dayanımı özellikleri sağlayan, iki halka grubuna sahiptir [15].

Bu rijit ve tok özellikli doymamış termoset plastikler hem vinil gruplarının peroksit katalizör ilaveli polimerizasyonu, hem de hidroksil gruplarının oda veya daha yüksek sıcaklıklarda anhidril çapraz bağlanması ile kürlenmektedir. Kür edilmiş bisfenol-A vinilesterler kimyasal direnç ile karakterize edilmektedir; epoksi novolak vinilesterler çözelti ve ısı dayanımı ile; yanmaz (alev almayan) ve tüm tipler genel olarak tok ve esnek olarak tanımlanır. Diğer bir çok ticari takviyeli plastikler ile karşılaştırıldığında, yüksek korozyon veya kimyasal bir çevrede istisnasız yüksek dayanım özellikleri sağlamaktadırlar. Yapısal kompozitlerde, tabaka kalıplama bileşenlerinde ve kimyasal cihazlarda kullanım bulmaktadır.

Vinilester reçineler hem polyester hem de epoksi reçinelerin en iyi özelliklerini birkaç uzlaşma ile kombine etmektedir. Dayanımı epoksi ile benzerdir ancak daha ucuz ve işlenmesi daha kolaydır. Yüksek sıcaklıklarda takviyeli plastiklerde yüksek dayanım ve saldırgan ortamlara karşı direnç ile karakterize edilirler. Aynı zamanda darbe ve yorulmaya karşı iyi direnç göstererek suya karşı düşük geçirgenlik ile kabarmayı düşürürler. Elektriksel ve termal yalıtım özellikleri de mükemmeldir.

Geleneksel bisfenol polyester reçinelerden farklı olarak, tekrar eden birimlerde değil de sadece zincir sonunda doymamışlık göstererek, daha az ester bağlantılarına sahip olurlar.

2.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Yapılarında çok sayıda farklı malzeme kullanılabilen kompozit malzemelerin gruplandırılmasında kesin sınırlar çizmek mümkün olmamakla birlikte, kompozit malzemeleri takviye elemanlarına ve matriks elemanlarına göre iki ana gruba ayırabiliriz.

2.3.1. Takviye Elemanlarına Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Takviye elemanlarına göre kompozit malzemeler dört guruba ayrılırlar. Kompozit malzemelerin takviye elemanlarına göre sınıflandırılması Şekil 2.13.'de verilmiştir.



Şekil 2. 13. Takviye elemanlarına göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması

2.3.1.1. Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler

Fiberler, uygulanan yükün büyük bir kısmını taşıırken matriks malzeme yükün fiberlere transferini sağlamakta, süneklik ve tokluk temin etmekle yükümlüdür. Araştırmalar sonucu fiberlerin zayıf olan özellikleri geliştirilerek dış etkilere karşı dayanımları arttırılmıştır. Bu yüzden hali hazırda üstün mekanik özelliklere sahiptirler. Fiberlerin mühendislik malzemesi olarak kullanılmasının sebepleri olarak aşağıda sıralanmıştır:

- Küçük çapta üretilmeleri, üstün mikro yapısal özellikleri, ve tane boyutlarının çok küçük oluşu,
- Boy/çap oranının artması halinde matriks malzemesinden fiber malzemeye iletilen yük miktarının artması,
- Elastisite modülünün çok yüksek olması,
- Düşük yoğunluğunun olması,
- Üretim kolaylığı,
- Yüksek dayanımlı olmasıdır.

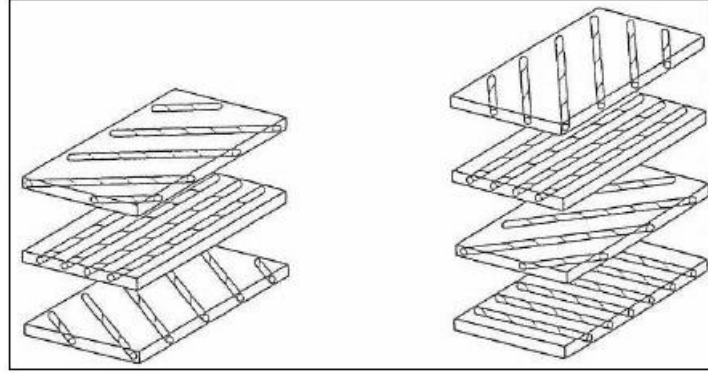
2.3.1.2. Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler

Bir matriks malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilen malzemelerdir. Yapı olarak belirgin uniform olarak dağılmış sert, gevrek malzeme, yumuşak daha sünek bir matriksle kuşatılmıştır. Yapının mukavemetinin

parçacıkların sertliğine bağlı olduğu bilinmektedir. En yaygın tip olarak, plastik matriks içinde yer alan metal parçacıklarını sayabiliriz. Metal parçacıklar ısı ve elektriksel iletkenlik sağlamaktadır. Metal matriks içinde seramik parçacıklar içeren yapıların sertliklerinin ve sıcaklık dayanımlarının yüksek olması sebebi ile uçak motor parçalarının üretiminde sıkça tercih edilirler [17].

2.3.1.3. Tabakalı Kompozit Malzemeler

Tabakalı kompozit malzemeler, en az iki farklı levha malzemenin tabakalar halinde dizilmesiyle oluşmaktadır. Bu özgün yapının tabakalar halinde bulunması her tabakanın ayrı bir kompozit olması avantajını da beraberinde getirmektedir.



Şekil 2. 14. Tabakalı kompozit malzemelerin dizilimi [18].

Tabakalı kompozitlerin tasarımının, üretiminin, standartlaştırılmasının ve kontrolünün diğer kompozitlerden daha kolay olduğu gözlemlenmiştir. Bu kompozitlerde özel gereksinimleri karşılamak amacıyla birden çok tabaka birlikte kullanılabilir ki bu işlem kompozit malzemenin mukavemetini, aşınma direncini ve ısı yalıtım özelliklerini iyileştirmektedir.

2.3.1.4. Hibrit Kompozit Malzemeler

İki ya da daha fazla malzemenin meydana gelen kompozit malzemelere verilen isimdir. Örneğin kevlar ve grafit gibi iki farklı malzeme çeşidini karşılaştıracak olursak; cam fiber ucuz ve tok olmasına rağmen basma mukavemetinin düşük olduğunu görebiliriz. Grafit ise tam tersi özelliklerde basma mukavemetinin yüksek olmasına rağmen pahalı ve düşük tokluğa sahip bir fiberdir. Cam ve grafit ikilisinden oluşan hibrit kompozit yapılarda ise her

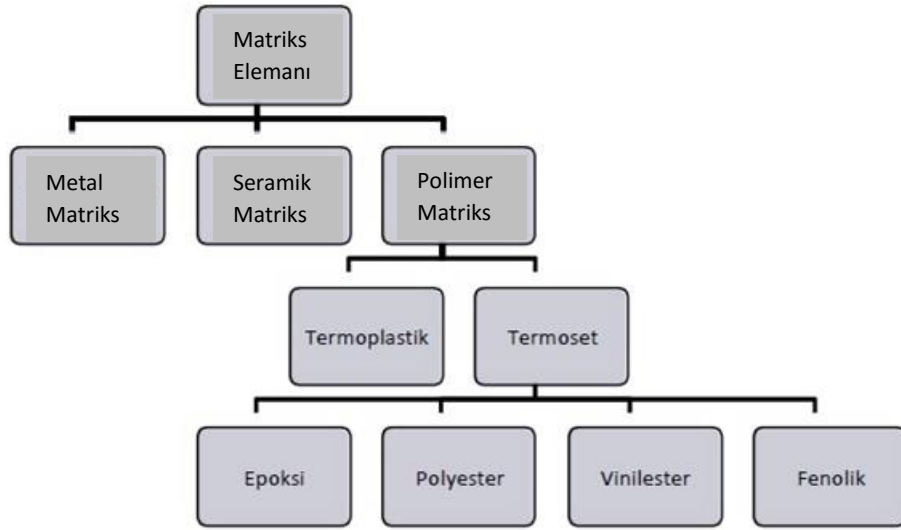
ikisinin olumlu özelliklerini alan, yani yeterince tok, ucuz ve basma mukavemetinin iyi olduğu yeni bir yapının ortaya çıktığı görülmüştür. Şu anki çalışmalar ışığında hibrit kompozit malzemelerin gelecekte en yaygın kullanım alanına sahip kompozit malzeme türü olacağı düşünülmektedir.

2.3.2. Matriks Elemanlarına Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Matriks katılaştığında içine yerleştirilmiş takviye malzemesini belli bir doğrultuda tutacak ve toplam dayanımda artışı sağlayacak, üniform dolgu malzemesine verilen isimdir. Matriksler, elyaflara göre genellikle düşük yoğunluk, rijitlik ve dayanıma sahip olmalarıyla öne çıkmaktadırlar. Matrikslerin, kırılğan, elastik veya plastik özelliklerde olabildiği bilinmektedir [19]. Matrikslerin görevi kompozit sistem içinde elyafları bir arada tutmak, malzeme üzerine gelen yükleri elyaflara dağıtmak ve elyafları çevresel etkilerden korumaktır.

Kompozit malzemelerde yükü taşıyan elyafların fonksiyonlarını yerine getirmeleri açısından matriksin mekanik özelliklerinin rolü büyük bir önem taşır. Örneğin, matriks malzemesi olmadan bir elyaf demeti düşünüldüğünde, yükün bir ya da birkaç elyaf tarafından taşındığını gözlemleyebiliriz. Matriksin varlığında ise yükün tüm elyaflara eşit dağıldığı görülmektedir. Matriksin dayanımı ve matriks ile elyaf arası bağ kuvvetlerinin çok yüksek olması durumunda ise, elyaf ya da matrikste oluşacak bir çatlağın yön değiştirmeksizin ilerlemesi mümkün olabilmektedir. Böylesi bir durumda kompozit gevrek bir malzeme gibi davrandığından kopma yüzeyi temiz ve parlak bir yapı gösterir. Tersisi durum olarak eğer bağ dayanımı çok düşükse, bu kez de elyaflar boşluktaki bir elyaf demeti gibi davranarak kompozit malzemeyi zayıflatacaktır. Orta seviyede bir bağ dayanımında ise, elyaf veya matriksten enlemesine başlayan bir çatlak elyaf/matriks ara yüzeyine dönüp elyaf doğrultusunda ilerlemektedir. Bu durumda kompozit, sünek malzemelerin kopması gibi lifli bir yüzey sergiler.

Kompozit malzemelerin matriks elemanlarına göre sınıflandırılması Şekil 2.15. 'de verilmiştir.



Şekil 2. 15. Matriks elemanlarına göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması

2.3.2.1. Metal Matriksli Kompozitler

Metallerin, kompoziti sürekli bir arada tutan ve bu bütünlük içinde elyafyla birlikte malzemenin özelliklerini belirleyen matriks malzemesi olarak, taşıyıcılık açısından, özellikle plastik matriks malzemesine kıyasla yüksek dayanıma sahip olduğu bilinmektedir. Üretimleri zor olup maliyeti yüksektir, buna karşın metal matriks malzemesi kompozitin tokluğunu önemli ölçüde arttırabilmekte ve yüksek sıcaklık etkisindeki uygulamalara imkân tanıyabilmektedir. Metallerin matriks malzemesi olarak kullanılması, yine metal olan ince elyafların üretimiyle gerçekleşmiştir.

Kompozit üretiminde, metal matriks malzemesi olarak sıkça kullanılan metaller bakır, alüminyum, titanyum, nikel ve gümüşdür. Matriks malzemesi ergimiş halde, moleküler yapıda, levha veya ince tabaka şeklinde olabilmekte ve kullanılan üretim teknolojisine bağlı olarak dökme, karıştırma, presleme, elektroliz yoluyla kaplama ve haddeleme yöntemleriyle birleştirilmektedir. Metal matriks içinde en kolay kullanılabilen elyafın ise bor elyaf olduğu gözlemlenmiştir.

2.3.2.2. Seramik Matriksli Kompozitler

Termal şoklara ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanımları yüksektir. Gevrektiler ve çentik hassasiyetleri yüksektir. Bu gruba örnek olarak SiC, Al₂O₃, B₄C ve Si₃N₄ seramikleri

verilebilir. Seramik matriksli kompozitler takviye elemanlarına göre, sürekli fiberli, süreksiz fiberli ve partiküllü olmak üzere 3 tipe ayrılırlar.

2.3.2.3. Polimer Matriksli Kompozitler

Fiber takviyeli kompozitlerin üretiminde en çok kullanılan matriks çeşididir. İç yapılarına göre termoplastik ve termoset olmak üzere iki gruba ayrılırlar.

2.3.2.3.1. Termoplastikler

Lineer zincirli molekül yapısı vardır ve eklenme polimerizasyonu ile oluşurlar. Molekülleri arasında zayıf Van der Waals bağları vardır. Bu nedenle rijit değildirler. Sıcaklık yükseldikçe yumuşarlar, soğudukça tekrar sertleşirler. Termoplastik malzemeler oda sıcaklığında yüksek viskoziteye sahiptirler. Uygulamada matriksle fiber arasındaki bağların kurulması termosetlere göre daha zordur. Akrilikler, fluorokarbon esaslı plastikler, aseton reçineler, polyamidler ve PVC gibi vinil esaslı plastikler bu gruba girmektedir.

2.3.2.3.2. Termosetler

Üç boyutlu ağ şeklinde molekül yapısı vardır ve yoğunlaşma polimerizasyonu ile oluşurlar. Üretimleri sırasındaki polimerizasyon reaksiyonun geri dönüşü olmadığından ısıtılarak tekrar yumuşatılması ve şekillendirilmesi söz konusu değildir. Epoksi reçineler, polyester reçineler, vinilester reçineler ve fenolik reçineler bu gruba girmektedir.

2.3.2.3.2.1. Epoksi Reçine Matriksli Kompozitler

Epoksiler, iki veya daha fazla epoksit içeren bileşenlerden oluşmaktadırlar. Epoksilere uygulanan kür işlemleri neticesinde yüksek sıcaklıklara dayanımları artırılabilir. Epoksi reçinelerin avantajlarına, elyaf yapılarda yüksek bağ dayanımı sağlamaları, yüksek aşınma direncine sahip olmaları, uçucu olmamaları ve kimyasal dayanımlarının yüksek olması, kopma dayanımlarının yüksek olması, geniş bir sıcaklık aralığında sertleşebilme özelliklerini sayabiliriz. Dezavantajlardan bahsedecek olursak, polyesterlere göre maliyetlerinin yüksek olması ve polyesterlere oranla yüksek viskoziteye çok uygun

olmamasını saymak mümkündür. Epoksiler avantajlarının çokluğu ve tüm elyaf malzemelerle birlikte kullanılabilme serbestliği nedeniyle, yaygın olarak uçak endüstrisinde, genellikle karbon elyaflarla birlikte kullanılmakta olduğunu görebiliriz.

2.3.2.3.2.2. Polyester Reçine Matrisli Kompozitler

Polyester reçineler, cam elyaf takviyeli plastiklerin üretiminde yaygın olarak kullanılan matris malzemelerindendir. Kür işlemi neticesinde matrisin esnekliği iyileştirilerek kopma dayanımı arttırılabilmektedir. Polyester reçinelerin bazı avantajlarına örnek olarak; takviye malzemelerin nemini dışarı kolayca atabilmesini sağlayan düşük viskozite, düşük maliyet, iyi çevresel dayanımları ve kolay üretim şartları gibi avantajlarını sayabiliriz.

2.3.2.3.2.3. Vinilester Reçine Matrisli Kompozitler

Epoksi reçinelerin avantajları ile doymamış polyesterlere özgü kolay üretim ve hızlı sertleşme özelliklerini bir araya getirebilmek üzere geliştirilen kompozitlerdir. En önemli avantajları elyaf ve matris arasında iyileştirilmiş bir bağ dayanımına sahip olmalarıdır. Bu plastikler, kimyasal dayanım gerektiren kimya tesislerinde, borularda ve depolama tanklarında sıkça kullanılmaktadır.

2.3.2.3.2.4. Fenolik Reçine Matrisli Kompozitler

Fenolik reçineler, uzun yıllardan beri kullanılmakta olup kompozit malzeme içinde sertleşme ısı enerjisiyle gerçekleşmektedir. Laminasyon ve kalıplamada basınca ihtiyaç duyarlar. Fenolik reçinelerin ısıl stabiliteleri, elektrik özellikleri, suya ve alkaliler dışındaki kimyasal maddelere dayanımları yüksektir.

2.4. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

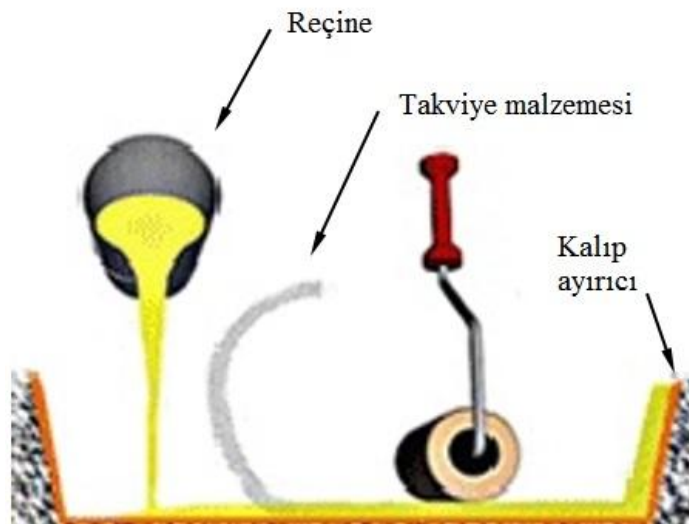
İstenilen özelliklere uygun kompozit malzeme tasarımında, ilk düşünülmesi gereken parametrelerden biri üretim maliyetidir. Üretim maliyeti ise performans, tasarım, malzeme seçimi ve şekil verme yöntemi gibi parametrelere bağlıdır. Kompozit malzemeyi oluşturan

bileşenlerin uygun şekilde seçiminin, üretim maliyetini önemli ölçüde azaltabildiği gözlemlenmiştir. Tasarım ile maliyetin düşürülmesi her zaman geçerli bir yöntem olup, ilk dikkate alınması gereken parametredir. Dayanım ve tokluk, düşük ağırlık, yüksek sıcaklıkta kullanılabilirlik, yorulma dayanımı, düşük bakım masrafı, korozyon dayanımı ve tamir kolaylıkları gibi etkenler birlikte düşünülerek; en düşük maliyetle, en kolay üretilen bir kompozit üretim planı yapılması optimum fayda gösterecektir. Kompozit malzemelerin üretiminde, el yatırması, vakum infüzyon, pultrüzyon, püskürtme, filaman sarma, otoklav ve reçine transfer gibi çeşitli yöntemler kullanılabilmektedir.

2.4.1. El Yatırması Yöntemi

Bu işlem kabaca; reçinenin elyaflara yedirilmesi ile altındaki kalıbın şeklinin verilmesi olarak söylenebilir. İşlem birkaç aşamada yapılır. Bunlar genel olarak aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Uygun malzemelerin seçilmesi,
- Gerekli miktarların hesaplanması,
- Kalıbın hazırlanması,
- Kalıp ayırıcı uygulanması
- Elyafın yeterli reçineyle ıslatılması,
- Kalıptaki kompozitin kurluşmesi için uygun şartlarda bekletilmesi.



Şekil 2. 16. El yatırması yöntemi

2.4.2. Vakum İnfüzyon Yöntemi

Vakumlanmış ortam içerisinde reçinenin ilerlemesi prensibiyle çalışan bu yöntemde, üretim için hazırlıkların tamamlanmasının ardından üretimin el değmeden gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu üretim yönteminde reçine sarfiyatı kontrol altında tutulabilmektedir. Aynı şartlar altında üretilen ürün için her seferinde aynı miktar reçine sarfiyatı olmaktadır.

Reçinenin elyaf yüzeyine dağılımı ve kumaş tarafından emilmesi her yerde aynı olduğundan, malzeme üzerinde reçine birikintisi veya kumaşların katlanması problemleri olmamaktadır. Böylece ürünün yüzey kalitesinde ve yapısında homojen bir dağılım elde edilebilir. Üretim sırasında vakum naylonu altından reçine ilerlediği için dışarıyla herhangi bir temas olmaz. Ayrıca reçineden dışarı çıkan zehirli gazların da etrafa yayılması önlenmiş olmaktadır. Vakum uygulamasıyla fazla reçinenin dışarı çekilerek kompozit yapı içindeki elyaf/reçine oranının daha yüksek olması sağlanmaktadır. Ayrıca vakum uygulaması sayesinde reçinenin bütün katmanlar içine tam olarak nüfuz etmesi sağlanabilmekte, bu şekilde hava kabarcıklarından arınmış katmanlı bir yapı üretimi mümkün olmakta ve bütün bölgelerin reçineyle ıslatılmış olması garanti edilebilmektedir (Şekil 2.17.).



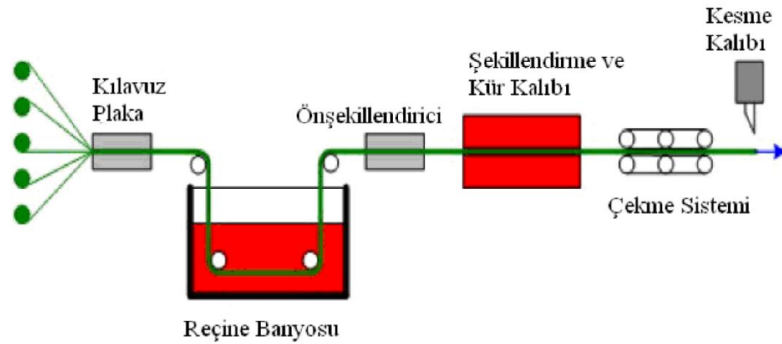
Şekil 2. 17. Vakum infüzyon yöntemi

Bu yöntemin avantajları olarak; geleneksel el yatırması yönteminden daha yüksek elyaf oranlı lamineler üretilmektedir. El yatırması yöntemine göre daha az boşluğa sahip parçalar elde edilir. Elyaflar boyunca, basınç ve reçine akışına bağlı olarak daha iyi elyaf/reçine oranı sağlanır. Vakum torbası kürlenme sırasında ortaya çıkan zararlı gazları

tuttuğu için sağlık ve güvenlik açısından daha kullanışlıdır. Yöntemin dezavantajı olarak ise, ek işlemler hem yapılan işin, hem de kullanıldıktan sonra atılabilen torbalama malzemelerinin maliyetini artırmaktadır. Çalışan kişinin yapılan iş ile ilgili ustalığa sahip olması gerekir. Reçine içeriğinin kontrolü ve karıştırma işlemi ancak usta operatörler tarafından sağlanabilmektedir.

2.4.3. Pultrüzyon Yöntemi

Pultrüzyon, üniform kesit alanında takviye edilmiş malzemenin sürekli üretim yöntemidir. Takviye, her bir elyafın iyice ıslanması için sıvı reçine banyosuna yönlendirilir. Sisteme beslenen sürekli takviye malzemesi, reçine banyosundan geçirildikten sonra 120-150°C arası sıcaklıkta ısıtılmış şekillendirme kalıbından geçirilerek sertleşmesi sağlanır. Malzeme ısıtılmış kalıba ilerlerken reçine jel formuna ve daha sonra da kurlenmiş rijit bir plastiğe dönüşür. Kalıplar genellikle krom kaplanmış çelikten yapılmaktadır. Kalıp, elyafların emdirilmesini sağlar ve reçine içeriğini kontrol eder ve son olarak da malzemenin kurlenmesini sağlar. Bir çekme cihazı kurl edilmiş malzemeyi tutarak kalıptan tamamen çıkarır. Ürün çekiciden geçtikten sonra istenilen uzunlukta kesilir. Pultrüzyon, oldukça ekonomik bir yöntemdir ve uzun, üniform şekiller için ideal bir üretim yöntemidir (Şekil 2.18.).



Şekil 2. 18. Pultrüzyon yöntemi

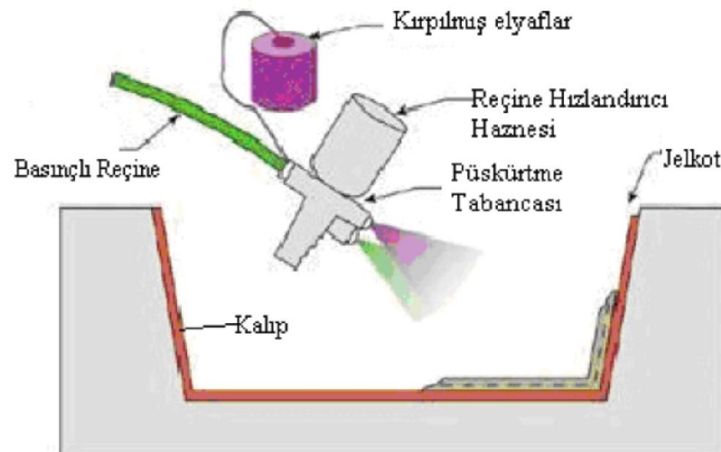
Bu yöntemle; kompozit borular, profiller, levhalar gibi malzemeler üretilir ve bu malzemeler istenilen uzunluklarda kesilerek olta kamışı, golf sopası, pencere kasası, merdiven, parmaklık gibi ürünler elde edilir. Bu yöntemde epoksi, vinilester, polyester ve fenolikler en yaygın kullanılan matriks malzemeleridir. Sürekli elyaflar kullanıldığı için

kompozitlerin, elyafların yönlendirildiği doğrultuda mekanik özellikleri çok iyidir. Dokuma kumaşlar kullanılarak tek yöndeki mekanik özellikler de iyileştirilebilir.

2.4.4. Püskürtme Yöntemi

Bu yöntemde kırılmış elyaflar ve reçine kalıp içine ya da dışına düzgün bir şekilde püskürtülür. Elyafları kırmak ve kırılmış elyafları, reçine-katalizör püskürtme akımına ilave etmek için özel bir aparat kullanılır. Reçine ve katalizör tek bir tabanca içerisinde karıştırılabilir ya da iki farklı tabancadan düzgün bir akım içerisinde püskürtülebilir. Püskürtme işleminden sonra, elyaf ve reçine karışımı içinde kalan hava, rulo yardımıyla alınır. Düzgün bir yüzey elde etmek için kumaşlar aşağıya doğru yatırılır. Kürleme oda sıcaklığında gerçekleşir ya da ısı ile hızlandırılabilir. Püskürtme yönteminde, polyester ya da epoksi reçineler kullanılır (Şekil 2.19.).

Birçok açıdan püskürtme yöntemi el yatırması yöntemine benzerdir. Her iki işlemde de içeride kalan hava tamamıyla dışarı çıkartılmalı, reçine ve katalizör çok dikkatli bir şekilde karıştırılmalı ve kürlenmelidir. Bununla birlikte püskürtme yönteminde önceden şekil verilmiş yapılara veya benzer güçlendiricilere ihtiyaç duyulmaz ve ana takviye olarak sadece kırılmış elyaflar kullanılır. Bunun anlamı, elyaf ve reçine oranının püskürtme yöntemindeki en büyük değişken olmasıdır [20].



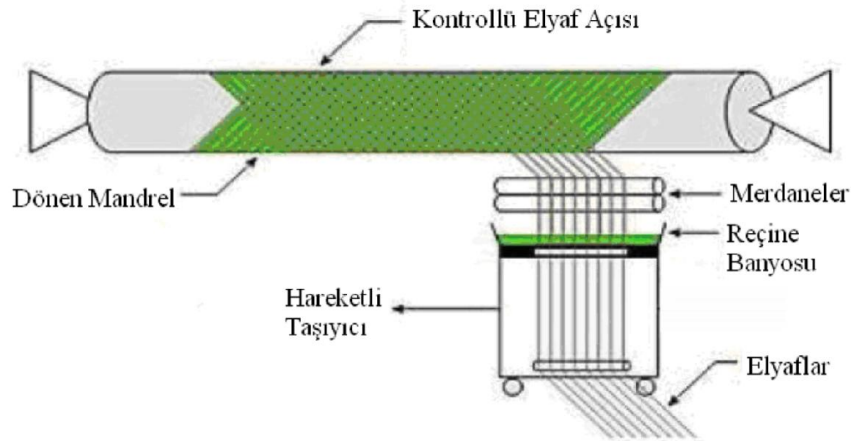
Şekil 2. 19. Püskürtme yöntemi

Püskürtme yönteminin önemli avantajları, uzun yıllardır yaygın olarak kullanılması ve düşük maliyetli kalıplama gerektirmesidir. Bu yöntemin dezavantajları olarak da,

laminelerin daha fazla reçine emmesi ile birlikte daha ağır olması ve işlem esnasında sınırlı mekanik özelliklere sahip olan kırılmış elyafların kullanılmasıdır. Kullanılan reçinenin püskürtülebilecek yoğunluğa sahip olması gereklidir. Püskürtme yönteminde kullanılan reçinelerin yüksek sitren içermesi onları daha zararlı yapar ve düşük viskoziteleri ile malzemeleri delme eğilimleri daha fazladır. Sitren kullanımını yasal seviyelere çekme işlemi de zordur. Tipik kullanım alanları basit duvarlar, hafif yüke maruz kalan yapısal paneller, karavan gövdeleri ve buna benzer alanlardır.

2.4.5. Filaman Sarma Yöntemi

Filaman sarma yöntemi özel şekle sahip ürünlerin seri üretiminde kullanılmaktadır. Bu yöntem, belirli şablonlarda dönen mil üzerine reçine emdirilmiş elyafların sarılması esasına dayanır. Üniform yapı ve elyaf yerleşimi konusunda yüksek kontrol imkânı sağlar. Islak yöntemde, elyaf düşük viskoziteli bir reçineye daldırılır. Kuru yöntemde ise takviye elemanı ön emdirilmiş formda kullanılır. Takviye sarıldıktan sonra kür işlemi gerçekleştirilir ve kompozit malzeme milden çıkarılır. Polyester, vinilester, epoksi ve fenolikler gibi reçineler filaman sarma yönteminde kullanılan reçinelerdir. Sürekli elyafların farklı açılarla kalıba sarılmasıyla farklı mekanik özelliklerde ürünlerde elde edilebilir (Şekil 2.20.).



Şekil 2. 20. Filaman sarma yöntemi

Bu yöntemle yapılan ürünler genellikle silindirik borular, araba şaftları, uçak su tankları, yat direkleri ve dairesel basınç tankları gibi malzemelerdir.

2.4.6. Otoklav Kalıplama Yöntemi

Otoklav kalıplama, vakum infüzyon yönteminin bir modifikasyonudur. Bu gelişmiş kompozit malzeme üretim yöntemi, yoğun ve boşluksuz kalıplama yapılmasını sağlamaktadır. Sebebi ise, kürlenme için yüksek sıcaklık ve basınç kullanılıyor olmasıdır. Bu üretim yöntemi; uçak, uzay aracı ve füze gibi araçlar için ön emdirilmiş yüksek dayanımlı elyaflardan yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip malzemeler üretmek için oldukça yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Otoklavlar; basınç ve sıcaklığın kür çevrimi için gerekli olduğu, kalıpta vakum torbası olan ısıtılmış basınçlı kaplardır. Kür basıncı, işlemlere göre değişebilmekle birlikte genellikle 3.4-6.8 atm arasındadır ve kür çevrimi genellikle uzun zaman alır. Bu yöntemde, epoksi gibi yüksek sıcaklık matriks reçineleri kullanılır. Otoklav boyutu, üretilecek parça boyutunu sınırlamaktadır (Şekil 2.21.).



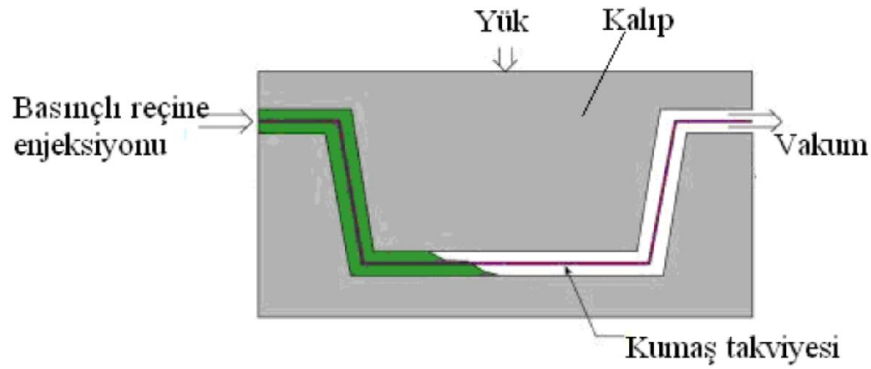
Şekil 2. 21. Otoklav cihazı

2.4.7. Reçine Transfer Metodu (RTM)

Reçine transfer yöntemi (RTM), sürekli elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanılan sıvı kompozit kalıplama yöntemidir. RTM, diğer ileri kompozit üretim yöntemlerine göre çeşitli avantajlara sahiptir. Yöntemin en büyük avantajları, ürünün pürüzsüz yüzeyle bitmesi ve üniform kalınlık imkânı tanınmasıdır. Bu yöntemde; kompozit malzeme boyutları, şekli ve kalitesi üzerinde iyi bir kontrol sağlanır. Kalıbı kapalı tutmak

için uygulanan sıkıştırma kuvveti, üretim sırasındaki diğerkalıp basınçlarına göre daha düşüktür. RTM yönteminin en büyük avantajı, tekrarlanabilir sayıda karmaşık şekilli parçaların üretilebilmesidir. Teçhizatlar ve işleme maliyetleri, kalıp tasarımı ve üretim işleminden dolayı diğerkompozit üretim yöntemlerine göre daha pahalıdır. RTM yöntemiyle üretilen kompozitler, havacılık ve otomotiv uygulamaları gibi kritik mühendislik uygulamalarında kullanılır. RTM prosesi ile üretilen hafif ürünler, yakıt tüketiminin azalmasına da katkıda bulunur. Bu kompozitler yüksek mekanik performans ve yapısal güç özelliklerine sahiptir. Ayrıca RTM prosesi ile montaj için daha az parçaya gerek duyulduğundan, daha entegre parçalar üretilebilmektedir.

RTM yönteminde sürekli elyaf takviyeli kumaş katmanları veya sürekli elyaf keçeleri, ürünün son şeklini önceden verir ve bu şekle ön şekil denir. Genellikle cam ve karbon elyaflar, takviye malzemesi olarak tercih edilir. Isı ile sertleşen reçinelerden epoksiler ileri uygulamalarda kullanılmaktadır. RTM çoğunlukla plastik kompozitlerde kullanılır, fakat seramik kompozitlerin üretimi için de kullanımı mümkündür. Enjeksiyon ve kürlenme hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilebilir (Şekil 2.22.).



Şekil 2. 22. Reçine transfer kalıplama yöntemi

Genellikle epoksi, polyester, vinilester ve fenolik reçineler kullanılır. İlmik sistemi ile birbirine bağlanmış olan malzemeler aralarında bulunan boşluklar sebebi ile daha hızlı reçine transferine izin verdiği için bu işlemde daha iyi sonuç verir. Hücreler reçine ile dolduğuve kalıp basıncı hücreye zarar verdiği için “bal peteğiyapısı” kullanılmaz.

RTM yönteminin avantajları olarak, az boşluğasahip fakat yüksek elyaf hacmine sahip lamineler elde edilebilmesidir. Ayrıca, reçine kapalı bir ortamda kaldığı için sağlık ya da güvenlik açısından bir problem oluşturmaz. Daha az iş yüküne ihtiyaç duyulur ve üretilen kompozitin her iki tarafı da düzgün kalıp yüzeyine sahip olur.

Dezavantajları olarak da, erkek ve dişiden oluşan kalıp, basınç sistemine dayandığı için ağırdır ve yüksek maliyete sahiptir. Genellikle küçük bileşenlerin üretiminde kullanılır. Kalıp içerisinde reçinenin ulaşamadığı bir alan kalırsa bu parçalar kullanılamadığından üretim maliyetlerinin artmasına neden olur.

3. BALİSTİK

1800'lü yılların ortalarına doğru ortaya çıkan balistik bilimi mermilerin hareketleriyle ilgilenen bilim dalıdır. İlk olarak basit kuramlarla silahlara uygulanarak başlanmış olup zamanla bilim dalının geliştirilmesiyle balistik tek başına bir bilim dalı haline dönüşmüştür. Balistik bilimine ihtiyaç duyulmasının nedeni mermi silah ve zırhların birbirleriyle olan etkileşimlerinin merak edilmesidir. Bu bilimin gelişmesi sonucunda silah, mermi ve zırh teknolojisi de hızla gelişme göstermiştir.

Balistik merminin namludan çıkıp hedefe varıncaya kadar geçirdiği zamandaki karmaşık olayı ifade eden bilim dalı olup detaylı ve kapsamlı bir terimdir. Bu nedenle balistik 3 aşamada incelenmektedir:

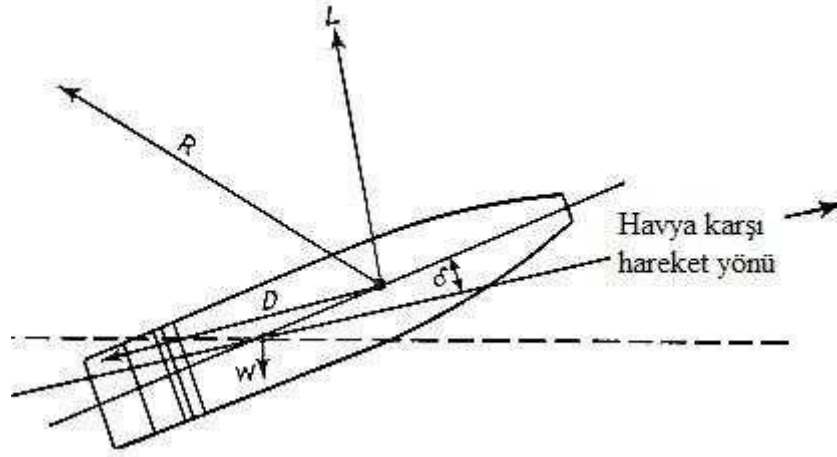
1. İç balistik: Namlunun içinde meydana gelen olayları inceleyen bilim ve teknolojiye verilen addır.
2. Dış balistik: Merminin namludan çıkıp uçuşu esnasındaki aerodinamik kuvvetleri inceleyen bilim ve teknolojiye verilen addır.
3. Terminal balistik: Mermi ve hedefin çarpışma dinamiğiyle ilgilenen bilim ve teknolojiye verilen addır.

3.1. İç Balistik

İç balistik, barutun yanma şeklini, oluşan basıncı, namlu boyunca mermide oluşan hızı ve mermi haznesinin boyutlarıyla ilgilenir. Bunun sonucunda silah için elde edilen barut basınç eğrisiyle silahın her bir noktasına gelecek basınç miktarını karşılayacak duvar kalınlıkları silah üretim ilkeleri göz önünde bulundurularak hesaplanır. Belirlenen ortamda barutun itilip sıkıştırılması sonucunda yanma başlar. Basınç miktarının artmasıyla birlikte yanma da belirgin şekilde artış gözlenir ve bu olay mermi atış değerine varıncaya kadar sürer. Mermi atış basıncı, merminin ileri doğru gidebileceği basınç değeridir. Mermi namlu boyunca hareket ederken artan gaz miktarı için uygun boşluk elde edilerek basınç düşüşü sağlanır. Boşluk artışıdan dolayı oluşan basınç düşüşü yanan barut nedeniyle oluşan basınç artışına eşit olduğunda basıncın en yüksek değerine ulaşmış olur. Bu noktadan sonra namludaki basınç giderek düşer. Bu esnada barutun tamamı yandıktan sonra bile ivmelenme sürer. Ancak hemen namlu çıkışı sırasında, gecikme nedeniyle, ivme artışı, azalışı başlar.

3.2. Dış Balistik

Merminin havadaki hareketini ve uçuş esnasındaki davranışlarını inceleyen bilim dalına dış balistik denir. Mermi, belirlenen yere atılan yada fırlatılan rijit bir nesnedir. Merminin havadayken Şekil 3.1. deki gibi hareket yönü ile δ açısı yapan bir eksene sahip olup bu harekete farklı kuvvetler etki etmektedir. Bu hareket, yerçekimi w 'ye (dikeyde aşağı doğru), hıza, hava ve merminin özelliklerine, merminin hareket ettiği yöne bağlı bir hava kuvveti R 'ye bağlıdır. Eğer δ , sıfıra eşitse ve mermi kendi eksenine göre simetrikse R kuvvetinin yönü mermi hareket yönünün tam tersi yöndedir.



Şekil 3. 1. Mermi üzerine etki eden kuvvetlerin gösterilmesi [21]

Çoğunlukla δ , sıfır olmaz bundan dolayı , R hareket yönünü keser. Dış balistik bu türlü hava dinamiği kuvvetlerinin merminin uçuşu sırasındaki etkilerini inceyen bilim dalıdır.

3.3. Terminal Balistik

Merminin hedefte oluşturduğu etkiyi veya zırhın (hedefin) mermide gösterdiği etkiyi inceyen ayrıca hedef darbe dinamiği ile de ilgilenen bilim dalına terminal balistik denilir. Darbe esnasında iki madde arasındaki ilişki askeri alan dışında birçok alanda da mevcuttur. Sivil teknolojinin daha karmaşık bir hal almasıyla malzemeler üzerine uygulanan kısa süreli ani yüklemelerin malzeme özelliklerine etkisi ile ilgili çeşitli sonuçlar elde edilmiştir. Farklı yöntemlerle güvenli ve uygun tasarımların oluşturulabilmesi için kısa zamanlı ve yüksek değerli yüklerin uygulanarak malzeme davranışının çok iyi

anlaşılması gerekmektedir. Bu yöntemlerden kısaca aşağıdaki gibi bahsedebiliriz;

1. Ön gerilmeli beton yapıların denetimli yıkımlarında,
2. Zehirli maddelerin güvenle taşınmalarında,
3. Nükleer reaktörlerin zararlı etkilerinden korunmayı sağlayan basınçlı kapların iç ve dış tehlikelerden korunmasında
4. Uzay araçlarının göktaşı yağmurlarından korunmasında,
5. Araçların çarpışma ve kaza esnasında içerideki personele zarar vermemesi için,
6. Polis memurlarının, yönetici ve iş adamlarının, devlet ve askeri personellerin korunması için kumaş zırhlar da dâhil olmak üzere hafif zırhların tasarımında,
7. Askeri araç, uzay araçlarının ve yapıların darbe ve patlama yükleri altında altındaki hasar miktarlarının belirlenmesinde,
8. Metallerin patlama ile şekillendirilmesi ve kaynaklanmasında.

Darbe olayı birçok temel prensiplerden oluşmaktadır. 50 /sn'den küçük olan düşük hıza sahip durumlar yapı dinamiği adı altında incelenir. Bu tür hızlarda sistemin hasara uğraması bölgesel olarak batma ve delinme olarak adlandırılır ve iletilen bu enerji tüm alan tarafından karşılanır. Yükleme ve cevap zamanı çoğunlukla milisaniye'dir. Fakat ateş hızı 0,5–2 km/h gibi hızlara eriştiğinde tüm bölge değil küçük bir alan enerjiye uğrar ve düşük hızların aksine tüm alan değil birkaç mermi çapı kadarlık bir alan bu enerjiye cevap verir. Kırılma mekanizmalarının anlaşılmasında darbe sonrasında oluşan şok dalgaları yardımcı olmaktadır. Darbe sürecinin oluşmasında hızın, geometrinin, malzemeyi oluşturan kimyasal içeriklerin, gerinim hızının, bölgesel kalıcı akma ve kırılmanın etkilerinin oluşması gerekmektedir.

Genellikle yükleme ve cevap verme zamanı mikro saniye zaman dilimindedir. Darbe hızındaki fazladan artışlar (2–3 km/h) malzemenin dayanma sınırının üzerindeki daha yüksek basınçlara neden olurlar. Çarpılan katı maddeler darbenin ilk anlarında akışkan gibi düşünülebilir. 12 km/h ' den büyük hızlardaki darbe durumlarında enerji düşüşü yaşanmaktadır. 12 km/h ' den yüksek olan hızlar çarpılan malzemenin buharlaşmasına neden olur.

3.4. Kompozit Malzemelerde Balistik Darbe

Darbe şeklini, çarpan kütlenin büyüklüğü ile darbe hızı belirler. Vurucu cismin

malzemeye etki süresinin, malzemede oluşan en düşük titreşimin periyodundan daha uzun olduğu darbe türü, düşük hızlı darbedir. Yani düşük hızlı darbede merminin malzemeye etki süresi darbe noktasından itibaren malzeme üzerinde oluşan titreşimlerin yayılma süresinden daha uzundur. Düşük hızlı darbedeki çarpan cismin kütlesi, yüksek hızlı darbedeki cismin kütesinden daha büyüktür. Malzemenin içinde meydana gelen delaminasyonlar düşük hızlı darbeyi tehlikeli kılarken, yüksek hızlı darbe malzemenin yapısal bütünlüğünü doğrudan etkiler. Yüksek hızlı darbede, merminin malzemeye temas süresi, malzemenin en düşük titreşim periyodundan çok daha hızlı olup, darbe mekanizmasının hedef ve mermi parametreleri ile bağıntılı olarak yapılan analitik incelemeleri ayrı ayrı araştırma alanlarıdır [21]. Bu kapsamda; balistik performansın kompozit yapının matriks ve takviye fazlarının mekanik özellikleri ile merminin darbe karakteristiğine bağlı olması sebebiyle diğer bir araştırma sahası olan analitik incelemenin kapsamının daha sınırlı olmasına ve deneysel çalışmaların daha yaygın yapılmasına sebep olur.

Mermilerin darbe hızlarının genel olarak sınıflandırılması aşağıda verilmiştir:

- Alçak hızlı darbe (10 m/sn'ye kadar)
- Orta hızlı darbe (10 – 100 m/sn)
- Yüksek hızlı darbe (100 – 1000 m/sn) [22].

3.4.1. Balistik Performansa Etkiyen Parametreler

Balistik performans parametreleri Tablo 3.1.'de özetlendiği şekilde genel olarak mermi ve hedef yönünden değerlendirilebilir [23].

