



**ZIRHLI ARAÇLARDA KULLANILAN KOMPOZİT ZIRH
MALZEMELERİNİN BALİSTİK
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

Baybora BİTLİSLİ



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ZIRHLI ARAÇLARDA KULLANILAN KOMPOZİT ZIRH
MALZEMELERİNİN BALİSTİK PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

Baybora BİTLİSLİ

Prof. Dr. Murat YAZICI
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI


BURSA – 2019

TEZ ONAYI

Baybora BİTLİSLİ tarafından hazırlanan “ZIRHLI ARAÇLARDA KULLANILAN KOMPOZİT ZIRH MALZEMELERİNİN BALİSTİK PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Murat YAZICI


Başkan: Prof. Dr. Murat YAZICI,
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Müh. ABD

İmza


Üye : Dr. Öğr. Üy. Erol SOLMAZ,
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Müh. ABD

İmza


Üye : Dr. Öğr. Üy. Yalçın BOZTOPRAK,
Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Malzeme
ve Metalurji Müh. ABD

İmza


Yukarıdaki sonucu onaylarım



Prof. Dr. Ali BAYRAM
Enstitü Müdürü

29.4.2019

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

21/01/2019

Baybora BİTLİSLİ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ZIRHLI ARAÇLARDA KULLANILAN KOMPOZİT ZIRH MALZEMELERİNİN BALİSTİK PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Baybora BİTLİSLİ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat YAZICI

Teknolojinin en hızlı ilerlediği sektör olan savunma sanayi için, silah mühimmat tehditlerine karşı korunma her zaman ön önemli ihtiyaç haline gelmiştir. Savaşta veya savaş dışında güvenliği sağlamak için zırh ile kaplanmış araç tanımından yola çıkarak tarihte teknolojinin gelişmesi ile birlikte zırhlı araç tasarımı ve şekilleri de değişiklik göstermiştir. Zırh sistemi temelini ortaçağda hareketli kulelere dayandığı sanılmaktadır. Gerçek anlamda zırhlı araçlar içten yanmalı motorun icadı ile hayatımıza girmiştir. Günümüzde zırhlı araçlar için en çok kullanılan zırh malzemesi çelik olmasına karşın, daha hafif ve daha üst koruma sağlayan zırh tasarımları için kompozit zırh sistemleri bir gerekliliktir.

Bu tez kapsamında birinci olarak zırhlı araçlardaki kompozit zırh malzemelerinde takviye malzemesi olarak kullanılan UHMWPE(Ultra Hight Molecular Weight Polyethylene-Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen), Aramid, Karbon, Karbomid ve Cam elyafı türleri ile matris malzemesi olarak herhangi bir reçine kullanmadan PE film tabakaları ile kat kat laminasyon yapıldıktan sonra, pres ile sıcaklık ve basıncın etkisiyle birleştirilmiş, oluşturulan plaka şeklinde birbirinden farklı parçalara balistik uygulamalarda kullanılan NIJ standartlarına uygun olarak, 5 metre mesafeden 8 gram ağırlığında çekirdeği olan 9x19 parabellum FMJ fişekler ile atışlar yapılmıştır. Yapılan atış testleri sonrası, plakaların üretimindeki proses farklılıkları, plakaların ağırlığı, oluşan deformasyonlar, plakaların kalınlıkları, elyafların alansal yoğunlukları, elyafların dokuma tipleri, kat sayıları, mermi giriş delikleri ve varsa çıkış delikleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları düzenlenen tabloda gösterilmiş, üretim yöntemi olarak en uygun proses, oluşturulan kurşun geçirmeyen plakalardan ise en ince ve en hafif olanı ideal olarak seçilmiştir.

İkinci olarak ise yüzde yüz yerli malzeme kullanarak yapılan özgün hibrit balistik kompozit malzemeler ile aynı seviye için çözüm üretilmiştir. İkinci çalışmada da NIJ standartlarına uygun olarak 9x19 parabellum tipi fişeklerle atış testleri yapılarak karşılaştırılmış, karşılaştırma sonuçları düzenlenen tabloda belirtilmiş, farklı olarak kurşun çekirdeklerindeki deformasyonda değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Balistik kompozit malzemeler, balistik, zırhlı araç, zırh geliştirme
2019, viii + 77 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF BALLISTIC PERFORMANCES OF COMPOSITE ARMOR MATERIALS USED IN ARMORED VEHICLES

Baybora BİTLİSLİ

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Murat YAZICI

For the defense industry, which is the fastest progression of technology, protection against weapons ammunition threats has always been the most crucial need. With the development of technology in history, armored vehicle design and shapes have also changed with the definition of vehicle covered with armor to ensure security outside of war or war. The armor system seems to be based on the mobile towers in the medieval period. The armored vehicles entered into our lives with the invention of the internal combustion engine. Today, although the most commonly used armor material for armored vehicles is steel, for armor designs that provide lighter and higher protection, composite armor systems are a requirement.

Through the scope of this thesis was divided in two stages: Firstly, UHMWPE(Ultra High Molecular Weight Polyethylene), Aramid, Carbon, Carbomide and Glass fiber types used as reinforcing material in composite armor materials in armored vehicles with after laminating with PE film layers without using any resin as matrix material, with press consolidated with the influence of temperature and pressure. The produced various laminated plates subjected to ballistic impact following NIJ standards. According to this standard, the 9x19 Parabellum FMJ cartridges which have 8-gram core mass, from a distance of 5 meters were shot. After the shot tests, the process differences in the production of the plates, the weight of the plates, the deformations formed, the thickness of the plates, the areal densities of the fibers, the weaving types of the fibers, the number of layers, the bullet entry holes and the outlet holes, if any, were compared. The comparison results are shown in the table, the most suitable process as production method and the thinnest and lightest of the lead-impermeable plates are ideally selected.

Secondly, using one hundred percent domestic material, the same level of the solution is produced with original hybrid ballistic composite materials. In the second study, 9x19 Parabellum type cartridge was shot by NIJ standards into the developed composite armors and compared with the each other regarding design parameters. Additionally, they were evaluated in deformation in lead cores.

Keywords: Ballistic composite materials, ballistic, armored vehicle, armor development
2019, viii + 77 pages.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, birinci kısımda araç zırhı için yapılan farklı kompozit malzemelerin balistik özellikleri incelenmiş, İkinci kısımda ise değerli tez danışman hocamın fikir vermiş olduğu yüzde yüz yerli malzemelerle araç zırhı için yeni bir kompozit malzeme geliştirilmiş ve balistik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir.

Öncelikle tez konumun her aşamasında desteklerini esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Murat YAZICI'ya teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Birinci kısımdaki elyaf malzemeler için sponsor olan, Telateks Kompozit Sanayi A.Ş.'ye, CES İleri Kompozit ve Savunma Teknolojileri A.Ş.'ye ve Sayın Berat Hünkar ODABAŞ'a, ilk yapılan çalışmalar için benden desteğini esirgemeyen, yardımcı olan değerli arkadaşım Orhan DEDEOĞLU'na teşekkür ederim.

İkinci kısım için yerli kompozit malzeme çözümü geliştirilmesinde malzeme ve imalat desteği sağlayan Sayın Dr. Hasan KASIM'a ve Pega Otomotiv A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Lisans dönemimde balistik malzemeler konusuna adım atmamda vesile olan değerli hocam Bülent Ecevit Üniversitesi Müh. Fak. Makine Müh. Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Mehmet YETMEZ'e teşekkür ederim.

Genel anlamda yazım ve yönetmeliğe uygunluk açısından gözden geçiren Sayın Araş. Gör. Hakkı ÖZER'e teşekkür ederim.

Son olarak bugünlere gelmemde büyük emeği olan, maddi ve manevi her zaman yanımda olan başta değerli Annem olmak üzere, Anne ve Babama teşekkürlerimi sunarım.

Baybora BİTLİSLİ
21/01/2019

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	2
2.1. Kompozit Malzemeler.....	2
2.1.1. Matris Malzemesi.....	4
2.1.2. Takviye Malzemesi	5
2.2. Balistik Bilimi	9
2.3. Katı Cisimlerde Penetrasyon ve Perforasyon.....	15
2.4. Katmanlı Kompozitlerde Hasar Modları.....	18
2.5. İki Serbest Dereceli Model.....	18
2.6. Balistik Malzemeler	19
2.6.1. Metal Zırh.....	19
2.6.2. Seramik Zırh.....	21
2.6.3. Hafif Kompozit Zırh.....	22
2.7. Yüksek Hızlı Darbe Test Methodları.....	26
2.7.1. Split-Hopkinson Basınç Barı Test Yöntemi.....	26
2.7.2. Balistik Test Yöntemi.....	29
2.7.3. Tahribatsız Test Yöntemleri.....	30
2.7.4. Diğer Test Yöntemleri.....	31
2.8. Kaynak Araştırması.....	32
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	39
3.1. Katmanlı Kompozitler.....	39
3.2. Hibrit Kompozitler	47
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	63
4.1. Katmanlı Kompozitler İçin Bulgular.....	63
4.2. Hibrit Kompozitler İçin Bulgular	66
5. SONUÇ	70
5.1. Katmanlı Kompozitler İçin Sonuç.....	70
5.2. Hibrit Kompozitler İçin Sonuç	71
KAYNAKLAR.....	73
ÖZGEÇMİŞ.....	77

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
M	Kütle
V	Hız
m1	Plaka Kütle
m2	Mermi Kütle
kb	Eğilme Direngenliği
km	Membran Direngenliği
S2	Kontak Direngenliği
P	Kontak Kuvveti
α	Yer Değiştirme

Kısaltmalar	Açıklama
NIJ	Ulusal Adalet Enstitüsü
BC	Balistik Katsayı
RSP	Değişken Durdurma Gücü
KE	Kinetik Enerji
RHA	Haddelenmiş Homojen Zırh
UHMWPE	Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen
HB	Brinel Sertliği
FMJ	Tam Metal Ceket
PE	Polietilen
AP	Zırh Delici
SHPB	Split – Hopkinson Basınç Çubuğu