Tablo 3. 1. Mermi ve hedef bakımından balistik performans parametreleri

HEDEF	Malzeme Özellikleri ve Yapısı	Elastisite Modülü
		Alansal Yoğunluk
		Kalınlık
		Tabaka Sayısı
MERMİ	Fiziksel Özellikler	Ağırlık
		Kalibre
		Uç Geometrisi
		Sertlik
		Hız
		Vuruş Açısı

3.4.1.1. Hedefin Malzeme Özellikleri ve Yapısı

Kompozit sistemler ister elyaf dokuma isterse dokuma olmayan polietilen fiber yapılardan oluşsun bu sistemlerin balistik koruyucu özellikleri olduğu maddelerin fiziksel özelliklerine bağlıdır. Yüksek hızlardaki çarpmalarda kompozit yapının gösterdiği direnç lifin elastisite modülü, kopma uzaması gibi lif özellikleri ile lifin bu kompozit yapı içerisindeki kullanım şekline ve kompozitin alansal yoğunluğuna bağlıdır [24]. Elyaf dokuma yapılarda, merminin çarpması sonucu, darbe hızıyla orantılı olarak liflerde ani olarak gerilme artışı oluşur. Kritik hızın altında bulunan hızlarda oluşan gerilme artışı lifleri koparacak yeterlilikte olmadığından enine doğru eğilme meydana gelmekte ve lifler uzayarak enerji yutulmaktadır [25].

Oluşacak deformasyonun yayılması lifin elastisite modülünün ne kadar yüksek olduğuyla orantılıdır. Elastisite modülü ne kadar yüksekse deformasyonda o kadar hızlı olmaktadır. Sistemin enerji absorbe edebilme yeteneği, lifin elastisite modülü ile doğru orantılıdır [26]. Tabakalı yapılarda balistik özellikler lif tipi, reçine tipi, doku konstrüksiyonu, kat sayısı, iplik yönü, kesişmeleri ve yoğunluğu gibi değerlere bağlı olarak değerlendirilmektedir [27]. Balistik uygulamalarda kullanılan yoğunluk, dokuma yapının atkı ve çözgü adımlarına göre oluşturulmuş bir faktöre bağlı olarak tanımlanmaktadır. Yoğunluk faktörü 0.6 – 0.95 arasında boyutsuzdur, yoğunluğun 0,6 değerinin altında olması yapının gevşek olmasına ve reçinesiz dokuma elyaf yapılarda, liflerin sağa sola kayarak birbirlerine yapışmasına neden olmaktadır. Liflerin yüzey sürtünmesinin düşük olması durumunda reçinesiz dokuma elyaf yapılarda balistik performans olumsuz yönde etkilenir [28]. Polimer matriksli kompozit bir yapının balistik performansının, aynı kat sayısındaki matriksiz bir yapıya göre %30 düşük olduğu kabul gören genel bir yaklaşımdır [29]. Balistik darbenin çok katlı dokuma yapılarına etkisi enerjinin dağıtılması yönünden olumluken katlar arası açılma ile kompozit yapının dayanımı açısından olumsuz olabilmektedir. Tabakalı kompozitlerde, darbenin oluşumu ve meydana gelen hasar tabakaların yapısına, cinsine ve matriksin sünek davranışına bağlıdır. Rijit fiberlerin, esnek epoksi matriks içinde olduğu karbon ve polietilen içeren hibrid yapılarla ilgili yapılan araştırmalarda en iyi balistik korumanın, her iki fiber tipinin ayrı ayrı tabakalar halinde dizilen yapılarda olduğu görülmüştür [30].

3.4.1.2. Merminin Özellikleri ve Yapısı

Farklı amaçlara hizmet eden birçok mermi türü, gelişen teknolojiyle beraber hız, şekil, çekirdek yapısı gibi özellikleri birbirinden çok farklı, değişik silahlar ve amaçlar için üretilmiştir.

Kinetik enerjiye sahip bir merminin hedef üzerindeki delici etkisi, merminin kütlesine, enerjisine, hedefe vurus açısına ve mermi ile zırh malzemesinin metalurjik yapısına bağlıdır. Merminin kütlesi (m) ve çarpma anındaki hız (V_m) olduğunda merminin kinetik enerjisi;

$$E_k = \frac{1}{2}mV_m^2 \quad (3.1)$$

şeklindedir [31].

Tasarım sırasında balistik koruyucu malzemenin özellikleri kadar, tehlike oluşturan mühimmatın özellikleri de bilinmelidir. Merminin yapısal özelliklerine, uç geometrisine, hızına, çekirdek malzemesi ve kaplama özelliklerine bağlı olarak merminin hedefe penetrasyonu ve deformasyonu belirlenir [32].

3.4.1.2.1. Mermi Ağırlığı

Malzeme türüyle ilişkili olarak merminin ağırlığı, çapının bir fonksiyonudur. Bir merminin hareket enerjisi, merminin ağırlığıyla doğru orantılıdır [33].

3.4.1.2.2. Mermi Uç Geometrisi

Uç geometrisi kompozit yapının delinmesinde etkili olan başlıca unsurlardandır. Yuvarlak uçlu mermilerin sivri uçlu mermiler kadar hızlı durdurulamadığı ayrıca kevlar kumaşlarında yuvarlak uçlu mermilerin delik oluşturma kabiliyetinin iyi olduğu gözlemlenmiştir. Merminin kütle ve geometrisinin özellikle yüksek hızlarda darbe üzerinde etkisi artmaktadır. Polimer matriksli elyaf takviyeli yapılarda, küt uçlu mermilerin aynı balistik darbe hızlarında aynı kütledeki sivri uçlu mermilere göre hedefe momentum transferinin dört kat büyük olduğu ve hedefte daha büyük tahribat oluşturduğu, sivri uçlu mermilerin hedefi daha küçük çaplı deldiği görülmüştür [34]. Penetrasyon sırasında meydana

gelen hasarın büyüklüğünü etkileyen mermi geometrisinin, perforasyon enerjisine de etkisi büyüktür. Keskin kenarlı mermiler yüksek hızlarda yapıyı esnetip uzatarak delmek yerine keserek delme eğilimindedirler. Düşük çarpma hızlarında koruyucu yapı geniş bir alanda buruşarak gerilir , bu olay enerjinin dağıtılmasına katkı sağlar [23]. Yüksek hızlı darbeye fiberler yeterince enine doğru uzamadan delinme meydana gelir ve hasar bölgesel olur. Yüksek hızlarda sivri uçtan küt uca doğru merminin yavaşlatılması daha kolaydır. Küt uçlu mermiler vuruş sırasında daha çok iplik ile temas ederek enerjinin daha çabuk yayılmasını sağlar. Sivri uçlu ve konik uçlu mermiler ise daha az lifle temas ederek sıyrılacağından absorbe edilen enerjinin miktarı daha az olacaktır. Kevlar ve yüksek moleküler ağırlıklı polietilen malzemeler ile yapılan deneylerde, yüksek hızlardaki çarpmanın fiberleri makas gibi kestiği, yapının eridiği gözlenmiştir [23].

3.4.1.2.3. Çekirdek Sertliği

Mermi çekirdekleri bakır, çelik vb. malzemedan kaplamasız olarak veya pirinç gövdeli ve bu gövdenin üzerine bakır, çelik alaşım vb. metal kaplamalı olarak da (FMJ) üretilmektedir. Kullanım amaçlarına göre farklı alaşımlardan üretilen mermiler bulunmaktadır. Metal kaplamalı bir merminin polimer matriksli fiber takviyeli bir hedefe penetrasyon kabiliyeti kaplamasız bir çekirdekten daha yüksek, ancak hedefin arkasında meydana getirdiği çöküntü miktarı daha düşüktür [35].

3.4.1.2.4. Mermi Hızı

Tehditin büyüklüğünü etkileyen en önemli etmen merminin hızıdır. Mermi hızının karesi ile paralel olarak hareket enerjisi yani balistik koruyucu yapının mermiyi durdurabilmek için soğurması gereken enerji miktarı artar. Ayrıca merminin kütlesiyle doğru orantılı olarak kütle artıkça kinetik enerji artacak bunun sonucunda absorbe edilecek enerji artacaktır [36].

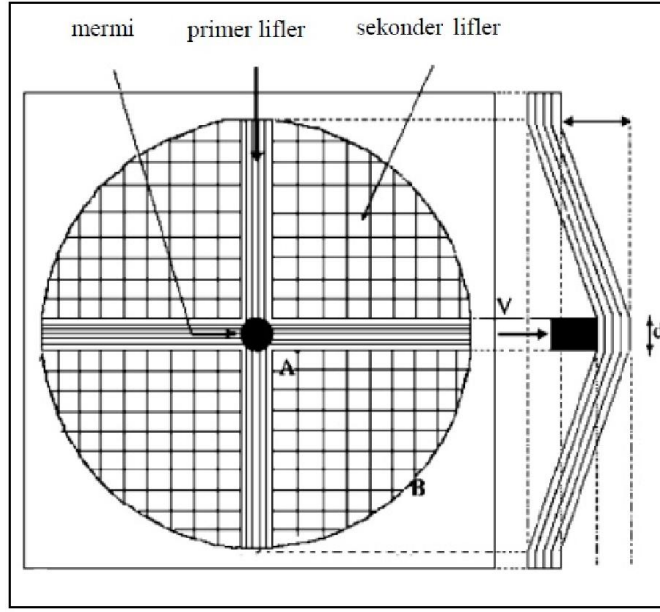
3.4.1.2.5. Mermi Vuruş Açısı

Namlu ile hedef arasındaki nişan hattı ile hedef normali arasındaki açıdır. Elyaf dokuma yapıların 60°'lik vuruş açısındaki balistik direnci 90°'deki balistik direncinden daha

düşük iken, yüksek moleküler yoğunluklu polietilen yapılarda daha yüksektir [32].

3.4.2. Yüksek Hızlı Darbenin Oluşumu

Balistik performans; malzemenin yüksek hızlı darbe bölgesindeki cevap karakteristiği ile ilişkili ve darbe esnasında absorbe edebildiği enerji ile orantılıdır. Malzeme kalınlığı da bazı durumlarda darbe sırasında soğurulan enerjiyi bariz bir biçimde etkilemektedir. Polimer matriksli, özellikle de yüksek hızlı darbelere karşı korunmada tekstil dokuma takviyeli kompozitler yaygın olarak kullanılan; daha az kalınlıkta ve ağırlıkta yüksek kinetik enerji sönümlene yeteneği olan malzemelerdir [37]. Yüksek elastisite modülüne ve düşük yoğunluğa sahip malzemeler, enerjiyi darbe noktasından başlayarak daha geniş alanlara dağıtır, gerilme dalgasını daha hızlı yayar ve büyük şekil değiştirmelerin oluşmasını önlerler. Takviye malzemesinin yapısal özellikleri veya dokumanın yapısı, matriks mekanik özellikleri, tabakalı yapılarda tabaka sayısı ve sıralanışı, mermi geometrisi ve hızı gibi birçok etmen fiber takviyeli kompozit malzemelerin balistik performansının belirlenmesinde etkin olmaktadır. Ani şok dalgası merminin çarpması anında, darbenin olduğu yerden başlayarak merminin hızına bağlı olarak oluşur. Mermi, liflere enerjisinin büyük bir bölümünü şekil değiştirme ve kinetik enerji olarak direk aktarır ve bu lifler, primer lifler olarak isimlendirilir. Şok dalgasının etkisiyle balistik koruyucu dokumanın yapısında yüksek çekme gerilmesine, şekil değiştirmeye ve hasara uğrayan primer lifler önemli miktarda enerjiyi absorbe eder. Sekonder lifler ise mermi ile direk olarak ilişkide bulunmayan liflerdir. Primer ve sekonder lifler Şekil 3.2.'de belirtilmiştir. Yüksek hızlı balistik darbe esnasında, hedefin arka tarafında oluşan deformasyon konisinin büyüme hızı temasta bulunduğu merminin hızı ile aynıdır. Şekil 3.2.'ye göre merminin uç kısmı ile temas eden ortadaki primer liflerde çekme gerilmeleri ve şekil değiştirmeler maksimum seviyededir. Bu liflerdeki gerilme ve deformasyon miktarı merminin diğer tabakaya ilerlemesiyle azalırken, bir sonraki tabakadaki primer liflerde artar. Merminin darbe noktasına yani primer liflere de yakın olan ve şekil üzerinde A ile gösterilen bölgelerde sekonder liflerdeki gerilme, primer liflerdeki gerilmeye yakın seviyededir. Sekonder liflerdeki gerilme şekil üzerinde B olarak gösterilen konuma doğru darbe noktasından uzaklaştıkça azalır [38].



Şekil 3. 2. Primer ve sekonder lifler [38].

Lifler arasındaki bağlantı noktalarının çokluğu balistik koruyucu dokuma bir yapıda merminin kinetik enerjisinin yayılma hızıyla orantılıdır. Bağlantı noktaları ne kadar çok ise enerji de o kadar daha hızlı yayılarak lifler tarafından absorbe edilmesini sağlar. Merminin vuruş anından itibaren, balistik koruyucu yapının balistik dayanım sınırına kadar enerji transferi gerçekleşir. Mermi hızı balistik sınıra ulaştığında koruyucu yapının enerji absorbe yeteneği ortadan kalkar ve perforasyon meydana gelir [39].

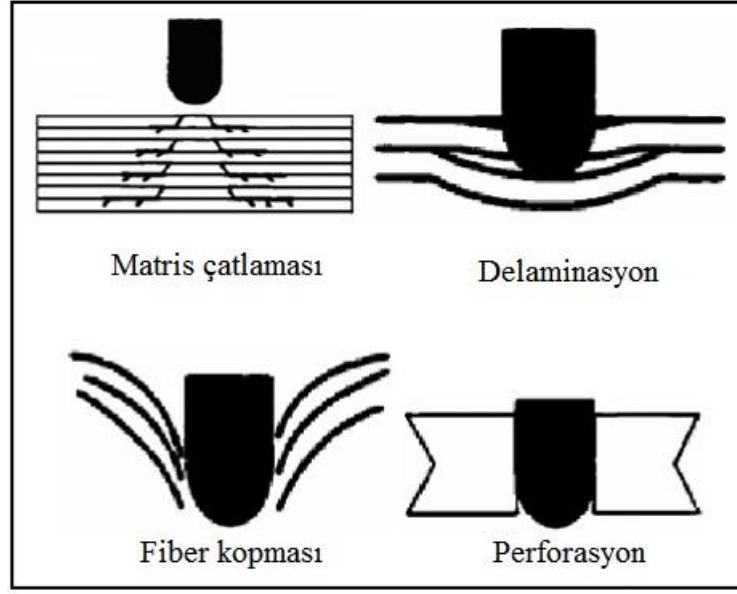
3.4.3. Balistik Darbe Sonucu Oluşan Hasar Şekilleri

Genellikle kırılma özelliğinde olan polimer matrisli kompozit malzemeler, enerjiyi sadece elastik deformasyon ve bazı hasar mekanizmaları (matris kırılması, delaminasyon, fiber kırılması v.b) sayesinde absorbe edebilirler. Plastik deformasyonun enerjiyi absorbe etmede etkisi yok denecek düzeydedir [40]. Tabakalı kompozit bir malzemenin enine yöndeki ve özellikle de darbe noktasına yakın tabakalarının elastik özelliği daha düşük olduğundan, en hassas olduğu gerilmeler düzlem dışına doğru olan (tabaka veya fibere dik) yüklemelerdir [41]. Kompozit yapı ile merminin özelliklerine göre balistik darbe sırasında oluşan ve barizleşen hasar tiplerinde değişiklikler oluşabilir. Kompozit malzemelerin darbe yüklerine karşı göstermiş oldukları karmaşık cevap kompozit malzemeyi meydana getiren her bir bileşenin kendi özellikleri kadar yapısal konfigürasyonuna, balistik tehdide sebep veren cismin geometrisine, hızına ve kütlesine bağlıdır [42].

Tabakalı kompozit malzemelerde görülen hasar mekanizmaları; balistik darbe esnasında kesme delinmesi, matriks kırılması, delaminasyon, fiber kırılması ve kopması, yarılma ve perforasyondur [43]. Merminin hedefe çarpması sonucunda, malzeme mermi altında sıkıştırılmakta ve oluşan çukur kısmında kalınlık boyunca meydana gelen kesme gerilmelerinden kaynaklı deformasyon oluşmaktadır.

Kesme delinmesi yüksek darbe hızlarında meydana gelen ilk hasar şekli olup tabakalı kompozit yapılarda balistik darbe esnasında ilk birkaç tabaka katında oluşabilir . Perforasyon durumunda darbe noktasında görülebilen ilk hasar şekli de kesme delinmesi ve bunu akabinde fiberlerde ani kopmadır. Mermi ucu geometrisi ve liflerin birim uzama miktarının kritik değerin üzerine çıkması kesme delinmesi hasarının oluşumunun bağlı olduğu önemli etmenlerdir [44].

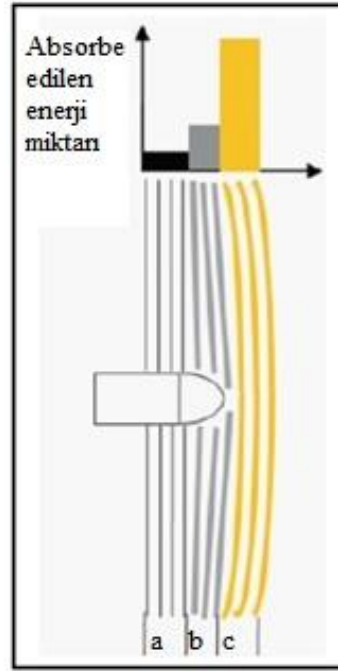
Delaminasyon hasarı dokuma yapılarda kesme delinmesinden sonra merminin fiberleri kopma dayanımını aşana kadar zorlamasıyla birlikte fiber kopması sonucunda ortaya çıkar [45]. Dokuma olmayan tabakalı fiber yapılarda ise üst tabakalardaki merminin temas kenarlarında fiberlerde kesilme ve kopma, alt tabakalarda ise çekme gerilmesi zorlaması oluşur bunun sonucunda ise kopma meydana gelir [46]. Şekil 3.3.'de tabakalı kompozit yapıda balistik darbe hasar şekilleri gösterilmiştir [43]. Matriks kırılması delaminasyonun başlaması açısından gerekli bir faktördür. Matriks kırılmaları iki şekilde oluşur, bunlar çapraz kesme çatlaması ve eğilme çatlamasıdır. Her ikisi de delaminasyon için başlangıç mekanizmasıdır. Darbe noktasının hemen dışındaki yakın çevresinde yaklaşık 45° açı yaparak çapraz kesme çatlaması meydana gelir. Meydana gelen bu açının sebebi tabakalar arası meydana gelen kayma gerilmesi ve enine normal gerilmelerin bileşke etkisidir. Düzlem içi gerilmelerin eğilmeye zorlaması sonucu tabakalı yapıların alt katmanlarda ise eğilme çatlamaları meydana gelir. Pratik uygulamalarda sistemden sisteme farklılık gösteren bu iki mekanizma birbiriyle iç içe durumdadır [47].



Şekil 3. 3. Kompozit yapıda balistik darbe hasar şekilleri [43].

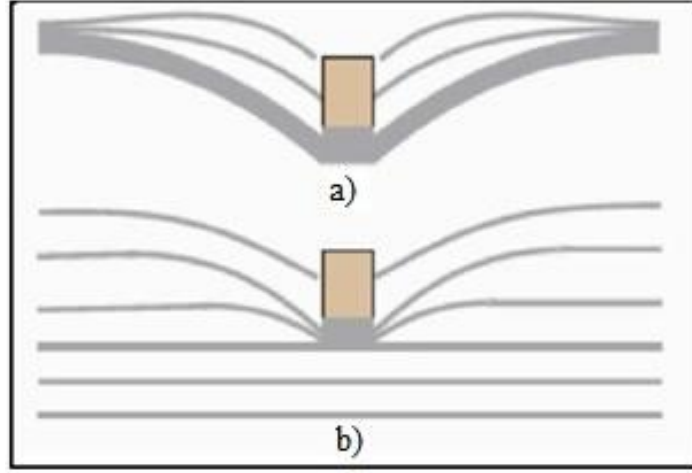
Kompozit malzemenin her bir katmanının ayrılmasına delaminasyon denir. Tabakalı yapılarda en etkin enerji soğurma mekanizması olan delaminasyonlar, tabakalar arası ara yüzey kısımlarında, aynı katman grubundaki tabakalar arasından daha ziyade, farklı fiber oryantasyonlarına sahip tabakalar arasında meydana gelen bir hasar tipidir [48]. Delaminasyon oluşumuna ve büyümesine neden olan etmen, merminin kompozit yapının içerisine nüfuz ederek tabaka kalınlığı boyunca ilerlerken malzemenin düşey yönde deformasyonu ile merminin altında kalan tabakaların arasında meydana gelen normal gerilmelerdir. Ayrılma, her bir katman arasında bulunan ve katmanlar arası yüzey adı verilen ince matriks malzemesi bölgesinde, genellikle matriks malzemesindeki kırılmaların birbirleriyle kesiştiği noktalarda meydana gelir [49].

Malzemenin arka tarafında oluşan delaminasyon yani bel verme (bulging); penetrasyon sırasında merminin önünde azalan malzeme kalınlığı, mermiye uygulanacak reaksiyon direncinin azalmasına, daha düşük bir dirençle tabakaların ayrılmasına ve bunun sonucunda tabakanın arka yüzeyinde delaminasyon oluşumuna neden olur. Tabakalı kompozit bir yapıda meydana gelen hasar şekilleri ile sönmölen enerji miktarı arasındaki ilişki şematik olarak Şekil 3.4. 'de gösterilmiştir [50].



Şekil 3. 4. Tabakalı kompozit yapılarda hasar oluşumu – enerji sönümlene indeksi karşılaştırması
a) kesme gerilmesi, b) fiber kopması, c) delaminasyon

Tabakalı kompozit yapılarda, üretim yöntemine bağlı olarak yukarıda açıklanan balistik darbe sonucu oluşan hasar şekillerinin dışında karşılaşılan problem ise tabakaların arasında yeterli bağın oluşamamasıdır. El yatırma yönteminde elyaf katlarına uygun miktarda reçine emiliminin sağlanamaması ve yeterli birleştirme basıncının oluşturulamaması durumunda tabakalar arası açılma yani boşluk oluşur. Tabakaları arasında yeterli bağın bulunduğu yapılarda ilk tabaka darbeye maruz kaldığında merminin kinetik enerjisini bir miktar emerek şok darbesini ikinci tabakaya aktarır, takip eden tabakalarda meydana gelen enine dalgaların gelişimi arasında gecikme olmaz. Tabakalar arasında açılma olduğu durumda ise darbe esnasında ilk tabaka tam olarak darbe enerjisi absorbe edemediği sonraki tabakaya şok darbesini iletir. Şekil 3.5.'de tabakalar arası açılmanın, boşluğun fazla olduğu ve ihmal edilebilir olduğu durumlar için şematik olarak gösterilmiştir [51].



Şekil 3. 5. Tabakalı kompozit bir yapıda a) tabakalar arası boşluğun fazla, b) tabakalar arası boşluğun ihmal edilebilir olduğu durumlarda balistik darbe

3.5. Balistik Koruyucu Ölçüm Standardı

Balistik koruyuculuğu ölçmek amacıyla National Institute of Justice (NIJ) ve NATO çeşitli standartlar geliştirmiştir. NIJ 0101.06 standardında kullanılan merminin kalibresi, tipi, ağırlığı ve hızı dikkate alınarak çeşitli koruma seviyeleri tanımlanmıştır. Ayrıca bu konu ile ilgili çeşitli askeri standartlar ve Türk Standartları Enstitüsü tarafından da bir standart hazırlanmıştır. Tablo 3.2.' de uluslararası balistik koruyucu standartlardan bazıları sunulmuştur.

Tablo 3. 2. Uluslararası balistik koruyucu standartları

Standart No	Standart Adı
MIL-STD-662 F	Balistic Test For Armor
NIJ-0101.06	National Institute of Justice
STANAG 2920	Balistic Test Method For Personnel Armor
TS 11164	Balistik Koruyucu Vücut Zırhı
EN1063	Euronorm Standard For Security Glazing

3.5.1. NIJ- 0101.06 ' ya Göre Koruma Seviyeleri

Koruma seviyesi; balistik uygulamalarda kullanılan mermi mühimmatının kalibresi, tipi, ağırlığı, hızı dikkate alınarak belirlenen bir ölçüttür. Tablo 3.3.'de verilen dünyadaki

balistik uygulamalarda değişik özelliklerdeki mermi mühimmatlarının oluşturduğu koruma seviyeleri açıklanmıştır.

Tablo 3. 3. NIJ 0101.06'ya göre koruma seviyelerini belirleyen mermi özellikleri

Koruma Seviyesi	Mermi Tipi	Atış Hızı (m/sn)	Çekirdek Ağırlığı (gr)
Seviye II-A	9 mm FMJ	373 ± 9.1	8
(5m mesafeden)	40 S&W FMJ	352 ± 9.1	11.7
Seviye II	357 Mag. JSP	436 ± 9.1	10.2
(5m mesafeden)	9 mm FMJ	398 ± 9.1	8.0
Seviye III-A	0.44 Mag, JHP	436 ± 9.1	15.6
(5m mesafeden)	9 mm FMJ RN	448 ± 9.1	8.1
Seviye III	7.62 mm NATO	838 ± 9.1	9.6
(15m mesafeden)	FMJ		
Seviye IV	30 kalibre M2 AP	878 ± 9.1	10.8
(15m mesafeden)			

Seviye II-A

Seviye II-A zırhlar, kütlesi 8.0 gr (124 grain) olan ve asgari 373 m/s ± 9.1 m/s (1225 ft/s ± 30 ft/s) hızla etki eden 9 mm tam metal kaplama burunlu mermilere (FMJ RN) ve kütlesi 11.7 gr (180 grain) olan ve 352 m/s ± 9.1 m/s (1155 ft/s ± 30 ft/s) hızla etki eden 40 S&W kalibre tam metal kaplama mermilere (FMJ) karşı korur.

Seviye II

Seviye II zırhlar, kütlesi 8.0 gr (124 grain) olan ve asgari 398 m/s ± 9.1 m/s (1305 ft/s ± 30 ft/s) hızla etki eden 9 mm tam metal kaplama burunlu mermilere (FMJ RN) ve kütlesi 11.7 gr (180 grain) olan ve kütlesi 10.2 g (158 grain) olan ve 436 m/s ± 9.1 m/s (1430 ft/s ± 30 ft/s) hızla etki eden 357 Magnum yumuşak nokta kaplama mermilere (JSP) karşı korur.

Seviye III-A

Seviye III-A zırhlar, kütlesi 8.1 gr (125 grain) olan ve asgari $448 \text{ m/s} \pm 9.1 \text{ m/s}$ ($1470 \text{ ft/s} \pm 30 \text{ ft/s}$) hızla etki eden 357 SIG tam metal kaplama düz burunlu (FMJ FN) ve kütlesi 15.6 g (240 grain) olan ve $436 \text{ m/s} \pm 9.1 \text{ m/s}$ ($1430 \text{ ft/s} \pm 30 \text{ ft/s}$) hızla etki eden 44 Magnum kaplama çukur nokta mermilere (JHP) karşı korur.

Seviye III

Seviye III zırhlar, kütlesi 9.6 gr (148 grain) olan ve asgari $847 \text{ m/s} \pm 9.1 \text{ m/s}$ ($2780 \text{ ft/s} \pm 30 \text{ ft/s}$) hızla etki eden 7.62 mm tam metal kaplama mermilere (FMJ) (A.B.D. Askeri adı M80) karşı korur.

Seviye IV

Seviye IV zırhlar, kütlesi 10.8 gr (166 grain) olan ve asgari $878 \text{ m/s} \pm 9.1 \text{ m/s}$ ($2880 \text{ ft/s} \pm 30 \text{ ft/s}$) hızla etki eden 30 mm zırh delici (AP) mermilere (A.B.D. Askeri adı M2 AP) karşı korur.

4. LİTERATÜR ÖZETİ

Kompozit malzemelerin zırh malzemesi olarak kullanımı bilimsel açıdan çok çalışılan bir konudur. Bu çalışmalardan bazıları incelenecek olursa;

Briscoe ve Motamedi, üç farklı Kevlar kumaş tipinin balistik performansları bakımından sürtünme karakteristiklerini deneysel olarak araştırmıştır. Bu deneyler sonucunda anlaşılmıştır ki, sürtünme derecelerinin artırılmasıyla bağlantılı olarak, hedefi delmek için gerekli hız da artmalıdır. Yüksek sürtünme derecesine sahip olan kumaş, daha fazla enerjiyi absorbe etmektedir [27].

Mines vd., tarafından yapılan çalışmada aynı ağırlıktaki üç farklı geometride vurucu uç kullanılarak, üç farklı tabaka sayısındaki polyester reçine matriksli $\pm 45^\circ$ elyaf dokuma E-cam numunelerin perforasyon esnasında meydana gelen hasar mekanizmaları ve enerji sönümleme kabiliyetleri incelenmiştir. Yapılan deneylerde geniş uç geometrisinin ve yüksek tabaka sayısının absorbe edilen enerji miktarını arttırdığı gözlemlenmiştir [52].

Gellert vd., çalışmalarında aynı çapta ve üç farklı geometrideki çelik vurucu uçlarla, üç farklı sayıda E-cam elyaf dokuma tabakadan oluşan vinylester reçine matriksli farklı kalınlıklardaki kompozit levhalara atış testleri yapmışlardır. Testler sırasında mermi hızı 520 m/sn kadar olan atışlar yapılarak malzeme kalınlığının ve vurucu uç geometrisinin balistik etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada artan malzeme kalınlığı ile absorbe edilen enerji miktarının arttığı ancak kullanmış oldukları çelik vurucu uçların geometrisinin levhaların absorbe ettiği enerji miktarını etkilemediği görülmüştür [23].

Tan vd., tek katmanlı Twaron kumaşının balistik performansı üzerine yaptıkları deneysel çalışmalarında, farklı kalibredeki mermilerle, karşılıklı iki kenarından sıkıştırılmış dikdörtgen kumaş numuneleri üzerinde çarpma testleri yapmışlardır. Çalışmalar neticesinde, gelişmekte olan mermi tipleri ile kumaş arasındaki sürtünmenin, çarpma sırasındaki enerjinin sönümlenmesinde önemli bir mekanizma olduğu görülmüştür [53].

Wagner vd., tarafından yapılan çalışmada silika partikülleri içeren kesici yoğun sıvı akışkanın Kevlar 49 aramid elyafa emdirilmesi ile oluşan kompozit yapının balistik performansı incelenmiştir. Yapılan deneylerde mermi hızının 244 m/sn olduğu testlerde malzeme olumlu balistik dayanım göstermiş, kesici yoğun sıvı akışkanın emdirilmesi ile

kumaş malzemesinin esnekliğinden hiçbir şey kaybetmediği ve balistik dayanımında önemli bir artış olduğu gözlemlenmiştir [54].

Ceyhun ve Turan, yaptıkları çalışmada tabakalı kompozit malzemelerin düşük ve yüksek hızlı darbelere karşı göstermiş olduğu davranışı araştırmıştır. Çalışma sonucunda darbe türünün belirlenmesinde hasar türü ve darbe enerjisinin önemi açıklanmıştır [43].

Naik ve Shrirao, çalışmasında epoksi reçine matriksli, karbon elyaf ve E-cam elyaf takviyeli kompozit yapıların balistik özelliklerini karşılaştırmıştır. Absorbe edilen enerji miktarı ve hasar durumları göz önüne alınarak yapılan karşılaştırmada E-cam elyaf takviyeli kompozit yapının daha iyi koruma sağladığı gözlemlenmiştir [21].

Temiz, yaptığı deneylerde para-aramid ve PBO elyaf dokumalar ile yumuşak bir kompozit yapı, para-aramid ve E-cam elyaf dokumaların epoksi reçine ile sertleştirilmesi sonucu ise sert bir kompozit yapı elde etmiştir. Bu yapıları balistik testler uygulamıştır. Testler sonucunda sert kompozit yapının kullanılan mermilere karşı uygun koruma sağlayamadığı, yumuşak kompozit yapının ise daha yüksek balistik dayanım sergileyerek uygun koruma sağladığını görmüştür [55].

Ozek, hafif silahlara karşı zırh yapımında kullanılan polimer matriksli kompozit malzemelerin mekaniksel özellikleri ve balistik performanslarını ölçmek için deneyler yapmıştır. Bunun için önce deneylerde kullanılacak aramid ve polietilen numuneler hazırlamıştır. Daha sonra bu numunelere çekme deneyi, darbe sönümleme deneyi ve atış poligonunda balistik deneyler yapmış ve elde edilen bulguları incelemiştir [56].

Gustin vd., Kevlar ve karbon fiber kombinasyonlu sandviç kompozit numunelerin çarpma testlerini yapmışlardır. Çarpma yüzeyindeki malzeme değiştirilerek, farklı karbon fiber/Kevlar, karbon fiber/hibrit kombinasyonları elde edilmiştir. Tüm testler boyunca arka yüzeydeki malzeme olarak karbon fiber kullanılmış ve çalışmanın asıl amacı olarak, ön yüzeyde kullanılan karbon fiber yerine, Kevlar yada hibrit kullanıldığında sonuçta bir iyileşme olup olmadığı gözlemlenmiştir. Yine bu çalışmada ara katman olarak poliüretan köpük doldurulmuş Kanadalı Mikor firması tarafından üretilmiş bal peteği yapısı kullanılmıştır. Testler Instron Dynatup 9250 HV cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar neticesinde, ön yüzeyde Kevlar ve hibrit kullanıldığı durumlarda numunenin çarpma dayanımlarında, karbon fibere oranla yaklaşık %10 artış gözlemlenmiştir [57].

Hosur vd., yaptıkları çalışmada dört farklı kombinasyonlu hibrit kompozit tabakalara düşük hızlı darbeler uygulamışlardır. Hibrit kompozit tabakalar, epoksi reçine vakumlu kalıp

kullanılarak çapraz örgü karbon kumaş ve düz örgü cam kumaş kullanılarak üretilmiştir. Sonuç olarak, hibrit kompozit malzemelerin karbon/epoksi tabakalı malzemeye göre rijitliğinde azalma, yük taşıma kabiliyetinde artma olduğu grlmştir [58].

Salehi - Khojin vd. tarafından yapılan çalışmada tabakalı Kevlar/cam elyaf hibrit kompozit malzemelere değişik sıcaklıklarda ve düşük darbeler uygulamışlardır. Absorbe edilen enerjinin sabit ve sıcaklıktan bağımsız olduğu ve darbe enerjisinin artmasıyla absorbe edilen enerjinin sıcaklığa daha fazla bağımlı olduğu ve maksimum çökmenin ise darbe enerjisi veya sıcaklığın artmasıyla arttığı sonuçlarına ulaşmışlardır [59].

Caprino, çalışmasında, farklı kalınlıklarda 4 adet epoksi/grafit dikiş katmanı yüksek hızlı darbe testine maruz bırakmıştır. Darbe mühimmatı olarak biri 12.7 mm ' lik birisi 20 mm ' lik iki tip elik küre şekilli mühimmat kullanmıştır. Darbe testleri 129 m/sn ve 65 m/sn hızlarla yapılmıştır. Yapılan testlerde az sayıdaki numunede delinme olduğu ve diğer numunelerde ise darbe mühimmatının geri teptiği ve delinme olmadığı gözlenmiştir. Beklendiği gibi delinme enerjisi panel kalınlığı ve mermi çapının artmasıyla artmaktadır [60].

Candan, aynı tabaka sayısına sahip preslenerek ve preslenmeden imal edilen yüksek moleküler yoğunluklu polietilen plakaların üretim aşamalarını, uygulanan balistik test yöntemlerini ve hasar bölgesinin görüntülenmesini terminal balistik olarak incelemiştir. Balistik testlerde kullanılan deney numunelerinin üretim aşamaları hammadde aşamasından nihai mamul haline gelene kadar takip edilmiştir. Yapılan balistik testler sonucunda preslenerek üretilen zırh plakalarında mermi hızı ortalama değerinin preslenmeden üretilen zırh plakalarında elde edilen mermi hızı ortalama değerine göre %22 daha yüksek olmasına ve preslenerek üretilen zırh plakalarının preslenmeden üretilen zırh plakalarından daha hafif olmasına rağmen preslenerek üretilen zırh plakalarının preslenmeden üretilen zırh plakalarından balistik testlerde daha başarılı olduğu ve preslenerek üretilen zırh plakalarında elde edilen ortalama çöküntü değerinin, preslenmeden üretilen zırh plakalarında elde edilen ortalama çöküntü değerinden %65 daha küçük olduğu grlmştir [61].

Karahan vd., farklı kat adedinden oluşan koruyucu zırh kumaşlarının balistik performansı ile ilgili araştırma sonuçlarını incelemiştir. Twaron CT 170 tip kumaş katmanları farklı sayılarda ve farklı dikiş tipleri ile birleştirilmiş ve panel oluşturulmuş, bu paneller NIJ standartlarına göre yapılan balistik testlerden geirilmif, balistik performansı, atış sonrası koruyucu panel arkasında oluşan çöküntü derinliği ve çöküntü çapının ölçülmesi

ile belirlenmiştir. Bu testler tabaka kalınlığı ile dikiş tiplerinin balistik performans üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu, dikişin daha yoğun kullanıldığı yapılardaki çöküntü miktarlarında diğerlerine göre % 6.7 oranında azalma olduğunu göstermiştir [62].

Bilişik ve Turhan tarafından yapılan çalışmada Kevlar 29 elyaf dokuma ile tek fazlı ve Kevlar 29 ile Kevlar 129 elyaf dokumalarla iki fazlı olarak oluşturdukları toplam dört çeşide ait dikişsiz ve dikişli kompozit numuneler üretilmiştir. Bu kompozit numunelerin beş farklı mermi cinsine karşı balistik performansı araştırılmıştır. Yaptıkları çalışmada absorbe edilen enerji yönünden dikişli ve dikişsiz numuneler arasında belirgin bir fark bulunmadığı, ancak çöküntü miktarının dikişli yapılarda daha fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır [63].

Yavaş, takviye elemanı olarak E-cam elyaf, cam yünü, cam keçe ve aramid elyaf kullandığı polyester reçine matriksli hibrit kompozit numunelerin hafif silahlara karşı balistik performansını incelemiştir. Aramid elyaf, cam elyaf ve cam yünü kullanılan hibrit numunelerin balistik testlerde başarı gösterdiği tespit edilmiştir [64].

Yu vd. tarafından yapılan çalışmada takviye elemanı olarak üç boyutlu ortogonal dokuma Kevlar 29 ile yine aynı yapıda E-cam kullanarak vinylester reçine matriksle numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler ile yapılan deneysel çalışmalarda numunelere 5 mm çapında çelik küre ile 600 m/sn ile 1050 m/sn arasındaki hızlarda atışlar yaparak numunelerin balistik özellikleri araştırılmıştır. Çalışmalarda çelik kürenin kinetik enerjisinin büyük miktarını her iki numune cinsinde de Z eksenindeki fiberlerin absorbe ettiğini, Kevlar 29 takviyeli numunelerin daha fazla enerji absorbe edebildikleri gözlemlenmiştir [65].

Buitreggo vd., E-cam elyaf takviye ve polyester reçine matriks malzemelerden üretilen üç farklı kalınlıktaki monolitik ve katmanlı numunelerin balistik özelliklerini, hasar durumunu ve balistik limit değerini araştırmışlardır. Çalışmalarında 7.5 mm çapında ve 1.7 gr ağırlığındaki çelik küre ile 80 - 780 m/sn arasındaki hızlarda atışlar yapmışlardır. Deney sonucu olarak daha kalın numunelerin daha yüksek balistik limite, daha geniş ve büyük hasar alanına sahip olduğu tespit edilmiştir [66].

García-Castillo vd., polimer matriksli E-cam elyaf numunelere 200 m/sn – 510 m/sn arasında değişen farklı hızlarda aynı çapta çelik kürelerle atış yaparak, geometri ve yoğunluk oranlarındaki değişimin numunelerin balistik dayanımını nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmanın sonucunda numunelerin geometri ve yoğunluk oranlarındaki artışın balistik dayanımın artmasına neden olduğunu ve bu oranlardaki değişimlere bağlı olmaksızın balistik dayanımın altındaki hızlarda fiber kopması, balistik dayanımın

üzerindeki hızlarda ise koni formasyonunun temel enerji absorpsiyon mekanizmaları olduğunu gözlemlemişlerdir [67].

Ramadhan vd., nitrojen gaz silahı kullanarak, kompozit lamine plakaların çarpma davranışları üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Testlerde malzeme olarak Kevlar 29 fiber /epoksi reçine ve 6061-T6 alüminyum plakalar kullanılmıştır. Silindirik şekilli 7.62 mm çaplı çelik mermi 180-400 m/s hız değerlerinde kullanılarak çarpma testleri uygulanmıştır. Hedef malzeme tarafından absorbe edilen enerji değeri deneysel çalışma arasındaki kıyaslamayı görmek üzere sayısal olarak elde edilmiştir. Alüminyum plakanın her diziliş şekli (ön, orta, arka) için testler tekrarlanmıştır. Alüminyumun arkada olduğu durumda, çarpma yüklemelerine dayanıklı bir sonuç elde edilmiştir [68].

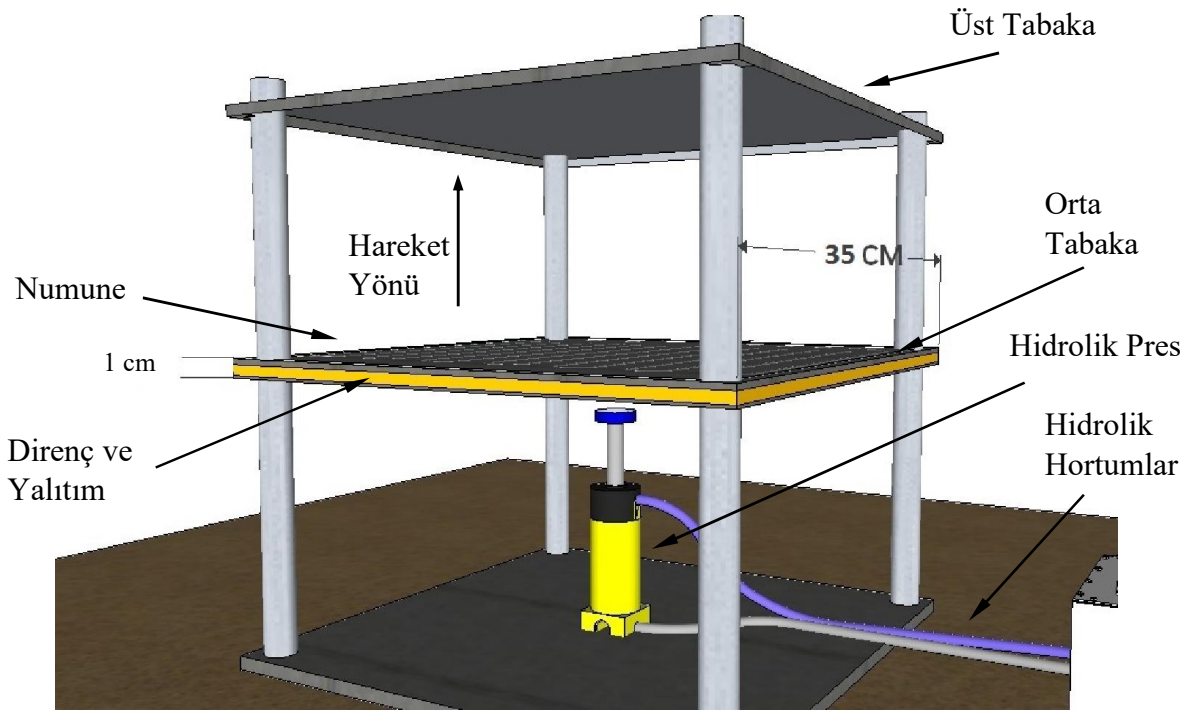
Özgültekin tarafından yapılan çalışmada aramid elyaf, karbon elyaf ve epoksi reçine ile takviye edilmiş polipropilen bal peteği yapısı ve yine epoksi reçine ile tabakalandırılmış çelik elek teli kullanılarak üretilen kompozitlerin balistik dayanımları incelenmiştir. Balistik testler sonucunda kevlar tabakasının en arkada olduğu kombinasyonlarda, esnek yapısı itibari ile başarısız olduğu, sert tabakayı delen mermi, kevlar tabakası herhangi bir tabaka ile desteklenmediği için rahatça geçerek numunelerin başarısız olmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Kombinasyonlarda üç katman kullanılmasının daha uygun sonuçlar verdiği nitekim kevlar tabakasının ara katman olarak kullanıldığı numunelerin mermiyi tutma başarısı gösterdiği gözlemlenmiştir [2].

Yılmaz tarafından yapılan çalışmada SB21 polietilen fiber malzeme ile düzlem dokumalı E-cam ve Kevlar 129 elyaflardan çok fazlı, tabakalı ve epoksi reçine matriksli olarak el yatırma yöntemiyle üretilen levhaların balistik testleri yapılmıştır. Yapılan balistik testler sonunda balistik koruma seviyesi için [Ecam (10x3 kat)/ Kevlar 129 (15 kat)/ SB21 (15 kat)] numunesinin ağırlık ve kalınlık yönünden optimum sonuç olduğu ortaya çıkmıştır. Numunelerin el yatırma ve el presi ile yapılan üretimine bağlı olarak balistik testlerde ortaya çıkan tabakalar arası ayrılma oluşumunun giderilmesi ve daha yüksek mermi hızlarına karşı balistik dayanım elde edilebilmesi için daha yüksek basınçlı presleme yöntemi kullanılarak numune üretimi yapılması gerektiği tespit edilmiştir [69].

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Hidrolik Pres Tasarımı ve Üretimi

Tez çalışması kapsamında tabakalı hibrit kompozit numune üretiminin gerçekleştirilebilmesi için 1 adet hidrolik pres tasarlanmış ve imal edilmiştir. Tasarlanan hidrolik prese ait çizim Şekil 5.1. de verilmiştir.



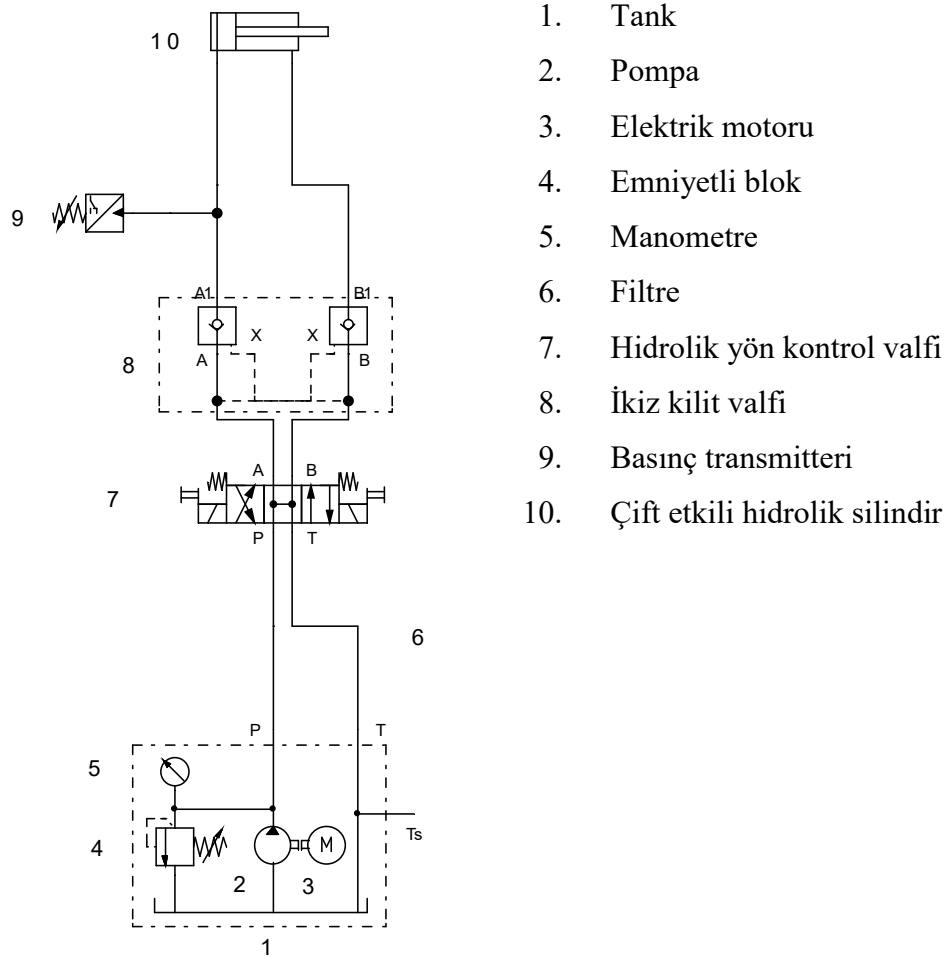
Şekil 5. 1. Hidrolik presin katı modeli

Bu deney cihazında kuvvet uygulama görevi hidrolik sistem tarafından yerine getirilmektedir. Deney numunelerinin balistik dayanımını artırmak amacıyla yüksek sıcaklığa dayanıklı polyester reçine kullanılmıştır. Bu polyester reçinenin kürleme işlemi sırasında sıcaklığının 20 C° den başlanarak 110 C° ye kadar 4 saat içinde kademeli olarak artırılması gerekmektedir. Bu sebeple hidrolik pres, sıcaklığı kontrollü olarak ayarlanabilecek şekilde tasarlanmıştır. Hidrolik presin sıcaklığı 110°C 'ye kadar artırılabilir. Hidrolik prese ait teknik özellikler Tablo 5.1. 'de verilmiştir.

Tablo 5. 1. Hidrolik presin teknik özellikleri

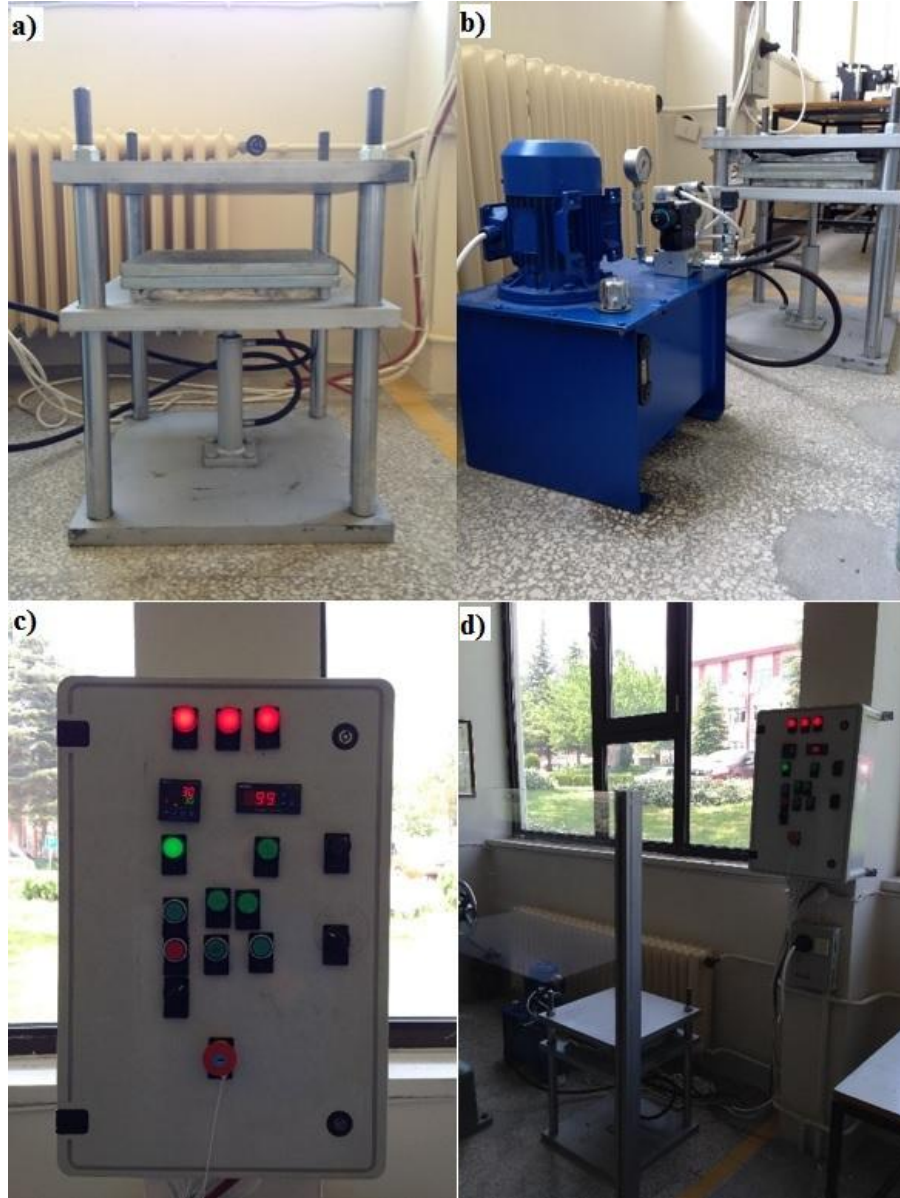
Maksimum Kuvvet	3 ton
Maksimum Basınç	250 bar
Motor Gücü	0.75 kW
Debi	2 lt/dk
Pompa Devri	1500 dev/dk
Piston Çapı	40 mm
Piston Stroku	120 mm
Piston Mili Çapı	25 mm
Piston Hızı	20 mm/sn

Cihazın hidrolik sistemi; bir elektrik motoru, hidrolik pompa, filtre, ikiz kilit valfi, hidrolik yön kontrol valfi, manometre, basınç transmitteri, valfler arasında akışkan transferinin gerçekleştirildiği blok ve çift etkili hidrolik silindirden oluşmaktadır. Hidrolik prese ait sistem şeması Şekil 5.2. de verilmiştir.



Şekil 5. 2. Hidrolik prese ait sistem şeması

Hidrolik presin kontrolü, bir elektronik kontrol ünitesi ile yapılmaktadır. Sistemin kontrol ünitesinde sıcaklık ve basınç kontrol cihazlarından faydalanılmıştır. Presin istenilen sıcaklık ve basınç aralığında tutulması bu kontrol cihazları yardımıyla sağlanmaktadır. Tasarımı yapılan ve Hidrel Hidrolik Elemanlar San. ve Tic. A.Ş. tarafından üretilen hidrolik prese ait resimler Şekil 5.3. de verilmiştir.



Şekil 5. 3. Hidrolik prese ait resimler a) Ana gövde b) Elektrikli motor c) Kontrol ünitesi d) Sistem genel görünümü

5.2. Kompozit Numunelerinin Üretimi

Bu tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmada kullanılan 8 adet tabakalı hibrit kompozit plaka Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Mekanik Laboratuvarında üretilmiştir. Tabakalı hibrit kompozit plaka numunelerinin üretimi için elle yatırma yöntemi kullanılmıştır.

Deneylerde dokuz farklı takviye malzemesi kullanılmıştır. Kullanılan bu takviye malzemelerinin özellikleri Tablo 5.2. de verilmiştir.

Tablo 5. 2. Deneyde kullanılan takviye malzemeleri

Sıra	Malzeme Adı	Türü	Kütlesi
1	Karbon Elyaf	Dikişli 0°	300 gr/m ²
2	Karbon Elyaf	Dikişli 45°	400 gr/m ²
3	Karbon Elyaf	Dokuma Plain	200 gr/m ²
4	Karbon Elyaf	Dokuma Twill	245 gr/m ²
5	Cam Elyaf	Dikişli 0°	300 gr/m ²
6	Cam Elyaf	Dikişli 45°	460 gr/m ²
7	Cam Elyaf	Dokuma Plain	200 gr/m ²
8	Cam Elyaf	Dokuma Twill	282 gr/m ²
9	Kevlar 49 Aramid Elyaf	Dokuma Plain	410 gr/m ²

Tabakalı hibrit kompozitlerin üretiminde matriks malzemesi olarak balistik dayanımı artırmak amacıyla yüksek sıcaklığa dayanıklı polyester reçine ve sertleştirici kullanılmıştır. Kullanılan polyester reçine ve sertleştiricinin özellikleri Tablo 5.3. ve Tablo 5.4. de verilmiştir.

Tablo 5. 3. Deneylerde kullanılan Hexion MGS L326 marka polyester reçinenin özellikleri

Çalışma Sıcaklığı	-60°C / +150°C
Özellikleri	Yüksek ısı mukavemeti, çok iyi mekanik ve ısı özellikler 1.5 saatten 5 saate kadar çalışma süresi
Yoğunluk (gr/cm ³)	1.14-1.19
Vizkosite (mPa·s)	5000-7000
Elastisite Modülü (kN/mm ²)	3.2-3.5
Kopma Uzaması (%)	5.0-6.5

Tablo 5. 4. Deneylerde kullanılan Hexion H265 marka sertleştiricinin özellikleri

Yoğunluk (gr/cm ³)	0.91-0.93
Vizkosite (mPa·s)	10-20

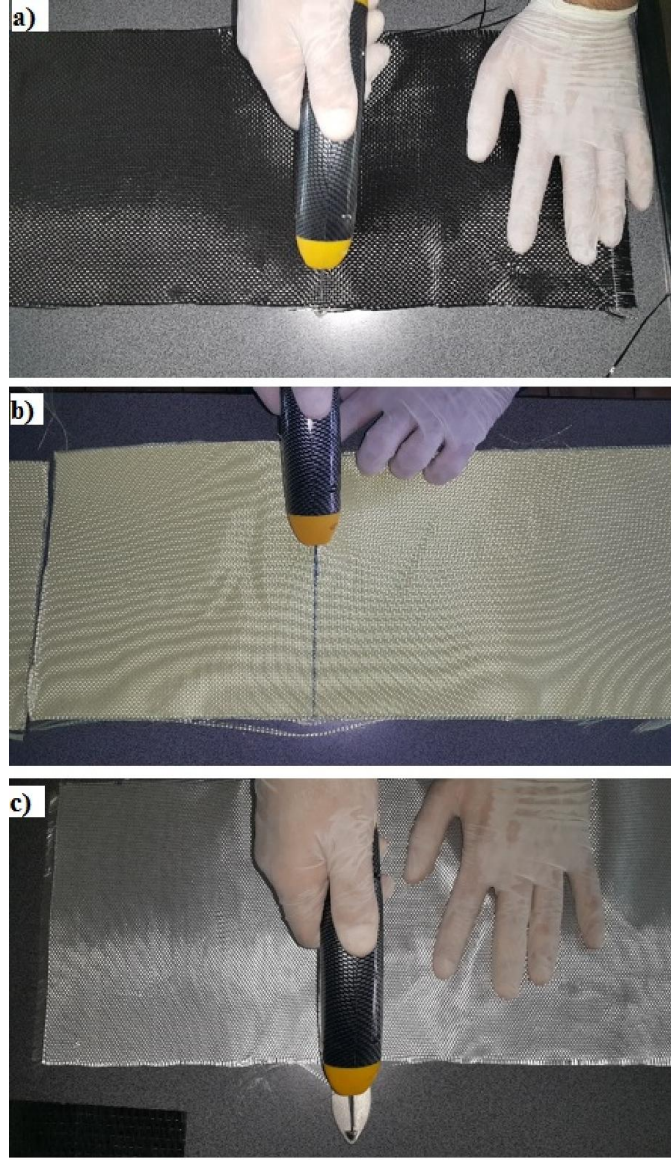
Deneylerde kullanılan Hexion MGS L326 marka polyester reçine ve Hexion H265 marka sertleştiricinin karışım oranları Tablo 5.5. de verilmiştir.

Tablo 5. 5. Hexion MGS L326 marka polyester reçine ve Hexion H265 marka sertleştiricinin karışım oranları

Ağırlıkça	100 : 25 +- 2/100 : 35+-2
Hacimce	100 : 30 +- 2/100 : 42+-2

5.2.1. Elle Yatırma Yöntemi ile Kompozit Üretimi

Gerçekleştirilen çalışmada kullanılan tabakalı hibrit kompozit numunelerin üretimi için elle yatırma yöntemi kullanılmıştır. Numunelerin üretim aşamaları aşağıda verilmiştir. Üretime başlamadan önce kumaşlar (200x200) mm² ölçülerinde kesilmiştir (Şekil 5.4.). Kumaş kesimi çok hassas yapılması gerektiğinden bu iş için Şekil 5.5. de fotoğrafı verilen Robuso marka elektrikli fiber malzeme kesme makas seti kullanılmıştır.



Şekil 5. 4. Kumaş kesilmesi a) Karbon elyaf kesimi b) Aramid elyaf kesimi
c) Cam elyaf kesimi



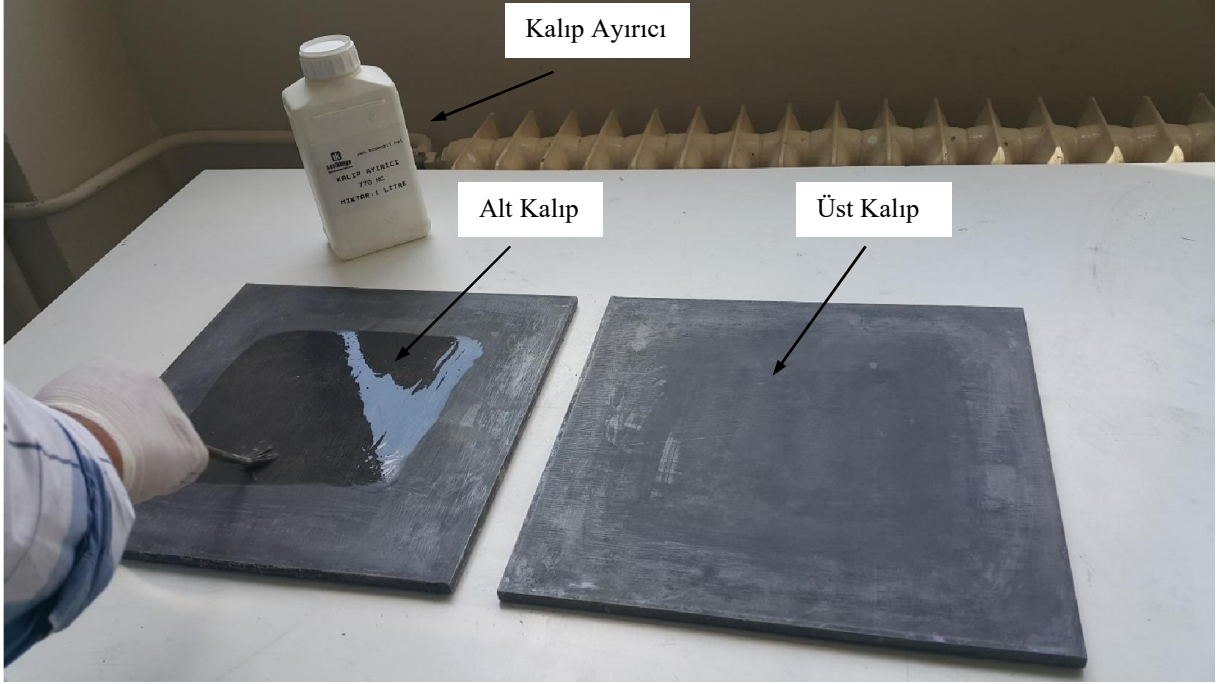
Şekil 5. 5. Robuso elektrikli fiber malzeme kesme makas seti

Hassas terazinin kalibrasyonu yapılmış ve kesilen kumaşlar Radwag marka hassas terazi kullanılarak tartılmıştır (Şekil 5.6.).



Şekil 5. 6. Terazinin kalibrasyonun yapılması ve kesilen kumaşların tartılması

Alt ve üst kalıp raspa ve zımpara yardımıyla temizlendikten sonra bir fırça yardımıyla 770 NC marka kalıp ayırıcı sürülmüş ve kuruması için beklemeye alınmıştır (Şekil 5.7.).



Şekil 5. 7. Kalıp ayırıcı uygulanması

MGS L326 polyester reçine ve H265 sertleştirici 4 birim reçine için 1 birim sertleştirici olacak şekilde karışım oranları ayarlanarak hazırlanmıştır. Karışım oranlarının doğru belirlenebilmesi için Radwag marka hassas terazi kullanılmıştır (Şekil 5.8.).



Şekil 5. 8. Karışımın hazırlanması

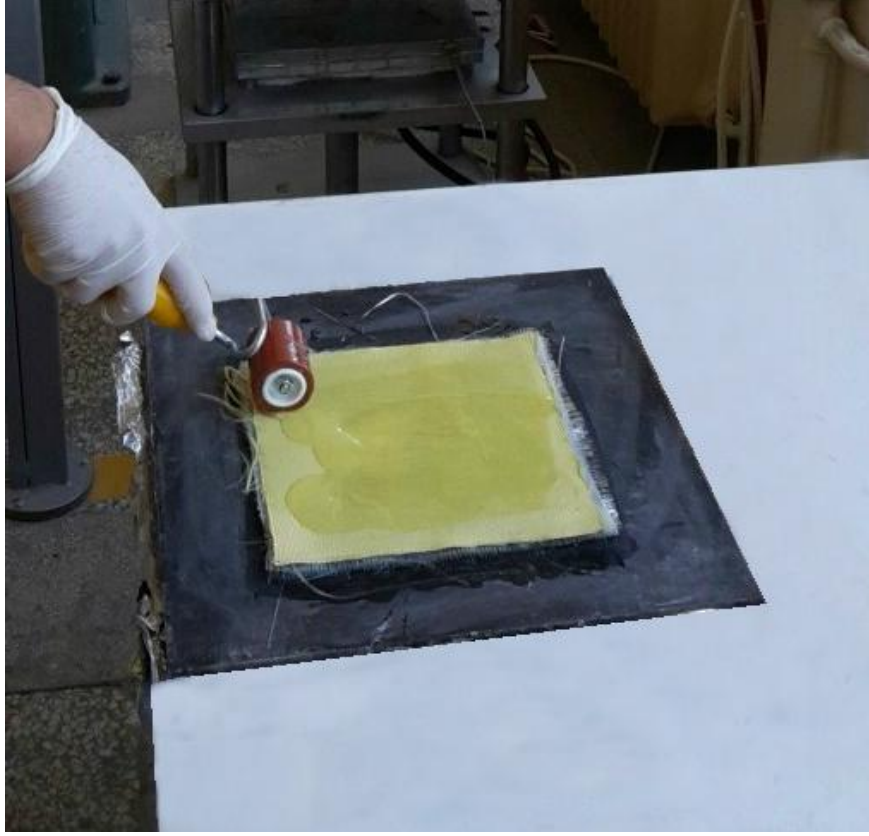
Alt kalıba bir miktar polyester reçine ve sertleştirici karışımı dökülerek rulo yardımıyla kalıba yayılmıştır. Kalıp içerisine (200x200)mm ölçülerinde kesilen kumaşlardan numune düzenine göre seçilen ilk kat serilerek üzerine polyester karışım dökülmüş ve rulo yardımıyla kumaşa eşit bir şekilde dağılması sağlanmıştır (Şekil 5.9.).



Şekil 5. 9. İlk kat kumaşın serilmesi

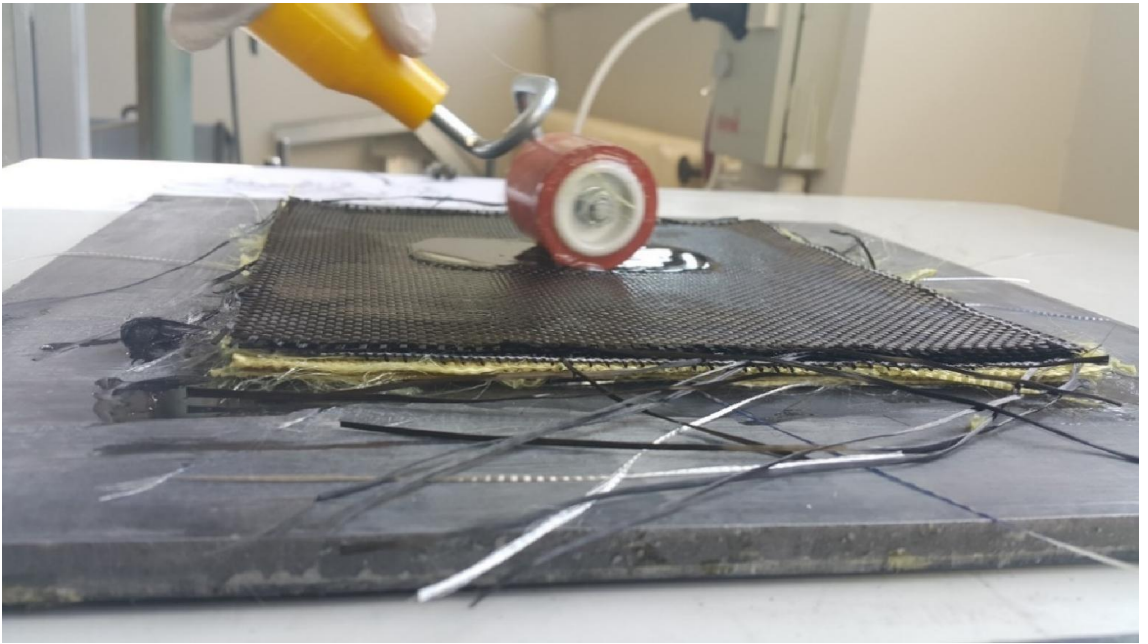
Bir kat daha kumaş serilerek yeniden polyester karışım dökülmüş ve kumaşın polyesterle iyice ıslanması ve hava boşluklarının uzaklaştırılabilmesi için rulo yardımıyla yayılmıştır.

Numune için hazırlanan tüm kumaşlar için bu işlemler tekrarlanmıştır (Şekil 5.10.).



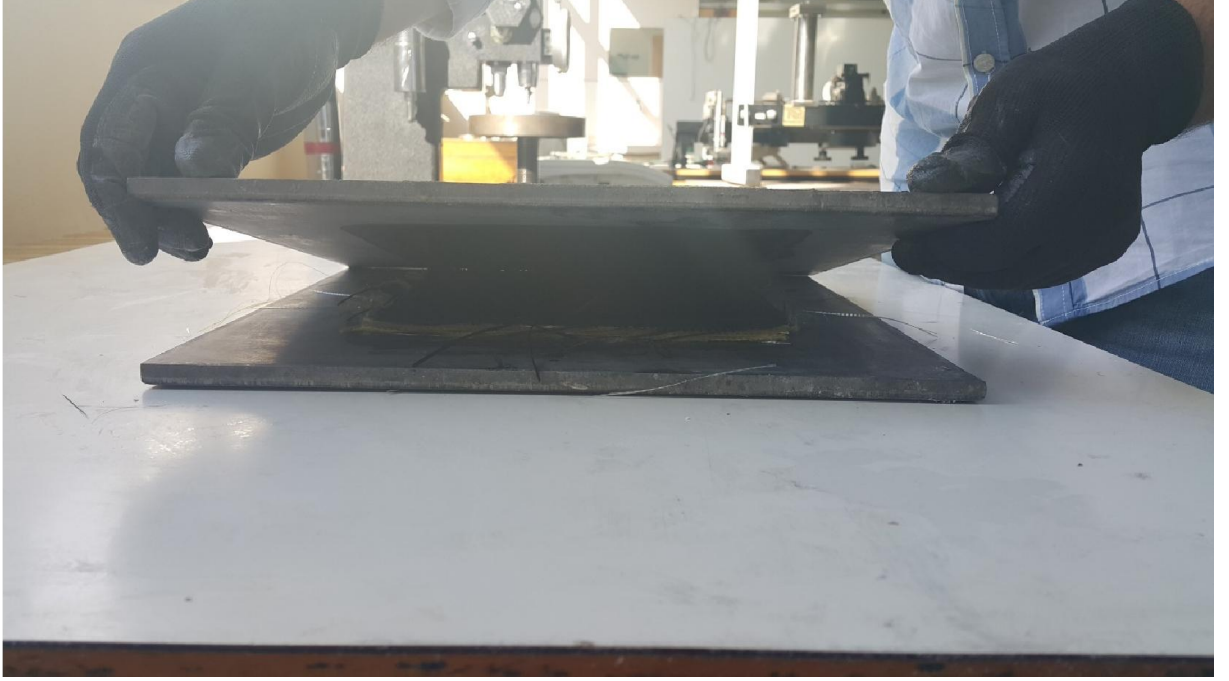
Şekil 5. 10. Numune üretiminde kullanılan kumaşların serilmesi ve reçine sürülmesi

Son kat kumaş serilerek üzerine bir miktar polyester karışımı dökülmüş ve rulo yardımıyla iyice yayılması sağlanmıştır (Şekil 5.11.).



Şekil 5. 11. Son katın serilmesi

Bütün kumaşlar serildikten ve polyester karışımı en uestede sürüldükten sonra üst kalıp kapatılmıştır (şekil 5.12.).



şekil 5. 12. Üst kalıbın kapatılması

Kalıp hidrolik prese koyulmuş ve tüm numuneler 30 bar basınçta preslenmiştir (şekil5.13.). Presleme işlemi sırasında sıcaklık 20 C° 'den başlanarak sırasıyla 50 C°, 80 C° ve 110 C° 'ye çıkartılmıştır. Her sıcaklıkta 1 saat bekletilerek kütleme işlemi yapılmıştır.



Şekil 5. 13. Presleme işlemi

Kürleme işleminden sonra kalıbın presin içinde oda sıcaklığına kadar soğuması beklenmiş ve daha sonra kalıptan çıkarılmıştır (Şekil 5.14.).



Şekil 5. 14. Kalıptan çıkan ürün

5.3. Kompozit Numunelerin Konfigürasyonu

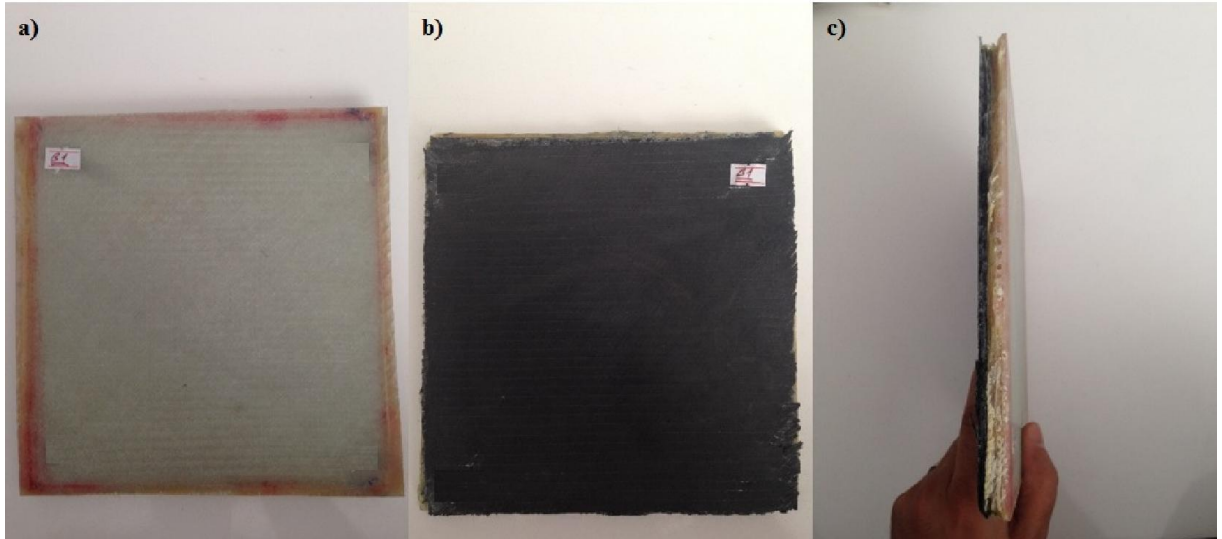
Deneylerde kullanılmak üzere 8 adet tabakalı hibrit kompozit üretilmiştir. Bu hibrit kompozitlerin üretiminde takviye malzemesi olarak 4 tanesinde 30 kat geri kalan 4 tanesinde ise 21 kat elyaf kumaş kullanılmıştır. Matriks malzemesi olarak ise yüksek sıcaklığa dayanıklı ve güçlü mukavemet özellikleri olan polyester reçine kullanılmıştır.

5.3.1. [Karbon₁₀/Aramid₁₀/Cam₁₀] 30 Tabakalı Hibrit Polyester Reçine Matriksli Numuneler

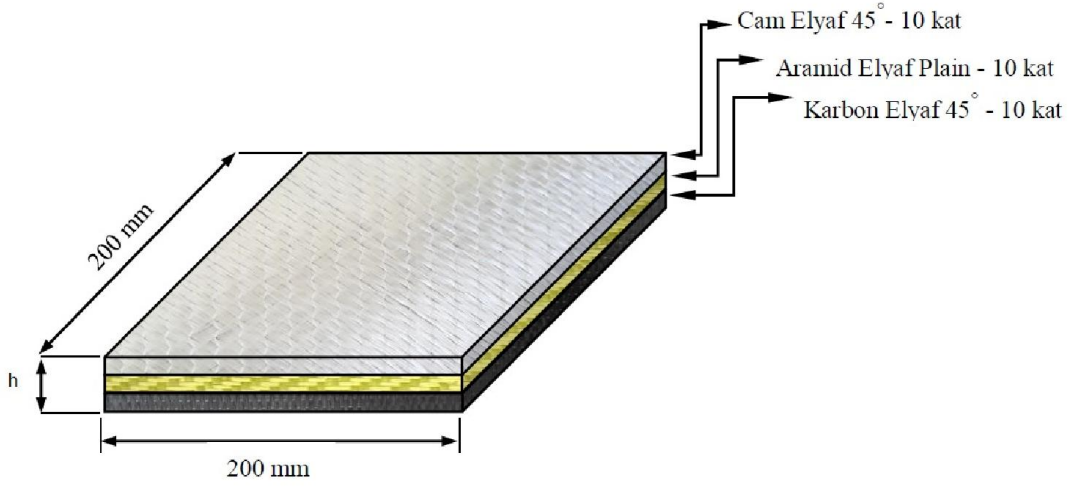
Deneylerde kullanılan 30 katlı numunelerde 0°, 45°, plain ve twill olmak üzere 4 farklı kumaş tipinde 10 kat Cam elyaf, 0°, 45°, plain ve twill olmak üzere 4 farklı kumaş tipinde 10 kat Karbon elyaf ve 10 kat Kevlar 49 Aramid elyaf kullanılmıştır.

5.3.1.1. [Karbon(45°)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(45°)₁₀] 30 Tabakalı Hibrit Polyester Reçine Matriksli Numune

Şekil 5.15. 'de fotoğraflarda gösterilen [Karbon(45°)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(45°)₁₀] 30 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numunenin yapı şeması Şekil 5.16. da verilmiştir.



Şekil 5. 15. Karbon(45°)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(45°)₁₀ 30 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numune a) ön görünüş b) arka görünüş c) kesit görünüş



Şekil 5. 16. Karbon(45°)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(45°)₁₀ 30 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numunenin yapı şeması

B1 adlı bu numuneye ait malzeme özellikleri aşağıda verilmiştir.

m_e (gr) : numunenin elyaf kütlesi	v_t (cm ³) : numunenin toplam hacmi
m_m (gr) : numunenin matriks kütlesi	ρ_e (gr/cm ³) : elyaf yoğunluğu
m_t (gr) : numunenin toplam kütlesi	ρ_m (gr/cm ³) : matriks yoğunluğu
v_e (cm ³) : numunenin elyaf hacmi	ρ_t (gr/cm ³) : numunenin yoğunluğu
v_m (cm ³) : numunenin matriks hacmi	h (mm) : numunenin kalınlığı

$$\rho_t = \frac{m_t}{v_t} \quad (5.1)$$

m_t : 818 gr

m_e : 526.05 gr

Üretim öncesince kumaşların ağırlıkları ölçülmüştür. Üretim sonrası numune ağırlığından bu ağırlık çıkarılarak numunenin matris ağırlığı tespit edilmiştir.

m_m : 291.95 gr

h : 13 mm

v_t : 20 cm x 20 cm x 1.3 cm = 520 cm³ 'dir. Buna göre numunenin yoğunluğu

$$\rho_t = \frac{m_t}{v_t} = \frac{818}{520} = 1,57 \text{ gr/cm}^3 \text{ olarak hesaplanır. Tablo 5.3 ve 5.4 'e göre}$$

ρ_m : 1.11 gr/cm³ 'dir. Numunenin matriks hacmi

$$v_m = \frac{m_m}{\rho_m} = \frac{291.95}{1.11} = 263.02 \text{ cm}^3 \text{ 'dir. Elyaf hacmi ise}$$

$$v_e = v_t - v_m = 520 - 263.02 = 256.98 \text{ cm}^3 \text{ olarak bulunur. Elyaf yoğunluğu ise}$$

$$\rho_e = \frac{m_e}{v_e} = \frac{526.05}{256.98} = 2.05 \text{ gr/cm}^3 \text{ 'dir.}$$

Bu hesaplamalar sonucunda numunenin:

Elyaf ağırlık yüzdesi: %64.31

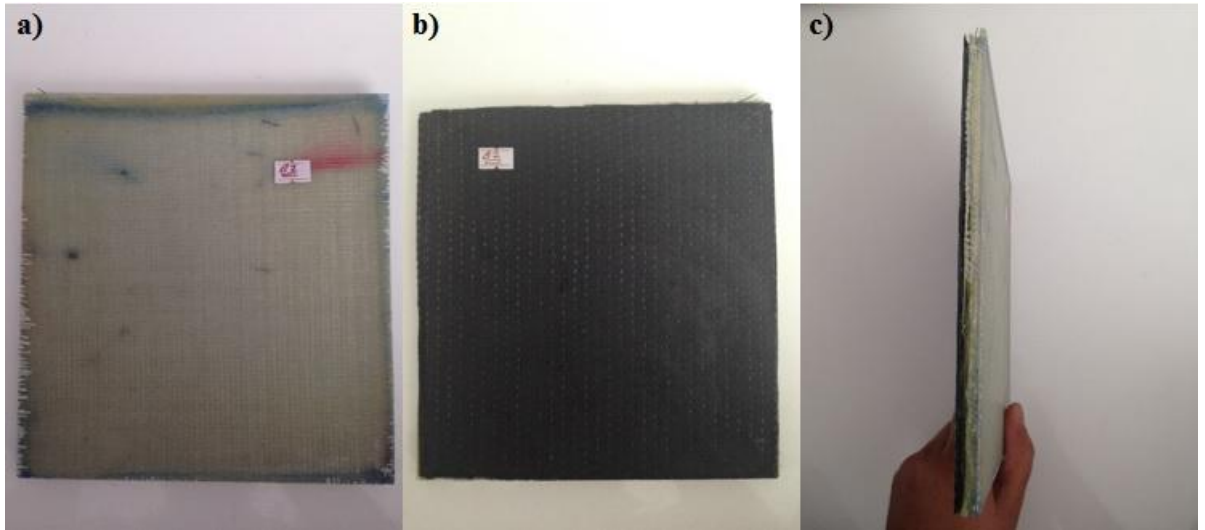
Elyaf hacim yüzdesi: %49.42

Matriks ağırlık yüzdesi: %35.69

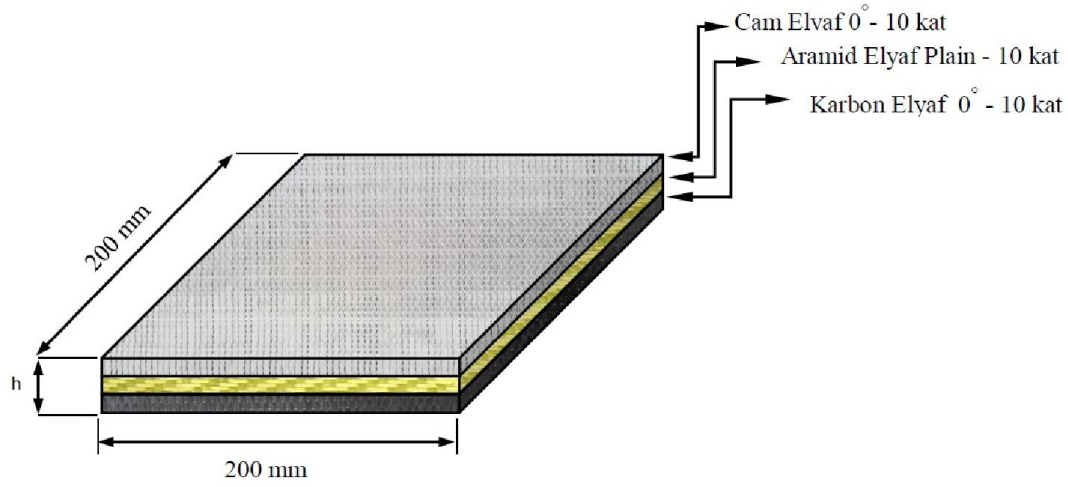
Matriks hacim yüzdesi: %50.58 olarak belirlenmiştir.

5.3.1.2. [Karbon(0°)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(0°)₁₀] 30 Tabakalı Hibrit Polyester Reçine Matriksli Numune

Şekil 5.17. 'de fotoğraflarda gösterilen [Karbon(0°)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(0°)₁₀] 30 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numunenin yapı şeması Şekil 5.18. de verilmiştir.



Şekil 5. 17. [Karbon(0°)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(0°)₁₀] 30 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numune
a) ön görünüş b) arka görünüş c) kesit görünüş



Şekil 5. 18. [Karbon(0°)10/Aramid(Plain)10/Cam(0°)10] 30 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numunenin yapı şeması

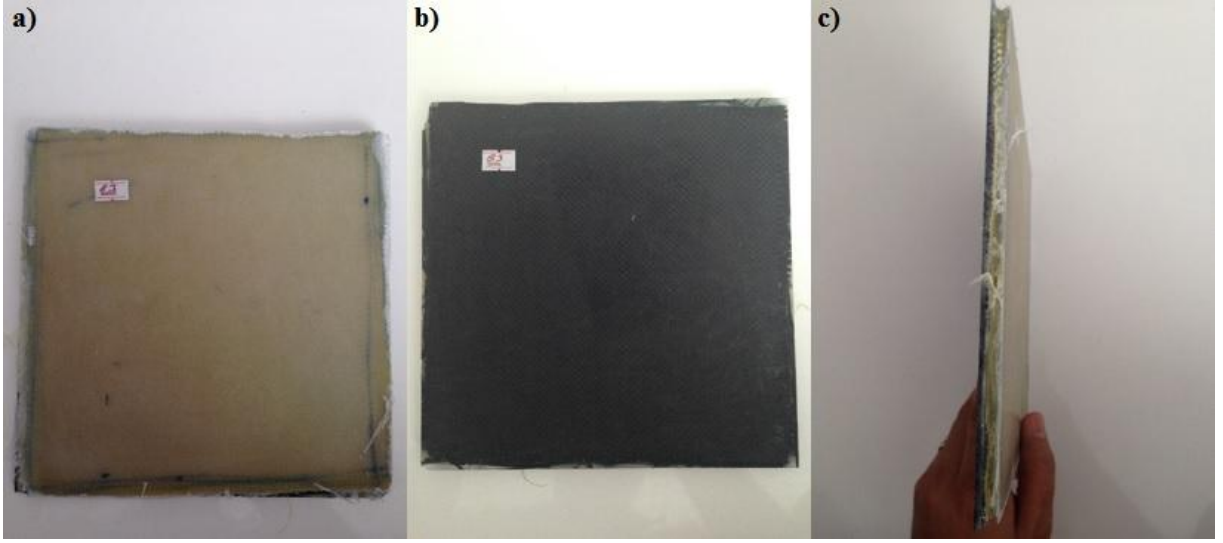
B2 adlı bu numuneye ait malzeme özellikleri Tablo 5.6.' da verilmiştir.

Tablo 5. 6. B2 numunesine ait malzeme özellikleri

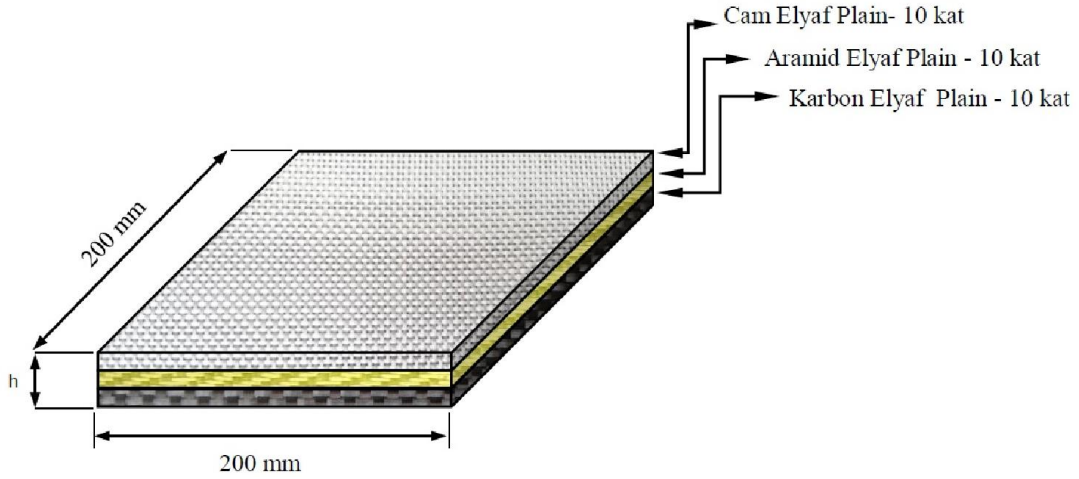
m_t (gr)	656 gr	v_t (cm ³)	440 cm ³	ρ_t (gr/cm ³)	1.49 gr/cm ³
m_e (gr)	417.77 gr	v_e (cm ³)	225.38 cm ³	ρ_e (gr/cm ³)	1.85 gr/cm ³
m_m (gr)	238.23 gr	v_m (cm ³)	214.62 cm ³	ρ_m (gr/cm ³)	1.11 gr/cm ³
h (mm)	11 mm				
Elyaf ağırlık yüzdesi		% 63.68	Matriks ağırlık yüzdesi		% 36.32
Elyaf hacim yüzdesi		% 51.22	Matriks hacim yüzdesi		% 48.78

5.3.1.3. [Karbon(Plain)10/Aramid(Plain)10/Cam(Plain)10] Plain 30 Tabakalı Hibrit Polyester Reçine Matriksli Numune

Şekil 5.19. 'da fotoğraflarda gösterilen [Karbon(Plain)10/Aramid(Plain)10/Cam(Plain)10] 30 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numunelerin yapı şeması Şekil 5.20. 'de verilmiştir.



Şekil 5. 19. [Karbon(Plain)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(Plain)₁₀] plain 30 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numune a) ön görünüş b) arka görünüş c) kesit görünüş



Şekil 5. 20. [Karbon(Plain)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(Plain)₁₀] plain 30 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numunenin yapı şeması

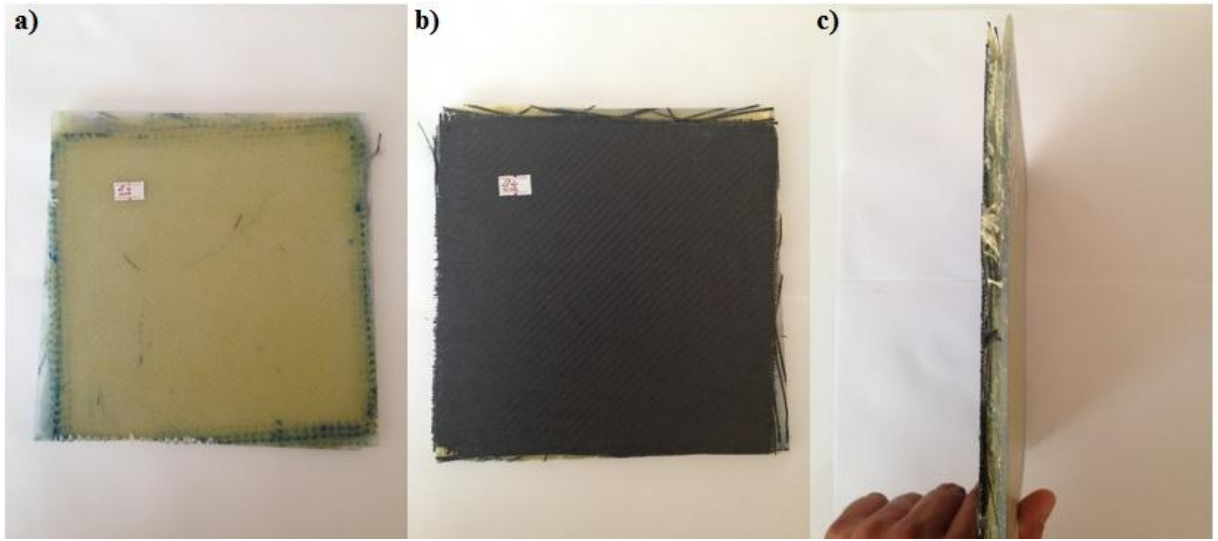
B3 adlı bu numuneye ait malzeme özellikleri Tablo 5.7.' de verilmiştir.