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Kompozitlerde kullanılan matris ve takviye malzemesi tipleri.....	3
Şekil 2.2. Merminin yalpalaması.....	12
Şekil 2.3. Merminin devinimi.....	12
Şekil 2.4. Merminin nütasyonu.....	13
Şekil 2.5. Darbe almış plakadaki hata modları.....	17
Şekil 2.6. Katmanlı kompozitlerde hasar modları.....	18
Şekil 2.7. Darbe dinamiği için iki serbestlik dereceli yay- kütle modeli.....	19
Şekil 2.8. SHPB şeması.....	28
Şekil 3.1. UHMWPE elyafı.....	40
Şekil 3.2. Aramid elyafı.....	40
Şekil 3.3. Karbon elyafı.....	41
Şekil 3.4. Karbomid elyafı.....	41
Şekil 3.5. Cam elyafı.....	41
Şekil 3.6. 9x19 Parabellum fişek ölçüleri.....	42
Şekil 3.7. İmalatta kullanılan pres.....	42
Şekil 3.8. Presin basınç göstergesi.....	43
Şekil 3.9. Presin sıcaklık göstergesi.....	43
Şekil 3.10. Aramid+UHMWPE plaka.....	44
Şekil 3.11. Karbon plaka.....	45
Şekil 3.12. Karbomid plaka.....	45
Şekil 3.13. Kullanılan fişekler.....	45
Şekil 3.14. Atış yapılan poligon.....	46
Şekil 3.15. Lazer metre ile atış mesafesinin ayarlanması.....	46
Şekil 3.16. İçinde St 37 sac olan kompozit tasarımı.....	47
Şekil 3.17. İçinde çelik tel olan kompozit tasarımı.....	47
Şekil 3.18. Kord iplerinin istenen ölçüde hazırlanması.....	49
Şekil 3.19. Kord iplerinin istenen ölçüde hazırlanması.....	49
Şekil 3.20. [0/+90/+45/-45] iplik dizilimi.....	50
Şekil 3.21. Şablon.....	51
Şekil 3.22. Kord iplerinin dizilimi.....	51
Şekil 3.23. Kord iplerinin dizilimi.....	52
Şekil 3.24. Kord iplerinin dizilimi.....	52
Şekil 3.25. Kord iplerinin dizilimi.....	53
Şekil 3.26. Köşelerin kesimi.....	53
Şekil 3.27. Köşelerin kesimi.....	54
Şekil 3.28. İplik diziliminde köşelerin kesilmiş hali.....	54
Şekil 3.29. Kemosil ile kaplama.....	55
Şekil 3.30. Kemosil kaplama sonrası.....	55
Şekil 3.31. Preslenmeden önceki ağırlık.....	56
Şekil 3.32. Kemosil kaplama sonrası.....	56
Şekil 3.33. Preslenmeden önceki ağırlık.....	57
Şekil 3.34. Kemosil kaplama sonrası.....	57
Şekil 3.35. Preslenmeden önceki ağırlık.....	58
Şekil 3.36. Kalıp içine yerleştirme.....	58
Şekil 3.37. Kalıp aparatı koyulması.....	59
Şekil 3.38. Kalıptan çıkan numune.....	59

Şekil 3.39. Preslendikten sonraki ağırlık.....	60
Şekil 3.40. Preslendikten sonraki ağırlık.....	60
Şekil 3.41. Preslendikten sonraki ağırlık.....	61
Şekil 3.42. Atışa hazırlık.....	61
Şekil 3.43. Atış anı.....	62
Şekil 4.1. Atış sonrası UHMWPE numune ve giriş deliği.....	63
Şekil 4.2. Atış sonrası Aramid+UHMWPE numune ve giriş deliği.....	63
Şekil 4.3. Karbon plaka giriş deliği.....	64
Şekil 4.4. Karbon plaka içinde kurşun.....	64
Şekil 4.5. Karbomid giriş deliği.....	65
Şekil 4.6. Karbomid çıkış deliği.....	65
Şekil 4.7. Cam elyafı numune.....	66
Şekil 4.8. St 37 sac içeren numunenin kesiti.....	67
Şekil 4.9. Kalın çelik telli numune kesit.....	67
Şekil 4.10. St 37 sac'lı numunenin çekirdeği.....	68
Şekil 4.11. St 37 sac'lı numunenin çekirdeği.....	68
Şekil 4.12. Kalın telli numunenin çekirdeği.....	69
Şekil 4.13. Kalın telli numunenin çekirdeği.....	69

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Çeşitli kurşun çekirdeklerine ait RSP değerleri.....	11
Çizelge 2.2. Çeşitli fişeklerin mermi enerjileri.....	14
Çizelge 2.3. Hafif kompozit zırhlarda kullanılan elyaf türleri ve özellikleri.....	23
Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan elyaflar ve teknik özellikleri.....	39
Çizelge 3.2. Üretimi yapılan kompozit plakaların proses özellikleri.....	44
Çizelge 3.3. 1400x2-120dtex kord ipi(Nylon 6.6) özellikleri	48
Çizelge 5.1. Katmanlı kompozit plakaların atış sonrası deformasyon özellikleri.....	70
Çizelge 5.2. Hibrit kompozit plakaların atış sonrası deformasyon özellikleri.....	71



1. GİRİŞ

Teknolojinin en hızlı ilerlediği sektör olan savunma sanayi için silah mühimmat tehditlerine karşı korunma her zaman en önemli ihtiyaç haline gelmiştir. Savaşta veya savaş dışında güvenliği sağlamak için zırh ile kaplanmış araç tanımından yola çıkarak tarihte teknolojinin gelişmesi ile birlikte zırhlı araç tasarımı ve şekilleri de değişiklik göstermiştir. Zırh sistemi temelini ortaçağda hareketli kulelere dayandığı sanılmaktadır. Gerçek anlamda zırhlı araçlar içten yanmalı motorun icadı ile hayatımıza girmiştir. Günümüzde zırhlı araçlar için en çok kullanılan zırh malzemesi çelik olmasına karşın, daha hafif ve daha üst koruma sağlayan zırh tasarımları için kompozit zırh sistemleri bir gerekliliktir.

Bu tez çalışmasının 1. aşamasında zırhlı araçlardaki kompozit zırh malzemelerinde takviye malzemesi olarak kullanılan UHMWPE, Aramid, Karbon, Hibrit ve Cam elyafi türleri matris malzemesi olarak herhangi bir reçine kullanmadan PE film tabakaları ile birleştirilerek kat kat laminasyon yapılmıştır. Daha sonra sıcaklık ve basıncın etkisiyle preslenerek birleştirilmiş, oluşturulan plaka şeklinde birbirinden farklı numunelere, balistik uygulamalarda kullanılan NIJ 0101.08 standardına uygun olarak, 5 metre mesafeden 8 gram ağırlığında çekirdeği olan 9x19 Parabellum FMJ fişekler ile atışlar yapılmıştır.(Anonim 1985) Yapılan atış testleri sonrası plakaların üretimindeki proses farklılıkları, plakaların ağırlığı, oluşan deformasyonlar, plakaların kalınlıkları, elyafların alansal yoğunlukları, elyafların dokuma tipleri, katman sayıları, mermi giriş delikleri ve varsa çıkış delikleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları tabloda belirtilmiş, üretim yöntemi olarak en uygun proses, üretilen kurşun geçirmeyen plakalardan ise en ince ve en hafif olanı seçilmiştir.

Çalışmanın 2. aşamasında ise yüzde yüz yerli malzeme kullanılarak yapılan hibrit balistik kompozit malzemeler ile aynı seviye için çözüm üretilmiştir. Yine burada da 9x19 Parabellum tipi fişeklerle atış testleri yapılarak karşılaştırma yapılmış, en hafif olan ve çöküntü değeri en az olan plaka optimum plaka olarak seçilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler genel olarak iki veya daha fazla malzemenin makro yapıda bir araya getirilmesiyle yeni bir malzemenin oluşturulması şeklinde tanımlanır. Kompozit malzemenin amacı, kompozit malzemeyi oluşturan malzemelerin ihtiyaç doğrultusunda birbirlerinin zayıf kalan yönlerini iyileştirmek ve istenilen amaca yönelik daha üstün özellik sağlayan bir malzeme elde etmektir.

Kompozit malzemeler öncelikle bir matris malzemedan oluşan (sürekli faz) ve bir takviye ile desteklenen (ikinci takviye fazı, genellikle süreksiz fazdır) malzemelerdir.

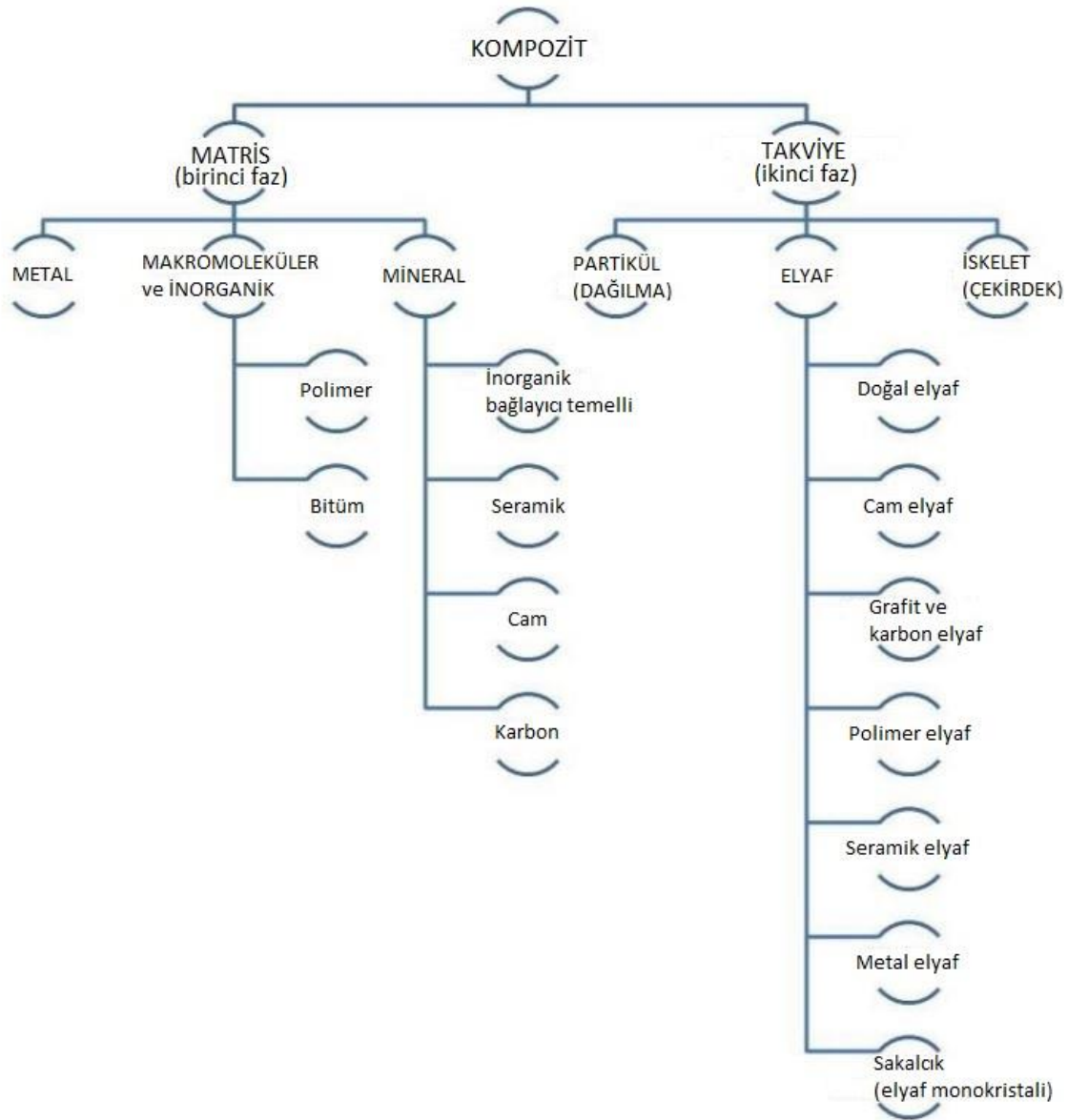
Matris, bağımsız parçalar halinde duran takviye fazını birleştirir ve onları dış etkilere karşı korur. Matrisin temel fonksiyonu, dış yüklemeleri takviye fazına iletmektir. Matris ile takviye fazı arasındaki bağ mukavemetinin (yani matris ve takviye ara yüzünde kimyasal etkileşim olmadan mükemmel ıslanabilirlik) kuvvetli olması gerekir. Matris için diğer gereksinimler dışında genellikle düşük ağırlıklı olması istenir. Takviye fazına kıyasla bir matris genellikle daha düşük mukavemete ve daha fazla şekil verilebilirliğe sahiptir.

Takviye fazı, dış yüklerin büyük bir kısmını taşır. Beklenti, yüksek dayanım ve yüksek elastisite modülü ile birlikte malzemenin yüksek oranda elastik şekil değiştirmesi ve kırılmanın hemen meydana gelmemesidir. Takviye malzemesinin konsantrasyonu ve oryantasyonu, şekil verilmiş kompozitin çekme davranışı ile ilişkilidir. Takviye parçacıklarının şekli yaklaşık olarak bir küre (takviye malzemesinin toz formu) veya bir lif (elyaf) olarak düşünülebilir. Takviye malzemesinin boyutları ve dağılımı kompozitin yapısını belirler.

Konsantrasyon takviye fazının bir yoğunluğudur, hacim veya ağırlık miktarı cinsinden ifade edilir. Kompozit malzemelerin özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerden

biridir. Kompozitlerde kullanılan matris ve takviye malzemesi tipleri Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

Takviye fazının oryantasyonu, sistemin izotropisini etkiler. Eğer takviye eden parçacıklar yaklaşık aynı şekil ve boyutta ise (örneğin toz gibi), kompozit temel olarak izotropik bir malzeme olarak davranır, dolayısıyla özellikler her yönde aynıdır. Fakat lif takviyeli sistemlerde ise özellikler anizotropik malzeme özelliği gösterir (Klarova 2015).



Şekil 2.1. Kompozitlerde kullanılan matris ve takviye malzemesi tipleri (Klarova 2015’den değiştirilerek alınmıştır)

Lamineler farklı malzeme katmanlarının, malzemeye belirli bir işlevi gerçekleştirmek için özel karakteristik verdiği kompozit malzemelerdir. Dokumaların matris malzemesi yoktur, fakat içlerinde kullanılabilen farklı fiberler onlara istenen belirlenmiş karakteristik özellikleri vermek için birleşir. Takviye malzemeleri genellikle maksimum yüke dayanır ve istenen özellikleri yerine getirir.

Ayrıca kompozit tipleri sıklıkla bir diğerinden ayırt edilmesine rağmen, hangi malzemelerin oluşturduğunu bulmak kolay değildir. Tanımlamayı kolaylaştırmak için ilgi ve alaka, genellikle farklılaşmanın gerçekleştiği seviyelere mikroskobik veya makroskobik olarak kaydırılır.

Basma ve çekme yüklemesi yapıldığı zaman bu malzemeler hata oluşana kadar elastikliğini sürdürür ve zorlanma değeri azalma gösterir. Kompozitler farklı doğrusal genişleme özelliklerine sahip bileşenlerden yapılamaz. Ara yüz, takviye ve matris malzemeleri arasında temas alanıdır. Bazı durumlarda bu alan ayrı bir fazdır. Bazı kompozitler, yüzeylerin birbirine benzemeyen bileşenleri birbiriyle etkileştiğinde ara yüz oluşturur. Üretim yönteminin seçimi, matris özelliklerine ve matrisin takviye malzemesinin özelliklerine etkisine bağlıdır. Kompozitlerin seçiminde ve imalatında en önemli konulardan biri, bileşenlerin kimyasal olarak inert olması gerekmektedir.

2.1.1. Matris Malzemesi

Matris malzemesinin 3 temel grubu vardır. Bunlar metal matrisler, polimer matrisler ve son olarak da seramik matrislerdir.

Matrislerle ilgili talepler çoktur. Sıcaklık değişimleri, iletkenlik veya elektrik direnci ve nem duyarlılığı gibi özellikler matris yapısından istenebilir. Matris malzemeleri seçilme amacına bağlı olarak, ağırlık avantajı, kolay uygulanabilirlik ve istenen diğer özelliklere göre kullanılır.

Diğer bileşenlerin dahil edilmesi için matris malzemeleri, takviye fazı için güçlü bağlar sağlarlar. Birkaç seramik malzeme, polimer ve metal, yapısal kompozitlerin

tasarlanmasında matris malzemeleri olarak uygulamalara övgüye değer başarılar sağlamıştır.

Metalik matrisler iyi elektriksel ve termal iletkenliğe sahiptirler, yumuşaktırlar, aşınma ve ısı dirençleri iyidir ve ayrıca kaplama ve yapıştırma imkanı sağlarlar. En yaygın olarak kullanılan metalik matrisler; alüminyum, magnezyum, titanyum ve alaşımları, çok yüksek sıcaklıklar için nikel bazlı alaşımlar, elektriksel çalışmalar için ise bakır veya gümüş matrisler kullanılır.

Polimer matrisler üretimde en yaygın kullanılan matris türüdür. Metal matrislerle karşılaştırıldığında düşük ağırlığa, yüksek mukavemete ve korozyon dayanımına sahiptirler. Yüzey işlemlerine gereksinim duymazlar, titreşimleri absorbe ederler, düşük termal ve elektrik iletkenliğine sahiptirler. Mekanik özellikleri termoplastik, termoset veya elastomer olsun polimerin türüne göre değişir. Kompozit üretimi için 3 tip polimer kullanılır. Termoplastikler üstün kırılma tokluğu, hammaddenin raf ömrünün uzun olması ve organik çözücülere ihtiyaç duymaması avantajlarına sahiptir. Termosetler çoğunlukla kimyasal olarak dirençli ve termoplastiklere göre daha rijittir. Elastomerler için ise baskın özellik uzamadır. Düşük yoğunlukları nedeniyle polimer matrisler özellikle uçak tasarımında geniş kullanım alanına sahiptir.

Seramik matrisler, değişen bileşim ve konfigürasyona sahip kristalin maddelerden oluşan inorganik metalik olmayan heterojen bir malzemedir. Seramik malzemeler genellikle iyi kimyasal dirence sahiptir, termal iletkenliği düşüktür, yüksek ergime noktası, yüksek sertlik ve basınç dayanımı olmasına karşın elektriksel olarak iletken değildir. Sahip olduğu dezavantajlar ise dikkate değer bir şekilde kırılma, zayıf işlenebilirlik ve iç kusurlara karşı yüksek hassasiyettir. Yüksek sıcaklıklarda kullanıma uygundur. Cam, kristalizasyon olmadan eriyiğin katılaşmasıyla oluşan amorf bir maddedir. Cam ve seramik özellikleri birbirine yakındır.

2.1.2. Takviye Malzemesi

Takviye fazları genellikle takviye malzemelerinin geometrisine bağlıdır. Bunlar parçacık, fiber ve iskelet (çekirdek) şeklinde tanımlanabilir.