Tablo 5. 7. B3 numunesine ait malzeme özellikleri

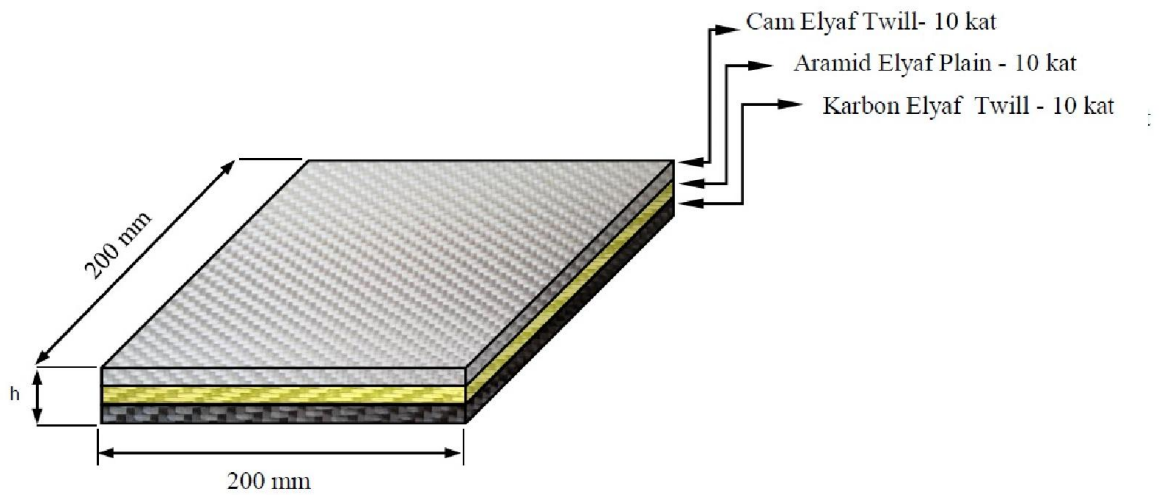
m_t (gr)	550 gr	v_t (cm ³)	360 cm ³	ρ_t (gr/cm ³)	1.53 gr/cm ³
m_e (gr)	321.21 gr	v_e (cm ³)	153.88 cm ³	ρ_e (gr/cm ³)	2.09 gr/cm ³
m_m (gr)	228.79 gr	v_m (cm ³)	206.12 cm ³	ρ_m (gr/cm ³)	1.11 gr/cm ³
h (mm)	9 mm				
Elyaf ağırlık yüzdesi	% 58.40	Matriks ağırlık yüzdesi		% 41.60	
Elyaf hacim yüzdesi	% 42.75	Matriks hacim yüzdesi		% 57.25	

5.3.1.4. [Karbon(Twill)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(Twill)₁₀] 30 Tabakalı Hibrit Polyester Reçine Matriksli Numune

Şekil 5.21. 'de fotoğraflarda gösterilen [Karbon(Twill)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(Twill)₁₀] 30 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numunenin yapı şeması Şekil 5.22. 'de verilmiştir.



Şekil 5. 21. [Karbon(Twill)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(Twill)₁₀] 30 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numune a) ön görünüş b) arka görünüş c) kesit görünüş



Şekil 5. 22. [Karbon(Twill)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(Twill)₁₀] 30 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numunenin yapı şeması

B4 adlı bu numuneye ait malzeme özellikleri Tablo 5.8.' de verilmiştir.

Tablo 5. 8. B4 numunesine ait malzeme özellikleri

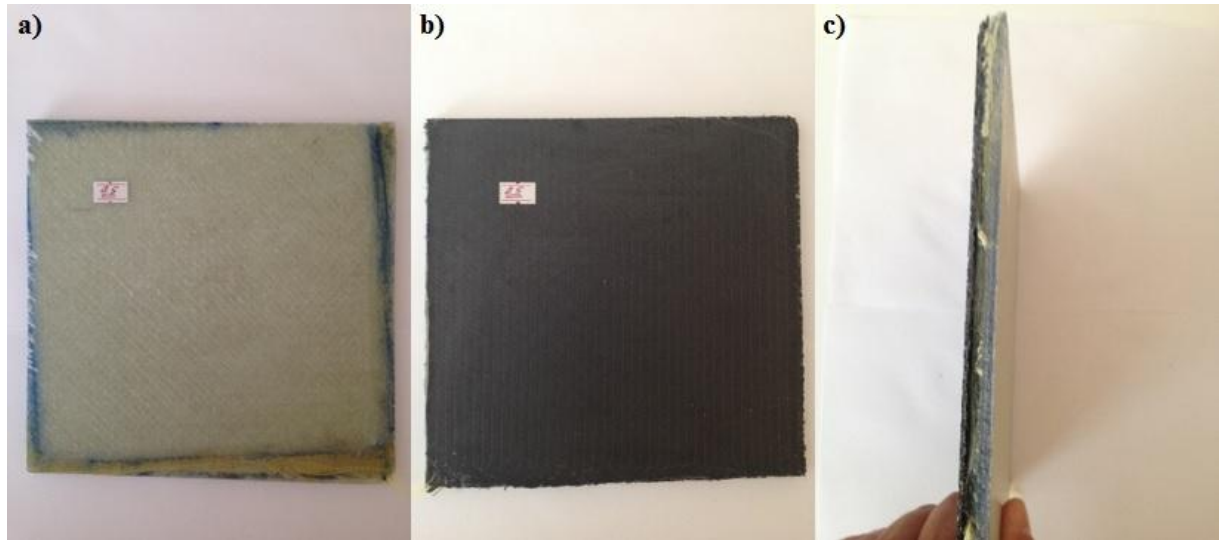
m_t (gr)	598 gr	v_t (cm ³)	380 cm ³	ρ_t (gr/cm ³)	1.57 gr/cm ³
m_e (gr)	340.81 gr	v_e (cm ³)	148.30 cm ³	ρ_e (gr/cm ³)	2.30 gr/cm ³
m_m (gr)	257.19 gr	v_m (cm ³)	231.70 cm ³	ρ_m (gr/cm ³)	1.11 gr/cm ³
h (mm)	9.5 mm				
Elyaf ağırlık yüzdesi	% 56.99	Matriks ağırlık yüzdesi		% 43.01	
Elyaf hacim yüzdesi	% 39.03	Matriks hacim yüzdesi		% 60.97	

5.3.2. [Karbon₇/Aramid₇/Cam₇] 21 Tabakalı Hibrit Polyester Reçine Matriksli Numuneler

Deneylerde kullanılan 21 katlı numunelerde 0°, 45°, plain ve twill olmak üzere 4 farklı kumaş tipinde 7 kat Cam elyaf, 0°, 45°, plain ve twill olmak üzere 4 farklı kumaş tipinde 7 kat Karbon elyaf ve 7 kat Kevlar 49 Aramid elyaf kullanılmıştır.

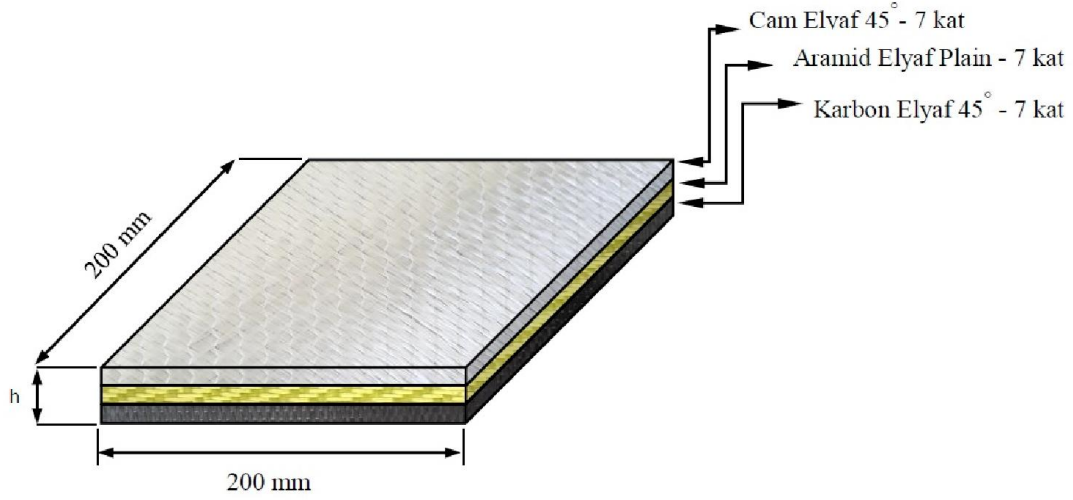
5.3.2.1. [Karbon(45°)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(45°)₇] 21 Tabakalı Hibrit Polyester Reçine Matriksli Numune

Şekil 5.23. 'de fotoğraflarda gösterilen [Karbon(45°)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(45°)₇] 21 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numunenin yapı şeması Şekil 5.24. de verilmiştir.



Şekil 5. 23. [Karbon(45°)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(45°)₇] 21 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numune

a) ön görünüş b) arka görünüş c) kesit görünüş



Şekil 5. 24. [Karbon(45°)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(45°)₇] 21 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numunenin yapı şeması

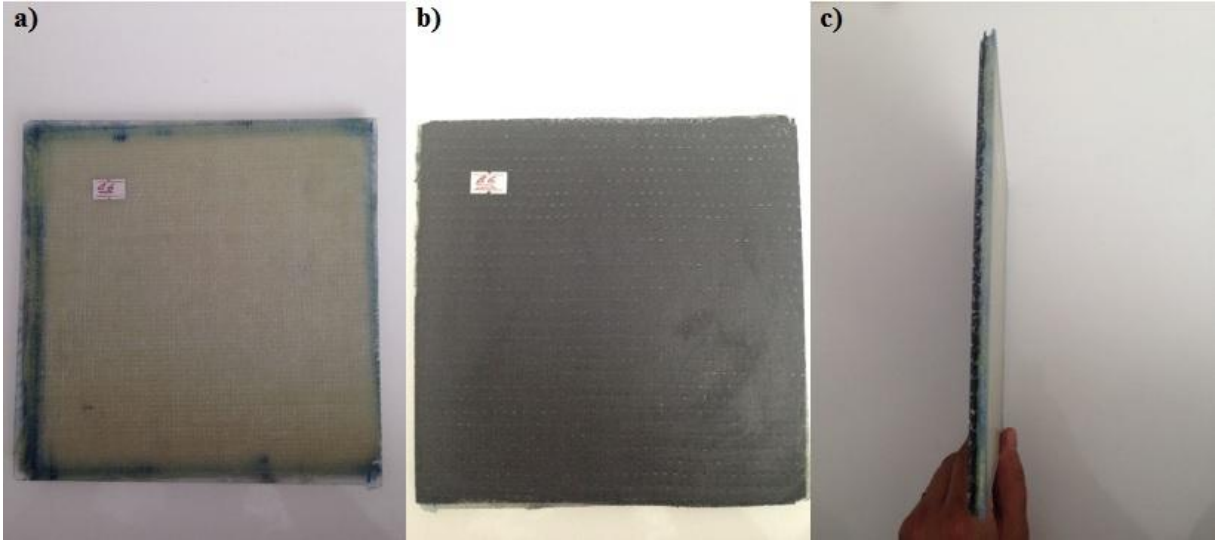
B5 adlı bu numuneye ait malzeme özellikleri Tablo 5.9.' da verilmiştir.

Tablo 5. 9. B5 numunesine ait malzeme özellikleri

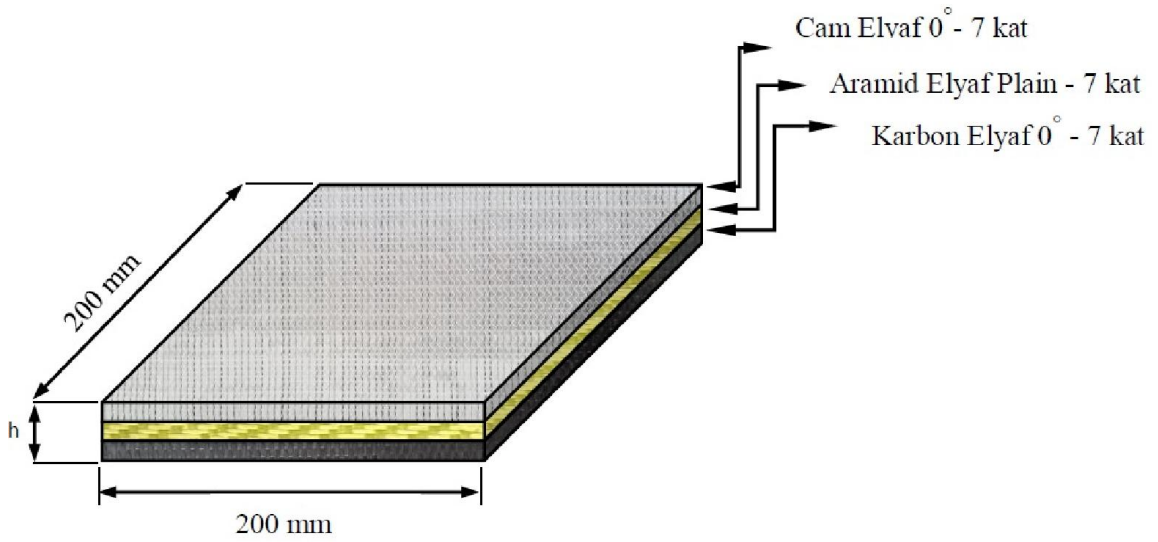
m_t (gr)	554 gr	v_t (cm ³)	360 cm ³	ρ_t (gr/cm ³)	1.54 gr/cm ³
m_e (gr)	357.11 gr	v_e (cm ³)	153.88 cm ³	ρ_e (gr/cm ³)	1.96 gr/cm ³
m_m (gr)	196.89 gr	v_m (cm ³)	206.12 cm ³	ρ_m (gr/cm ³)	1.11 gr/cm ³
h (mm)	9 mm				
Elyaf ağırlık yüzdesi	% 64.46	Matriks ağırlık yüzdesi		% 35.54	
Elyaf hacim yüzdesi	% 50.73	Matriks hacim yüzdesi		% 49.27	

5.3.2.2. [Karbon(0°)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(0°)₇] 21 Tabakalı Hibrit Polyester Reçine Matriksli Numune

Şekil 5.25. 'de fotoğraflarda gösterilen [Karbon(0°)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(0°)₇] 21 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numunelerin yapı şeması Şekil 5.26. da verilmiştir.



Şekil 5. 25. [Karbon(0°)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(0°)₇] 21 tabakalı hibrit polyester reçine matrisli numune
a) ön görünüş b) arka görünüş c) kesit görünüş



Şekil 5. 26. [Karbon(0°)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(0°)₇] 21 tabakalı hibrit polyester reçine matrisli numunelerin yapı şeması

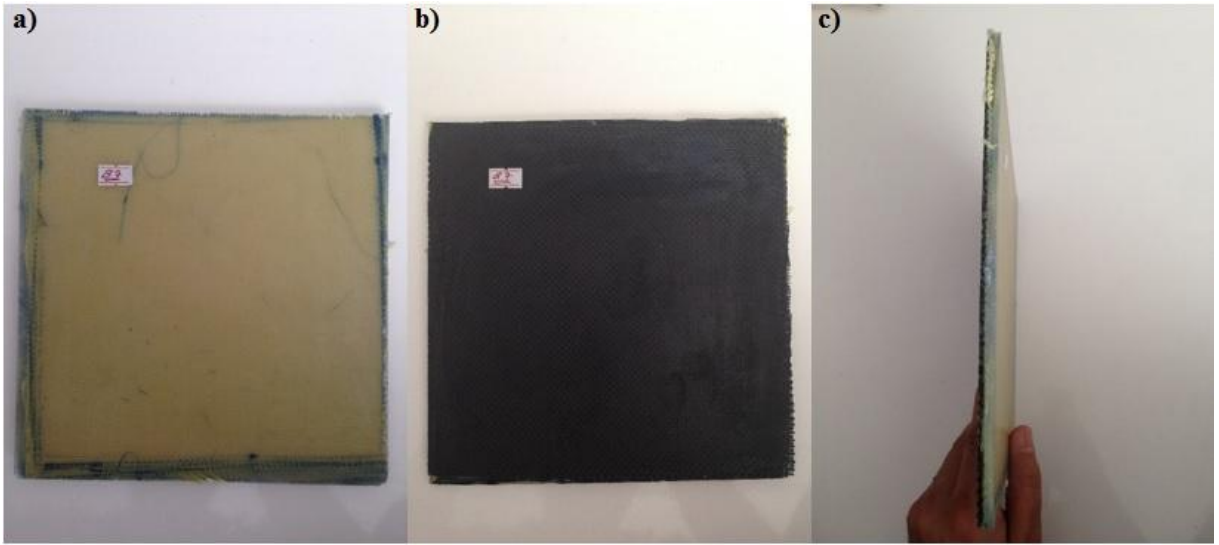
B6 adlı bu numuneye ait malzeme özellikleri Tablo 5.10.' da verilmiştir.

Tablo 5. 10. B6 numunesine ait malzeme özellikleri

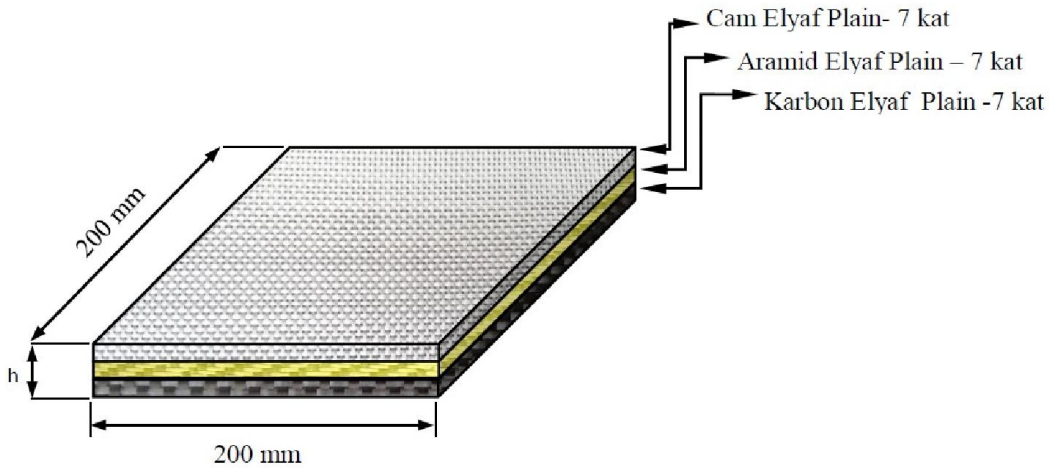
m_t (gr)	468 gr	v_t (cm ³)	288 cm ³	ρ_t (gr/cm ³)	1.63 gr/cm ³
m_e (gr)	280.70 gr	v_e (cm ³)	119.26 cm ³	ρ_e (gr/cm ³)	2.35 gr/cm ³
m_m (gr)	187.30 gr	v_m (cm ³)	168.74 cm ³	ρ_m (gr/cm ³)	1.11 gr/cm ³
h (mm)	7.2 mm				
Elyaf ağırlık yüzdesi	% 59.68	Matriks ağırlık yüzdesi		% 40.02	
Elyaf hacim yüzdesi	% 41.41	Matriks hacim yüzdesi		% 58.59	

5.3.2.3. [Karbon(Plain)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(Plain)₇] 21 Tabakalı Hibrit Polyester Reçine Matriksli Numune

Şekil 5.27. 'de fotoğraflarda gösterilen [Karbon(Plain)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(Plain)₇] 21 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numunenin yapı şeması Şekil 5.28. 'de verilmiştir.



Şekil 5. 27. [Karbon(Plain)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(Plain)₇] 21 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numune a) ön görünüş b) arka görünüş c) kesit görünüş



Şekil 5. 28. [Karbon(Plain)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(Plain)₇] 21 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numunenin yapı şeması

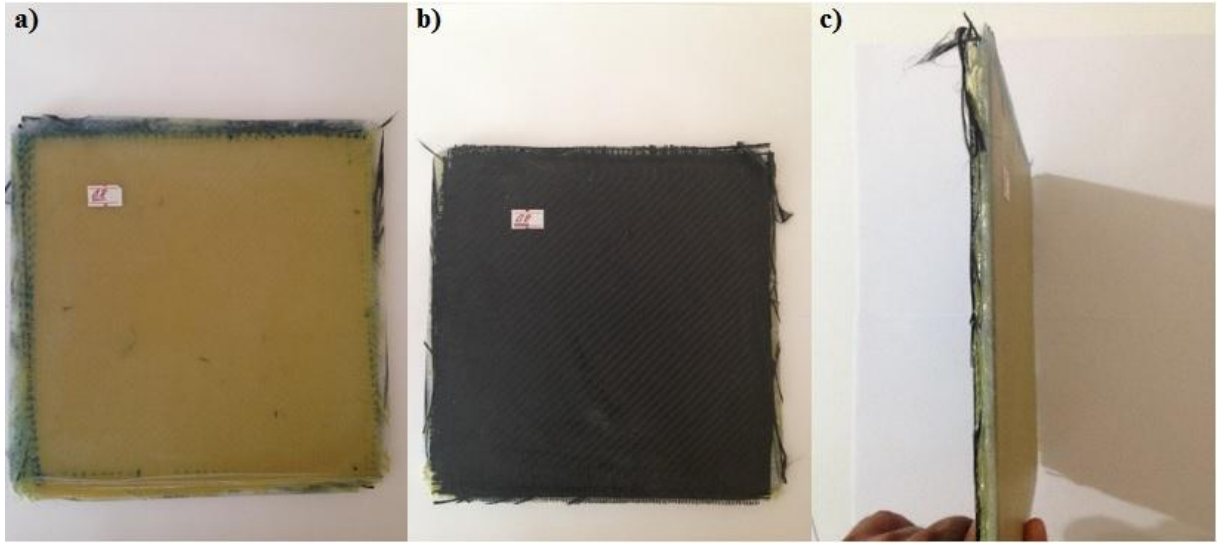
B7 adlı bu numuneye ait malzeme özellikleri Tablo 5.11.' de verilmiştir.

Tablo 5. 11. B7 numunesine ait malzeme özellikleri

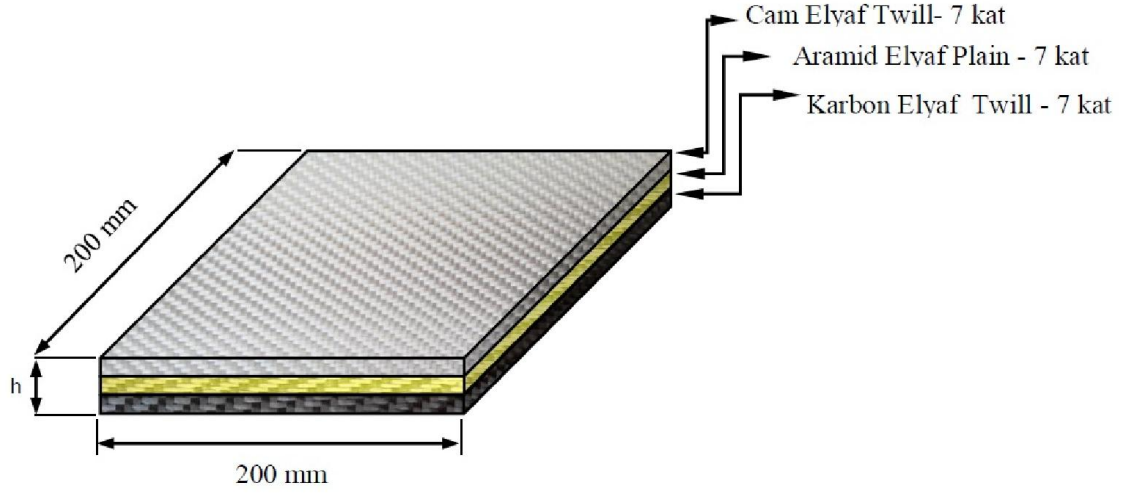
m_t (gr)	372 gr	v_t (cm ³)	240 cm ³	ρ_t (gr/cm ³)	1.55 gr/cm ³
m_e (gr)	227.23 gr	v_e (cm ³)	109.57 cm ³	ρ_e (gr/cm ³)	2.07 gr/cm ³
m_m (gr)	144.77 gr	v_m (cm ³)	130.43 cm ³	ρ_m (gr/cm ³)	1.11 gr/cm ³
h (mm)	6 mm				
Elyaf ağırlık yüzdesi	% 61.08	Matriks ağırlık yüzdesi		% 38.92	
Elyaf hacim yüzdesi	% 45.66	Matriks hacim yüzdesi		% 54.34	

5.3.2.4. [Karbon(Twill)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(Twill)₇] 21 Tabakalı Hibrit Polyester Reçine Matriksli Numune

Şekil 5.29. 'da fotoğraflarda gösterilen [Karbon(Twill)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(Twill)₇] 21 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numunelerin yapı şeması Şekil 5.30. 'da verilmiştir.



Şekil 5. 29. [Karbon(Twill)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(Twill)₇] 21 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numune a) ön görünüş b) arka görünüş c) kesit görünüş



Şekil 5. 30. [Karbon(Twill)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(Twill)₇] 21 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numunenin yapı şeması

B8 adlı bu numuneye ait malzeme özellikleri Tablo 5.12.' de verilmiştir.

Tablo 5. 12. B8 numunesine ait malzeme özellikleri

m_t (gr)	432 gr	v_t (cm ³)	280 cm ³	ρ_t (gr/cm ³)	1,54 gr/cm ³
m_e (gr)	250,58 gr	v_e (cm ³)	116,56 cm ³	ρ_e (gr/cm ³)	2,15 gr/cm ³
m_m (gr)	181,42 gr	v_m (cm ³)	163,44 cm ³	ρ_m (gr/cm ³)	1,11 gr/cm ³
h (mm)	7 mm				
Elyaf ağırlık yüzdesi	% 58	Matriks ağırlık yüzdesi		% 42	
Elyaf hacim yüzdesi	% 41,63	Matriks hacim yüzdesi		% 58,37	

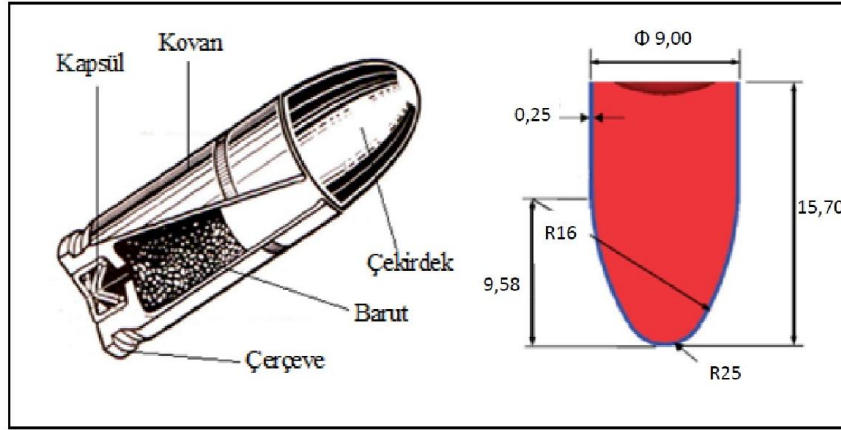
5.4. Balistik Test Düzeneği

Hafif silahlara karşı kullanılan zırhlar için balistik performansın ölçümünde iki ana tehdit göz önünde tutulmaktadır. Bunlardan birincisi parça tesirine karşı koruma diğeri ise mermi tesirine karşı korumadır. Mermiye karşı korumada NIJ 0101.06 standart değerleri referans olarak alınmıştır. Bu kapsamda atış test sisteminin şeması Şekil 5.31. de verilmiştir. Şekil 5.32. 'de fotoğrafı verilen Chrony F1 Master marka kronograf ile balistik testler sırasında merminin hızı tespit edilmiştir. Testler sırasında atışlar bir kişi tarafından yapılarak bütün numuneler için aynı şartlarda atış yapılması sağlanmıştır.

mm merminin teknik özellikleri Tablo 5.13. 'de, yapı resmi ve çekirdek ölçüleri Şekil 5.33. 'de verilmiştir.

Tablo 5. 13. 9 mm standart mermi özellikleri

Çekirdek çapı (mm)	9.08
Çekirdek ağırlığı (gr)	7.43
Kovan ağırlığı (gr)	3.80
Çekirdek uzunluğu (mm)	15.70
Standart barut miktarı (gr)	0.41 ± 0.005



Şekil 5. 33. 9 mm mermi [69].

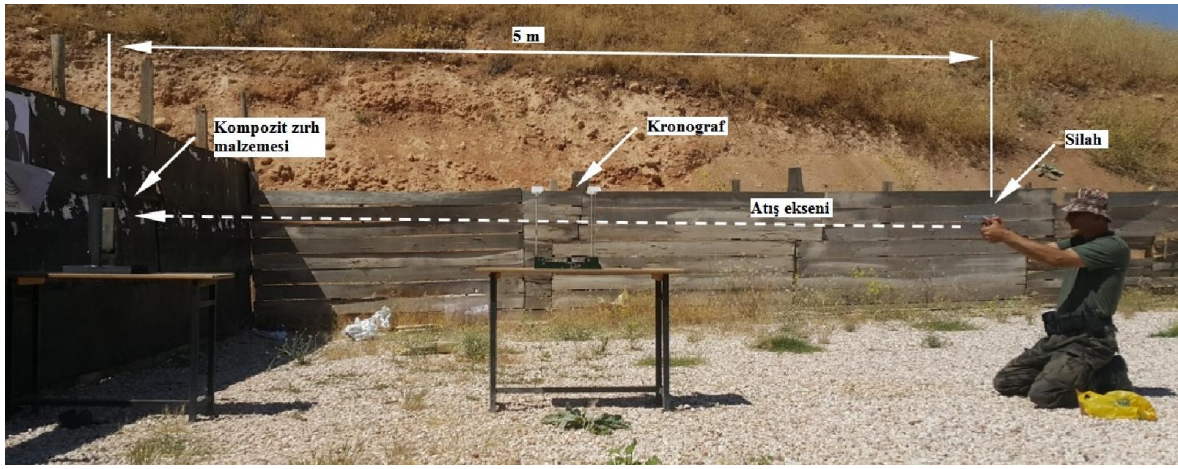
Balistik deneyler boyunca tüm numunelere yapılan atışlarda kullanılan 9 mm FMJ merminin resmi Şekil 5.34.' de verilmiştir.



Şekil 5. 34. Atışlarda kullanılan mermi

6. BULGULAR

Bu çalışma kapsamında daha önce üretimi yapılan tabakalı hibrit kompozit plakalara NIJ.0101-06 standardına uygun olarak Şekil 6.1.' de gösterildiği gibi 5 m mesafeden Beretta marka tabanca ile 9 mm FMJ mermiler kullanılarak atışlar yapılmıştır. Atışların ardından numuneler yatar testerede atış noktalarına mümkün olan en yakın hat boyunca kesilerek kesit fotoğrafları alınmış ve hasar tipleri incelenmiştir. Kesim işlemi sırasında inceleme alanına zarar vermemek amacıyla testere yüksek devirde kullanılmıştır.



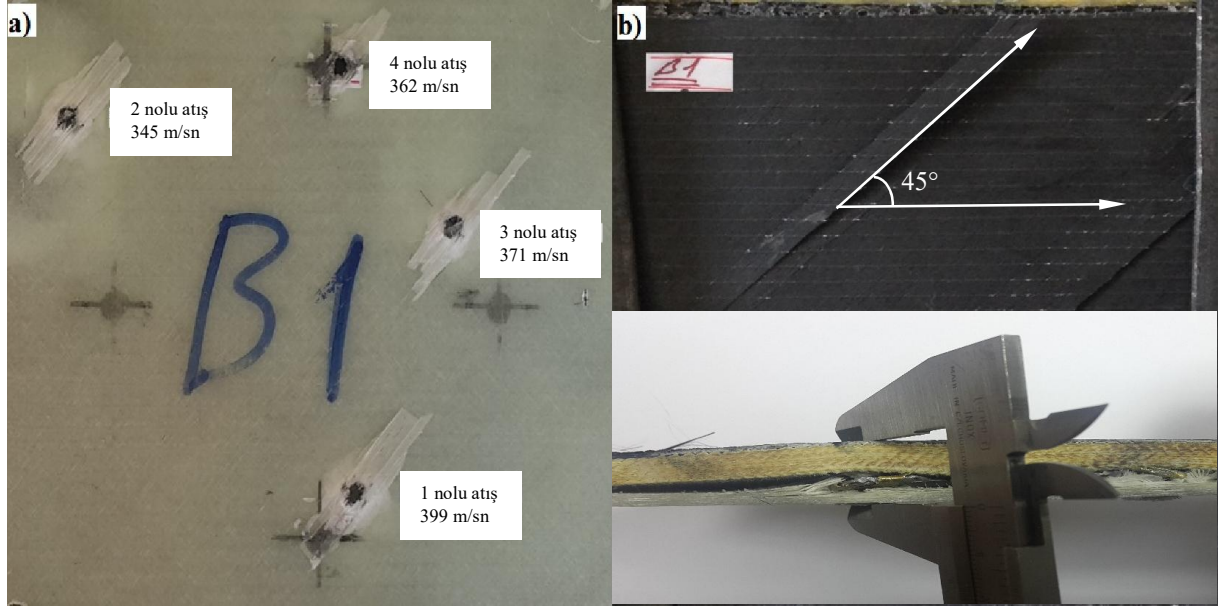
Şekil 6. 1. Balistik test düzeneği

6.1. [Karbon₁₀/Aramid₁₀/Cam₁₀] 30 Tabakalı Numuneler

Atışlar ilk olarak 30 tabakalı hibrit kompozit numunelere yapılmış ve bu atışlar sonucunda tüm numuneler başarılı olmuştur.

6.1.1. [Karbon(45°)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(45°)₁₀] 30 Tabakalı Numune

Şekil 6.2.' deki fotoğraflarda atış testleri yapılan [Karbon(45°)₁₀ /Aramid(Plain)₁₀/Cam(45°)₁₀] 30 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numune gösterilmiş ve Tablo 6.1.' de yapılan atışlara ait mermi hızı, mermi kinetik enerjisi ve çöküntü değerleri verilmiştir. Çöküntü miktarları Şekil 6.2. 'de gösterildiği gibi bir kumpas yardımıyla ölçülerek belirlenmiştir.

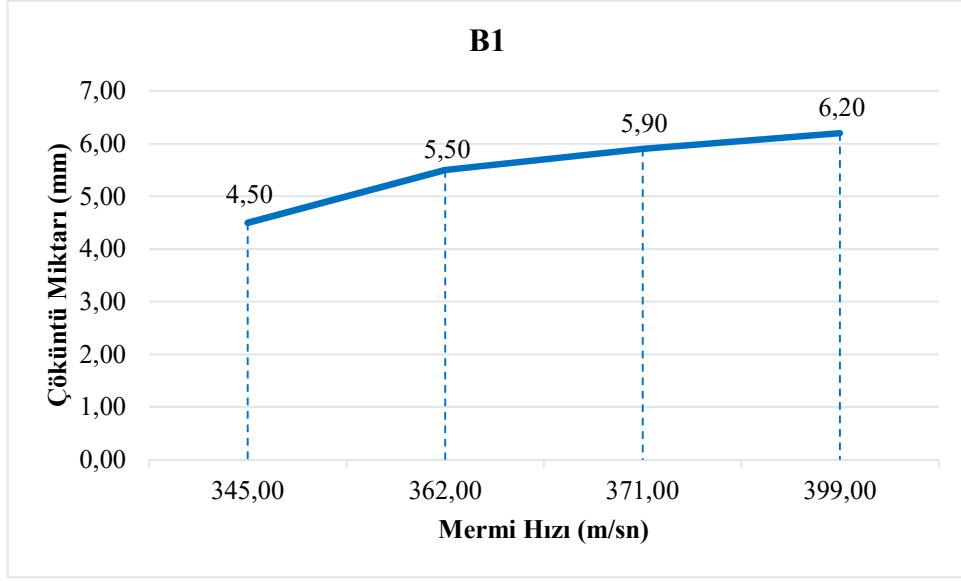


Şekil 6.2. [Karbon(45°)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(45°)₁₀] numunesinin balistik test sonucu fotoğrafı a) ön görünüş b) arka görünüş

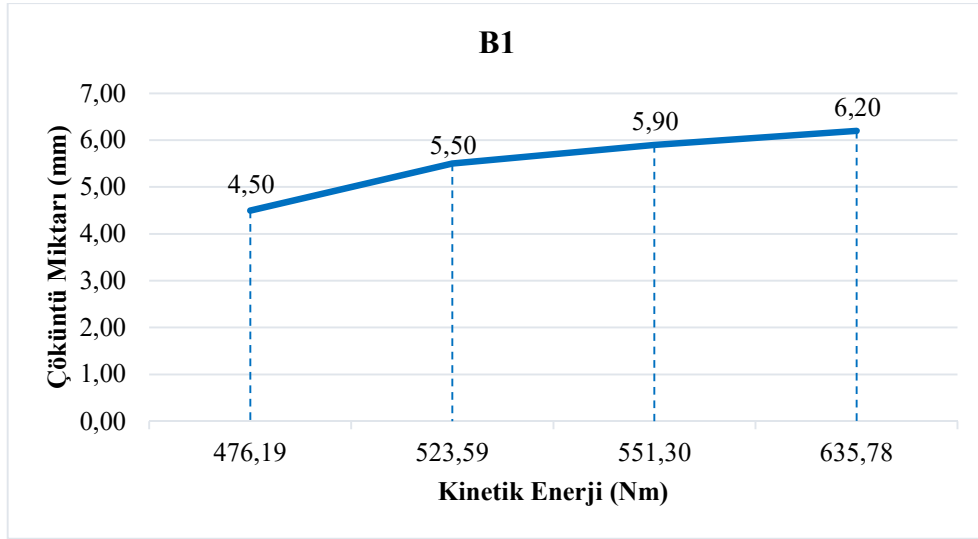
Tablo 6. 1. [Karbon(45°)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(45°)₁₀] numunesinin balistik testlerine ait mermi hızı, mermi kinetik enerjisi ve çöküntü değerleri

Numune Adı: B1				
Atış No	Atış Hızı (m/sn)	Kinetik Enerji (Nm)	Çöküntü Miktarı (mm)	Değerlendirme
1	399	635.78	6.20	Delinme Yok
2	345	476.19	4.50	Delinme Yok
3	371	551.30	5.90	Delinme Yok
4	362	523.59	5.50	Delinme Yok
Ortalama	369	546.71	5.53	

B1 adlı numunenin balistik limitinin 345 m/sn ile 399 m/sn aralığında olduğu tespit edilmiştir. Yapılan tüm atışlar plaka içerisinde tutularak balistik testler başarı ile sonuçlanmıştır. En arkada sert yapısıyla destek plakası görevi gören karbon fiber kumaşa, merminin uyguladığı kuvvetle karbon fiber kumaşın 45° olması sebebiyle $\pm 45^\circ$ yönünde fiber hasarı meydana gelmiştir. Bu numuneye yapılan atışlarda ortalama atış hızı değeri 369 m/sn' dir. Balistik testler sonrasında delinme meydana gelmeyen atışlarda plaka arka yüzeyinde meydana gelen çöküntü miktarı kumpas yardımıyla ölçülerek tespit edilmiştir. Elde edilen ortalama çöküntü değeri 5.53 mm' dir. Bu numune NIJ Seviye II-A standardına göre koruma sağlamaktadır. Şekil 6.3.' de mermi hızı – çöküntü miktarı grafiği ve Şekil 6.4.'de kinetik enerji – çöküntü miktarı grafiği verilmiştir.



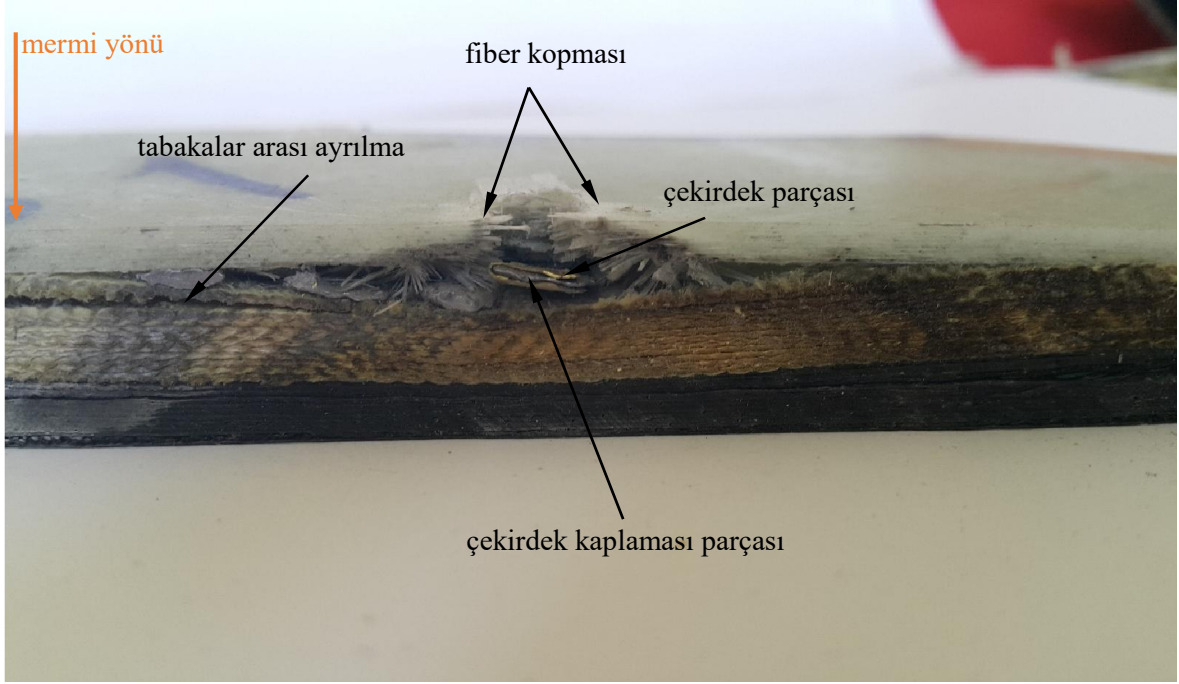
Şekil 6.3. [Karbon(45°)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(45°)₁₀] numunesine ait mermi hızı – çöküntü miktarı grafiği



Şekil 6.4. [Karbon(45°)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(45°)₁₀] numunesine ait kinetik enerji – çöküntü miktarı grafiği

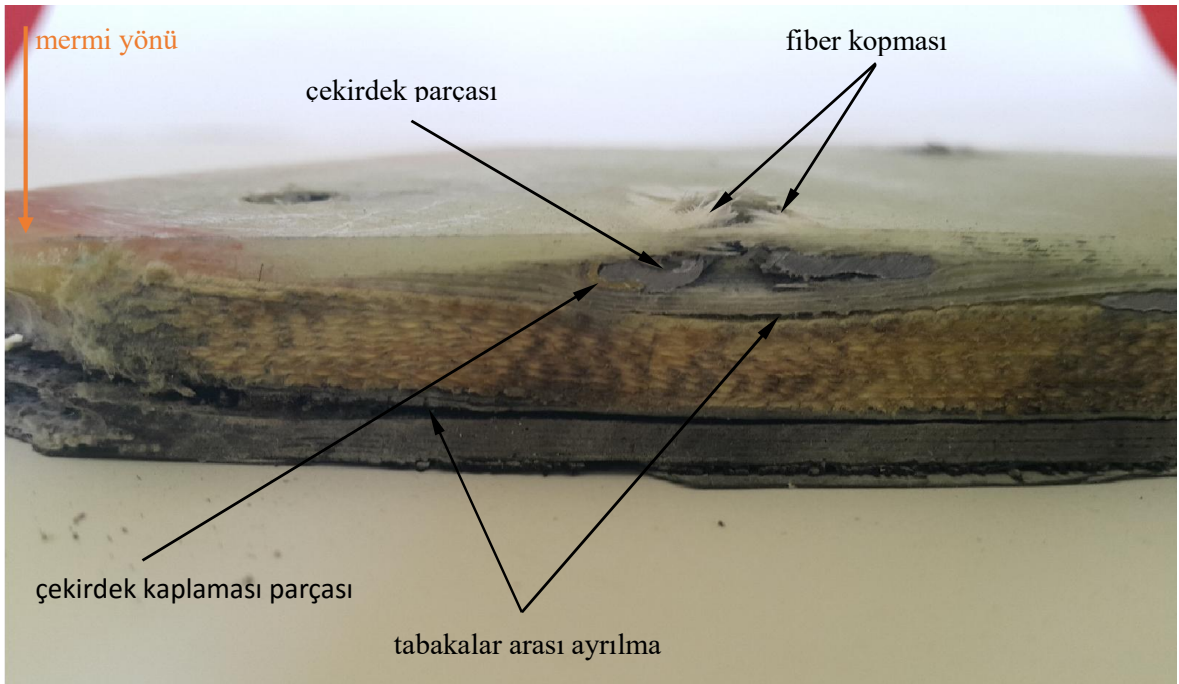
Deneylerden elde edilen çöküntü değerlerinin, artan mermi hızları ile ve artan kinetik enerji değerleri ile arttığı gözlemlenmiştir.

Atışlar içerisinde en yüksek mermi hızı olan 1 nolu atışa ait malzeme kesitinin fotoğrafı Şekil 6.5.' de verilmiştir. Perforasyon meydana gelmeyen bu atışta çekirdek kaplaması cam fiberden sonraki aramid fiber tabakasına nüfuz edemediği parçalanmış ve durdurulmuştur.



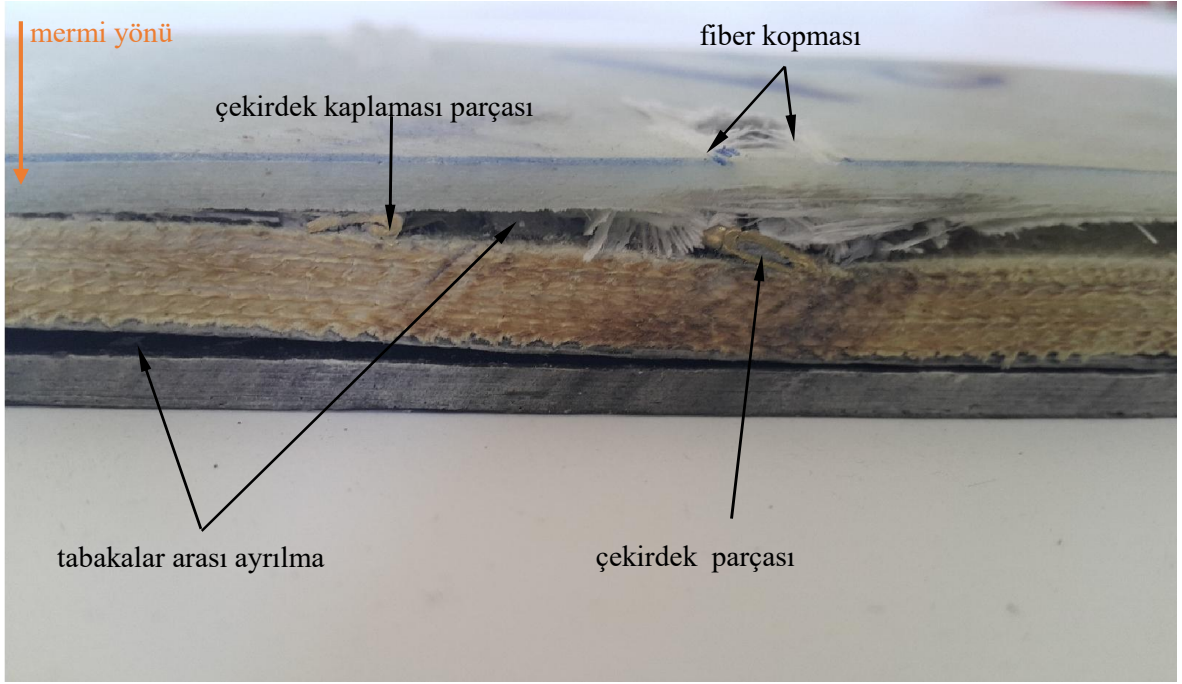
Şekil 6.5. B1 numunesinde 1 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

Şekil 6.6.' deki fotoğrafta 2 nolu atışa ait malzeme kesiti görülmektedir. Atış sonucu perforasyon meydana gelmemiştir. Mermi çekirdeği cam fiber tabakasını aşmadan bu tabakalar içerisinde tutulmuştur. Merminin hedefe darbe yaptığı bölgede fiber kopması ve bir sonraki aramid fiber plakalarda delaminasyona sebep olmuştur.



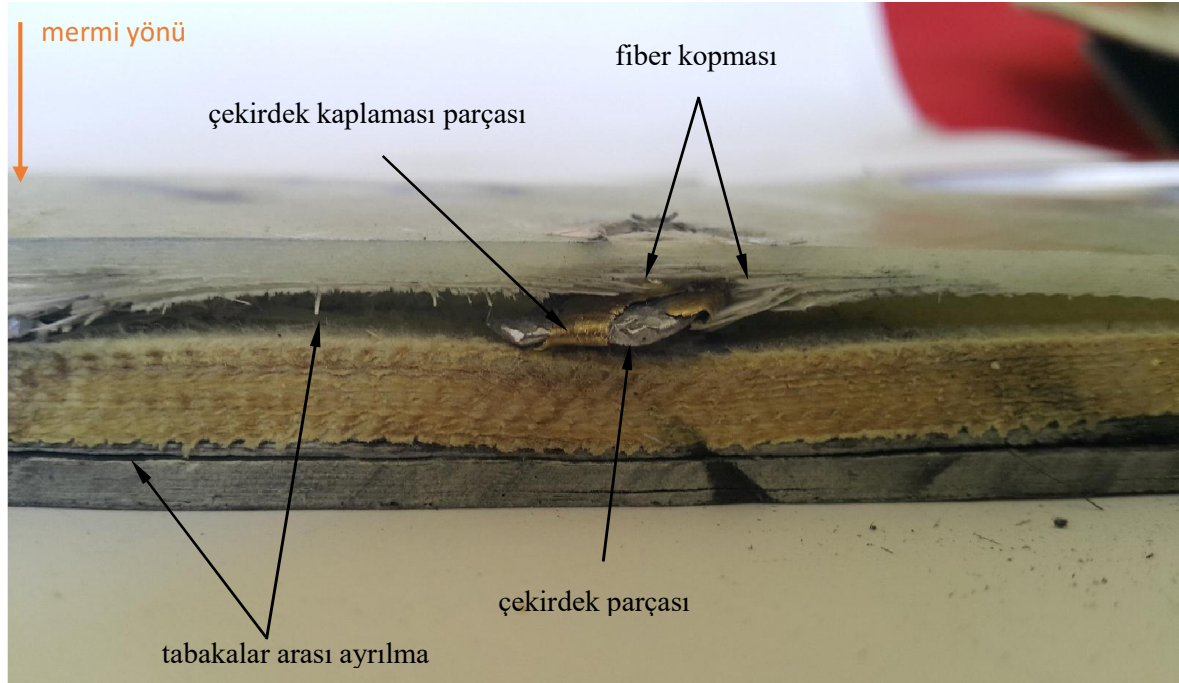
Şekil 6.6. B1 numunesinde 2 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

3 nolu atışa ait malzeme kesiti Şekil 6.7.' deki fotoğrafta görülmektedir. Mermi hedefle temas ettiği bölgede cam fiber tabakalarda fiber kopması meydana gelmiş ve cam ile aramid fiber arasında delaminasyona sebep olduktan sonra durdurulmuştur. Aynı zamanda karbon fiber ve aramid fiber tabakaları arasında, tabakalar arası ayrılma hasarı meydana gelmiştir.



Şekil 6.7. B1 numunesinde 3 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

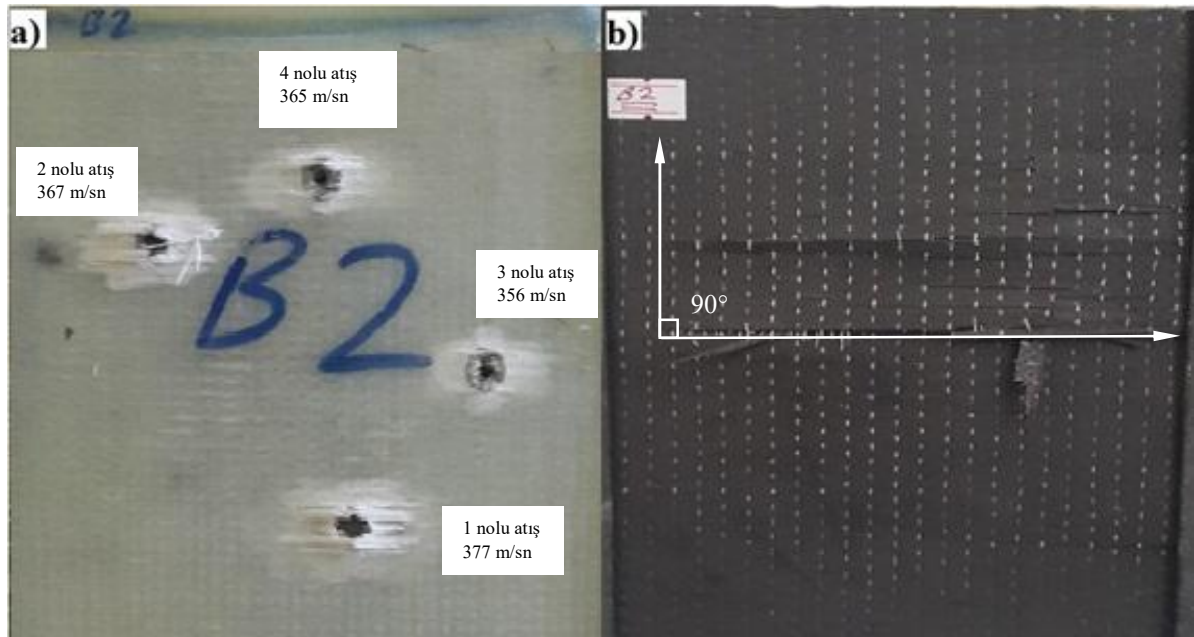
Şekil 6.8.' deki fotoğrafta 4 nolu atışa ait malzeme kesiti görülmektedir. Atış sonucu perforasyon meydana gelmemiştir. Cam fiber tabakası parçalanmış, mermi çekirdeği aramid fiber tabakalara nüfuz edemediği için parçalanarak burada tutulmuştur. Merminin hedefe darbe yaptığı bölgede aramid fiber plakalarda delaminasyona ve tabakalar arası ayrılmaya sebep olmuştur.



Şekil 6.8. B1 numunesinde 4 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

6.1.2. [Karbon(0°)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(0°)₁₀] 30 Tabakalı Numune

[Karbon(0°)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(0°)₁₀] 30 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numunenin atış testleri sonundaki fotoğrafları Şekil 6.9.' da gösterilmiş ve Tablo 6.2.' de yapılan atışlara ait mermi hızı, mermi kinetik enerjisi ve çöküntü değerleri verilmiştir.

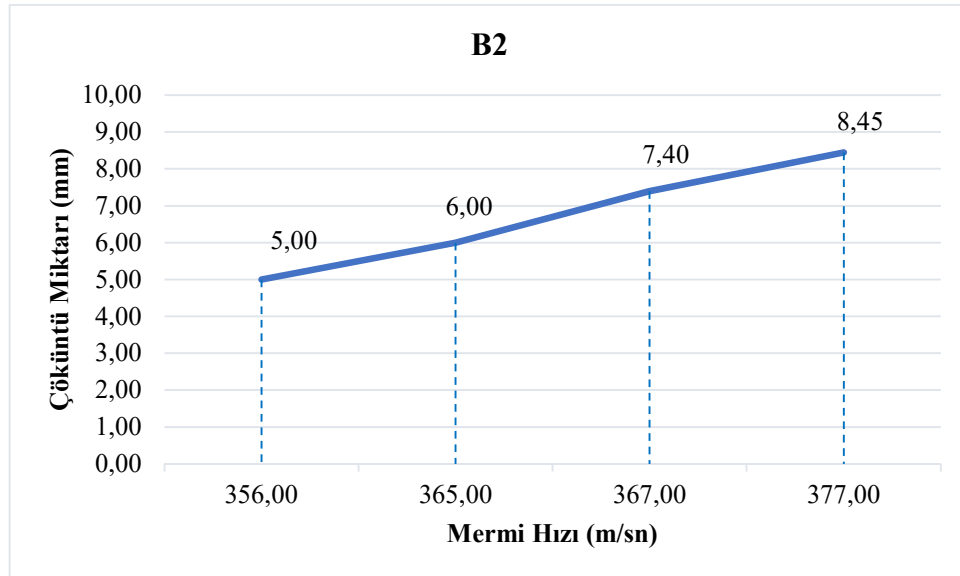


Şekil 6.9. [Karbon(0°)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(0°)₁₀] numunenin balistik test sonucu fotoğrafı a) ön görünüş b) arka görünüş

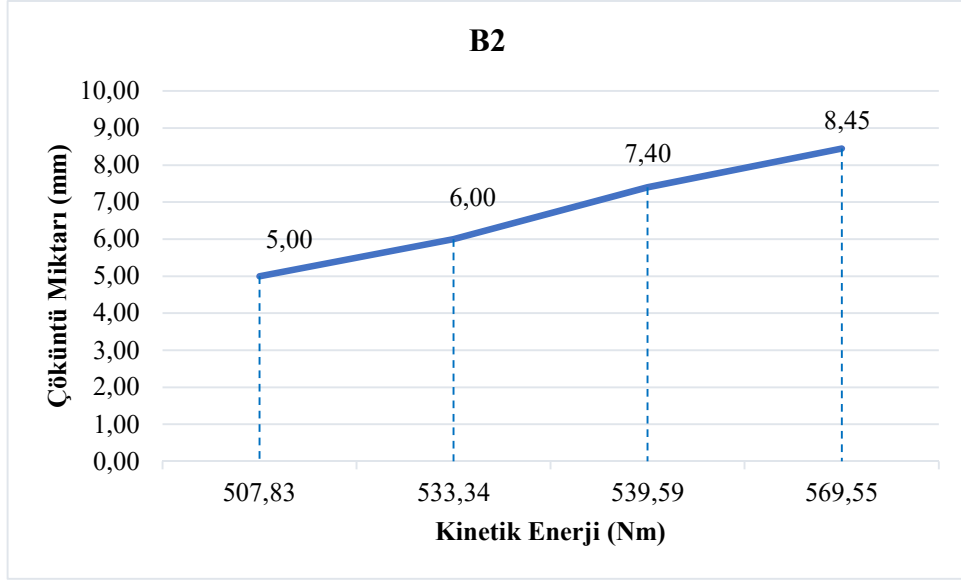
Tablo 6. 2. [Karbon(0°)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(0°)₁₀] numunesinin balistik testlerine ait mermi hızı, mermi kinetik enerjisi ve çöküntü değerleri

Numune Adı: B2				
Atış No	Atış Hızı (m/sn)	Kinetik Enerji (Nm)	Çöküntü Miktarı (mm)	Değerlendirme
1	377	569.55	8.45	Delinme Yok
2	367	539.59	7.40	Delinme Yok
3	356	507.83	5.00	Delinme Yok
4	365	533.34	6.00	Delinme Yok
Ortalama	367	537.58	6.71	

B2 adlı numuneye yapılan atışların hiç birinde delinme olmamış ve bu numune balistik olarak başarılı kabul edilmiştir. En arkada olan ve destek plakası görevi yapan karbon fiber kumaşın 0° olması sebebiyle merminin etkisiyle karbon fiber üzerinde yatay matriks ayrılma hasarı meydana gelmiştir. B1 adlı numunenin balistik limitinin 356 m/sn ile 377 m/sn aralığında olduğu tespit edilmiştir. Yapılan atışlar göz önüne alındığında ortalama 367 m/sn mermi hızına karşılık ortalama çöküntü değeri 6.71 mm'dir. Bu numune NIJ Seviye II-A standardına göre koruma sağlamaktadır. Şekil 6.10.' da mermi hızı – çöküntü miktarı grafiği ve Şekil 6.11.'de kinetik enerji – çöküntü miktarı grafiği verilmiştir.

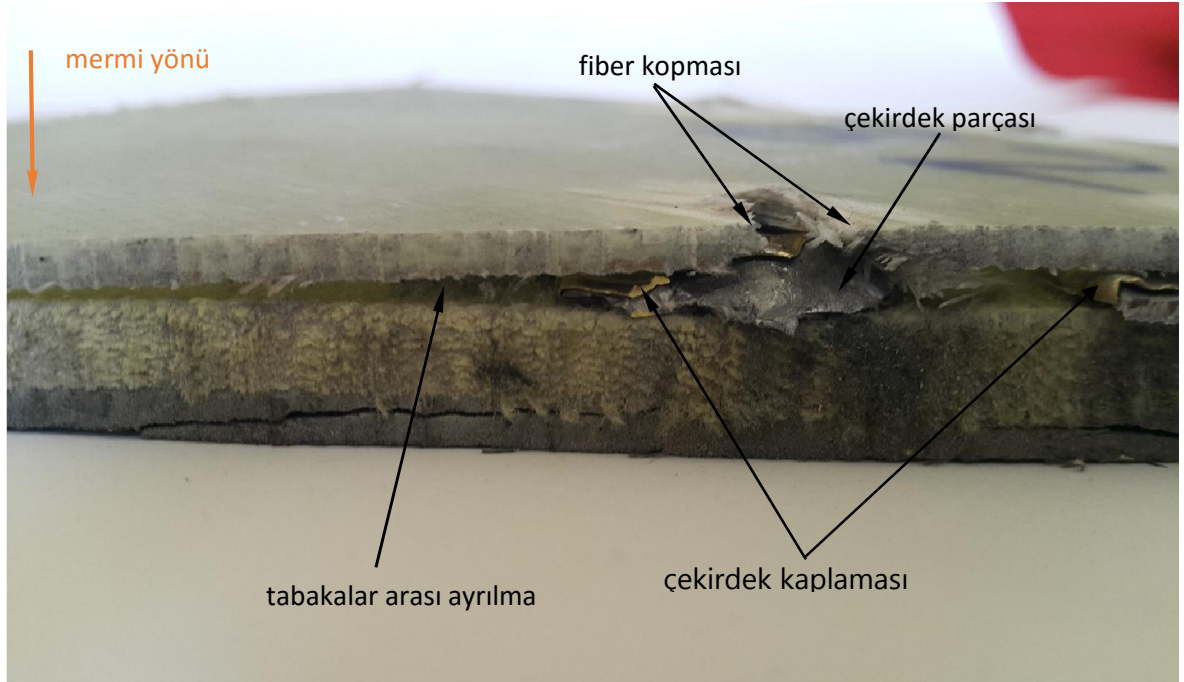


Şekil 6. 10. [Karbon(0°)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(0°)₁₀] numunesine ait mermi hızı – çöküntü miktarı grafiği



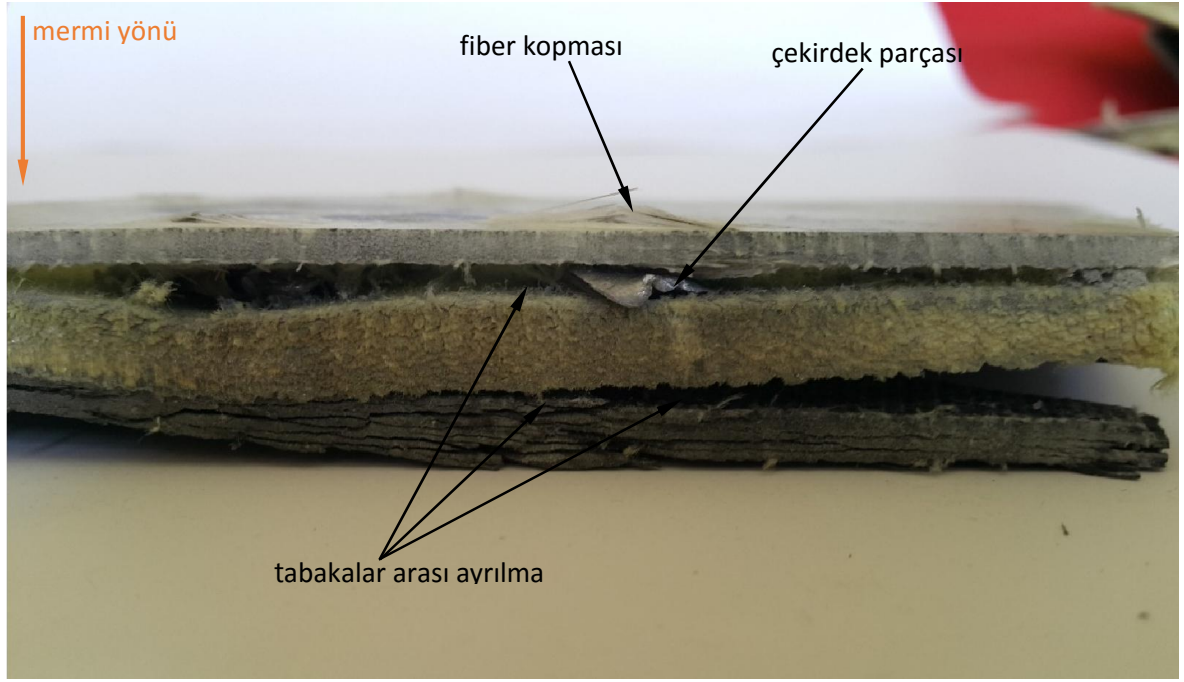
Şekil 6. 11. [Karbon(0°)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(0°)₁₀] numunesine ait kinetik enerji – çöküntü miktarı grafiği

Şekil 6.12.’ de B2 adlı numuneye yapılan 1 nolu atışa ait malzeme kesitinin fotoğrafı verilmiştir. Bu atış atışlar içerisinde en yüksek mermi hızına sahiptir. Çekirdek kaplaması cam fiberden sonraki aramid fiber tabakasına nüfuz edemedi ve parçalanmış ve durdurulmuştur.



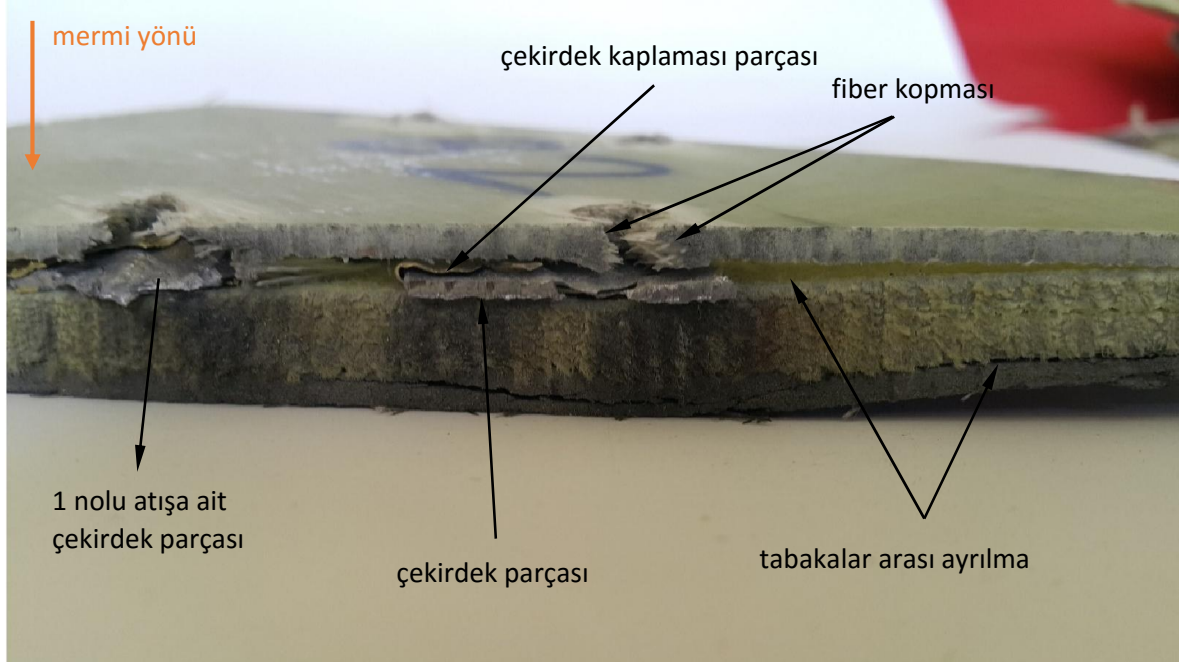
Şekil 6. 12. B2 numunesinde 1 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

Şekil 6.13.' de 2 nolu atışa ait malzeme kesit fotoğrafı görülmektedir. Merminin hedefe darbe yaptığı bölgede cam fiber tabakalarda fiber kopması meydana gelmiş, aramid fiber tabakalarda herhangi bir hasar oluşmamış ve mermi bu tabakada durdurulmuştur. Destek plakası olan karbon fiber tabakalarda ise tabakalar arası ayrılma meydana gelmiştir.



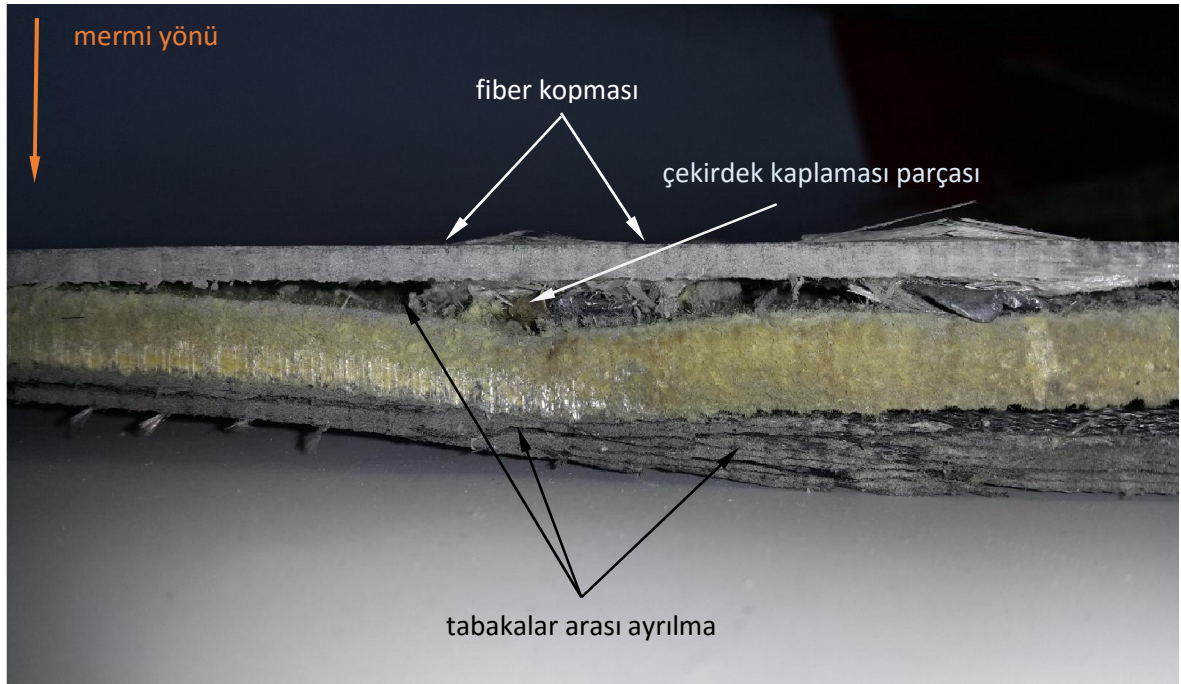
Şekil 6. 13. B2 numunesinde 2 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

B2 numunesine yapılan atışlar içerisinde en düşük mermi hızı ile yapılmış olan 3 nolu atışa ait malzeme kesit fotoğrafı Şekil 6.14.' de verilmiştir. Perforasyonun meydana gelmediği bu atışta mermi Cam fiber tabakalara hasar verdikten sonra Aramid fiber tabakaya nüfuz edemedi durdurulmuştur.



Şekil 6. 14. B2 numunesinde 3 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

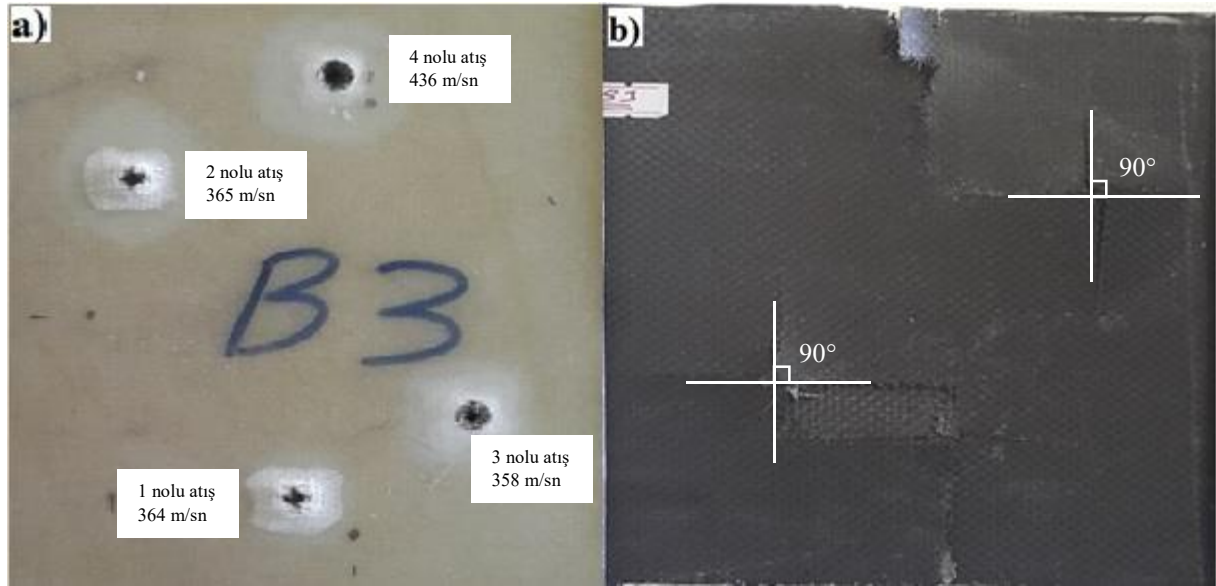
Şekil 6.15.' de 4 nolu atışa ait fotoğrafta görüldüğü üzere merminin hedefe darbe yaptığı bölgede fiber kopması meydana gelmiş ve cam fiber tabakalar hasar görmüştür. Aramid fiber tabakalarda delaminasyon ve karbon fiber tabakalarda tabakalar arası ayrılma meydana gelmiştir. Bu atışta perforasyon meydana gelmemiştir.



Şekil 6. 15. B2 numunesinde 4 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

6.1.3. [Karbon(Plain)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(Plain)₁₀] 30 Tabakalı Numune

Atış testleri yapılan [Karbon(Plain)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(Plain)₁₀] 30 tabakalı hibrit polyester reçine matrisli numunenin fotoğrafları Şekil 6.16.' da gösterilmiş ve Tablo 6.3.' de yapılan atışlara ait mermi hızı, mermi kinetik enerjisi ve çöküntü değerleri verilmiştir.



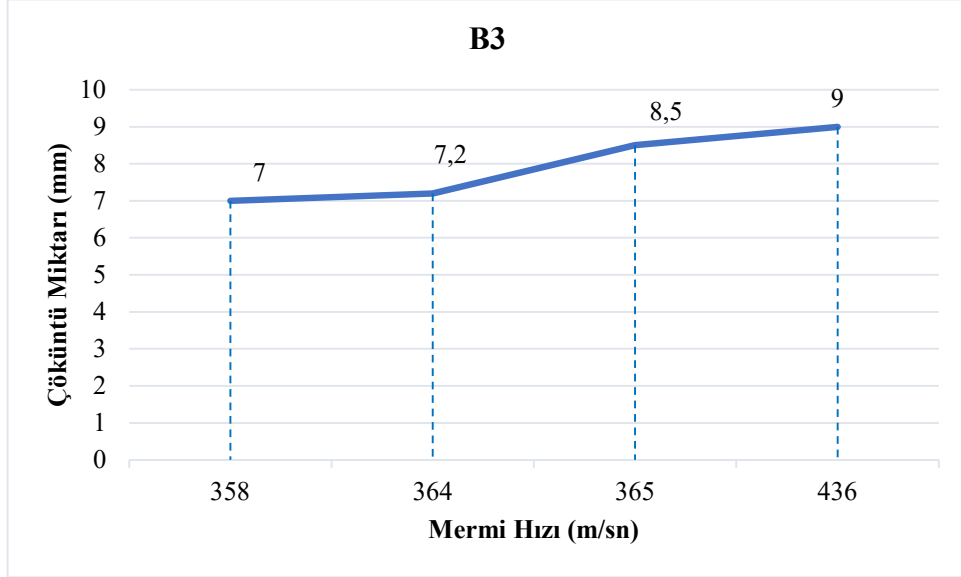
Şekil 6. 16. [Karbon(Plain)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(Plain)₁₀] numunesinin balistik test sonucu fotoğrafı
a) ön görünüş b) arka görünüş

Tablo 6.3. [Karbon(Plain)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(Plain)₁₀] numunesinin balistik testlerine ait mermi hızı, mermi kinetik enerjisi ve çöküntü değerleri

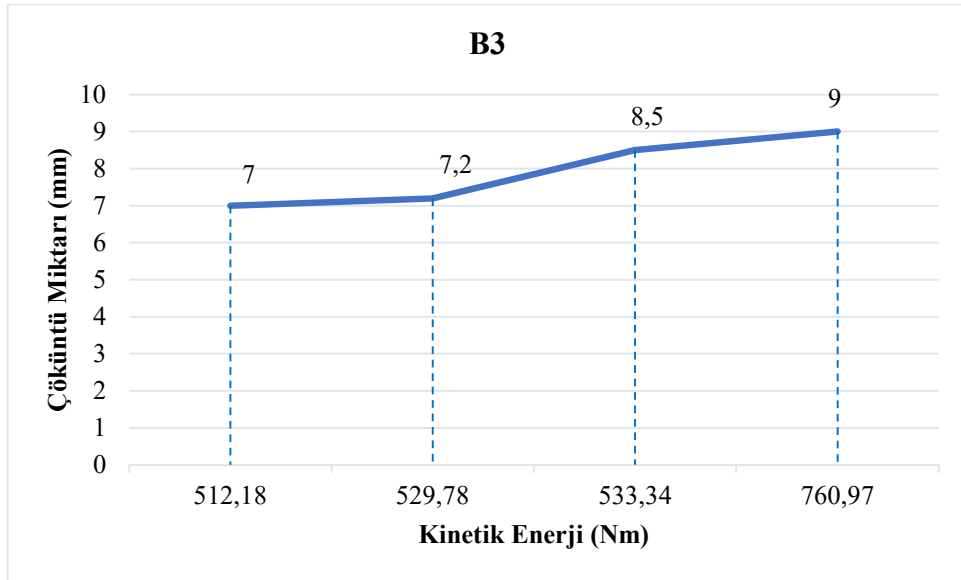
Numune Adı: B3				
Atış No	Atış Hızı (m/sn)	Kinetik Enerji (Nm)	Çöküntü Miktarı (mm)	Değerlendirme
1	364	529.78	7.20	Delinme Yok
2	365	533.34	8.50	Delinme Yok
3	358	512.18	7.00	Delinme Yok
4	436	760.97	9.00	Delinme Yok
Ortalama	381	584.07	7.93	

Deneylerde B3 adlı numuneye yapılan atışların ortalama hızı 381 m/sn ve ortalama çöküntü değeri 7.93 mm'dir. Perforasyon olmaksızın elde edilen çöküntü değerleri bu numunenin balistik limit sınırları içinde kaldığını göstermektedir. Bu numune NIJ Seviye II-A standardına göre koruma sağlamaktadır. En arkada olan karbon fiber kumaşın plain olması sebebiyle hem yatay hem dikey yönde fiber hasarı meydana gelmiştir. Şekil 6.17.' de mermi

hızı – çöküntü miktarı grafiği ve Şekil 6.18.’de kinetik enerji – çöküntü miktarı grafiği verilmiştir.



Şekil 6. 17. [Karbon(Plain)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(Plain)₁₀] numunesine ait mermi hızı – çöküntü miktarı grafiği

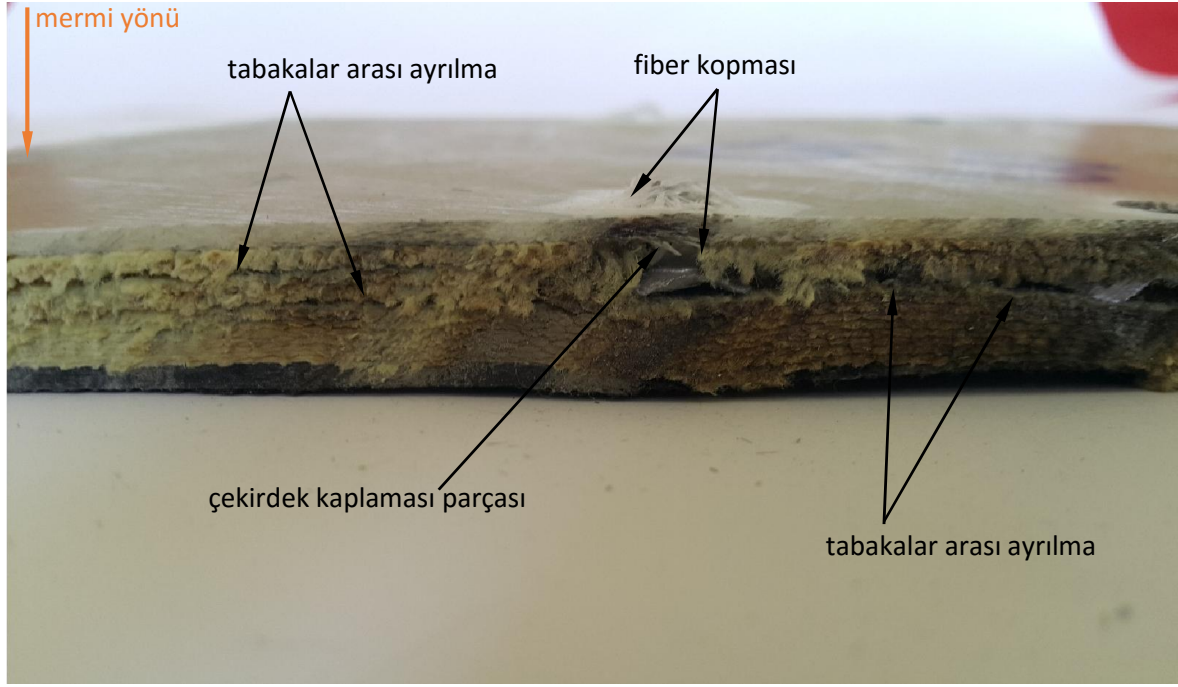


Şekil 6. 18. [Karbon(Plain)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(Plain)₁₀] numunesine ait kinetik enerji – çöküntü miktarı grafiği

Deneylerden elde edilen çöküntü miktarları incelendiğinde, çöküntü miktarlarının artan mermi hızları ile arttığı gözlemlenmiştir.

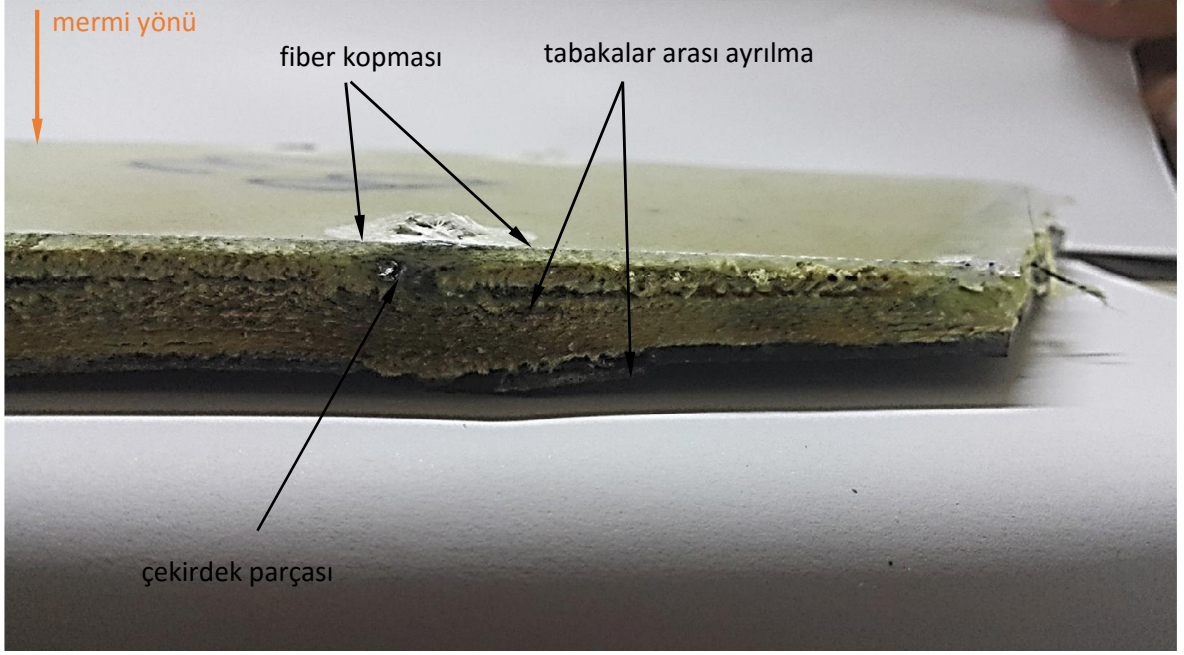
Şekil 6.19.’ da 1 nolu atışa ait malzeme kesit fotoğrafı görülmektedir. Merminin hedefe çarptığı bölgede cam fiber tabakalarda fiber kopması meydana gelmiştir. Deforme

olmuş mermi çekirdeği aramid fiber tabakalarda durdurulmuştur. Darbenin etkisiyle aramid fiber tabakalarda tabakalar arası ayrılma hasarı meydana gelmiştir.



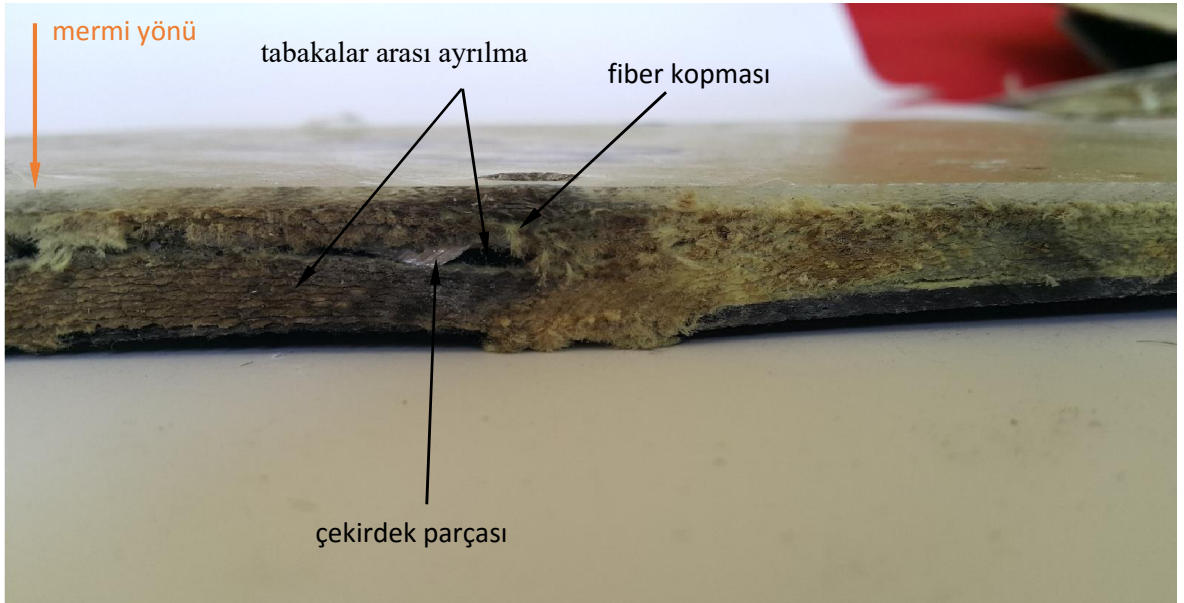
Şekil 6. 19. B3 numunesinde 1 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

Şekil 6.20.' de B3 numunesine yapılan 2 nolu atışa ait malzeme kesit fotoğrafı verilmektedir. Mermi cam fiber tabakasının altındaki aramid fiber tabakada durdurulmuştur. Çarpmanın etkisiyle aramid fiber tabakalarda delaminasyon ve tabakalar arası ayrılma meydana gelmiştir.



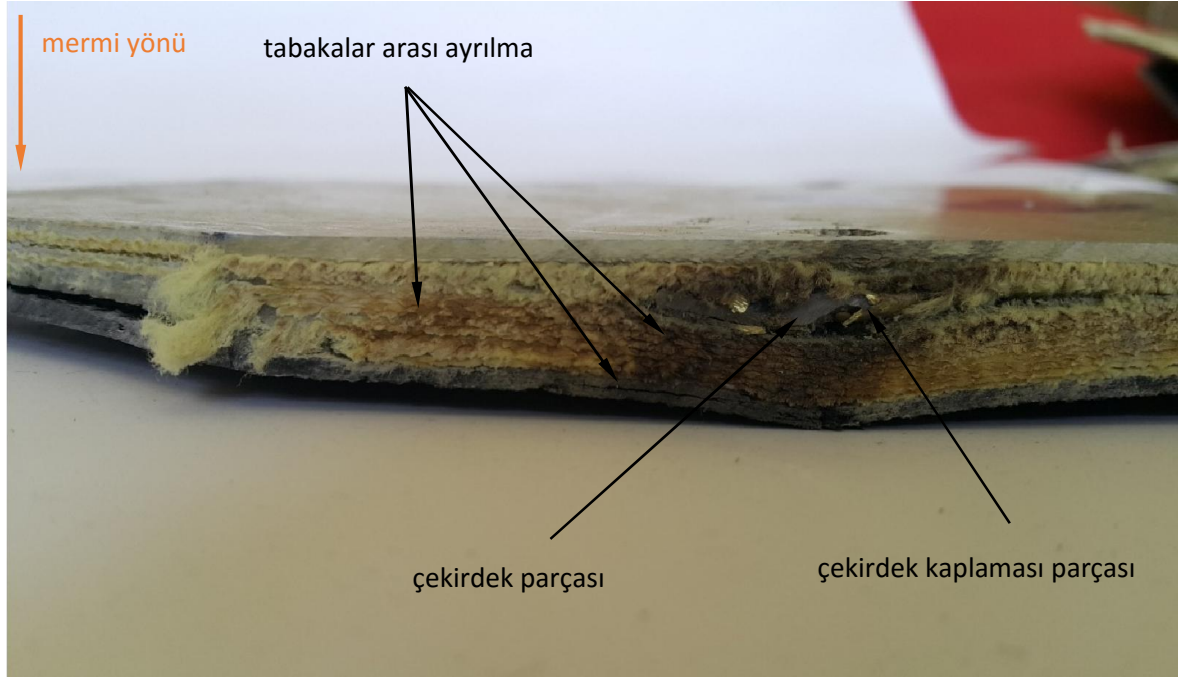
Şekil 6. 20. B3 numunesinde 2 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

B3 numunesine yapılan atışlar içerisinde 3 nolu atış en yavaş mermi hızına sahip olan atıştır. Şekil 6.21.' de B3 numunesine yapılan 3 nolu atışa ait malzeme kesit fotoğrafı verilmektedir. Mermi hedefe temas ettiği bölgede cam fiber tabakasında ve aramid fiber tabakasında fiber kopması hasarına sebep olmuş fakat aramid fiber tabaka içerisinde durdurulmuştur. Bu atış perforasyon ile sonuçlanmamıştır. Çarpmanın etkisiyle aramid fiber tabakalarda delaminasyon ve tabakalar arası ayrılma meydana gelmiştir.