Kompozitlerdeki parçacıklar tipik olarak sadece mekanik özellikleri geliştirmek için değil, ayrıca ısı direnci, elektrik iletkenliği, titreşimlerin sönümlenmesi, aşınma direnci, rijitlik gibi özellikleri iyileştirmek için de kullanılabilir. Parçacıkların tercih edilen bir yönü ve şekli yoktur. Sakalcıklar (Whiskers), şekilleri yüzünden tercih edilir fakat liflere kıyasla hem çapta hem de boyda küçüktür.

Kompozitin takviye bileşenleri ile güçlendirilmesi, kompozitten beklenen dayanımı sağlar ama aynı zamanda ısı direnci veya iletimi gibi veya korozyon direnci gibi bazı ek amaçlara da hizmet eder. Matris malzemesi dayanımını arttıran takviye malzemesi, matris malzemesinden daha güçlü ve daha rijit olmalıdır. Bu, sünekliliğin en az düzeyde olması gerektiği veya hatta bileşenin mümkün olduğunca kırılğan davranması gerektiği anlamına gelir.

Lifler istenen koşulları sağladıkları, özellikleri istenilen şekilde matris bileşenine aktardıkları için takviye malzemeleri içerisinde önemli bir sınıftır.

Cam elyaflar malzemeleri güçlendirmek için kullanılan en eski elyaflardır. Seramik ve metal fiberler daha sonra keşfedilmiş ve kompozitlerin daha sert olması ve ısıya daha dayanıklı olması için geniş çapta kullanılmıştır.

Bir fiber kompozitin performansı; liflerin uzunluğu, şekli, oryantasyonu, bileşimi ve matrisin mekanik özellikleri ile değerlendirilir. Elyafın matristeki oryantasyonu, kompozitin dayanımının bir göstergesidir ve mukavemet, lifin uzunlamasına yönü boyunca en yüksektir. Bu, uzunlamasına liflerin uygulandığı yöne bakılmaksızın aynı miktarda yükü alabileceği anlamına gelmez. Yükleme yönü boyunca uygulanırsa, uzunlamasına liflerden optimum performans elde edilebilir. Yükleme açısındaki en ufak bir kayma, kompozitin dayanımını önemli ölçüde azaltabilir. Tek yönlü yükleme birkaç yapıda bulunur, bundan dolayı özellikle ağır yük taşıması beklenen kompozit malzemelerde bir karışım olarak liflerin oryantasyonunu sağlamak akıllıcadır.

Sürekli veya süreksiz liflerden oluşan tek tabakalı bantlar, aynı yönde yönlendirilmiş filament tabakalarını içeren katlar halinde tek yönlü olarak yönlendirilebilir. Daha karmaşık yönelimlerde mümkündür, günümüzde bilgisayarlar belirli ihtiyaçlara uyacak şekilde bu tür değişikliklerin gösterimini yapmak için kullanılıyor. Kısacası tabakalı kompozitlerde, kompozitteki tek yönlü fiber dizilimi ile mukavemet değiştirilebilir, sonuç olarak izotropik özellik gösteren bir malzemeye çok yakın özelliklerde bir kompozit malzeme oluşur.

Yarı izotropik olmayan açılı kompozitlerin özellikleri, kat sayısı ve oryantasyonları ile değişebilir. Bu tür kompozitlerde kompozit değişkenlerin sabit bir orana sahip olduğu varsayılır ve matrisler fiberlere nispeten daha zayıf olarak kabul edilir. Bu nedenle üç eksenenden herhangi birinde fiber dayanımı, hacim yüzdesinin her üç ekseninde eşit olduğu varsayılarak tek yönlü fiber kompozitin üçte biri kadardır.

Kısa liflerin farklı yöntemlerle yönlendirilmesi de rastgele yapılabilir. Bu yöntemler serpmeye ile oryantasyon verilmiş düzlem, sıvı veya katı halde matris ilave etme ve katılma evresi öncesi veya sonrası fiber biriktirmedir. Üç boyutlu yönelimler bile bu şekilde yapılabilir.

Çalışmalar, sürekli liflerin veya filamentlerin daha iyi bir yönelim sergilediğini göstermiştir. Fiberlerin en/boy oranı yüksektir, yani uzunlukları etkin çaplarından birkaç kat fazladır. Filamentlerin sürekli işlemlere tabi tutularak üretilmesinin nedeni budur.

Filamentlerin seri üretimi iyi bilinir ve filamentler bir kumaşın özelliklerini sergileyen sarma, büküm, dokuma, örme gibi farklı şekillerde farklı matrislerle eşleşir.

Düşük yoğunluklara ve yüksek dayanıma sahip oldukları için filamentlerdeki veya diğer liflerdeki lif uzunlukları, mekanik özelliklerin yanı sıra kompozitlerin işleme ve prosedürlere verdiği tepkiler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Cam, karbon ve aramid gibi sürekli lifli uygun oryantasyonlu kompozitler, süreksiz lif kullanılan kompozitlere göre oldukça yüksek dayanıma sahip olabilirler. Kısa fiberler, teorik dayanımlarıyla bilinmektedir. Filament sarma yönteminde matris emdirilmiş fiber, kompozitin

yerleştirileceği mandrel şekilli bir kısmın etrafına sarılır, bitmiş üründe eşit yük dağılımı ve elyafın uygun yönelimi mümkündür. Bununla birlikte sarım çoğunlukla, dönen gövdelerin üretimi ile sınırlanmıştır ve nadiren düzensiz olsa da düzgün yüzeyler ortaya çıkar.

Açık veya kapalı kalıplama prosesi ile birleştirilen kısa fiberlerin, yatırım maliyetleri filament sargısından önemli ölçüde düşük olmasına rağmen daha az verimli olduğu bulunmuştur.

Elyaftan istenen daha fazla mukavemetin, yüzey kusurlarının en aza indirilmesi veya tamamen ortadan kaldırılması ile daha küçük çaplarla elde edilebileceği görölmüştür.

Düz ince filamentlere rağbet edildikten sonra fiber dikdörtgen kesitleri yüksek dayanımlı yapılarda yeni özellikler sağlamıştır. Şekillerinden ötürü bu elyaflar mükemmel sarma sağlarken içi boş elyaflar istenilen rijitlik ve basınç dayanımları ile daha iyi yapısal etki gösterirler. İçi boş fiberlerin enine basma dayanımı, boşluk kısmı toplam fiber çapının yarısından daha fazla olduğunda içi dolu fiberlere göre daha düşüktür. Ancak bunları işlemek ve imal etmek kolay değildir.

Laminer kompozitler de kullanılan malzemelerin sayısı kadar birçok farklı kombinasyon oluşur. Onlar birbirine bağlı malzemelerin tabakalarını içeren malzemeler olarak, tanımlanmış olur. Bunlar iki veya daha fazla metal ya da metal dışı malzemelerden dönüşümlü olarak veya belirli bir sırada, birden fazla sayıda ve belirli bir amaç için gereken sayılarda olabilir.

Örtülü ve sandviç yapıda olan lamineler birçok kullanım alanına sahiptir, modül ve dayanım noktalarını incelemede karışım kuralına uydukları bilinir.

Toz metalürjisi, rulo bağlama, sıcak presleme, yayılarak yapıştırma, lehimleme vb. toz metalürjik prosesler, tabaka, folyo, toz veya püskürtölmüş malzemelerin farklı alaşımlarının imalatı için kullanılabilir. Fiber versiyonundan farklı olarak yüksek mukavemetli malzemeler elde etmek mümkün değildir. Ancak tabaka ve folyolar

fiberlere göre, daha kolay iki boyutta izotropik yapılıdır. Folyolar ve tabakalar ayrıca kullanıldıkları yerlerde hacimce yüksek oran sergilerler. Örneğin güçlü bir tabaka laminasyon yapısında % 92'den fazla kullanılabilirken, bu tür bileşimlerin aynı kompozisyonda fiberlerini yapmak zordur. Fiber lamineler hacimce % 75'in üzerinde güçlü fiberler olamazlar.

Metal-Metal laminelerin ana fonksiyon tipleri, sadece yüksek dayanıma ve sertliğe sahip olmaları değildir, ayrıca tek kat bile kompozit malzemeye istenen özellikleri verebilir, maliyet diğer kompozitlere göre daha uygundur. Genellikle ön kaplama veya giydirmeye yöntemleri ile yapılır.

Ön kaplanmış metaller, ince bir kesintisiz film formunda alt katmanlarda tabakalar oluşturularak yapılır. Bu sıcak daldırma bazen de kimyasal kaplama ve elektrolizi meydana getirir. Kaplanmış metallerin daha yoğun çevresel koşullar için daha uygun olduğu bulunmuştur.

Birçok tabaka ve folyo kombinasyonu düşük sıcaklıklarda yapıştırıcı işlevi görebilir. Bu tür malzemeler, plastikler veya metaller üçüncü bir bileşenle birlikte kullanılabilir.

2.2. Balistik Bilimi

Temel olarak balistik bilimi üç farklı kategoriye ayrılır, bunlar iç balistik, dış balistik ve terminal (yara) balistiğidir.

İç balistik, silahın namlusunun içinde gerçekleşen olayları inceler. Ateşleme pimi veya horozun kapsüle vurduğu andan, mermi çekirdeğinin namluyu terk edişine kadar olan sürede gelişen tüm durumlar iç balistik konusu dahilindedir. İç balistikte genellikle itici basınç kuvvetleri, mühimmatın hızlandırılması, mermi çekirdeğinin namludan çıkış hızı ve namlu geri tepmesi ile çalışılır. Birinci ateşleme zamanı, birinci basınç-zaman eğrileri ve sıcaklık da iç balistik konusudur.

Dış balistik, silah namlusundan hedefe doğru mermi çekirdeğinin uçuşuyla ilgilenir. Dış balistik mermi şekli, kesit yoğunluğu, atmosfer basıncı ve hatta yüksek kalibreli silahlarda dünyanın dönüşü gibi parametreleri içeren çok karmaşık bir konudur. Güçlü bilgisayarların ortaya çıkmasıyla bu konular şimdi daha kolay çözülmektedir.

Terminal balistik, mühimmatın hedefe ulaştığı andaki davranışıyla ilgilenir. Burada anlatılmak istenen mermi çekirdeğinin bir kağıt hedefi vurması değil, mühimmatın havaya kıyasla oldukça yoğun bir ortam ya da malzeme ile karşılaştığında tepki olarak nasıl bir davranış gösterdiğidir. Genellikle mühimmatın performansıyla ilgili olmakla beraber, canlı dokularda yaralama veya yüksek tahribat gücü, su, toprak, tuğla, beton, ahşap veya kurşungeçirmez yepek gibi malzemelerde oluşan etki ve tepki durumları incelenir (Heard 2008).

Balistik katsayı (BC) bir cismin uzayda ve zamanda yolculuk ederken nasıl hareket edeceğini belirleyen ve hareket denklemlerinde tanımlanan bir fizik terimidir. Balistik katsayı yerçekimi kuvvetini etkilemez.

$$\text{Namlu Çıkış Hızı} \times \text{Balistik Katsayı (BC)} = \text{Maksimum Menzil} \quad (2.1)$$

Yukarıdaki formül kullanılarak maksimum teorik atış menzili hesaplanabilir.

Binbaşı Julian Hatcher ilk defa 1935 yılında, belirli bir kurşun çekirdeği / fişek grubu için, kurşun çekirdeğinin yaralama yeteneğini sayısal olarak tanımlamaya çalışmıştır. Bulduğu bu sayısal değere, 'Değişken Durdurma Gücü'(RSP) adını vermiştir. Onun hesaplamalarda kullandığı orijinal formül aşağıdaki gibidir.

$$\text{RSP} = \text{Mermi kesit alanı} \times \text{Namlu enerjisi} \times \text{Şekil faktörü}$$

Ancak Hatcher bu formülün hatalı olduğunu fark etmiştir, çünkü hızın hedef üzerinde diğer katmanlara yayılmasını sağlayan faktör, namlu enerjisi değil momentumdur. Bu nedenle formülü aşağıdaki gibi değiştirmiştir.

$$\text{RSP} = \text{Mermi kesit alanı} \times \text{Momentum} \times \text{Şekil faktörü} \quad (2.2)$$

Çeşitli kurşun çekirdeklerine ait RSP değerleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Çeşitli kurşun çekirdeklerine ait RSP değerleri (Heard 2008)

Fişek	Momentum (lbft/s)	Kesit Alanı (in²)	Şekil Faktörü	RSP
0,22" LR	0,097	0,039	1000	3,8
0,25" ACP	0,083	0,049	900	3,7
7,65 mm Parabellum	0,246	0,075	900	16,6
0,32" ACP	0,147	0,076	900	10,0
0,38" Super Auto	0,347	0,102	900	31,8
9 mm Parabellum	0,288	0,102	1000	29,4
0,38" Spesiyal	0,302	0,102	1000	30,8
0,44" Spesiyal	0,416	0,146	1000	60,6
0,45" ACP	0,420	0,159	900	60,0

Balistik bilimi ile uğraşan kişiler genellikle yumuşak vücut zırhı olarak adlandırılan kurşun geçirmez yelek veya ceketlerin test edilmesi ve değerlendirilmesini de yaparlar.

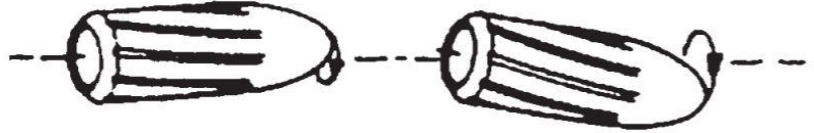
Bir merminin etkisiyle uğraşırken göz önünde bulundurulması gereken iki faktör vardır. Bunlardan biri momentum, diğeri ise kinetik enerjidir.

Momentum, kütle x hız'dır ve muhtemelen en önemli özelliği çarpışmalar sırasında korunmasıdır. Yani iki veya daha fazla nesne çarpışırsa, momentumlarının toplamı çarpışmadan önce olduğu gibi çarpışmadan sonrada aynıdır.

Bir merminin yaralama yeteneği konuşulurken birçok insan yanlış olarak kinetik enerjiyi güç olarak kullanır. Güç iş yapma oranıdır ve genellikle beygir gücü olarak ölçülür. Eğer bir merminin gücü gerekliyse, merminin ne kadar mesafede durduğunun bilinmesi gerekir. Merminin kinetik enerjisi daha sonra bu mesafeye bölünür ve sonra bu cevap beygir gücüne dönüştürebilmek için 550 sayısına bölünür.

Namluyu terk ettikten hemen sonra mermi temelde üç faktör nedeniyle hafif dengesiz durumdadır. Bunlar merminin yalpalaması, merminin devinimi ve merminin nütasyonu yani dönen bir cismin eksen eğiminin periyodik olarak değişmesidir. Merminin yalpalaması Şekil 2.2 de, merminin devinimi ise Şekil 2.3 de gösterilmiştir.

Yalpalama, merminin hedef doğrultusundaki eksenini ile merminin jiroskopik dengeye ulaşmasından önce var olan uçuş hattı arasındaki açı olarak tanımlanır.



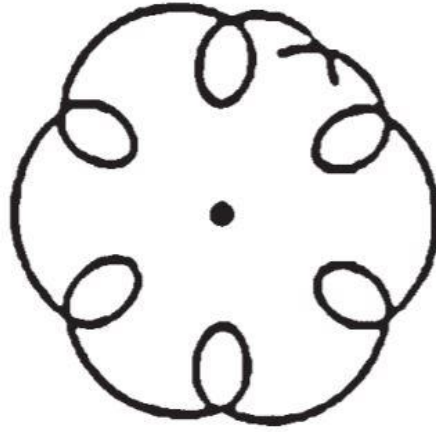
Şekil 2.2. Merminin yalpalaması (Heard 2008)

Merminin devinimi, merminin orta eksenini üzerinde dönmesi etkisidir.



Şekil 2.3. Merminin devinimi (Heard 2008)

Merminin nütasyonu ise Şekil 2.4 deki gibidir.



Şekil 2.4. Merminin nütasyonu (Heard 2008)

Yalpa açıları sadece askeri silahlar için detaylı incelenmiştir. Örneğin 5,56 mühimmat için M16 tüfeğinde 6° dir. Yalpa açılarının kurşun çekirdeklerinin yaralama yetenekleri üzerinde belirgin etkileri vardır. Yalpa açısı ne kadar büyükse, kurşun çekirdeğinin yaralama etkisi o kadar büyüktür. Bu yalpa etkisi aynı zamanda tüfek mermisinin namlu çıkışından 200 yard mesafede daha fazla nüfuz etme gücüne sahip olduğunu gösterir. Yüksek hızlı küçük kalibreli mermiler, yumuşak veya çukur uçlu olsalar bile neredeyse hiç şok gücüne neden olmazlar. Şok gücü aslında merminin kesit alanı ile orantılıdır, merminin hızı ikinci planda kalır (Heard 2008).

Kinetik enerji ise en basit tanımıyla, bir cismin hareketinden dolayı sahip olduğu enerjidir. Aşağıdaki formülde, KE kinetik enerjiyi, M mermi çekirdeğinin kütesini, V ise mermi çekirdeğinin hızını göstermektedir.

$$KE = \frac{1}{2} MV^2 \quad (2.3)$$

Çizelge 2.2’de çeşitli fişeklerin mermi enerjisi görülmektedir. Unutulmaması gereken bir konu vardır. Bir kurşun çekirdeğinin momentumu, hedefi hareket ettirme yeteneği ya da hareket eden hedefi karşı yönden durdurma yeteneğidir. Kinetik enerji ise yerde duran bir ağırlığı kaldırma yeteneğidir.

Çizelge 2.2. Çeşitli fişeklerin mermi enerjileri

(<https://bayourenaissanceman.blogspot.com/2011/03/myth-of-handgun-stopping-power-part-1.html> ’den değiştirilerek alınmıştır, erişim tarihi:01.09.2018)

Silah Tipi	Fişek	Çekirdek ağırlığı (gram)	Namlu Hızı (m/s)	Namlu Enerjisi (joule)
Tabanca	,22 LR	2.59	330.7	142.4
Tabanca	,25 ACP	3.24	231.6	86.8
Tabanca	,32 ACP	4.60	275.8	174.9
Tabanca	,38 ACP	5.70	301.8	259.0
Tabanca	9 mm Parabellum	7.45	352.0	462.3
Tabanca	9 mm Parabellum (Yüksek Basınç)	8.23	381.0	597.9
Tabanca	,38 Spesiyal	8.10	243.8	241.3
Tabanca	,38 Spesiyal (Yüksek Basınç)	8.10	288.0	336.2
Tabanca	,357 Magnum	8.10	442.0	790.4
Tabanca	,40 S&W	10.69	347.5	645.4
Tabanca	,44 Spesiyal	12.96	265.2	455.6
Tabanca	,44 Magnum	15.55	359.7	1004.7
Tabanca	,45 ACP	14.90	254.5	482.7
Tabanca	,45 ACP (Yüksek Basınç)	14.90	301.8	679.3
Tabanca	,45 Colt	14.58	280.4	573.6
Av Tüfeği	20 Kalibre	30.33	371.9	2097.4
Av Tüfeği	20 Kalibre (Tek Kurşun)	21.25	449.9	2151.7
Av Tüfeği	12 Kalibre	31.36	403.9	2558.4
Av Tüfeği	12 Kalibre (Tek Kurşun)	28.32	487.7	3377.3
Harp Tüfeği	5,56x45 mm NATO	3.56	987.6	1738.2
Harp Tüfeği	7,62x51 mm NATO	11.66	798.6	3719.0

Bir kurşun çekirdeğini etkili bir şekilde durdurmak için, kurşun çekirdeği malzemesi önce deforme olmalıdır. Kurşun çekirdeğinin yüzey alanı yeterince genişse ve zırh malzemesinin mermi çekirdeğinin geçişine yeteri kadar direnci varsa, zırh malzemesini

çevreleyen diğer liflere enerji aktarımı gerçekleşir. Deforme olmayan kurşun çekirdeği ise yalnızca dokuma kumaş liflerini ayırarak içine girer.