Şekil 6. 21. B3 numunesinde 3 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

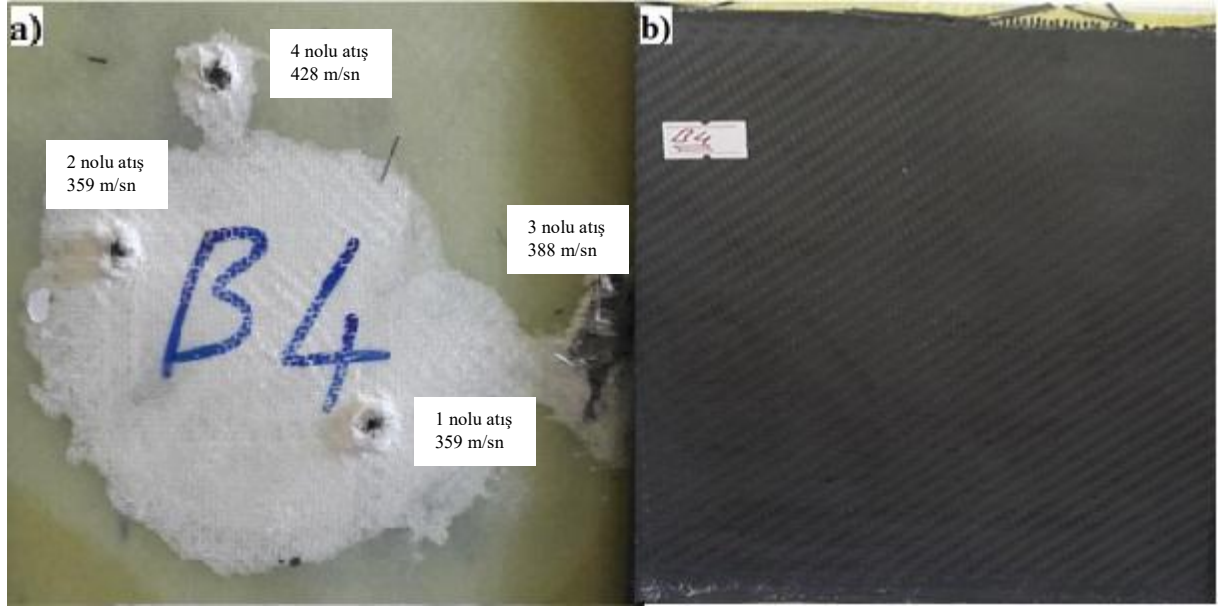
Şekil 6.22.' de 4 nolu atışa ait fotoğrafta görüldüğü üzere merminin hedefe darbe yaptığı bölgede fiber kopması meydana gelmiş ve cam fiber tabakalar hasar görmüştür. 4 nolu atış B4 numunesine yapılan atışlar içerisinde en yüksek mermi hızı ile yapılan atıştır. Aramid fiber tabakalarda delaminasyon ve karbon fiber tabakalarda tabakalar arası ayrılma meydana gelmiştir. Bu atışta perforasyon meydana gelmemiştir.



Şekil 6. 22. B3 numunesinde 4 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

6.1.3. [Karbon(Twill)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(Twill)₁₀] 30 Tabakalı Numune

[Karbon(Twill)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(Twill)₁₀] 30 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numuneye de diğer numunelerde olduğu gibi NIJ 0101-06 standardına uygun olarak 5 m mesafeden Beretta marka tabanca ve 9 mm FMJ mermi kullanılarak atış testleri yapılmış ve atış sonrası fotoğrafları Şekil 6.23.' de gösterilmiştir. Atışlar sırasında kronograf ile mermi hızları kaydedilmiştir. Tablo 6.4.' de yapılan atışlara ait mermi hızı, mermi kinetik enerjisi ve çöküntü değerleri verilmiştir.

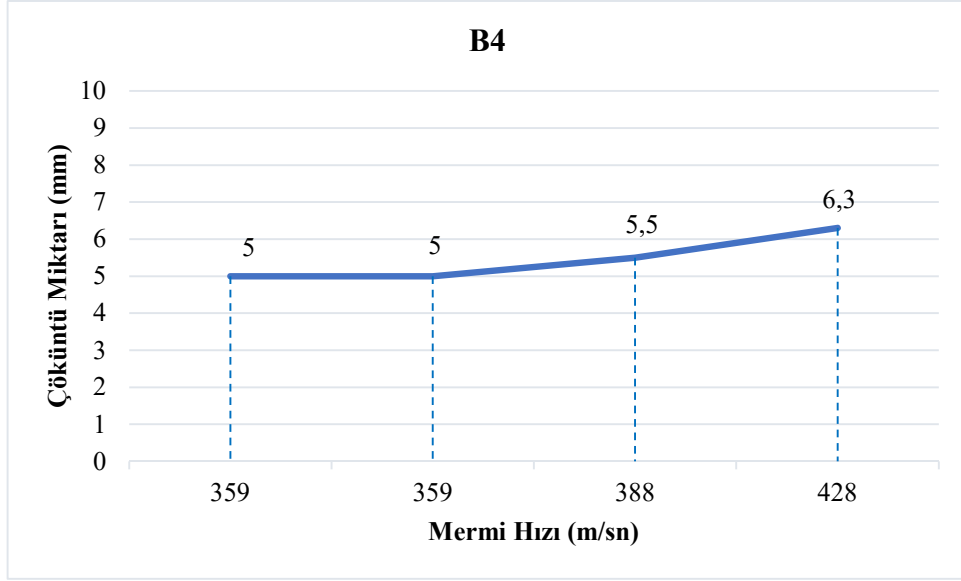


Şekil 6. 23. [Karbon(Twill)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(Twill)₁₀] numunesinin balistik test sonucu fotoğrafı
a) ön görünüş b) arka görünüş

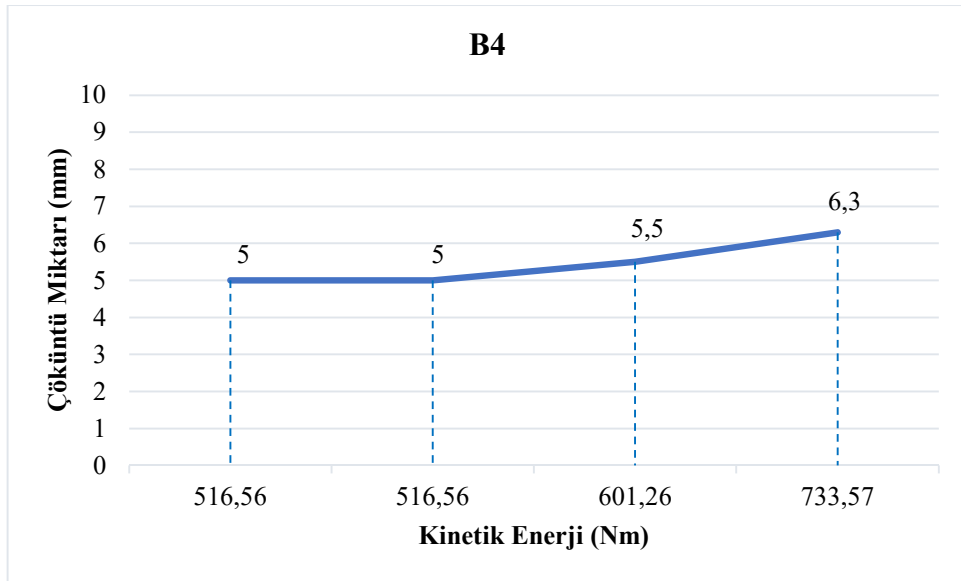
Tablo 6. 4. [Karbon(Twill)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(Twill)₁₀] numunesinin balistik testlerine ait mermi hızı, mermi kinetik enerjisi ve çöküntü değerleri

Numune Adı: B4				
Atış No	Atış Hızı (m/sn)	Kinetik Enerji (Nm)	Çöküntü Miktarı (mm)	Değerlendirme
1	359	516.56	5.00	Delinme Yok
2	359	516.56	5.00	Delinme Yok
3	388	601.26	5.50	Delinme Yok
4	428	733.57	6.30	Delinme Yok
Ortalama	384	591.99	5.49	

B4 adlı numuneye yapılan atışların hiç birinde perforasyon meydana gelmemiş ve bu numune başarılı olmuştur. En arkada destek plakası olarak çalışan karbon fiber kumaşta herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. B4 adlı numunenin balistik limitinin 359 m/sn ile 428 m/sn aralığında olduğu tespit edilmiştir. Yapılan atışlar göz önüne alındığında ortalama 384 m/sn mermi hızına karşılık ortalama çöküntü değeri 5.49 mm'dir. Bu numune NIJ Seviye II-A standardına göre koruma sağlamaktadır. Şekil 6.24.' de mermi hızı – çöküntü miktarı grafiği ve Şekil 6.25.'de kinetik enerji – çöküntü miktarı grafiği verilmiştir.



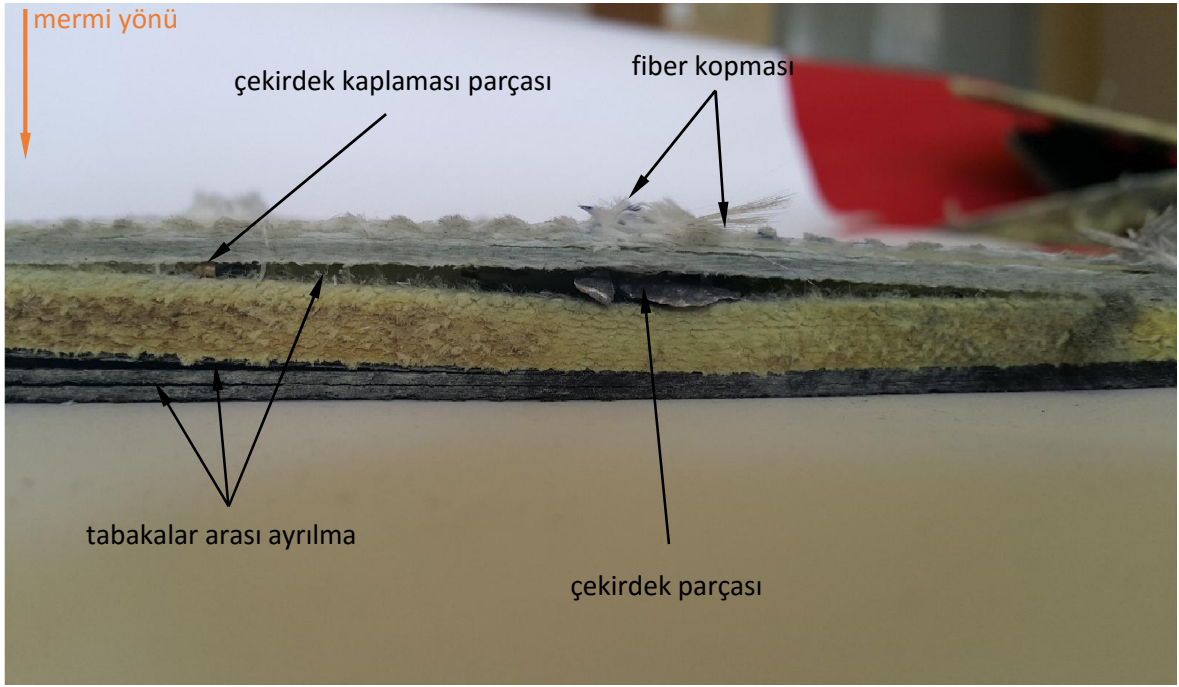
Şekil 6. 24. [Karbon(Twill)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(Twill)₁₀] numunesine ait mermi hızı – çöküntü miktarı grafiği



Şekil 6. 25. [Karbon(Twill)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(Twill)₁₀] numunesine ait kinetik enerji – çöküntü miktarı grafiği

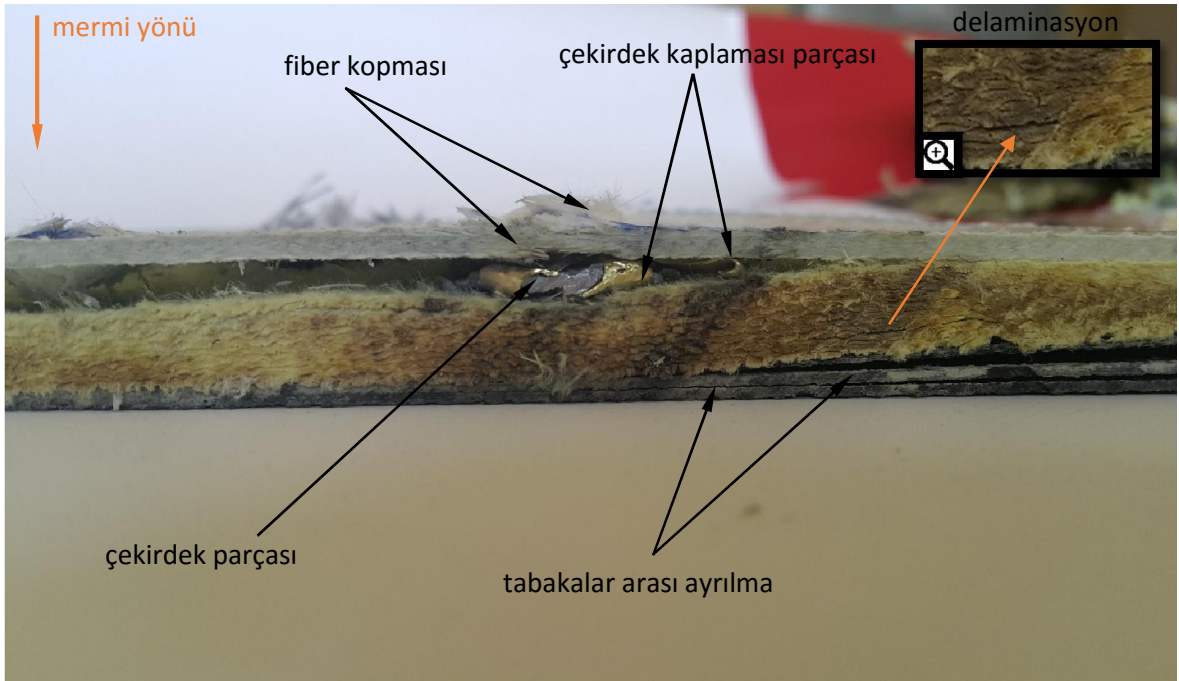
Şekil 6.24. ve Şekil 6.25.'de verilen deney sonuçlarından anlaşılabileceği üzere çöküntü miktarı mermi hızının ve buna bağlı olarak kinetik enerjinin artmasıyla doğru orantılı olarak artış göstermiştir.

Şekil 6.26.'da 1 nolu atışa ait malzeme kesit fotoğrafı görülmektedir. Merminin hedefe darbe yaptığı bölgede cam fiber tabakalarda fiber kopması meydana gelmiş, ardından gelen aramid fiber tabakalara herhangi bir hasar vermeden durdurulmuştur. Destek plakası olan karbon fiber tabakalarda ise tabakalar arası ayrılma meydana gelmiştir.



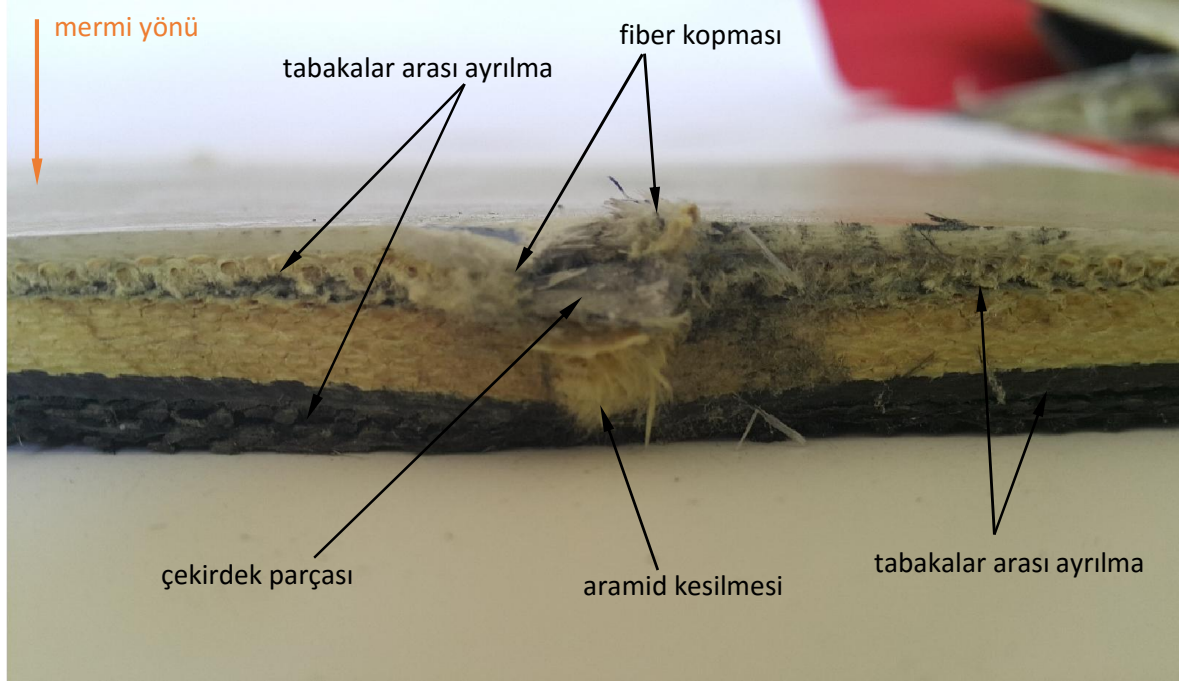
Şekil 6. 26. B4 numunesinde 1 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

Şekil 6.27.' da 2 nolu atışa ait malzeme kesit fotoğrafı görülmektedir. 2 nolu atışın mermi hızı aynı numuneye yapılan 1 nolu atış hızı ile aynıdır ve iki plakada da aynı hasar şekilleri meydana gelmiştir. Atış perforasyonla sonuçlanmamış ve numune başarılı olmuştur.



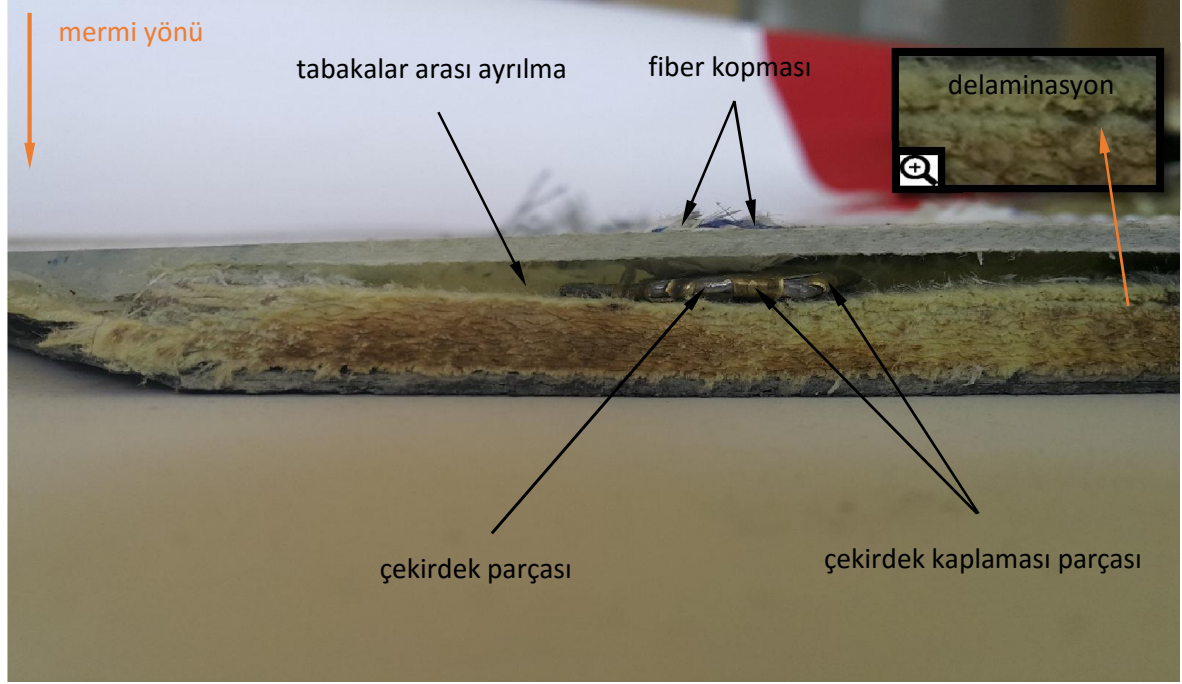
Şekil 6. 27. B4 numunesinde 2 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

Şekil 6.28.' deki fotoğrafta 3 nolu atışa ait malzeme kesiti görülmektedir. Atış sonucu perforasyon meydana gelmemiştir. Cam fiber ve aramid fiber tabakalarda fiber kopması meydana gelmiş ve mermi çekirdeği tutulmuştur. Aramid fiber plakalarda delaminasyona ve karbon fiber tabakalarda, tabakalar arası ayrılmaya sebep olmuştur.



Şekil 6. 28. B4 numunesinde 3 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

Şekil 6.29.' de malzeme kesiti fotoğrafı verilen ve sisteme yapılan sıralı atışlar içerisinde en yüksek mermi hızına sahip olan 4 nolu atış sonucu perforasyon meydana gelmemiştir. Merminin hedefe çarptığı noktada cam fiber tabakalarda fiber kopması meydana gelmiştir. Mermi cam fiber tabakaları geçtikten sonra arkasındaki aramid fiber tabakalara nüfuz edememiştir. Cam fiber ve aramid fiber tabakalar arasında tabakalar arası ayrılma hasarı meydana gelmiştir. Aramid fiber tabakalarda delaminasyona sebep olmuştur.



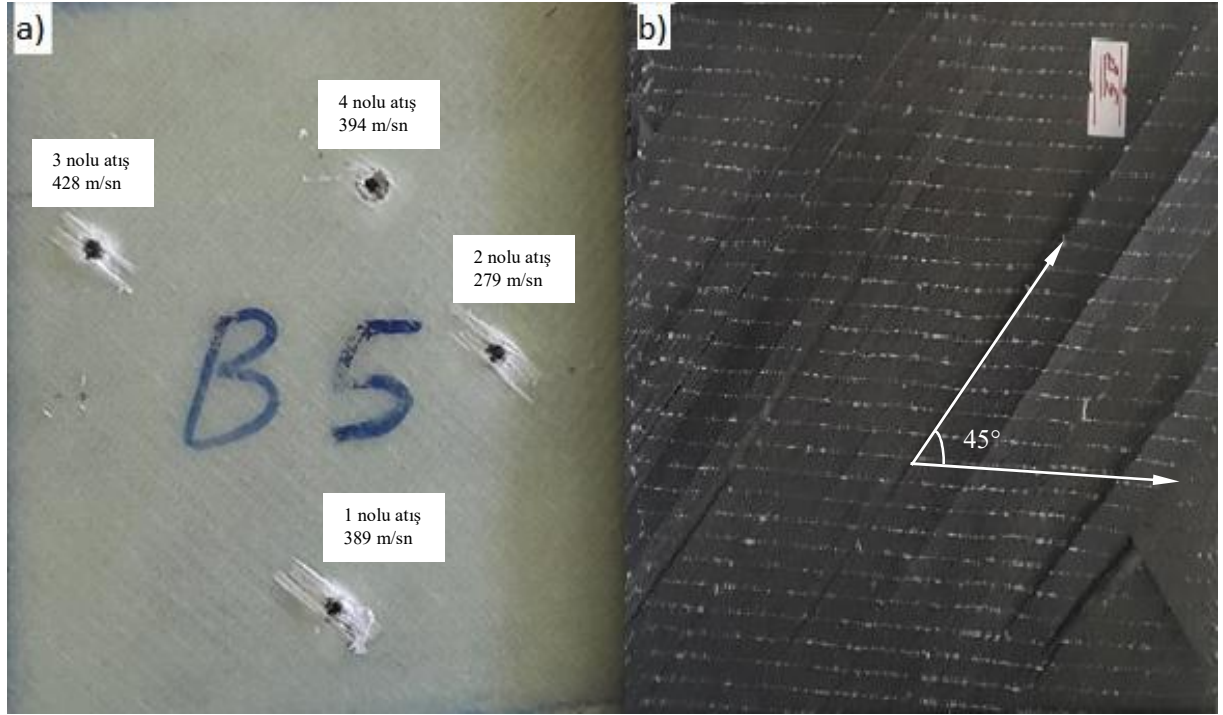
Şekil 6. 29. B4 numunesinde 4 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

6.2. [Karbon₇/Aramid₇/Cam₇] 21 Tabakalı Numuneler

Zırh malzemesi tasarımında balistik koruma sağlamanın yanı sıra hafiflikte çok önemli bir etkindir. 30 tabakalı numunelere yapılan tüm atışların başarılı olmasının ardından daha hafif olan 21 tabakalı plakalar üretilmiş ve bu numunelere de NIJ.0101-06 standardına uygun olarak 5 m mesafeden Beretta marka tabanca ile 9 mm FMJ mermi kullanılarak atışlar yapılmıştır.

6.2.1. [Karbon(45°)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(45°)₇] 21 Tabakalı Numune

Şekil 6.30.'daki fotoğraflarda atış testleri yapılan [Karbon(45°)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(45°)₇] 21 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numune gösterilmiş ve Tablo 6.5.'de yapılan atışlara ait mermi hızı, mermi kinetik enerjisi ve çöküntü değerleri verilmiştir.

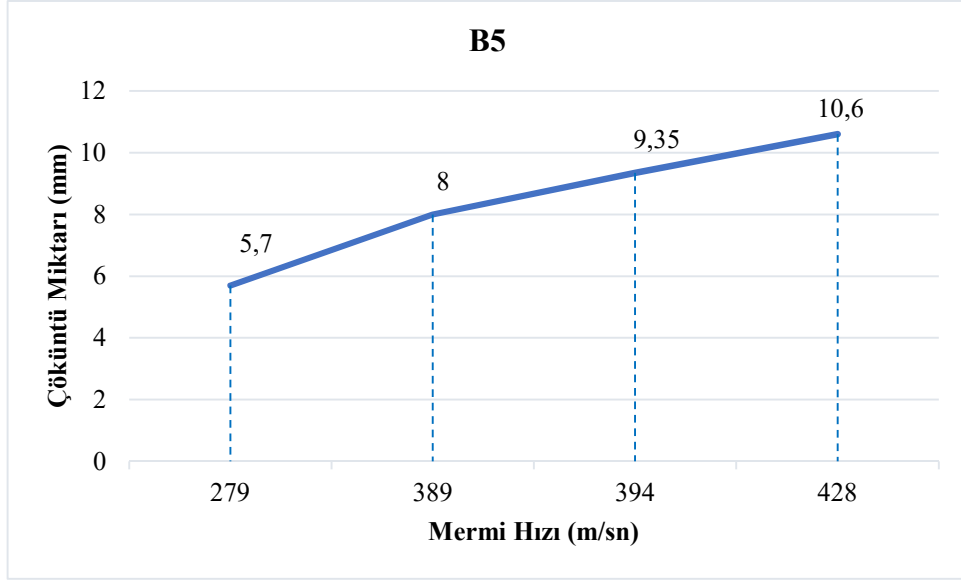


Şekil 6. 30. [Karbon(45°)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(45°)₇] numunesinin balistik test sonucu fotoğrafı a) ön görünüş b) arka görünüş

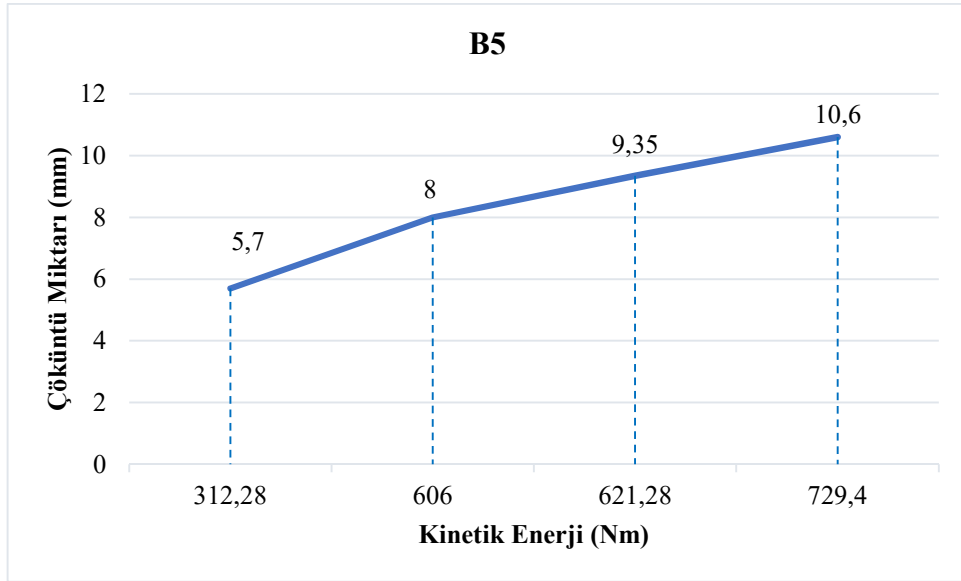
Tablo 6. 5. [Karbon(45°)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(45°)₇] numunesinin balistik testlerine ait mermi hızı, mermi kinetik enerjisi ve çöküntü değerleri

Numune Adı: B5				
Atış No	Atış Hızı (m/sn)	Kinetik Enerji (Nm)	Çöküntü Miktarı(mm)	Değerlendirme
1	389	606.00	8.00	Delinme Yok
2	279	312.28	5.70	Delinme Yok
3	428	729.40	10.60	Delinme Yok
4	394	621.28	9.35	Delinme Yok
Ortalama	372	567.24	8.41	

21 tabakalı numunelerin ilki olan B5 adlı numuneye yapılan atışların hiçbirinde perforasyon meydana gelmemiş ve numune başarılı olmuştur. B5 numunesine yapılan 4 adet atışın ortalama hızı 372 m/sn ve buna karşılık gelen ortalama çöküntü değeri 8,41 mm'dir. Bu numune NIJ Seviye II-A standardına göre koruma sağlamaktadır. Numunede sert yapısıyla destek plakası görevi gören karbon fiber kumaşa, merminin uyguladığı kuvvetle karbon fiber kumaşın 45° olması sebebiyle $\pm 45^\circ$ yönünde fiber hasarı meydana gelmiştir. Yapılan atışlar sonucunda elde edilen mermi hızı – çöküntü miktarı ve kinetik enerji – çöküntü miktarı grafikleri Şekil 6.31. ve Şekil 6.32.'de verilmiştir.



Şekil 6. 31. [Karbon(45°)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(45°)₇] numunesine ait mermi hızı – çöküntü miktarı grafiği

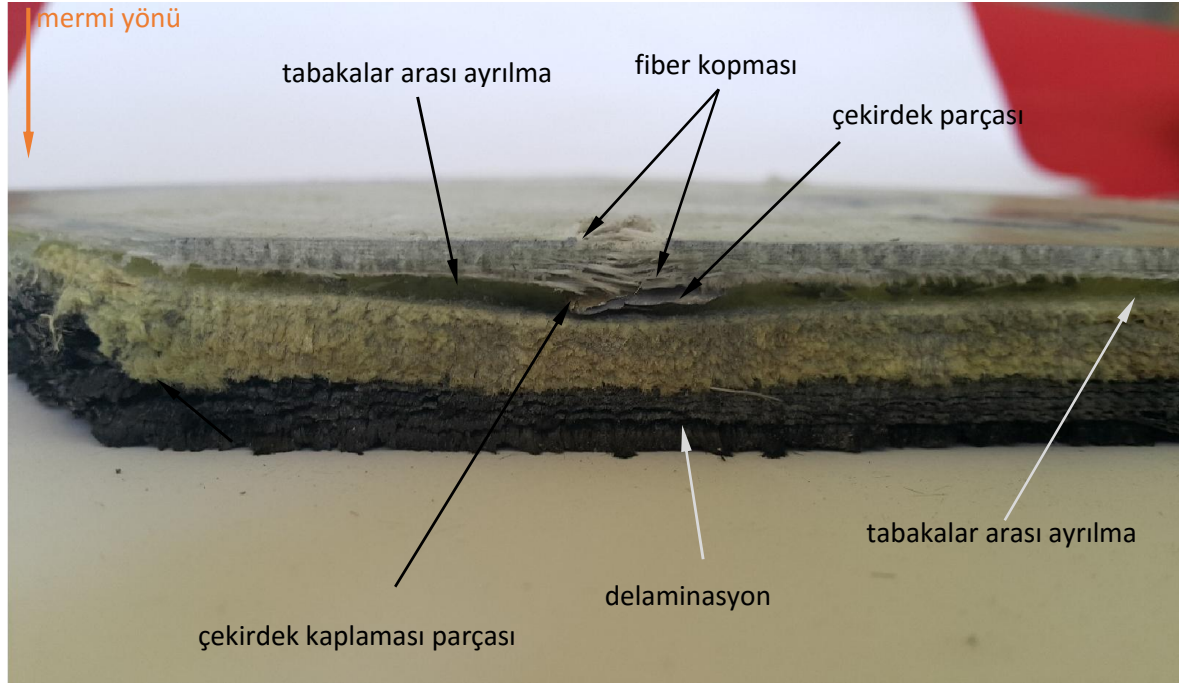


Şekil 6. 32. [Karbon(45°)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(45°)₇] numunesine ait kinetik enerji – çöküntü miktarı grafiği

Deneylerden elde edilen veriler incelendiğinde, Şekil 6.31. ve Şekil 6.32.’de de görüldüğü üzere, çöküntü miktarlarının artan mermi hızları ile arttığı gözlemlenmiştir. Aynı dizilime sahip 30 katlı B1 numunesinde ortalama çöküntü miktarı 5.53 mm iken 21 katlı B2 numunesine ortalama çöküntü miktarı beklenildiği gibi artarak 8.41 mm olmuştur.

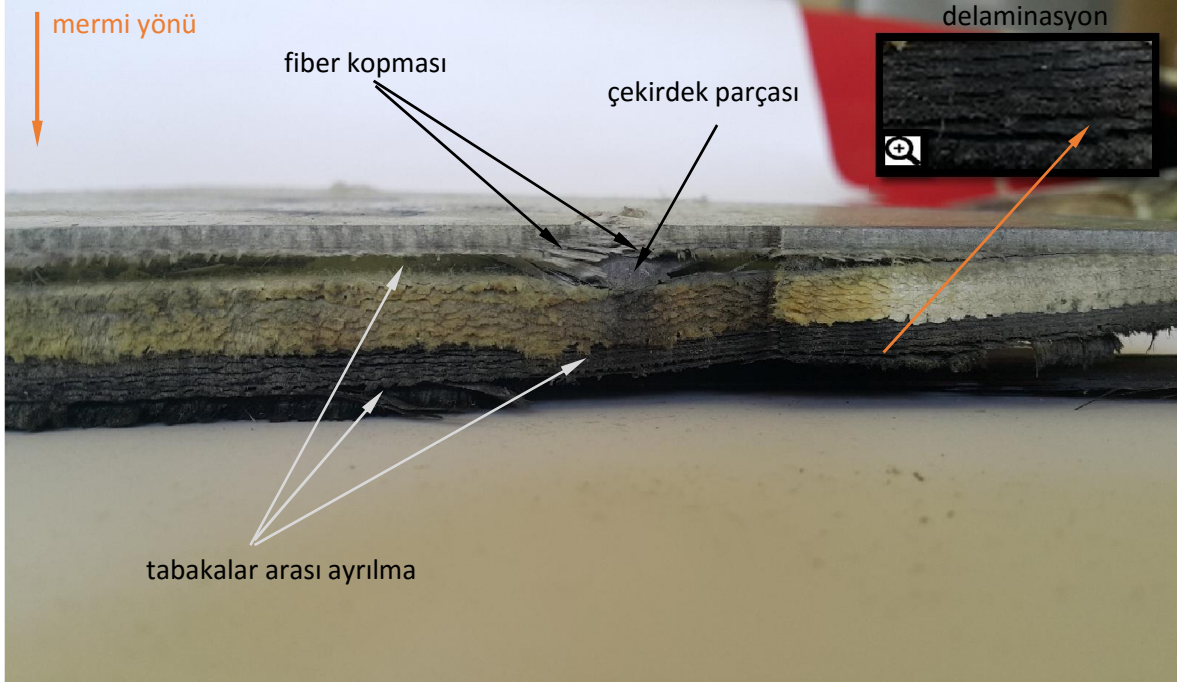
Perforasyon meydana gelmeyen 1 nolu atışa ait malzeme kesit fotoğrafı Şekil 6.33.’de verilmiştir. Atış sonucu mermi hedefe temas ettiği bölgede cam fiber tabakalarda fiber

kopması meydana getirmiş ve aramid fiber tabakalara nüfuz edemedi durdurulmuştur. Bu esnada aramid fiber tabakalarda delaminasyon ve karbon fiber tabakalarda ise tabakalar arası ayrılma hasarı meydana geldiği gözlemlenmiştir.



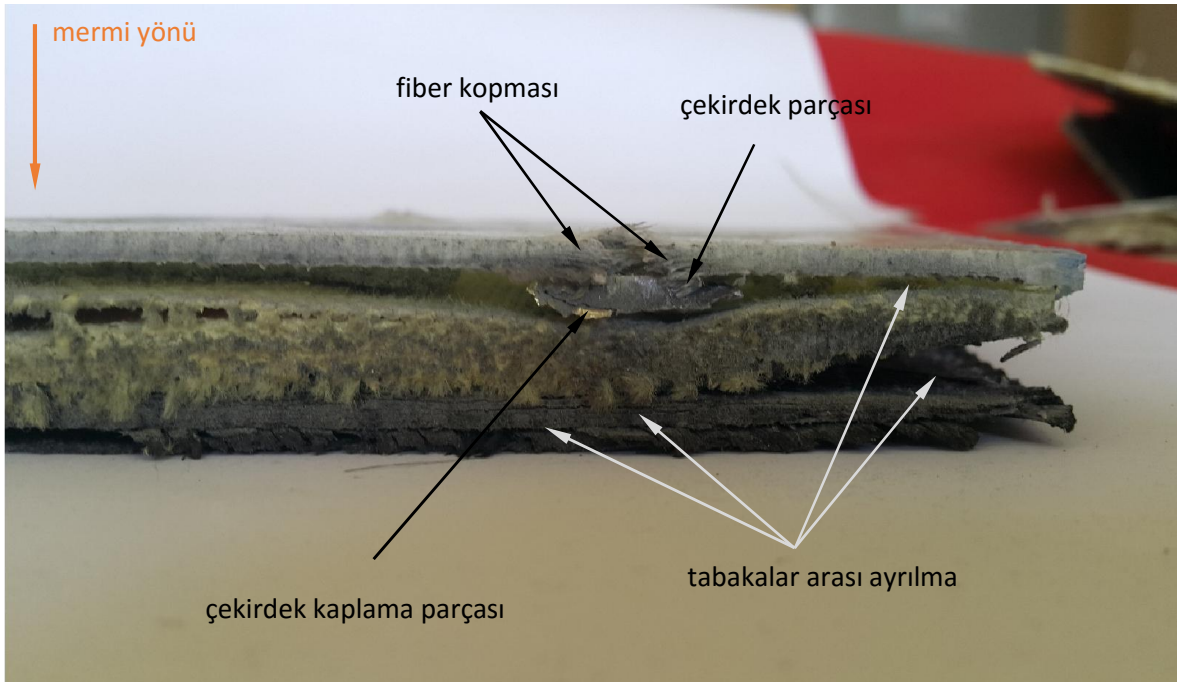
Şekil 6.33. B5 numunesinde 1 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

B5 numunesine yapılan 2 nolu atış bu numuneye yapılan atışlar içerisinde en düşük mermi hızına sahip olan atıştır. Buna bağlı olarak en az çöküntüye sebep olan atıştır. 2 nolu atışa ait malzeme kesit fotoğrafı Şekil 6.34.' de görülmektedir. Merminin hedefe vurduğu bölgede cam fiber tabakalarda fiber kopmasına ve cam fiber ile aramid fiber arasında tabaka ayrılmasına sebep olmuştur. Mermi aramid fiber tabakalara nüfuz edemedi durdurulmuştur. Destek plakası görevi gören karbon fiber tabakalarda ise tabakalar arası ayrılma hasarı meydana gelmiştir.



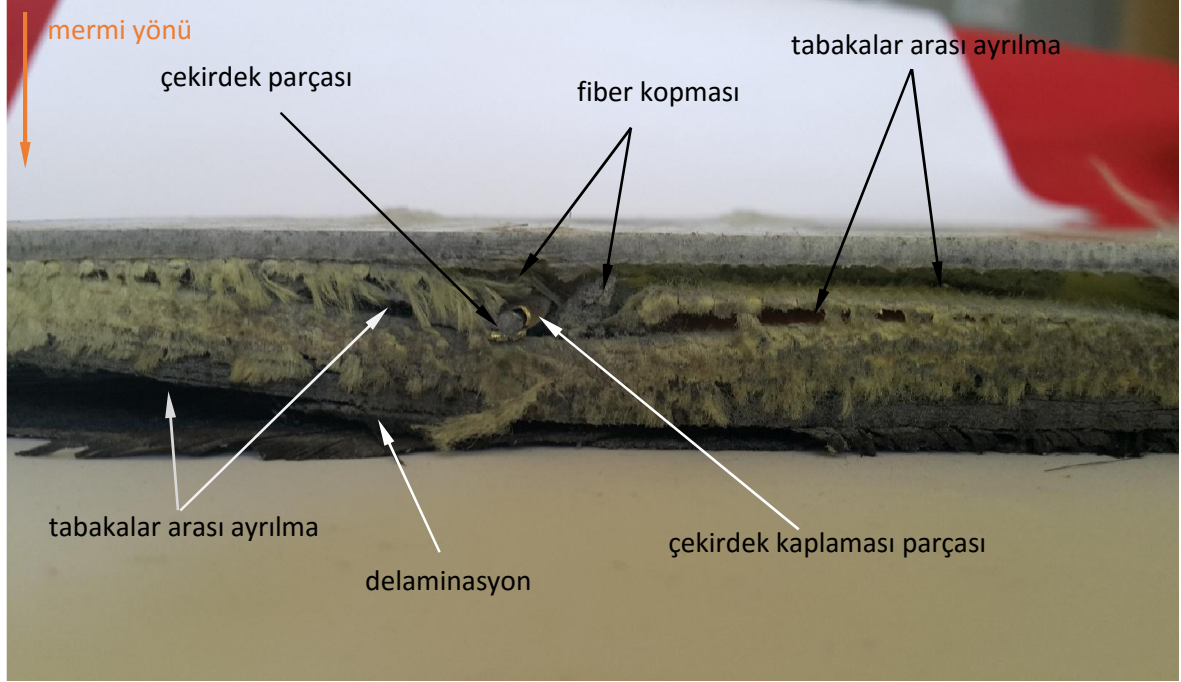
Şekil 6. 34. B5 numunesinde 2 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

Şekil 6.35.' de 3 nolu atışa ait malzeme kesit fotoğrafı görülmektedir. Bu atış B5 numunesine yapılan atışlar içerisinde en yüksek mermi hızına sahip atıştır. Perforasyon meydana gelmeyen bu atışta mermi cam fiber tabakalarında fiber kopması hasarına sebep olduktan sonra mermi deforme olmuş ve durdurulmuştur.



Şekil 6. 35. B5 numunesinde 3 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

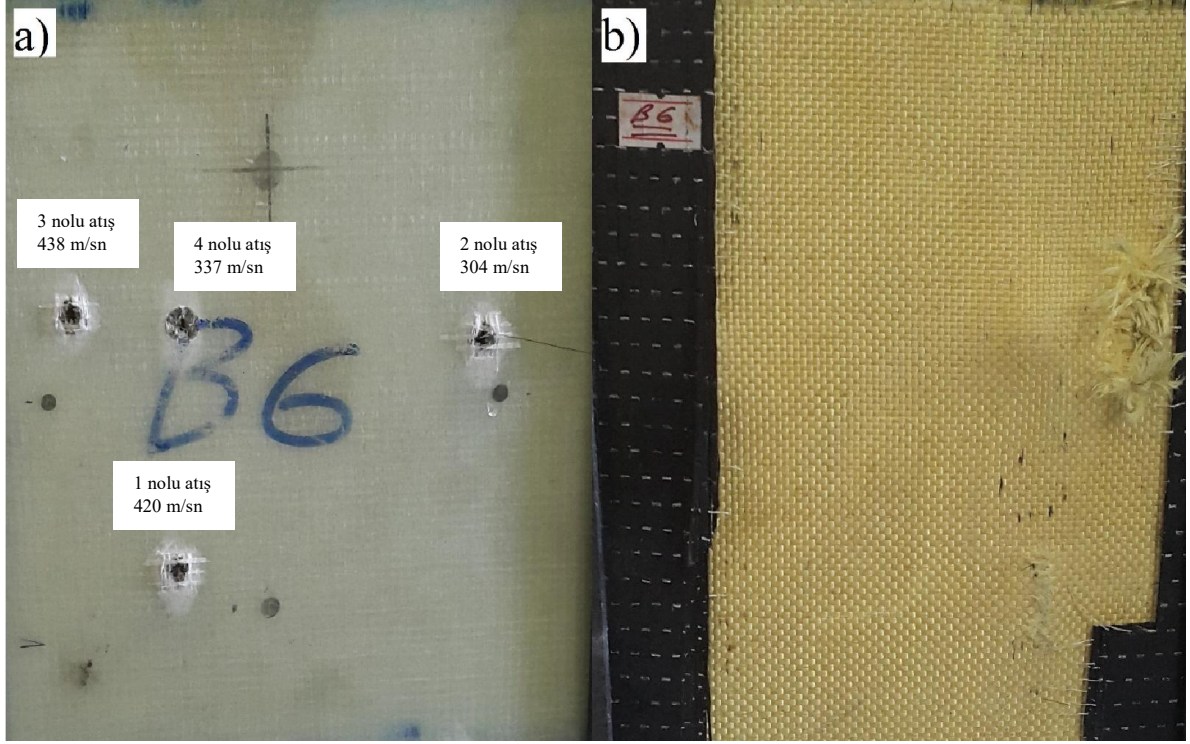
Şekil 6.36.' da 4 nolu atışa ait fotoğrafta görüldüğü üzere merminin hedefe darbe enerjisini aktardığı ilk bölgede fiber kopması meydana gelmiş ve cam fiber ve aramid fiber tabakalar hasar görmüştür. Mermi aramid fiber tabakalar içerisinde tutulmuştur. Darbe etkisiyle cam fiber ve aramid fiber tabakalar arasında ayrılma meydana gelmiştir. Ayrıca aramid fiber tabakalarda delaminasyon hasarı gelişmiştir. Perforasyon olmayan bu atışta karbon fiber tabakalarda tabakalar arası ayrılma gözlenmiştir.



Şekil 6. 36. B5 numunesinde 4 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

6.2.2. [Karbon(0°)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(0°)₇] 21 Tabakalı Numune

Atış testleri yapılan [Karbon(0°)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(0°)₇] 21 tabakalı numunenin atış sonrası fotoğrafları Şekil 6.37.' de gösterilmektedir. Tablo 6.6.' da ise bu numuneye yapılan atışlara ait mermi hızı, mermi kinetik enerjisi ve çöküntü değerleri verilmiştir.

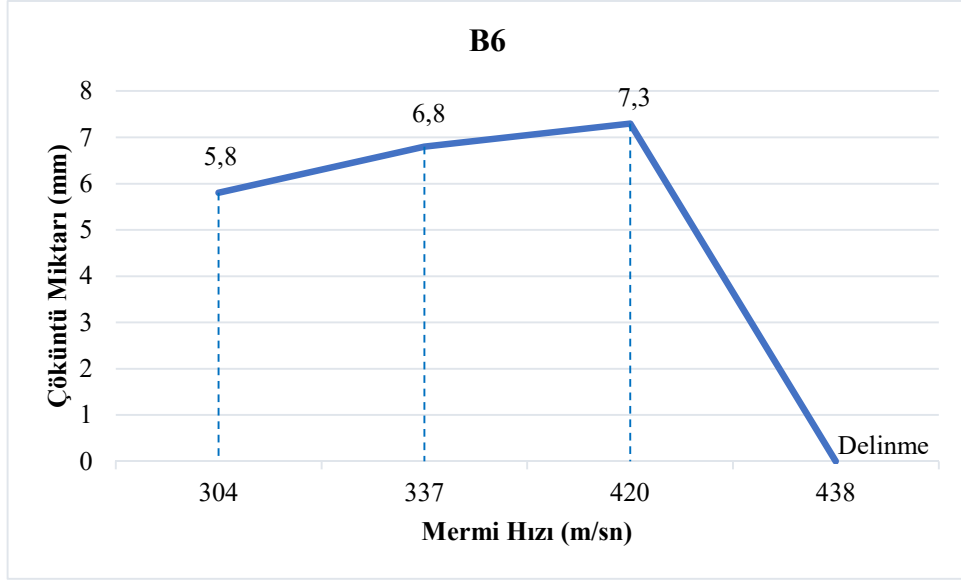


Şekil 6. 37. [Karbon(0°)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(0°)₇] numunesinin balistik test sonucu fotoğrafı a) ön görünüş b) arka görünüş

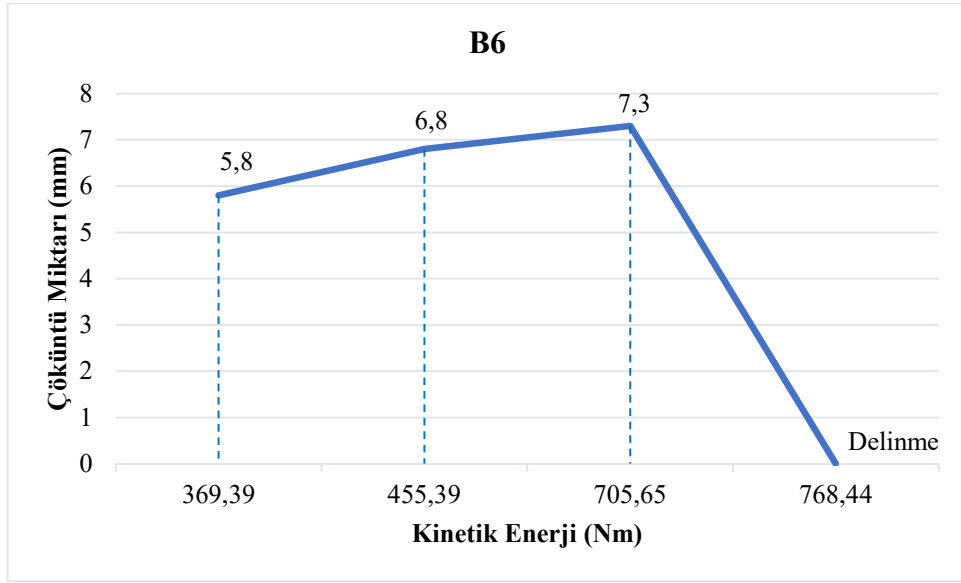
Tablo 6. 6. [Karbon(0°)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(0°)₇] numunesinin balistik testlerine ait mermi hızı, mermi kinetik enerjisi ve çöküntü değerleri

Numune Adı: B6				
Atış No	Atış Hızı (m/sn)	Kinetik Enerji (Nm)	Çöküntü Miktarı (mm)	Değerlendirme
1	420	705.65	7.30	Delinme Yok
2	304	369.39	5.80	Delinme Yok
3	337	455.39	6.80	Delinme Yok
4	438	768.44	-	Delinme
Ortalama	354	510.14	6.63	

B6 numunesine yapılan 4 atıştan 438 m/sn mermi hızına sahip olan 4. atışta perforasyon meydana gelmiştir. En arkada olan ve destek plakası görevi yapan karbon fiber plakalarda çarpışmanın etkisiyle kopma meydana gelmiştir. Perforasyonun meydana geldiği 4 nolu atış hariç diğer atışlar için ortalama 354 m/sn mermi hızına karşılık ortalama çöküntü değeri 6.63 mm'dir. Perforasyonun meydana geldiği 4 nolu atışta destek plakası olan karbon fiber tabakalar koparak sistemden ayrılmıştır. Yapılan atışlar sonucunda elde edilen mermi hızı – çöküntü miktarı ve kinetik enerji – çöküntü miktarı grafikleri Şekil 6.37. ve Şekil 6.38.'de verilmiştir.



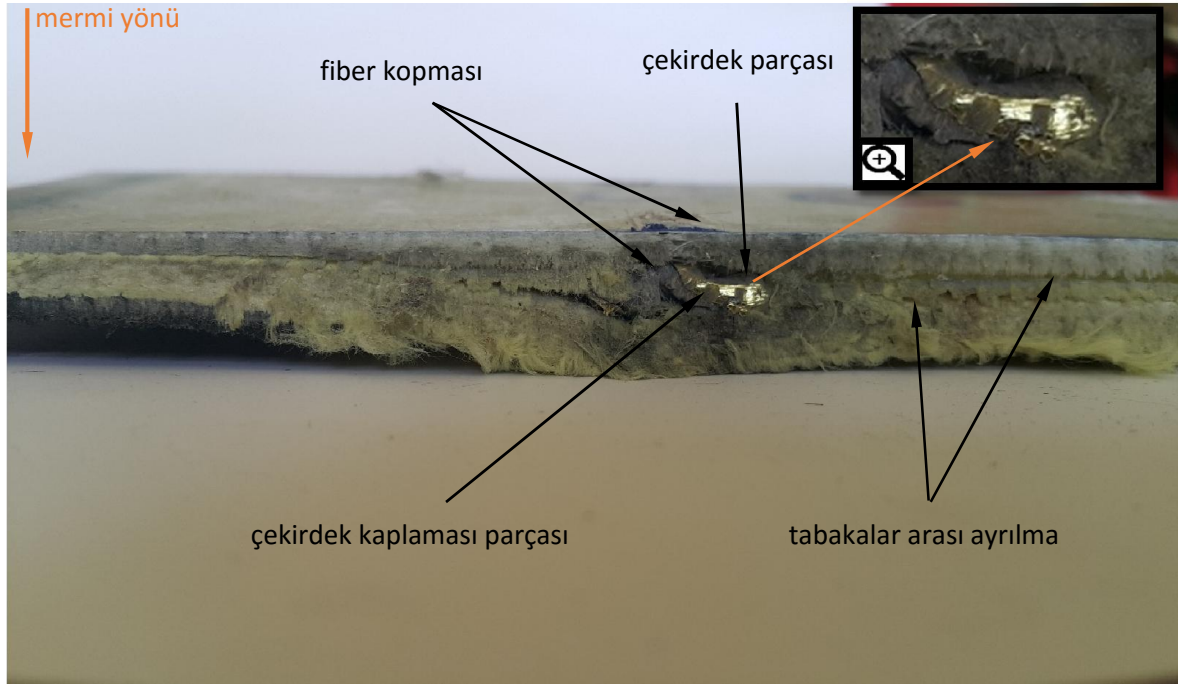
Şekil 6. 38. [Karbon(0°)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(0°)₇] numunesine ait mermi hızı – çöküntü miktarı grafiği



Şekil 6. 39. [Karbon(0°)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(0°)₇] numunesine ait kinetik enerji – çöküntü miktarı grafiği

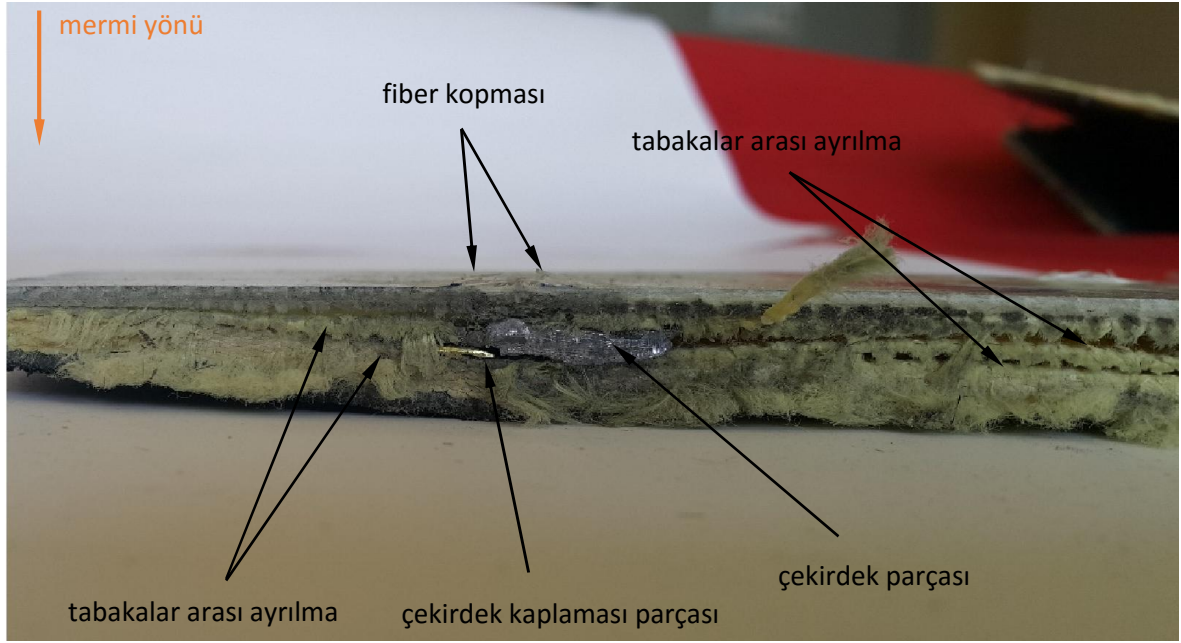
Şekil 6.38. ve Şekil 6.39.’daki grafiklerden de anlaşılacağı üzere perforasyon meydana gelmeyen atışlarda mermi hızı ve çöküntü değerleri arasında paralellik mevcuttur. Perforasyon meydana gelmeyen atışlar içerisinde en yüksek mermi hızına sahip olan 1 nolu atışın mermi hızı olan 420 m/sn, bu numune için balistik limit değeridir.

Perforasyon meydana gelmeyen 1 nolu atışa ait malzeme kesit fotoğrafı Şekil 6.40.’ da verilmiştir. Atış sonucu merminin hedefe temas ettiği bölgede cam fiber ve aramid fiber tabakalarda fiber kopması meydana getirmiş ve aramid fiber tabakaların içerisinde durdurulmuştur. Bu esnada Aramid fiber tabakalarda delaminasyon tabakalar arası ayrılma hasarı meydana geldiği gözlemlenmiştir.



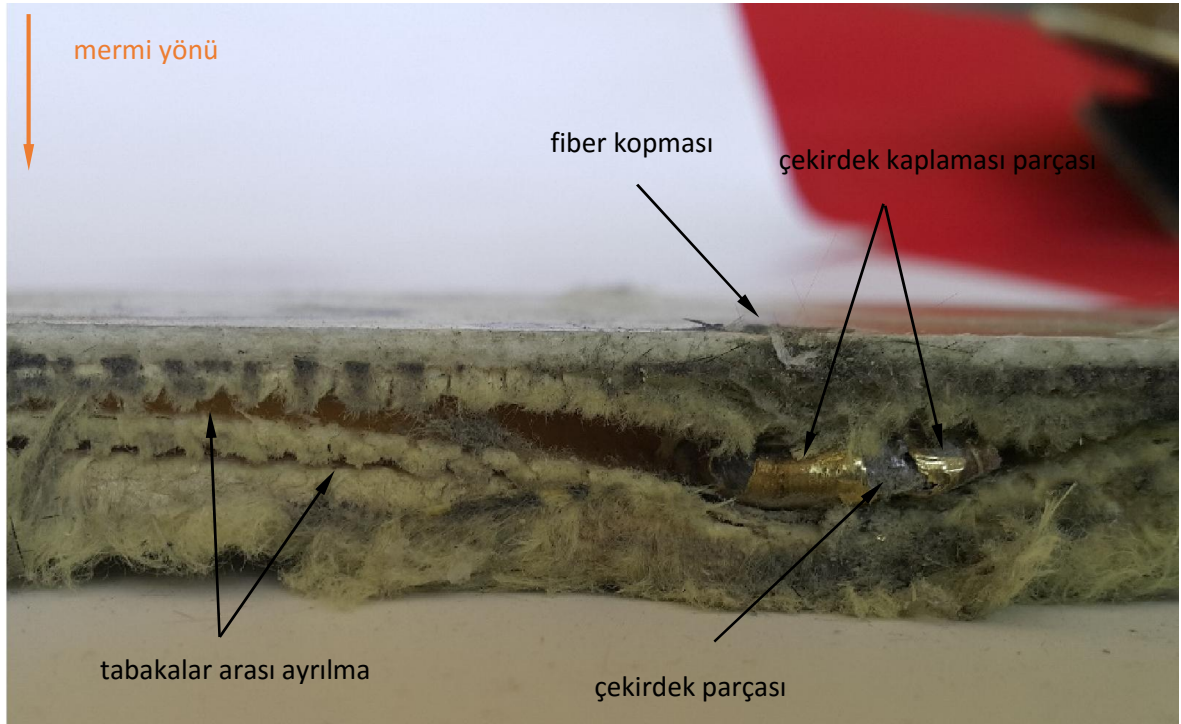
Şekil 6. 40. B6 numunesinde 1 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

B6 numunesine yapılan 2 nolu atış bu numuneye yapılan atışlar içerisinde en düşük mermi hızına sahip olan atıştır. Buna bağlı olarak en az çöküntüye sebep olan atıştır. 2 nolu atışa ait malzeme kesit fotoğrafı Şekil 6.41.’ de görülmektedir. Hasar bölgesinde cam fiber ve aramid fiber tabakalarda fiber kopmasına ve aramid fiber arasında tabaka ayrılmasına sebep olmuştur.



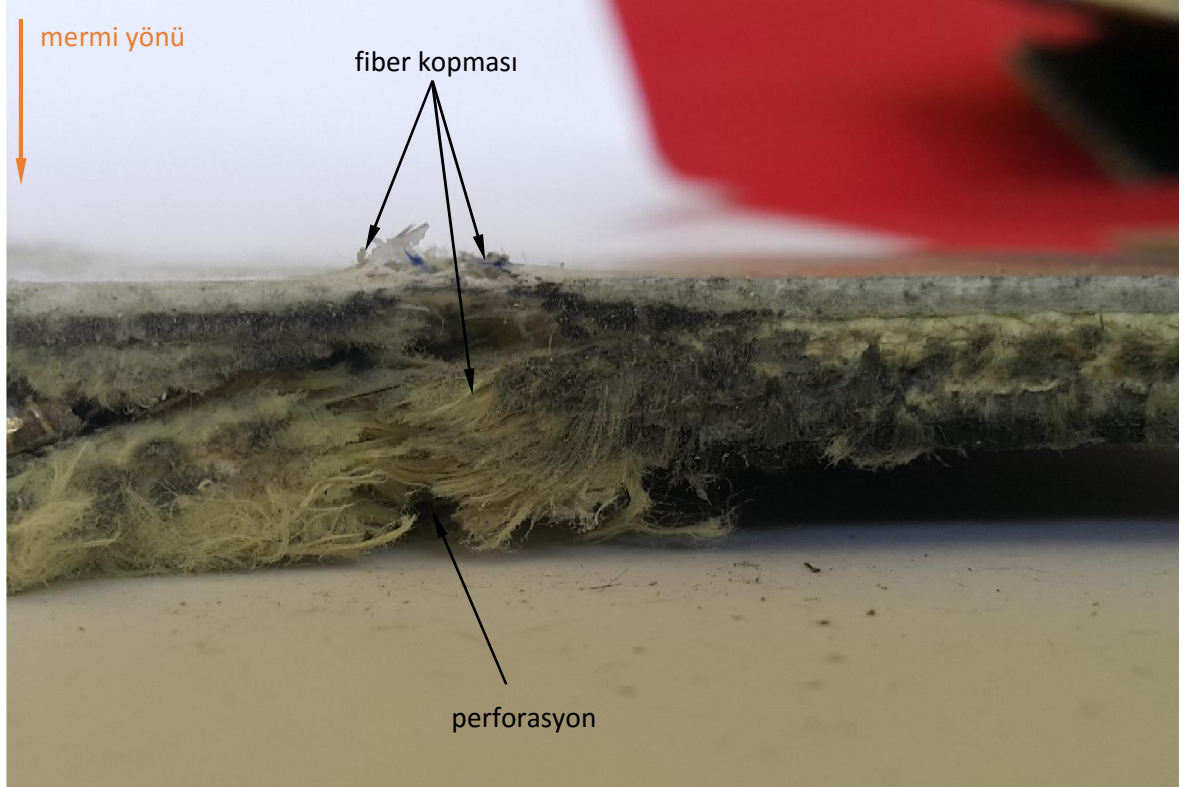
Şekil 6. 41. B6 numunesinde 2 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

Şekil 6.42.' de 3 nolu atışa ait malzeme kesit fotoğrafı görülmektedir. Merminin hedefe darbe yaptığı bölgede cam fiber ve aramid fiber tabakalarda fiber kopması meydana gelmiş ve aramid fiber tabakalar içinde durdurulmuştur.



Şekil 6. 42. B6 numunesinde 3 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

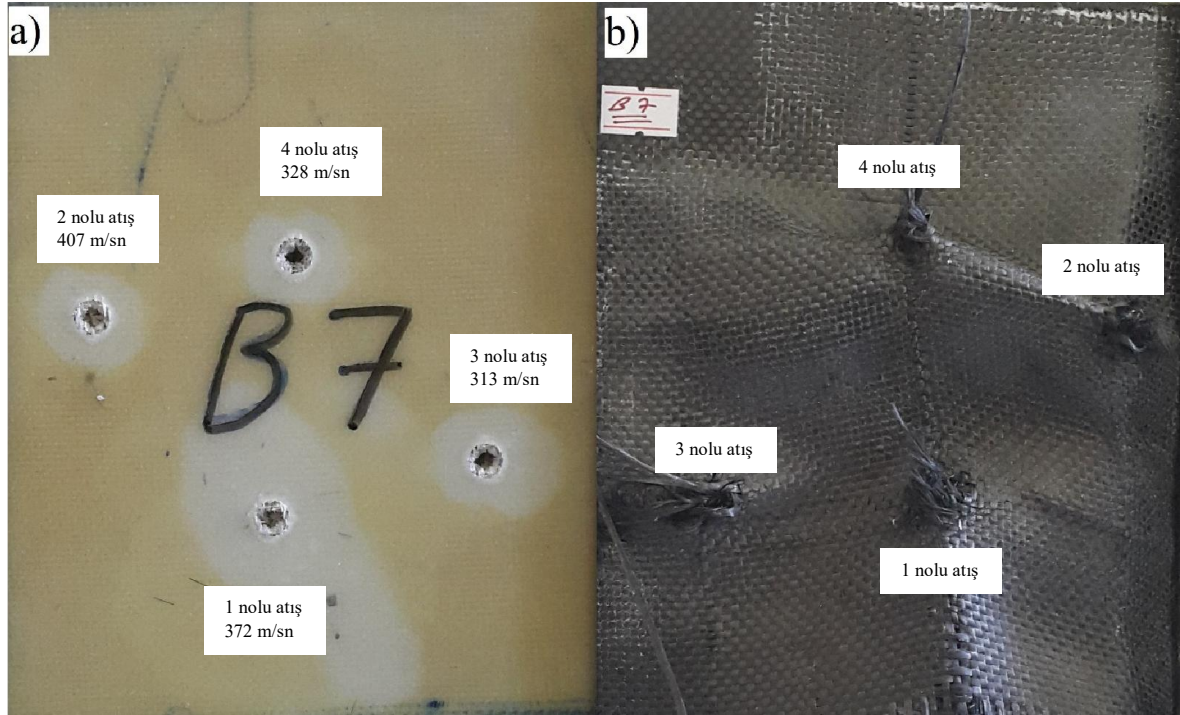
B6 numunesine yapılan atışlar içerisinde en yüksek mermi hızına sahip olan ve perforasyona sebep olan 4 nolu atışa ait malzeme kesit fotoğrafı Şekil 6.43.' de görülmektedir. Atış sonucu perforasyon meydana gelmiş ve mermi çekirdeği numuneyi tamamen terk etmiştir. Merminin hedefte oluşturduğu darbe etkisiyle en arkada destek plakası görevi gören karbon fiber tabakalar parçalanmıştır.



Şekil 6. 43. B6 numunesinde 4 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

6.2.3. [Karbon(Plain)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(Plain)₇] 21 Tabakalı Numune

[Karbon(Plain)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(Plain)₇] 21 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numuneye yapılan atış testleri sonundaki fotoğrafları Şekil 6.44.' de verilmiştir.



Şekil 6. 44. [Karbon(Plain)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(Plain)₇] numunesinin balistik test sonucu fotoğrafı
a) ön görünüş b) arka görünüş

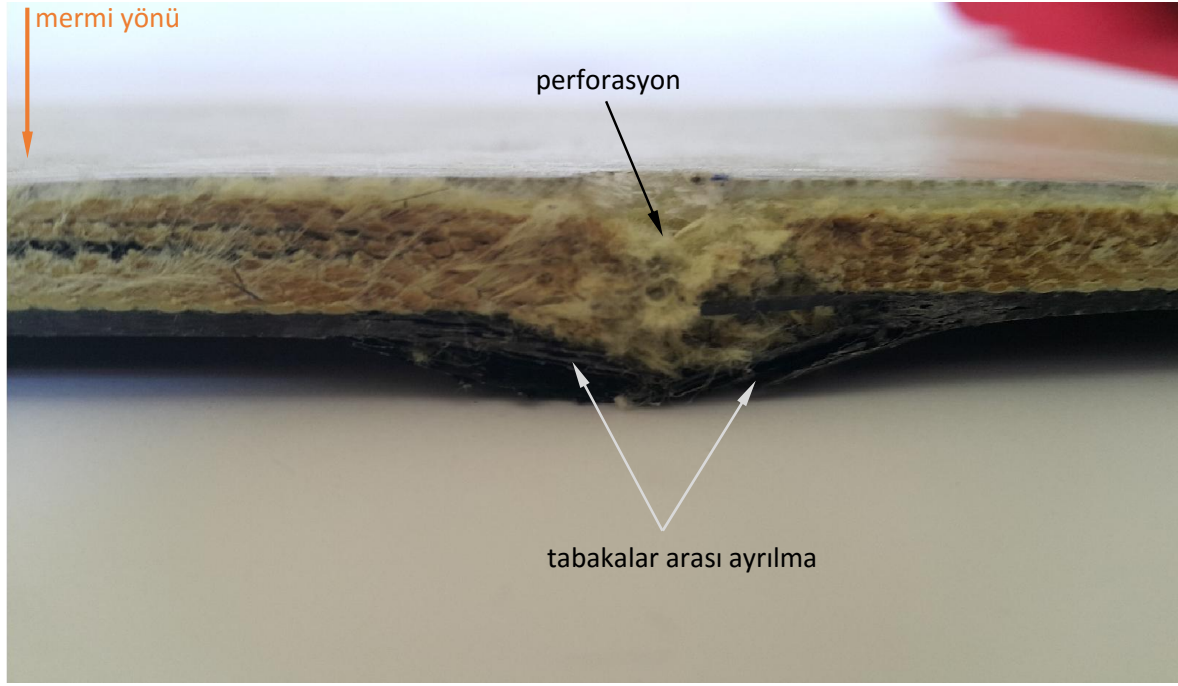
B7 adlı numuneye yapılan atışlara ait mermi hızı, mermi kinetik enerjisi ve çöküntü değerleri verilmiştir Tablo 6.7.' de gösterilmektedir.

Tablo 6. 7. [Karbon(Plain)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(Plain)₇] numunesinin balistik testlerine ait mermi hızı, mermi kinetik enerjisi ve çöküntü değerleri

Numune Adı: B7				
Atış No	Atış Hızı (m/sn)	Kinetik Enerji (Nm)	Çöküntü Miktarı (mm)	Değerlendirme
1	372	554.01	-	Delinme
2	407	663.29	-	Delinme
3	313	391.19	-	Delinme
4	328	429.44	-	Delinme
Ortalama	355	509.48	-	

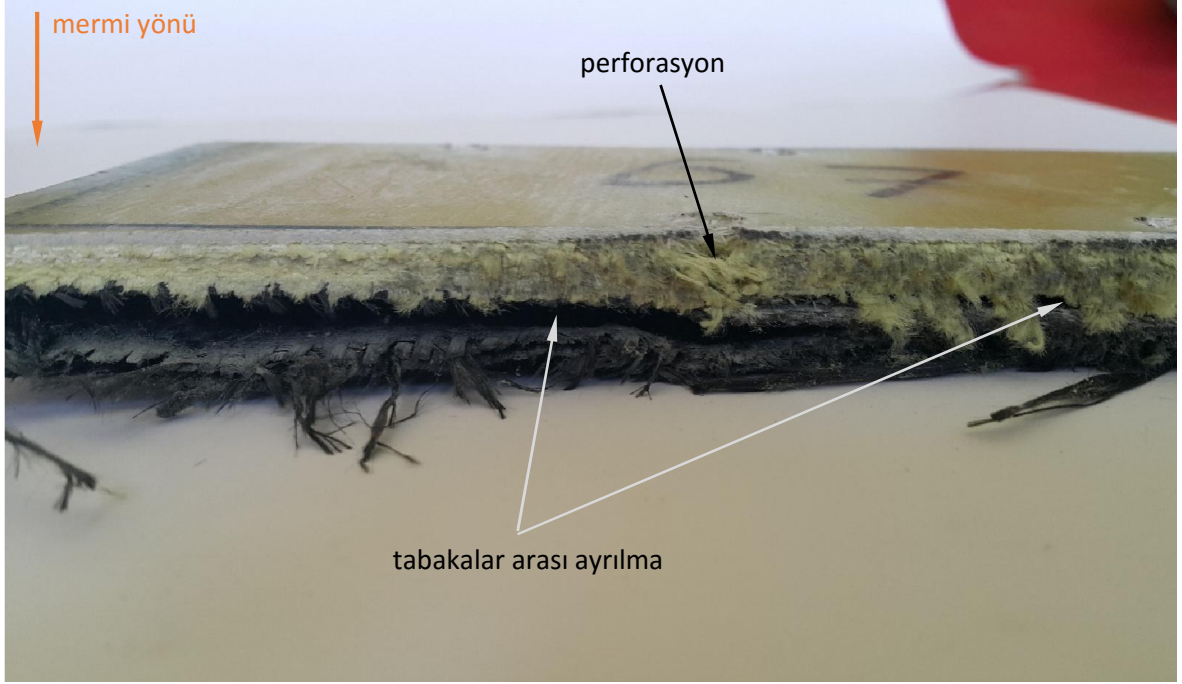
B7 numunesine yapılan 4 atışta mermi hızları 313 m/sn ile 407 m/sn hızları arasındadır. Bu atışların hepsi perforasyonla sonuçlanmış ve numune başarısız olmuştur. Atışların hepsi perforasyonla sonuçlandığı için mermi hızı – çöküntü ve kinetik enerji – çöküntü değeri grafikleri çizilememiştir. Yapılan bu atışlar sonucunda elde edilen bulguları inceleyecek olursak:

Şekil 6.45.' de B7 numunesine yapılan 1 nolu atışa ait numune kesit fotoğrafı görülmektedir. Bu atışta perforasyon meydana gelmekle birlikte mermi çekirdeği sistemi tamamen terk etmiştir. Merminin hedefe darbe yaptığı bölgede aramid fiber tabakalarda ve destek plakası olan karbon fiber tabakalarda tabakalar arası ayrılma meydana geldiği görülmektedir.



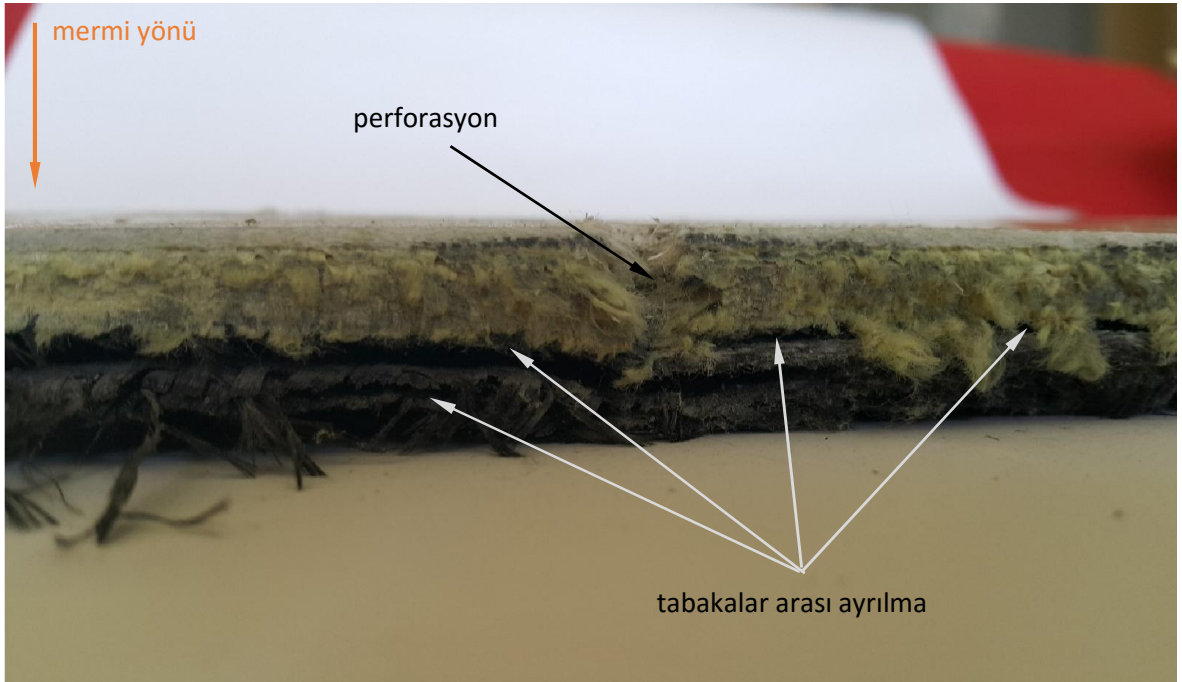
Şekil 6. 45. B7 numunesinde 1 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

Şekil 6.46.' da verilen ve B7 numunesine yapılan sıralı atışlar içerisinde en yüksek mermi hızına sahip olan 2 nolu atışa ait malzeme kesit fotoğrafı verilmiştir. Bu atış sonucunda perforasyon meydana gelmiştir. Mermi B7 numunesinde perforasyona sebep olmakla beraber karbon fiberde tabakalar arası ayrılmaya sebep olmuştur.



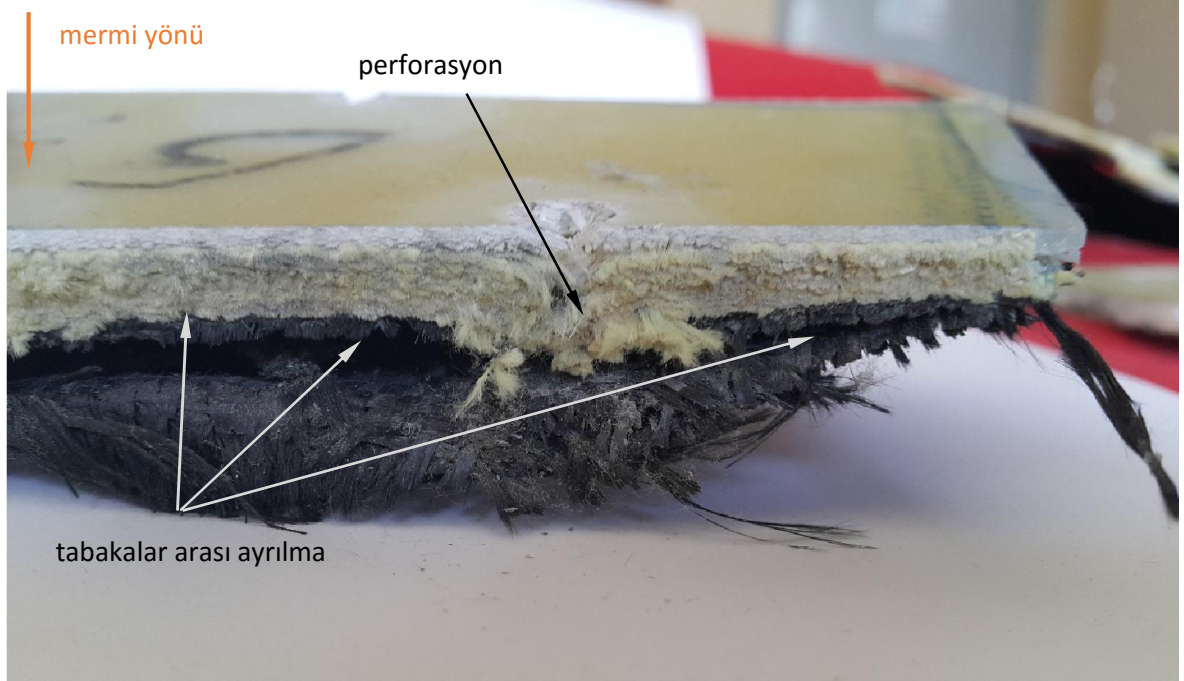
Şekil 6. 46. B7 numunesinde 2 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

B7 numunesine yapılan 3 nolu atışa ait malzeme kesit fotoğrafı Şekil 6.47.'de gösterilmektedir. Bu atışta B7 numunesi mermiye karşı herhangi bir direnç gösterememiş ve atış perforasyonla sonuçlanmıştır.



Şekil 6. 47. B7 numunesinde 3 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

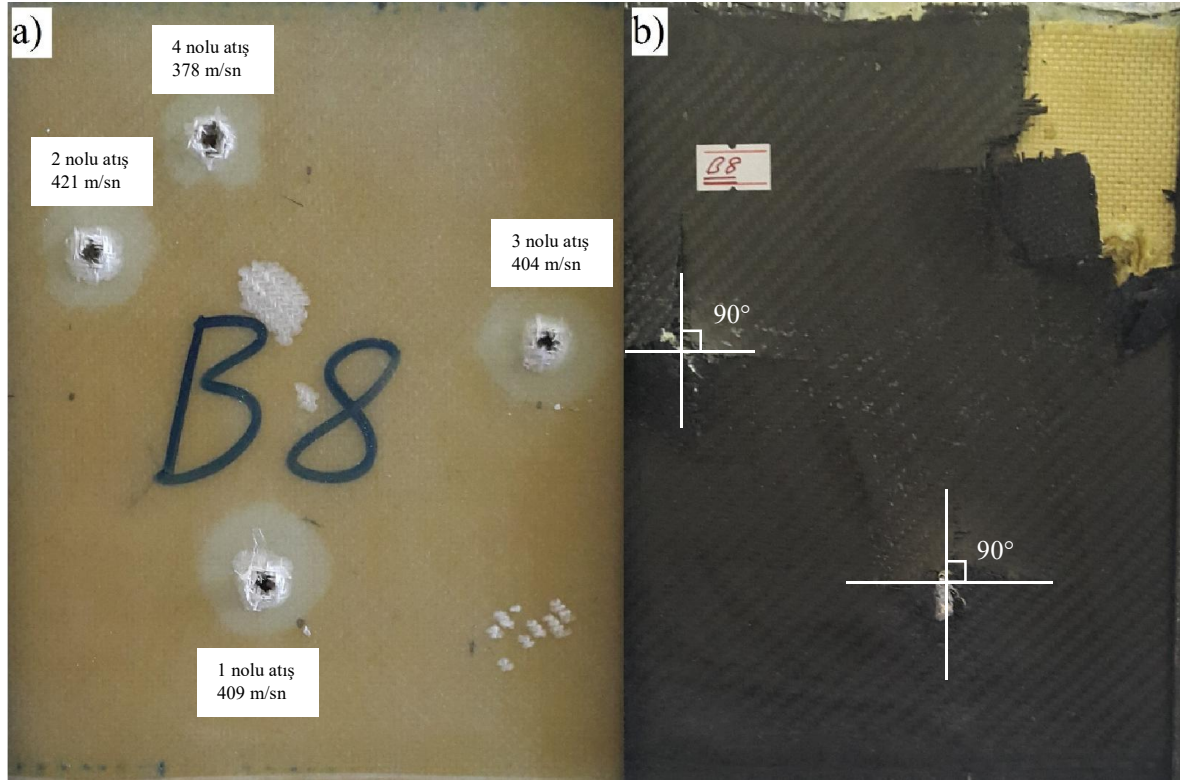
Şekil 6.48.' de B7 numunesine yapılan 4 nolu atışa ait fotoğrafta görüldüğü üzere merminin hedefe darbe yaptığı bölgede perforasyon meydana gelmiş ve karbon fiber tabakalar arasında tabakalar arası ayrılma meydana gelmiştir.



Şekil 6. 48. B7 numunesinde 4 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

6.2.4. [Karbon(Twill)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(Twill)₇] 21 Tabakalı Numune

[Karbon(Twill)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(Twill)₇] 21 tabakalı hibrit polyester reçine matriksli numuneye de diğer numunelerde olduğu gibi NIJ 0101-06 standardına uygun olarak 5m mesafeden Beretta marka tabanca ve 9 mm FMJ mermi kullanılarak atış testleri yapılmış ve atış sonrası fotoğrafları Şekil 6.49.' da gösterilmiştir. Atışlar sırasında kronograf ile mermi hızları kaydedilmiştir. Tablo 6.8.' de yapılan atışlara ait mermi hızı, mermi kinetik enerjisi ve çöküntü değerleri verilmiştir.



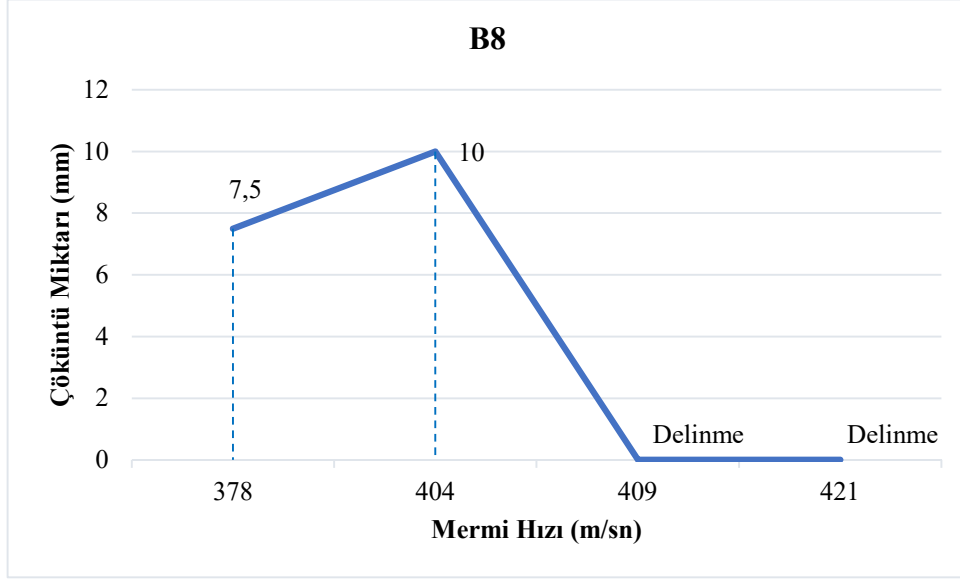
Şekil 6. 49. [Karbon(Twill)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(Twill)₇] numunesinin balistik test sonucu fotoğrafı
a) ön görünüş b) arka görünüş

Tablo 6. 8. [Karbon(Twill)₇/Aramid(Plain)₇/Cam(Twill)₇] numunesinin balistik testlerine ait mermi hızı, mermi kinetik enerjisi ve çöküntü değerleri

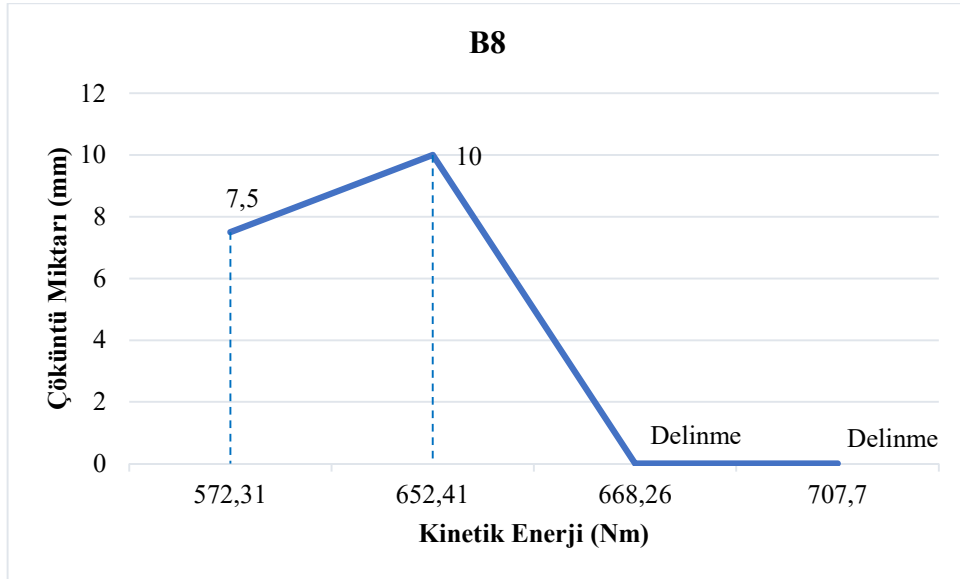
Numune Adı: B8				
Atış No	Atış Hızı (m/sn)	Kinetik Enerji (Nm)	Çöküntü Miktarı (mm)	Değerlendirme
1	409	668.26	-	Delinme
2	421	707.70	-	Delinme
3	404	652.41	10	Delinme Yok
4	378	572.31	7.50	Delinme Yok
Ortalama	391	612.36	8.75	

B8 numunesine yapılan 4 atıştan 409 m/sn ve 421 m/sn mermi hızına sahip olan 1. ve 2. atışta perforasyon meydana gelmiştir. En arkada olan karbon fiber kumaşın twill olması sebebiyle delinme olmayan atışlarda hem yatay hem dikey yönde fiber hasarı meydana gelmiştir. 2 nolu atış sonrası karbon fiber plakada kopma meydana gelmiştir. Perforasyonla sonuçlanan 1 nolu atış sonrası karbon fiber kumaşta twill dizilimden kaynaklı olarak hem yatay hem de dikey yönde hasar meydana gelmiştir. Perforasyonun meydana geldiği 1 ve 2 nolu atış hariç diğer atışlar için ortalama 391 m/sn mermi hızına karşılık ortalama çöküntü

değeri 8.75 mm'dir. Yapılan atışlar sonucunda elde edilen mermi hızı – çöküntü miktarı ve kinetik enerji – çöküntü miktarı grafikleri Şekil 6.50. ve Şekil 6.51.'de verilmiştir.