Eğer mermi çekirdeği yeterince yumuşaksa, yani sadece kurşun çekirdeği, yarı gömlekli kurşun çekirdeği veya ince gömlekli kurşun çekirdeği olduğu zaman çekirdek malzemesinin tek başına deformasyona uğraması daha kolay olacaktır. Ancak mermi çekirdeği ağır gömlekli veya metal nüfuz edici tipte olduğu takdirde, araya çok daha sert bazı malzemeler koyarak mermi çekirdeğini deforme etmek gerekecektir. Bu genellikle yumuşak vücut zırhının önüne koyulan sert plaka şeklinde olur.

Genellikle yumuşak zırhın önüne koyulan bu sert plakalara balistik ekler denir. Onların amaçları yüksek hızlı, sert gömlekli veya metal uçları kırmaktır. Mermi çekirdeğinin hızı azaldığında veya şekli deforme olduğunda, alt katlarda kalan Kevlar, Spectra vb. gibi malzemeler tarafından kolayca durdurulabilir. Bu ek plakalar genellikle sinterlenmiş seramik malzemedен, ısıtılma işlemine tabi tutulmuş alüminyumdan, sertleştirilmiş çelikten veya daha yeni kullanılmaya başlanan titanyumdan yapılır. Bunlar ya tek parça katı plakalar halinde ya da ufak birbirine geçmeli küçük karolar halinde olabilir.

Malzemelerin darbe tepkisi, genellikle düşük hız, orta hız, yüksek veya balistik hız ve aşırı yüksek hız durumları için incelenir. Yüksek hız (balistik) etkisi, genellikle düşük güçte olan silah ateşlemelerinden ya da şarapnel etkisi de denilen patlama sonucu malzemenin parçalanmasından kaynaklanır. Balistik etkinin cevabı; malzemenin yanıt vermeye zamanının olmadığı ve bu yüzden genellikle bölgesel bir hasarın olduğu durumlardır. Malzemenin boyut etkileri göz ardı edilebilir; çünkü darbe etkisi gerilme dalgaları malzeme sınırına ulaşmadan önce kaybolur. Yüksek hız etkisi, 50 m/s ile 1000 m/s aralığındadır (Abrate 2011).

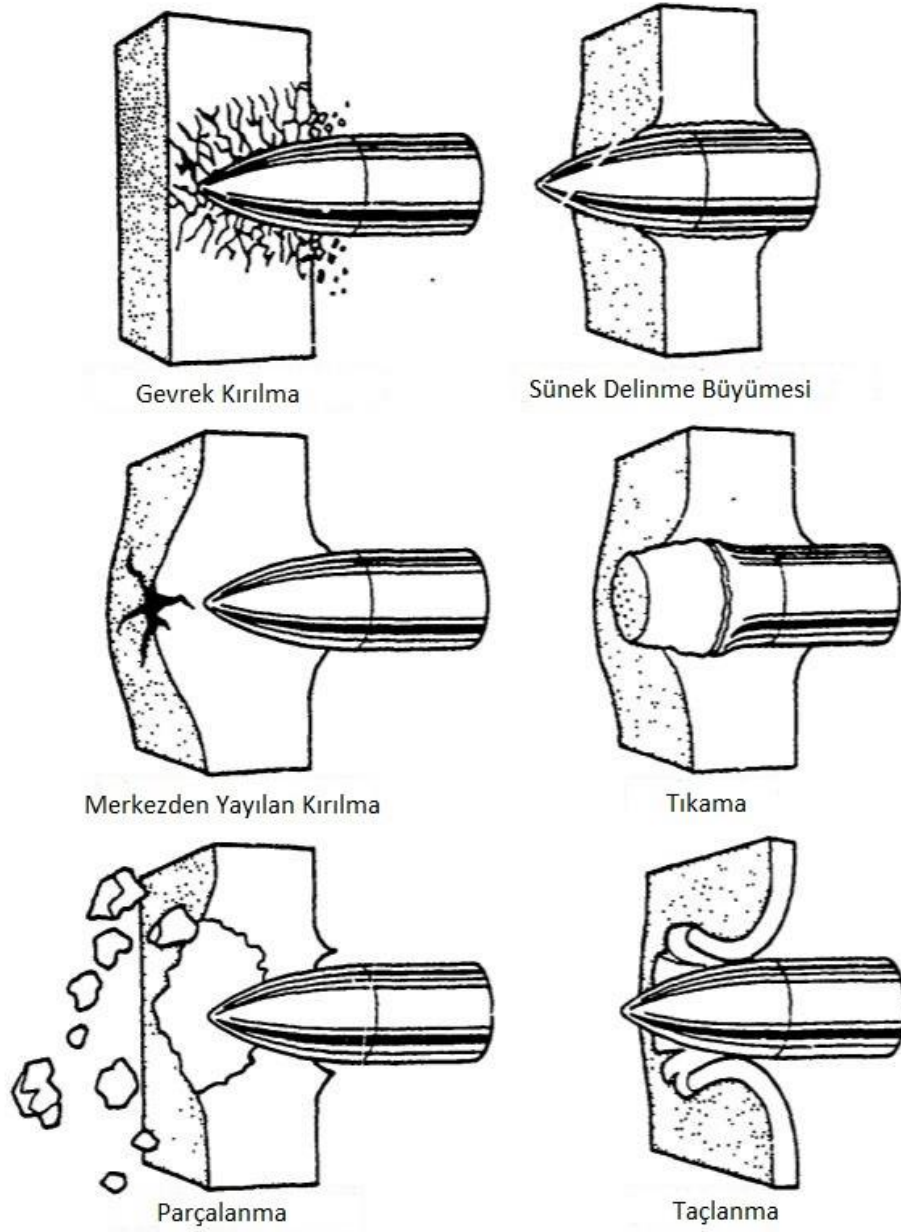
2.3. Katı Cisimlerde Penetrasyon ve Perforasyon

Malzemelerde penetrasyon fırlatılan cismin hedefe nüfuz etmesi, perforasyon ise fırlatılan cismin hedefi tam olarak delmesi olarak tanımlanmaktadır. Penetrasyon ve perforasyon birkaç mili saniye içinde gerçekleşir. Fırlatılan cisim ve hedef deformasyona

uğrar. Bir mermi hedefe vurduğunda kuvvetli basınç dalgaları her iki cisme de yayılır. Çarpma hızı yeterince yüksekse hacmi genişleyen dalgalar, merminin serbest yüzeyinden ve hedefin merkezinden içe doğru yayılır. Bu durumda yüksek çekme gerilmeli bir bölge meydana gelir. Bu gerilme bölgesi hedef malzemesinde kırılmaya neden olabilir. Mermi malzemesinin merkezinde gözenekler ya da diğer hatalar varsa kırılma etkisi artacaktır. Normal darbeler için gerilme durumu iki boyutludur. Hedef eğiklik oranı için, hedef üzerinde yüklemenin asimetrisinden dolayı ek olarak eğilme gerilmeleri de oluşur. Mermi geometrisinin uygun kombinasyonunda malzeme karakteri ve darbe hızı, eğme ve çekme gerilmelerinin oluşturduğu birleşik gerilme durumunda merminin sekmesine yol açabilir. Hedefteki ilk sıkıştırılmış dalga, serbest kalan dalgaları takip eder. İlk sıkıştırılmış dalga hedefte serbest sınırlara ulaştığında, ek serbest dalgalar üretilmiştir. Eğer yük yoğunluğunun kombinasyonu (ekme) ve süresi, hedef malzeme için kritik değeri aşarsa hedef malzemede deformasyon görülür. Hedeflerin sınıflandırması aşağıda en iyi şekilde tanımlanmıştır (Zukas 1980).

- a- Yarı Sonsuz: Penetrasyon süresince merkezden uzak sınırın etkisi yoksa yarı sonsuzdur.
- b- Kalın: Merminin hedefe ulaşmasından sonra merkezden uzak sınırın etkisi varsa kalındır.
- c- Orta Düzey: Arka yüzey, delici hareketin neredeyse tamamı boyunca deformasyon süreci üzerinde önemli bir etki yaparsa orta düzeydir.
- d- İnce: Eğer gerilme ve deformasyon gradyanları boyunca kalınlığı yoksa incedir.

Darbe alan malzemeler çeşitli değişken koşullara bağlı olarak hasar görebilir. Bunlar genel olarak değişken malzeme özellikleri, darbe hızı, mermi şekli, hedefi sabitleme veya destek yöntemi ve mermi veya hedefin değişken boyutlarıdır. İnce ve orta kalınlıkta hedeflerde en çok görülen modlar Şekil 2.5'dedir.