Şekil 6. 50. [Karbon(Twill)7/Aramid(Plain)7/Cam(Twill)7] numunesine ait mermi hızı – çöküntü miktarı grafiği

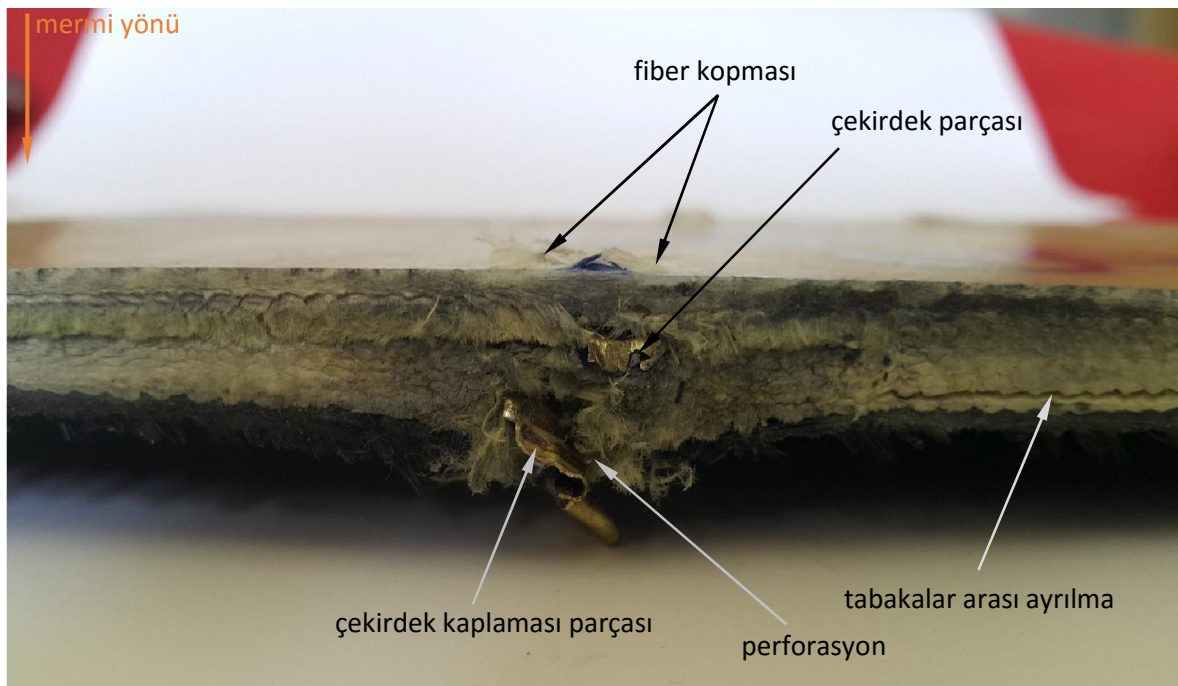


Şekil 6. 51. [Karbon(Twill)7/Aramid(Plain)7/Cam(Twill)7] numunesine ait kinetik enerji – çöküntü miktarı grafiği

Şekil 6.50. ve Şekil 6.51.'deki grafiklerden de anlaşılacağı üzere perforasyon meydana gelmeyen atışlarda mermi hızı ve kinetik enerji miktarı arttıkça çöküntü değerleri

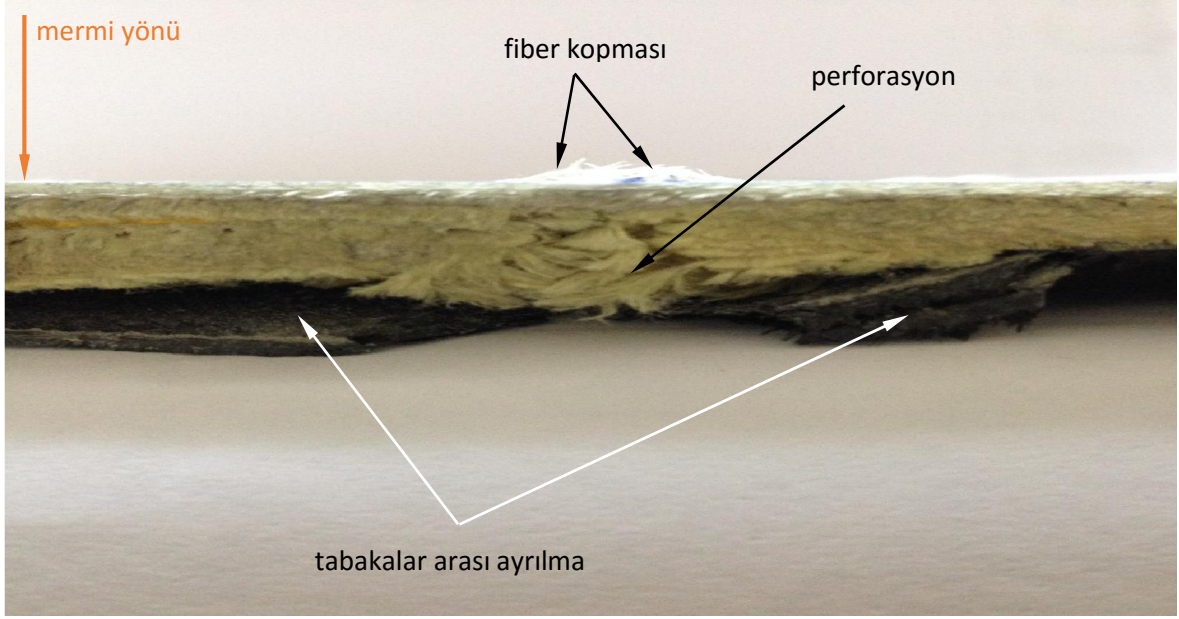
de artmaktadır. Perforasyon meydana gelmeyen atışlar içerisinde en yüksek mermi hızına sahip olan 2 nolu atışın mermi hızı olan 404 m/sn, bu numune için balistik limit değeridir.

Şekil 6.52.' de malzeme kesit fotoğrafı verilen 1 nolu atış sonucu perforasyon meydana gelmekle birlikte mermi çekirdeğinin parçalandığı ve deforme olmuş bir çekirdek parçasının aramid fiber tabakalar içinde kaldığı görülmektedir. Ayrıca aramid fiber tabakalarda merminin darbe etkisiyle delaminasyon ve tabakalar arası ayrılma hasarı meydana gelmiştir.



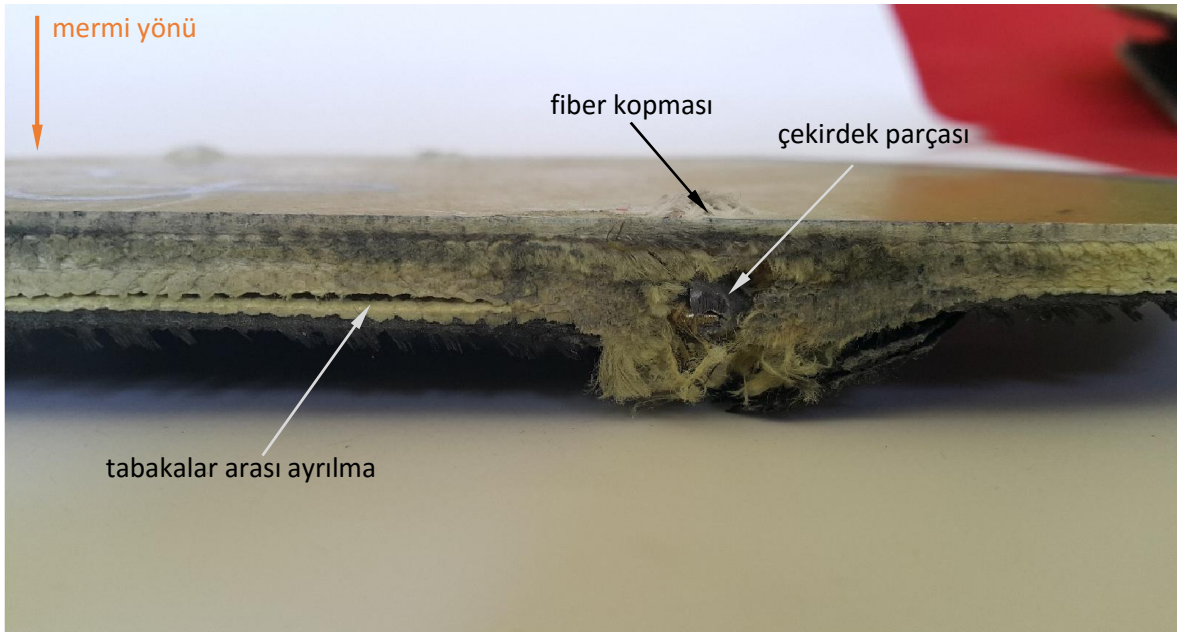
Şekil 6. 52. B8 numunesinde 1 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

Şekil 6.53.' de malzeme kesit fotoğrafları verilen ve B8 numunesine yapılan atışlar içerisinde en yüksek mermi hızına sahip olan 2 nolu atış sonucunda perforasyon meydana gelmiştir. Merminin hedefe darbe yaptığı bölgede cam fiber tabakalarda fiber kopması hasarı meydana gelmiş ve destek plakası görevi yapan karbon fiber tabakalarda kopma ve lokal ayrılmalar meydana gelmiştir.



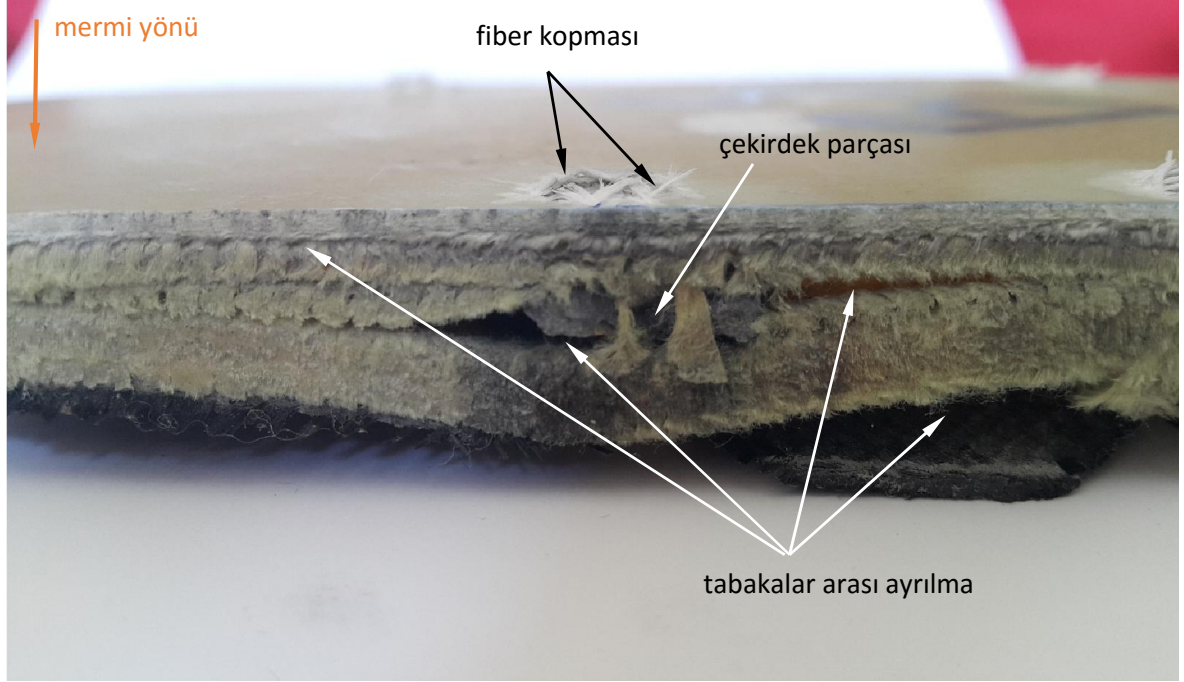
Şekil 6. 53. B8 numunesinde 2 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

Şekil 6.54.' deki fotoğrafta 3 nolu atışa ait malzeme kesiti görülmektedir. Atış sonucu perforasyon meydana gelmemiştir. Cam fiber ve aramid fiber tabakalarda fiber kopması meydana gelmiş ve mermi çekirdeği aramid fiber tabakalar içerisinde tutulmuştur. Aramid fiber plakalarda delaminasyon ve tabakalar arası ayrılma hasarı meydana gelmiştir.



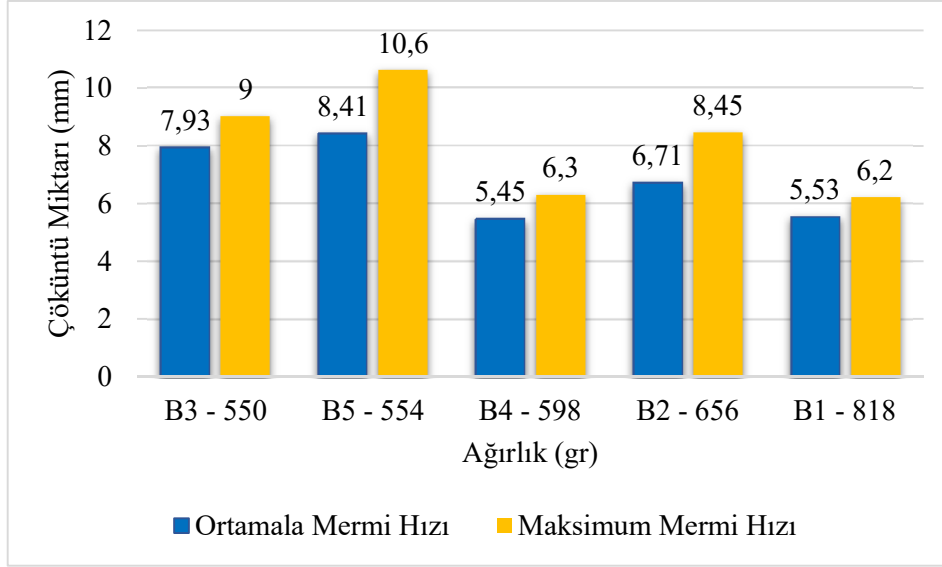
Şekil 6. 54. B8 numunesinde 3 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

B8 numunesine yapılan atışlar içerisinde 4 nolu atış en yavaş mermi hızına sahip olan atıştır. Şekil 6.55.' de B8 numunesine yapılan 4 nolu atışa ait malzeme kesit fotoğrafı verilmektedir. Mermi hedefe temas ettiği bölgede cam fiber tabakasında fiber kopması hasarına sebep olmuş ve mermi çekirdeği aramid fiber tabaka içerisinde durdurulmuştur. Bu atış perforasyon ile sonuçlanmamıştır. Çarpmanın etkisiyle aramid fiber tabakalarda delaminasyon ve tabakalar arası ayrılma meydana gelmiştir.



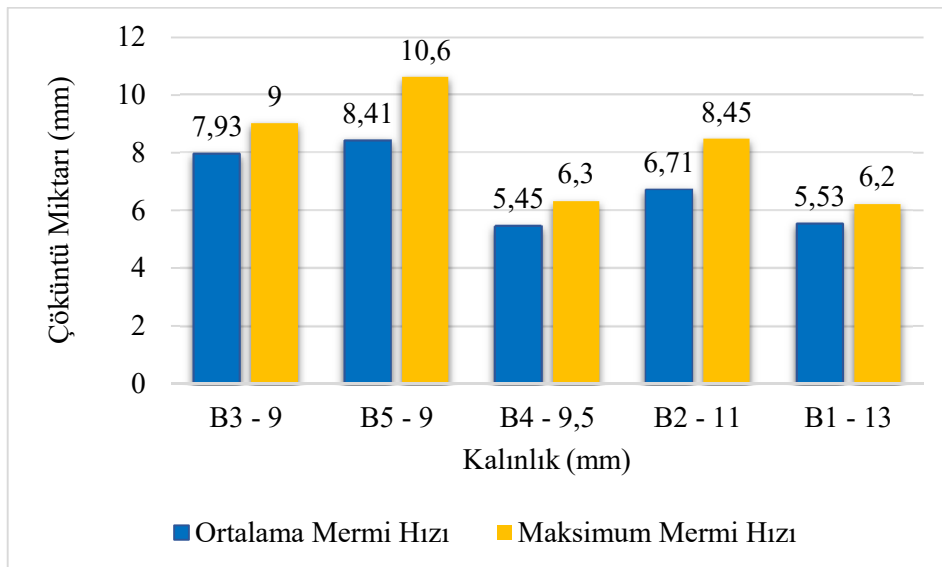
Şekil 6. 55. B8 numunesinde 4 nolu atışa ait kesit fotoğrafı

Balistik testler sonucunda atışların hiçbirinin perforasyonla sonuçlanmadığı beş numune arasında kalınlık, ağırlık ve çöküntü miktarı göz önüne alınarak yapılan karşılaştırmada B4 adlı numune 5.45 mm ortalama çöküntü miktarı ile NIJ 0101-06 standardına göre en başarılı numune olmuştur. Bu beş numune arasındaki karşılaştırma Şekil 6.56. ve Şekil 6.57.' de verilmiştir.



Şekil 6. 56. Ağırlık – Çöküntü miktarı grafiği

B1 adlı numune 818 gr ile en ağır numunedir ve çöküntü miktarı 5.53 mm olarak ölçülmüştür. 656 gr ağırlığı sahip olan B2 adlı numunenin çöküntü miktarı ise 6.71 mm'dir. Tüm numuneler içindeki en hafif numune olan B3 adlı numunene 7.93 mm çöküntü miktarı ile 30 tabakalı dört numune arasında çöküntü miktarı en fazla olan numunedir. 538 gr ağırlığa sahip olan B4 adlı numune 5.45 mm çöküntü miktarı ile en başarılı olan numunedir. NIJ-0101.06 standartlarına göre başarılı olan beş numune arasından 21 katlı tek numune olan B5 adlı numune 554 gr ağırlığa sahiptir ve ortalama çöküntü miktarı 8.41 mm'dir.



Şekil 6. 57. Kalınlık – Çöküntü miktarı grafiği

13 mm ile en kalın numune olan B1 adlı numune 5.53 mm çöküntü miktarına sahiptir. 11 mm kalınlığa sahip olan B2 adlı numunenin çöküntü miktarı 6.71 mm'dir. 9 mm ile en ince numuneler olan 30 tabakalı B3 ve 21 tabakalı B5 numunelerinden B3 numunesinin çöküntü miktarı 7.93 mm iken B5 numunesinin çöküntü miktarı 8.41 mm'dir. 9.5 mm kalınlığı olan B4 adlı numune 5.45 mm çöküntü miktarı ile en başarılı numune olmuştur.

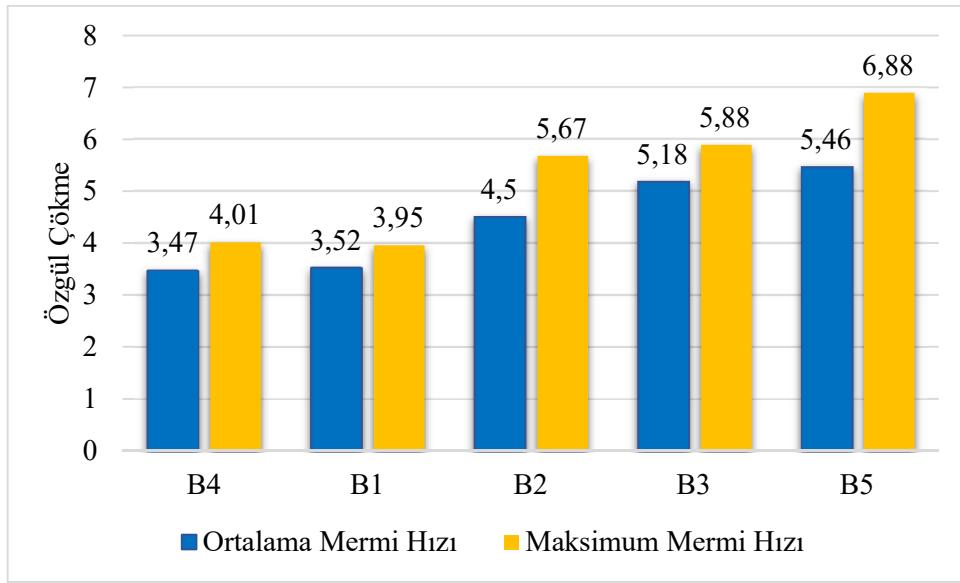
Numunelere yapılan balistik testlerde twill dokuma yapısına sahip B4 [Karbon(twill)₁₀/Aramid(plain)₁₀/Cam(twill)₁₀] 30 tabakalı numunede çöküntü miktarı 5.45 mm iken bir diğer dokuma kumaşlı numune olan 30 tabakalı B3 [Karbon(plain)₁₀/Aramid(plain)₁₀/Cam(plain)₁₀] numunesinde çöküntü miktarı 7.93 mm'dir. Twill kumaşın kullanıldığı 21 tabakalı B8 [Karbon(twill)₇/Aramid(plain)₇/Cam(twill)₇] numunesine yapılan atışların ikisinde balistik başarımları sağlanmış ancak diğer iki atış perforasyonla sonuçlanmıştır. Dokuma kumaş kullanılan 21 tabakalı B7 [Karbon(plain)₇/Aramid(plain)₇/Cam(plain)₇] numunesine yapılan tüm atışlar perforasyonla sonuçlanmıştır. Bu durum aynı tabaka sayısında twill dokuma yapısına sahip kumaşların kullanıldığı numunelerin plain dokuma yapısına sahip kumaşların kullanıldığı numunelerden balistik testlerde daha başarılı olduğunu göstermiştir.

Dikişli kumaşlara sahip numuneler kendi aralarında mukayese edilecek olursa; 30 tabakalı numunelerden 45° açılı kumaş kullanılan B1 [Karbon(45°)₁₀/Aramid(plain)₁₀/Cam(45°)₁₀] numunesinde ortalama çöküntü miktarı 5.53 mm iken 0° dikişli kumaşların kullanıldığı B2 [Karbon(0°)₁₀/Aramid(plain)₁₀/Cam(0°)₁₀] numunesinde ortalama çöküntü miktarı 6.71 mm'dir. 21 tabakalı numuneler incelendiğinde ise B5 [Karbon(45°)₇/Aramid(plain)₇/Cam(45°)₇] numunesi gerçekleştirilen balistik testlerde başarılı olmuş, B6 [Karbon(0°)₇/Aramid(plain)₇/Cam(0°)₇] numunesine yapılan atışlardan 1 tanesi perforasyonla sonuçlanmış ve numune başarısız olmuştur. Bu sonuçlar ışığında aynı kat adedindeki numunelerden 45° kumaş kullanılan numunelerin, 0° kumaş kullanılan numunelerden balistik koruma olarak daha üstün olduğu ortaya çıkmıştır.

Üretilen numunelere yapılan tüm balistik testlerde 45° açılıya sahip dikişli kumaşların kullanıldığı 30 tabakalı B1 [Karbon(45°)₁₀/Aramid(plain)₁₀/Cam(45°)₁₀] numunesinde ortalama çöküntü miktarı 5.53 mm iken plain dokuma tipindeki kumaşların kullanıldığı 30 tabakalı B3 [Karbon(plain)₁₀/Aramid(plain)₁₀/Cam(plain)₁₀] numunesinde ortalama çöküntü miktarı 7.93 mm'dir. 21 tabakalı numunelere yapılan deney sonuçları incelendiğinde ise B5 [Karbon(45°)₇/Aramid(plain)₇/Cam(45°)₇] numunesi 8.41 mm ortalama çöküntü miktarı ile

başarılı olmuş ancak B7 [Karbon(plain)₇/Aramid(plain)₇/ Cam(plain)₇] numunesine yapılan tüm atışlar perforasyonla sonuçlanmıştır. Elde edilen bu verilerin incelendiğinde aynı kat adedine sahip 45° kumaşların kullanıldığı numunelerin, plain dokuma kumaşların kullanıldığı numunelerden balistik koruma açısından daha üstün özelliklere sahip olduğu ortaya çıkmıştır.

Bireysel zırh malzemesi olarak tasarlanan test numunelerinde, tabaka sayısı dolayısıyla kalınlık ya da ağırlık artırılarak numunelerin enerji sönmeme kabiliyetlerini arttırmak mümkündür. Fakat burada sönmeme miktarı kadar önemli bir diğer faktörde hafifliktir. Bu amaçla özgül mukavemet terimine benzer şekilde çöküntü miktarlarının numunelerin yoğunluğuna oranlanmasıyla elde edilen özgül çöküntü değerlerinin karşılaştırılması daha anlamlı olacaktır. Şekil 6.58. 'de balistik testlerden başarılı olan 5 adet numunenin özgül çöküntü grafiği verilmiştir.



Şekil 6. 58. Özgül çöküntü grafiği

Şekil 6.58. incelenecek olursa en düşük özgül çöküntü değeri ortalama mermi hızı için 30 tabakalı B4 [Karbon(twill)₁₀/Aramid(plain)₁₀/Cam(twill)₁₀] adlı numunede 3.47 iken en yüksek özgül çöküntü miktarı 21 tabakalı B5 [Karbon(45°)₇/Aramid(plain)₇/ Cam(45°)₇] adlı numunede 5.46 olarak elde edilmiştir.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada kompozit malzeme tanımı ve genel kullanım alanlarından bahsedilmiş, malzemelerin üretim yöntemleri tanıtılmış ve elde edilen ürünlerin güçlü ve zayıf yönleri vurgulanmıştır. Tabakalı hibrit kompozitlerin bireysel zırh malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla numuneler üretilmiş ve bunların NIJ.0101-06 standartlarına uygun olarak atış testleri yapılarak sonuçlar incelenmiştir. Numunelerin yapısal konfigürasyonları, başarılı olanlar için atış testlerindeki ortalama mermi hızı, başarılı olamayanlar içinse perforasyonun meydana geldiği en düşük mermi hızı ile atış sonucu değerlendirmesi Tablo 7.1.' de verilmiştir.

Tablo 7. 1. Malzeme konfigürasyonu, mermi hızları ve değerlendirme

Malzeme Konfigürasyonu	Mermi Hızı	Değerlendirme
B1-[Karbon(45°) ₁₀ /Aramid(plain) ₁₀ /Cam(45°) ₁₀]	369 m/sn	II-A
B2-[Karbon(0°) ₁₀ /Aramid(plain) ₁₀ /Cam(0°) ₁₀]	367 m/sn	II-A
B3-[Karbon(plain) ₁₀ /Aramid(plain) ₁₀ /Cam(plain) ₁₀]	381 m/sn	II-A
B4-[Karbon(twill) ₁₀ /Aramid(plain) ₁₀ /Cam(twill) ₁₀]	384 m/sn	II-A
B5-[Karbon(45°) ₇ /Aramid(plain) ₇ /Cam(45°) ₇]	372 m/sn	II-A
B6-[Karbon(0°) ₇ /Aramid(plain) ₇ /Cam(0°) ₇]	304 m/sn	Delinme
B7-[Karbon(plain) ₇ /Aramid(plain) ₇ /Cam(plain) ₇]	313 m/sn	Delinme
B8-[Karbon(twill) ₇ /Aramid(plain) ₇ /Cam(twill) ₇]	378 m/sn	Delinme

- B1 numunesine yapılan atışlarda çöküntü değeri; en düşük mermi hızı olan 345 m/sn için 4,50 mm ve en yüksek mermi hızı olan 399 m/sn için 6,20 mm olarak ölçülmüş olup mermi kinetik enerjisindeki 159,59 joule artış için çöküntü miktarındaki artış 1,70 mm olmuştur.
- B2 numunesine yapılan atışlarda; en düşük mermi hızı olan 356 m/sn için 5,00 mm ve en yüksek mermi hızı olan 377 m/sn için 8,45 mm çöküntü değeri ölçülmüş olup 61,72 joule' lük kinetik enerji artışı için çöküntü miktarındaki artışın 3,45 mm olduğu gözlenmiştir.
- B3 numunesine ile yapılan atışlarda en düşük mermi hızı olarak ölçülen 358 m/sn' de 7,00 mm, en yüksek mermi hızı olan 436 m/sn için ise 9,00 mm çöküntü miktarı

görülmüştür. Mermi kinetik enerjisindeki 248,79 joule artış için ise çöküntü miktarında 2,00 mm' lik bir artış gözlemlenmiştir.

- B4 numunesine yapılan atışlarda çöküntü değeri; en düşük mermi hızı olan 359 m/sn' de 5,00 mm olarak gözlemlenirken en yüksek mermi hızı olan 428 m/sn için ise 6,30 mm olarak ölçülmüş ve mermi kinetik enerjisindeki 217,01 joule' lük bu artış çöküntü miktarında 1,30 mm' lik bir artış sağlamıştır. Bu durum ağırlıktan ziyade kumaş dokuma tipinin balistik koruma açısından daha önemli olduğunu ortaya çıkarmıştır.
- 30 katlı numuneler arasında balistik testlerde en başarılı olan numunenin en ağır ve en kalın numune olan B1 adlı [Karbon(45°)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(45°)₁₀] dizilimine sahip numunenin değil, [Karbon(Twill)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Cam(Twill)₁₀] dizilimli olan B4 adlı numune olduğu tespit edilmiştir.
- 30 kat adedine sahip tabakalı hibrit kompozitlerin balistik testlerde başarılı olmasından sonra kat adedi 21'e düşürülmüş ve bu numunelere balistik testler yapılmıştır.
- B5 numunesi ile yapılan balistik testlerde çöküntü değeri; en düşük mermi hızı olan 279 m/sn' de 5,70 mm, en yüksek mermi hızı olan 427 m/sn' de 10,60 mm olarak gözlemlenmiştir. Mermi kinetik enerjisindeki 417,12 joule artışa karşılık çöküntü miktarındaki artış 4,90 mm olmuştur.
- B6 numunesine yapılan 304 m/sn, 337 m/sn ve 420 m/sn hızına sahip ilk üç atışta malzemede herhangi bir hasar oluşmazken 438 m/sn hızındaki dördüncü atış perforasyonla sonuçlanmış ve numune başarısız olmuştur.
- B7 numunesine yapılan 313 m/sn, 328 m/sn, 372 m/sn ve 407 m/sn hızına sahip tüm atışlar perforasyonla sonuçlanmış ve numune başarısız olmuştur.
- B8 numunesine yapılan 409 m/sn ve 421 m/sn hızına sahip ilk iki atış perforasyonla sonuçlanmış ancak 404 m/sn ve 378 m/sn hızındaki diğer atışlarda numunede hasar meydana gelmemiştir. Ancak ilk iki atışın perforasyonla sonuçlanması sebebiyle bu numunede balistik koruma açısından başarısız olarak değerlendirilmiştir.
- Balistik testler sonucunda NIJ-0101.06 standardına göre koruma sağlamayı başarabilen beş adet numunenin ağırlık – çöküntü miktarı grafikleri incelendiğinde en başarılı numunenin B4 [Karbon(twill)₁₀/Aramid(plain)₁₀/Cam(twill)₁₀] adlı numune olduğu tespit edilmiştir.

- Atış testlerinde delinme olmadığı durumda, malzeme enerjinin hemen hemen tamamını sönümleyerek, arka tarafta delinme belirtileri vermemektedir. Ancak enerji seviyesi arttıkça malzemenin enerjiiyi yan taraftan dışarı doğru uzaklaştırmak isteyerek tabakalar arası ayrılmalara neden olduğu görülmüştür [70].
- 30 tabakalı hibrit numuneler arasında en başarılı balistik dayanımın twill dokuma yapısına sahip kumaşların kullanıldığı B4 [Karbon(twill)₁₀/Aramid(plain)₁₀/Cam(twill)₁₀] numunesi olduğu tespit edilmiştir.
- 21 tabakalı 4 numune arasından başarılı olan tek numune; 45° açılı dikişli kumaşların kullanıldığı B5 [Karbon(45°)₁₀/Aramid(plain)₁₀/Cam(45°)₁₀] numunesi olduğu belirlenmiştir.
- Dokuma kumaşlar kendi aralarında incelendiğinde; twill dokuma yapısına sahip kumaşların balistik dayanımının plain dokuma yapısına sahip kumaşlardan daha iyi olduğu belirlenmiştir.
- Dikişli kumaşlar incelendiğinde; 45° açısına sahip dikişli kumaşların yapısal özelliklerine bağlı olarak 0° açısına sahip kumaşlara göre balistik kullanıma daha uygun olduğu belirlenmiştir.
- Yapılan tüm deneylerde 45° açısına sahip dikişli kumaşların, plain dokuma tipindeki kumaşlardan balistik dayanım açısından daha başarılı olduğu belirlenmiştir.
- Balistik testler sonrasında yapılan incelemede numunelerde en sık görülen hasar tiplerinin fiber kopması ve tabakalar arası ayrılma hasarları olduğu tespit edilmiştir.
- Zırh malzemelerin tasarımında koruma kadar önemli bir diğer faktörde hafifliktir. Balistik dayanımla beraber optimum ağırlık ve kalınlığa ulaşmak için bu çalışma kapsamında yapılan balistik deneylerde başarılı olan numunelerin kat adedi düşürülerek çalışmaya devam edilmesi tavsiye edilir.

KAYNAKLAR

- [1] Demir, T., 2008. Metal ve Katmanlı Zırh Malzemelerinin 7,62 mm'lik Zırh Delici Mermiler Karşısında Balistik Başarımlarının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [2] Özgültekin, S.E., 2012. Balistik Zırhlarda Kullanılan Kompozit Malzeme Kombinasyonlarının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [3] Karasu, H.F., 2014, Kompozit Disk Yayların Tasarımı ve Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [4] Arıcasoy, O., “Kompozit Sektör Raporu”, İstanbul Ticaret Odası, 2006
- [5] Vasiliev, V.V., Morozov, E.V., 2001. Mechanics and Analysis of Composite Materials. Elsevier Science Ltd., 1st Edittion, 430p, Oxford.
- [6] Soy, U., 2009. Kompozit Malzemeler. Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, 1. Baskı, 11, Sakarya.
- [7] Heimbs, S., Cichosz, J., Klaus, M., Kilchert, S., Johnson, A.F., 2010. Sandwich structures with textile-reinforced composite fold cores under impact load Elsevier Composite Strcutres, 92, 1485-1497.
- [8] Csukat G.F., 2006. A study on the ballistic performance of composites. Wiley inter science macromol symposium, USA, 217-226.
- [9] Grogan, J., Tekalur, A.S., Shukla, A., Bogdanovich, A., Coffelt, A.R., 2007. Ballistic resistance of 2D and 3D woven sandwich composites. Journal of Sandwich Structures and Materials, 9, 283-302.

- [10] Morye, S.S., Hine, P.J., Duckett, R.A. , Carr, D.J., Ward, I.M., 2000. Modelling of the energy absorption by polymer composites upon ballistic impact. *Composites Science and Technology*, 60, 2631-2642.
- [11] Kayrak, M.A., (1999). “Havacılık Kompozitleri ve Dayanım-Maliyet Analizleri”, Havacılık Yüksek Okulu Yayınları, 9:1,12-13,69.
- [12] Rouchan,J., (1987). *Materiaux composites pour d’aeronefs*, National Higher School of Aeronautical Constructions, 95.
- [13] URL 1 - <http://www.matweb.com/search/QuickText.aspx> Matweb Material Property Data. 09 Haziran 2015.
- [14] Şahin, Y., (2006). *Kompozit Malzemelere Giriş*, 2. Baskı, Seçkin Yayıncılık, Ankara
- [15] URL-2 <https://www.bolton.ac.uk/CODATE/SPGuidetoComposites.pdf> *SP Systems Guide to Composites*. 11 Haziran 2015.
- [16] URL-3
http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpMHMILHD3/viewerType:toc/root_slug:military-handbook-mil-7/b-off-set:75/b-cat-name:Composites/b-cat-slug:composites/b-cat-id:977/b-off-set:75/b-order-by:name/b-sort-by:ascending/b-filter-by:all-content Polyester Reçine Özellikleri
11 Haziran 2015
- [17] Askeland, D. R. (1999). *The science and engineering of materials*, İstanbul: Nobel Yayınları.
- [18] Jones, M. R. (1999). *Mechanics of composite materials*, New York: Taylor&Francis.

- [19] Fidan, S., (2011). Polimer Matriksli Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi ve Oluşan Hasarların Mikro-Tomografi Yöntemiyle İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [20] T.H.Y. Teknik A.Ş. Kompozit Tamir Notları.
- [21] Naik, N.K. Shrirao P., 2004. Wahington, Composite structures under ballistic impact. Elsevier Composite Structures, 66, 579–590.
- [22] Starratt, D., Sanders, T., Cepus, E., Porsartip, A., Vaziri, R., 2000. An efficient method for continuous measurement of projectile motion in ballistic impact experiments. Elsevier International Journal of Impact Eng. 24, 155-170.
- [23] Gellert, E.P., Cimpoeru, S.J., Woodward, R.L., 2000. A study of the effect of the target thickness on the ballistic perforation of glass-fibre reinforced plastic composites. Elsevier International Journal of Impact Engineering, 24, 445- 456.
- [24] Campos, R., Bechtold, T., Rohrer, C., 2003. Fiber friction in yarn a fundamental property of fibers. Textile Research Journal, 73, 716-721.
- [25] Karakan, G., 2008. Balistik yapılarda balistik performansa etkiyen parametrelerin incelenmesi. Tekstil Teknolojileri, 3, 51-58.
- [26] Briscoe, B.J., Motamedi, F., 1990. Role of interfacial friction and lubrication in yarn and fabric mechanics. Textile Research Journal, 60, 697–708.
- [27] Briscoe, B.J., Motamedi, F., 1992. The ballistic impact characteristics of aramid fabrics: the influence of interface friction. Elsevier, Wear 61, 47-55.
- [28] Cheeseman B.A., Bogetti T.A., 2003. Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates. Elsevier Composite structures, 61, 161-173.

- [29] Carr, D.J., 1999. Failure mechanisms of yarns subjected to ballistic impact. *Jornal of materials science letters*, 18, 585-588.
- [30] Larsson, F., Svensson, L., 2002. Carbon, poilethylene hybrid fiber composites for structural light weight armor. *Elsevier Composites Part: A*, 221-231.
- [31] Candan, C., Akdemir, A., 2004. An investigation of terminal ballistic properties and design of composite armor against the light weapons, 10. *Denizli Malzeme Sempozyumu ve Sergisi*, 147-154.
- [32] Cheng-Kun, C., Yu-Liang, C., 2010. Ballistic-proof effects of various woven constructions. *Fibers & Textiles in Eastern Europe*, 18 (6), 63-67.
- [33] Rabb, R., P. Fahrenthold, E., 2010. Impact dynamics simulation for multilayer fabrics. *International Journal for Numerical Methods in Eng.*, 8, 537–557.
- [34] Jeng, S.T., Wang, S.B., Sheu, L.T., 1992. A model for predicting the the residual strength of GFRP laminates subjected to ballistic impact. *Journal of Reinforced Plastic Composites*, 11, 1127-1141.
- [35] Gower, H.L., Cronin, D.S., Plumtree, A., 2008. Ballistic impact response of laminated composite panels. *Elsevier International Journal of Impact Engineering*, 35, 1000-1008.
- [36] Sutherland, L.S., Soares, C.G., 1999. Impact tests on woven-roving E-glass/polyester laminates. *Elsevier Composites Science and Technology* 59, 1553-1567.
- [37] Hsieh, C.Y., Mount, A., Jang, B.Z., Zee, P.H., 1990. Response of polymer composites under high velocity impact. *22nd Int. SAMPE Tech. Conference*, 14-27.
- [38] Naik, N.K., Shrirao P., Reddy, B.C.K., 2006. Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: formulation, *Elsevier International Journal of Impact Engineering*, 32, 1521–1552.

- [39] Yong, M., Iannucci, L., Falzon, B.G., 2010. Efficient modelling and optimisation of hybrid multilayered plates subject to ballistic impact. Elsevier International Journal of Impact Engineering, 37, 605-624.
- [40] Patts, H.M., 2000, Ballistic impact damage and penetration mechanics of fiber reinforced composite laminates. The Pennsylvania State University Engineering Science&Mechanis, Doktor of Philosophy, 335p, Pennsylvania.
- [41] Sheikh, A.H., Bull, P.H., Kepler, J.A., 2009. Behaviour of multiple composite plates subjected to ballistic impact. Elsevier Comp. Scienc and Thec., 69, 704-710.
- [42] Wambua, P., Vangrimde, B., Lomov, S., Verposet, I., 2007. The response of natural fibre composites to ballistic impact by fragment simulating projectiles. Elsevier Composite Structures, 77, 232-240.
- [43] Ceyhun, V., Turan, M., 2003. Tabakalı kompozit malzemelerde yüksek hızlı darbe hasarı. Mühendis ve Makine, 48 (575), 51-57.
- [44] Karahan, M., 2008. Comparison of ballistic performance and energy absorption capabilities of woven and unidirectional aramid fabrics. Textile Research Journal, 78, 718-730.
- [45] Phoenix, S.L., Porwal, P.K., 2003. A New membrane model for the ballistic impact response and V50 performance of multi-ply fibrous systems. Elsevier International Journal of Solids and Structures, 40, 6723–6765.
- [46] Grujicic, M., Glomski, P.S., He T., Arakere, G., Bell, W.C., and Cheeseman, B.A., 2009. Material modeling and ballistic-resistance analysis of armor-grade composites reinforced with high-performance fibers. ASM International, 18, 1169-1182.

- [47] Kumar, S., Gupta, D.S., Singh, I., Sharma, A., 2009. Behavior of Kevlar/Epoxy composite plates under ballistic impact. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, September, 2048-2064.
- [48] Grujicic, M., Pandurangan, B., Koudela, K.L., Cheeseman, B.A., 2006. A computational analysis of the ballistic performance of light-weight hybrid composite armors. *Elsevier Applied Surface Science*, 253, 730-745.
- [49] Tan, V.B.C., Ching, T.W., 2006. Computational simulation of fabric armour subjected to ballistic impacts. *Elsevier International Journal of Impact Engineering*, 32, 1737-1751.
- [50] Novotny, W.R., Cepus, E., Shahkarami, A., Vaziri, R., Poursartip A., 2007. Numerical investigation of the ballistic efficiency of multi-ply fabric armours during the early stages of impact. *Elsevier International Journal of Solids and Structures*, 40, 71-88.
- [51] Phoenix, S.L., Porwal, P.K., 2005. Modeling system effects in ballistic impact into multi-layered fibrous materials for soft body armor. *Springer International Journal of Fracture*, 135, 217-249.
- [52] Mines, R.A.W., Roach, A.M., Jones N., 1999. High velocity behaviour of polymer composite laminates. *International Journal of Impact Eng*, 22, 561-588.
- [53] Tan V. B. C., Lim C, T., Cheong C.H., “Perforation of high-strength fabric by projectiles of different geometry”, *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28(2): 207–222.
- [54] Wagner, N.J., Young, S.L., Wetzel E.D., 2003. The ballistic impact characteristics of Kevlar woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid. *Journal of Materials Science*, 38, 2825-2833.
- [55] Temiz, S., An investigation about ballistic fabrics and test methods, 3-95, 2005. Ulven C., Vaidya U.K., Hosur M.V., 2003. Effect of projectile shape during ballistic

perforation of carbon/epoxy composite panels. Elsevier Composite Structures, 61, 143–150.

[56] Ozek, T., Hafif Silahlara Karşı Zırh Yapımında Kullanılan Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekaniksel Özelliklerinin İncelenmesi, 44-90, 2005.

[57] Gustin, J., Joneson, A., Mahinfalah, M., Stone, J., “Low velocity impact of combination Kevlar/carbon fiber sandwich composites”, Composite structures, 2005, 69: 396-406.

[58] Hosur, M.,V., Abdullah, M., and Jeelani, S., 2005, Studies on the low-velocity impact response of woven hybrid composites. *Composite Structures*, 67: 253– 262.

[59] Salehi-Khojin, A., Mahinfalah, M., Bashirzadeh, R., and Freeman, B., 2007, Temperature effects on Kevlar-hybrid and carbon fiber composite sandwiches under impact loading. *Composite Structures*, 78: 197–206.

[60] Caprino, C., Ballistic Impact ;Behaviour Of Stitched Graphite/Epoxy Laminates, Composites Science And Technology, 325–335, 2007.

[61] Candan, C., 2007. The examination of terminal ballistic qualifications of high density polythene (UHMW-PE) armor plaque which are produced with pressing and without pressing against small arms. Elsevier International Journal of Impact Engineering, 77, 176-184.

[62] Karahan, M., Kuş, A., Eren R., 2007. An investigation into ballistic performance and energy absorption capabilities of woven aramid fabrics. Elsevier International Journal of Impact Engineering, 35, 499-510.

[63] Bilişik, A.K., Turhan, Y., 2009. Multidirectional stitched layered aramid woven fabric structures and their experimental characterization of ballistic performance. Textile Research Journal, 79, 1331-1343.

- [64] Yavaş, M.O., 2009. Hafif Silahlara Karşı Bireysel Savunma Amaçlı Kompozit Malzeme Tasarımı ve Balistik Dayanımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [65] Yu Y.M., Wang X.J., Lim C.W., 2009. Ballistic impact of 3D orthogonal woven composite by a spherical bullet: experimental study and numerical simulation. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1, 1-18.
- [66] Buitrago, B.L, Shirley, Garcia-Castillo, S.K., Barbero, E., 2010. Experimental analysis of perforation of glass/polyester structures subjected to high-velocity impact. *Elsevier Materials Letters*, 64, 1052-1054.
- [67] Garcia-Castillo, S.K., Puente-López, J., Sánchez-Sáez, S., Barbero, E., Navarro,C., 2006. Analytical model for energy absorption capabilities of glass/ polyester panels subjected to ballistic impact. 23rd Southeastern Conference in Theoretical and Applied Mechanics Mayagüez, Puerto Rico, May 21–23, 211-216
- [68] Ramadhan, A. A., Talib, A. R., Rafie, A. S. M., Zahari, R., “High velocity impact response of Kevlar-29/epoxy and 6061-T6 aluminium laminated panels”, *Materials and Design*, 2012.
- [69] Yılmaz, H., 2012. Üç Fazlı Tabakalı Karma Kompozit Yapının Balistik Özelliklerinin İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [70] Yalçın, E.B., 2012. Farklı Kumaş ve Farklı Yöntemlerle Üretilmiş CTP Kompozitlerin Balistik Davranışlarının İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

ÖZGEÇMİŞ

Cenk YANEN 1987 yılında Adana’ da doğdu. İlk ve orta öğretimini Adana’da tamamladıktan sonra 2005 yılında Mersin Üniversitesi Mühendislik – Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünü kazandı ve 2010 yılında mezun oldu. 2010 yılından itibaren Fırat Üniversitesinde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı ve halen devam etmektedir. Evli ve 1 çocuk babasıdır.