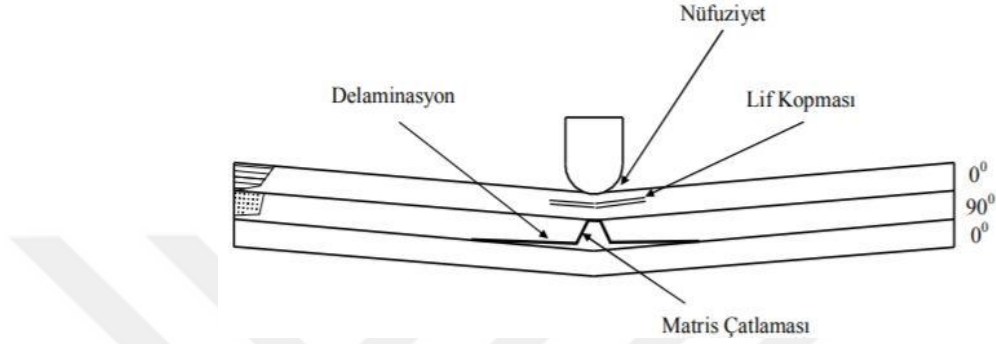


Şekil 2.5. Darbe almış plakadaki hata modları (Rosenberg ve Dekel 2012'den değiştirilerek alınmıştır)

Parçalanma, sonlu kalınlıktaki bir plakanın arka yüzeyinden patlama veya yoğun darbe yüklenmesi sonrası yaygın görülen bir olaydır. Özellikle çekmeye göre basmaya daha dayanıklı malzemelerde görülür.

2.4. Katmanlı Kompozitlerde Hasar Modları

Katmanlı kompozitler, anizotropik ve heterojen yapılarından dolayı dört değişik önemli hasar modunun ortaya çıkmasına müsaittirler. Katmanlı kompozitlerde hasar modları Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Katmanlı kompozitlerde hasar modları (Metin 2008’den değiştirilerek alınmıştır)

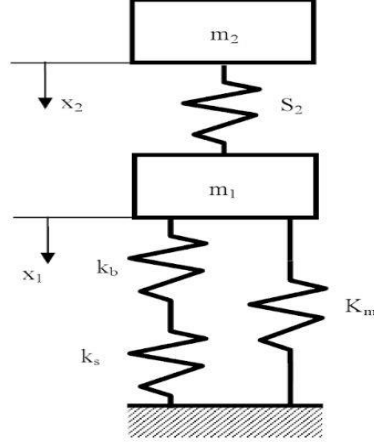
- a- Matris çatlaması: Fiberlere paralel meydana gelen hasar tipidir. Malzeme üzerinde oluşan basma ve kesme kuvvetlerinden meydana gelir.
- b- Delaminasyon: Uygulanan darbe sonrası eğilmeye maruz kalan malzeme tabakaları arasında oluşan tepkilerin farklı olması sonucu ortaya çıkar.
- c- Fiber kopması: Gerilme altındaki fiber kopar, sıkıştırma altındaki fiber eğilir.
- d- Nüfuziyet (Penetrasyon): Çarpan cisim kompozit malzemeye tamamen nüfuz eder.

Hasar modunun belirlenmesi sadece darbe olayı hakkında bilgi edinmek için değil, ayrıca malzemenin kalıcı mukavemeti hakkında fikir edinmeyi sağlaması açısından da çok önemlidir (Ceyhun ve Turan 2003).

2.5. İki Serbestlik Dereceli Model

Kabul edilen iki serbestlik dereceli modelde Zhou ve Stronge (2006) tarafından, Olsson (2002) ve diğerleri, m_1 plaka kütlesini, m_2 mermi kütlesini, k_b eğilme direngenliğini ve

k_m membran direngenliğini göstermektedir. Genel olarak k_m lineer olmayan yaydır. Bazen bu lineer olmayan davranış dikkate alınmaz ve k_m ihmal edilir. S_2 kontak direngenliğini temsil eden lineer olmayan yay, S_2 'deki kontak kuvveti ise P 'dir (Abrate 2011). Darbe dinamiği için iki serbestlik derecesine sahip yay-kütle modeli Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7. Darbe dinamiği için iki serbestlik derecesine sahip yay-kütle modeli (Abrate 2011)

Sistemin hareket denklemleri;

$$m_2 \ddot{x}_2 + P = 0 \quad (2.4)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_{bs} x_1 + k_m x_1^3 - P = 0 \quad (2.5)$$

Zhou ve stronge göre, kontak kuvveti aşağıdaki eşitlik tarafından verilir.

$$P = x \sqrt{\alpha + \beta \alpha^3} \quad (2.6)$$

Burada $\alpha = x_2 - x_1$ yani yer değiştirme olarak tanımlanır.

2.6. Balistik Malzemeler

2.6.1. Metal Zırh

Dövme çelik zırhlar uzun yıllar önce tarih sahnesinde yerini almıştır. 1. Dünya Savaşının ilk dönemlerindeki tanklarda yaygın olarak kullanılmıştır. Haddelenmiş zırhlar 2. Dünya Savaşında kullanılmaya başlanmıştır, fakat dökme çeliklerin daha düşük maliyeti ve daha yüksek üretim kapasitesi nedeniyle 1970'lere kadar büyük ölçüde benimsenmemiştir. Haddelenmiş homojen zırh (RHA) 1970'lerde yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Diğer çeliklere göre kaynak yapılabirlik, daha yüksek rijitlik ve daha yüksek tokluk dahil olmak üzere birçok avantaj sağlamıştır. Bugün bile RHA aracın gövdesinde ve temel zırhta en geniş kullanım alanına sahip malzemedir. Çelik zırhtaki gelişmeler, yüksek sertlikte çeliğin (500 HB) ortaya çıkmasına neden olmuştur ve son zamanlarda ultra yüksek sertlikte çelikler (600+ HB) bulunmuştur. Bu yeni bulunan çelikler balistik verimliliği arttırmakla beraber, kaynak yapılabirlik ve tokluk azalmıştır. Daha sert çeliklerin üretim yapılabirliği daha zordur, daha kırılğandır ve malzemede yüksek gerilme oranlarına çıktığında çatlama ihtimali daha yüksektir. Bu sert kırılğan çelikler, yapısal yük taşıma elemanı olmaları veya patlama basınç dalgalarına dayanmaları istenmediği için eklenen zırh sistemleri konusunda iyi seçimdir. Araç yapısında kullanılan çelik gibi şekillendirilebilirlik veya kaynak yapılabirlik gerektirmez.

Yüksek sertlik veya ultra yüksek sertlikteki çelik ek zırh sistemleri genellikle RHA, alüminyum veya kompozit destek malzemeleri gibi daha sünek malzemelerle birleştirilir. Zırh sistemindeki mermi darbesi zırhı oluşturan farklı malzemeler olduğu için, zırhın kalınlığı boyunca farklı malzeme özellikleri gösterir. Daha sert malzemeler tipik olarak, gelen merminin ucunu kırmak için zırhın önüne (vurma yüzü) yerleştirilir. Daha sünek malzemeler ise kalan enerjiyi emmesi ve parçaları tutması için vurma yüzündeki ilk plakanın arkasına yerleştirilir.

Alüminyum, zırh çeliğine alternatif olarak daha fazla kabul görmüştür. Alüminyum zırh genel olarak ağırlık oranına göre, çelik karşısında daha yüksek balistik verimliliğe sahiptir. Alüminyum kara taşıtlarında uzun yıllardan beri kullanılmakta iken, kaynak yapılabirlik ve yük taşıma gereksinimlerinin zorlu olmadığı ilave zırh sistemlerinde daha sık kullanılır. Alüminyumun sünekliği de patlamalarda hayatta kalabilmede avantaj sağlar.

Kara araçlarında M1 Abrams tankı da olmak üzere titanyum zırh kullanımı gittikçe artmaktadır. Titanyum iyi çoklu vuruş koruma yeteneği, yüksek yapısal dayanım / ağırlık

oranı ve iyi korozyon direnci sayesinde RHA 'ya göre gelişmiş balistik seçenekler sunar. En büyük dezavantajı maliyettir.

2.6.2. Seramik Zırh

Seramikler çok sert ve kırılabilir malzemelerdir, zırh delici merminin ucunu kırarlar ve yumuşak malzemeleri delme etkisini azaltırlar. Bir zırh delici mermi kendisinden daha yumuşak bir malzemeye darbe uyguladığında deforme olmaz ve şeklini değiştirmeden malzemeye nüfuz eder. Bu, delicinin etkin bir şekilde görevini yerine getirmesini sağlar ve zırhın balistik verimliliğini önemli ölçüde azaltır. Genellikle zırh delici mermiler, 60 HRC değerini aşan sertliğe sahip sertleştirilmiş çelik veya tungsten karbürden oluşur. Zırh delici mermi malzemelerinden daha güçlü olan malzemeler genellikle şok ve patlama yüklemeleri karşısında çok kırılabilir. Bu nedenle daha sert zırh delici mermilerin çoğunu durdurmak için seramikler, araç gövdesi olarak kullanılan haddelenmiş çelik zırha eklenir.

Birkaç farklı tipte seramik zırh vardır. Kara taşıtlarında en çok kullanılan seramik, sunduğu performans ve maliyet avantajları sayesinde alüminyum oksittir. Ağırlığın daha kritik olduğu uygulamalarda silisyum karbür veya bor karbür gibi yüksek performanslı seramikler kullanılır. İstenen bir zırh çözümü için seramik etkinliğini belirlemede en kritik malzeme özellikleri sertlik, kırılma tokluğu ve yoğunluktur. Daha sert bir seramik malzeme, deliciyi daha etkili bir şekilde parçalayacaktır. Artan sertlik genellikle kırılma tokluğunu azaltır, bu malzemenin kırılma direncini gösteren bir ölçüdür. Mekanik özellikleri balistik performans ile ilişkilendirmek çok zor olsa da genellikle balistik sınıftaki seramiklerde yüksek sertlik, yüksek kırılma tokluğu ve düşük yoğunluk (gözeneksiz) en çok tercih edilen özelliklerdir. Seramik zırh sisteminin etkinliğini nihai olarak belirleyen birçok başka faktör vardır. Zırh performansını tahmin etmek zor olduğu için malzeme özelliklerinin doğrudan karşılaştırılması yapılır.

Bor karbür, Silisyum karbürüne benzer bir sertliğe sahiptir ve daha düşük yoğunluğu vardır, bu da genellikle daha gelişmiş, daha iyi bir balistik etki sağlar. Bor karbür hafif

tehditlere karşı korunmak için (7,62 AP) genellikle uçak ve gemilerde kullanımı tercih edilen bir malzemedir.

Ağır makineli tüfek ve orta boy toplar gibi daha ağır tehditler için sıklıkla sıcak preslenmiş silisyum karbür seçilir. Maliyet / performans dengesi gerekli olduğunda, alüminyum oksit tercih edilen malzemedir.

2.6.3. Hafif Kompozit Zırh

Hafif kompozit zırhlar artan balistik ve düşük ağırlık gereksinimleri nedeniyle kara taşıtlarında daha fazla kabul görmektedir.

Hafif kompozit zırhlarda en çok kullanılan 3 çeşit elyaf vardır. Bunlar,

- Cam elyaf
- Aramid elyaf
- Ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) elyaf 'tır.

E, R ve S camları, zırh uygulamalarında kullanılan cam elyaflardır. E Cam fiberler uzun bir kullanım öyküsüne sahiptir ve birçok askeri olmayan polimer kompozitlerde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler iyi mekanik özellikler sergiler ve tehdit karşısında balistik direnç ihtiyacını karşılar. Daha iyi balistik direnç için E cam bileşimi, % 30 daha yüksek gerilme mukavemetine, daha fazla sertliğe ve tokluğa sahip olan R ve S cam üretmek için modifiye edilmiştir. Cam fiberler genel olarak mükemmel sıcaklık ve çevresel dirence sahiptir.

Aramid fiberler 1960'lerde ticarileşmiştir. Balistik alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Fiberler, onları özellikle zırh, koruyucu giysiler ve çok çeşitli uygulamalarda kullanışlı yapan bir dizi özellik sunmaktadır. Aramidler ilk defa 1970'lerde araç zırhında kullanılmaya başlanmıştır.

Zincir moleküllerinin kimyasal yapısı onlara üstün güç, esneklik ve sürtünme toleransı verir. Fiber eksenini boyunca bağlar hizalı şekildedir. Aramid fiber dayanımını, nispeten kısa moleküller arasındaki güçlü bağlardan almıştır.

Aramid fiberler ısıya karşı üstün direnç, düşük tutuşma kabiliyeti ve organik çözücülere karşı yüksek direnç gösterir. Aramid fiberleri yaklaşık 500 °C’de bozulmaya başlar. Aramidin ‘İnert’ özellikleri geniş bir uygulama yelpazesi için mükemmel çok yönlülük sunar. Bununla birlikte Aramid fiberler, Ultraviyole (UV) ışınlarına, asitlere ve belirli tuzlara duyarlıdır. Aramid fiberler yaygın olarak, vücut zırhında, araç zırhında, askeri kasklarda, koruyucu eldivenlerde ve itfaiyeciler için ateşe dayanıklı kıyafetlerde kullanılır.

Polietilen, her bir karbon atomuna bağlanmış iki hidrojen atomuna sahip uzun bir karbon atomu zincirinden oluşan, yaygın olarak kullanılan bir plastik malzemedir. Polietilen düşük yoğunluklu (dallı) veya yüksek yoğunluklu (doğrusal) zincirlerden oluşur. Yüksek yoğunluklu olanları daha güçlü ve daha pahalıdır, tipik olarak 2.000.000 ile 5.000.000 arasında bir moleküler ağırlığa sahiptir ve UHMWPE olarak adlandırılır. 1980’lerde ticarileştirilen UHMWPE fiberler, en düşük ağırlık gerektiren uygulamalar için yaygın olarak kullanılır. Bu elyaflar Jel-Spin metoduyla yapılmıştır, bu yöntemde UHMWPE’nin son derece uzun zincirleri birleştirilir ve daha sonra zincirler bir yönde hizalanır. Bu şekilde % 95’den daha büyük bir paralel yönelime ulaşan şekil almış UHMWPE fiberler, böylece en güçlü fiber tiplerinden birini oluşturur. Çizelge 2.3’de hafif kompozit zırhlarda kullanılan elyaf türleri ve özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.3. Hafif kompozit zırhlarda kullanılan elyaf türleri ve özellikleri (Bhatnagar 2016).

Malzemeler	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme dayanımı (Mpa)	Young modülü (Gpa)
E Cam	2,55	2000	80
S Cam	2,49	4750	89
Aramid	1,44	1880-2860	70-112
UHMWPE	0,97	2200-3900	62-132

Molekülün basit yapısı aynı zamanda yüksek performanslı polimerlerde nadir görülen yüzey ve kimyasal özelliklere de yol açar. UHMWPE, agresif ajanlara karşı saldırıya duyarlı kimyasal gruplar içermediğinden suya, neme, kimyasallara, UV ışınlarına ve mikroorganizmalara karşı oldukça dirençlidir. Bununla birlikte UHMWPE'nin düşük yüzey enerjisi vardır. Bu nedenle diğer polimerlere yapışması, kaplama ve boyama prosesleri daha zordur.

Kompozitlerin performansı, tehdide bağlı olarak değişir. UHMWPE elyaflar, zırh delici kurşunlar dışındaki tüfek kurşunlarını durdurmada son derece etkilidir. Örneğin, UHMWPE'nin ağırlığı 7,62 çapındaki normal delici tüfek kurşunlarına karşı, Aramid ve Cam kompozitlerin ağırlığının $\frac{1}{2}$ sinden yada $\frac{1}{3}$ ünden daha düşük olabilir. Şarapnel ve parçacık koruması için diğer fiber malzemelere göre % 20 ila % 50 daha az UHMWPE fiber ile aynı performans sağlanır.

Sert zırh kompozit sistemlerinde reçine eklenmiş fiberler, prepreg kumaşları oluşturur. Prepreg ifadesi aslında reçine emdirilmiş kumaşın kısaltmasıdır. Prepreg bir reçineyle emprenye edilmiş dokuma kumaştan veya tek yönlü [0/90] katlardan oluşan fiberlerden meydana gelir. Reçine seçimi, sistemin istenen özelliklerine ve tercih edilen üretim işlemine bağlıdır. Reçineler kompozit zırh sisteminin temel bileşenini ve performansını önemli ölçüde etkilerken, balistik direnç gösterecek özellik ve yapıya sahip değildir. Bunun yerine, takviye malzemesi olan fiberleri çevreler, fiberleri yerinde tutar ve kinetik enerjiyi fiberlere dağıtmaya yardımcı eder.

Kinetik enerji, kompozit malzeme tarafından absorbe edilir. Matris çatlağının bir kombinasyonu olarak (başlangıç hasarı), yüzey fiberlerinde ayrılma, fiber kayması, hidrostatik ezilme, çekme kırılması ve sürtünme kayması görülebilir. Seçilen reçine sistemi enerji absorbe etme sürecinin dinamiklerini, absorbe edilen toplam enerjiyi ve balistik etkiden kaynaklanan hasar miktarını etkileyebilir. Ek olarak yapısal özellikler, akışkanlara ve kimyasallara olan direnç, yanma dayanımı ve sistemin kolay üretilebilirliği gibi balistik olmayan özellikleri de etkileyebilir.

Balistik kompozitlerde kullanılan en yaygın termoset reçineler fenolikler, epoksiler, vinilesterler ve polyesterlerdir. Fenolikler genellikle yanmaya karşı direnç özellikleri,

akışkanlar ve kimyasallara karşı direnç özellikleri, rijitlikleri ve Cam veya Aramid fiberlerle iyi balistik etkinliklerinden dolayı seçilir. Epoksi reçineler ise yüksek mekanik ve termal özellikleri, tokluk, su geçirmeme ve sıcaklık dayanımı ve kürlenme sırasında düşük çekme olduğu için seçilir. Vinilesterler mekanik özelliklerde ara değerlerde olmalarına rağmen kullanım ve imalat kolaylığı sağlarlar.

Termoset prepreg kompozitler, fiber dokumaya yada tek yönlü [0/90] malzemeye uygulanan kısmen kürlenmiş reçine içeren kalıplanmaya hazır kompozit bileşenlerdir. Yüksek sıcaklık ve zamanla nihai sertleştirmeyi başlatan aktif kimyasallara sahiptirler. Bir termoset prepreg oluşturmak için takviye kumaş, vizkozitesi 50-1000 cP aralığında olan sıvı reçine sistemine daldırılır. Rulo fırçalar; reçine içeriğini kontrol ve fiberlerin reçine ile tamamen ıslatıldığından emin olmak için kullanılır. B evresi prepreg formunda, prepreg kalıplama ve final kürlenme için işlenebilir ve kesilebilir. Rulolar erken kürlenmeyi önlemek için donmuş olarak saklanır. Isı ve basınç prosesi ile prepregreçinesi rijit bir kompozit zırh paneli oluşturmak için sertleşir. 1990 ve 2000'li yılların ilk 10 yılında kullanılan en yaygın balistik kompozit zırh malzemesi, bir fenol reçine sisteminde Cam ya da Aramid elyafıydı (Bhatnagar 2016).

Termoplastik prepreg malzemeler termoplastik sıvı, film ya da toz reçine ile emprenye edilir. Termoplastik reçinelerin reaktif kimyasalları yoktur ve bu nedenle çok uzun bir raf ömrüne sahiptirler. Donmadan saklanabilirler ve taşınabilirler. Onlar asla kürlenmedikleri için yeniden kalıplanabilir ve şekillendirilebilirler. Tokluk, süneklik ve kimyasallara karşı direnç termoplastik reçineleri balistik uygulamalar için iyi bir seçenek haline getirir. Bununla birlikte termosetler diğer malzemelere göre yüksek sıcaklıklara daha fazla direnç gösterir ve bu nedenle yüksek sıcaklıklara maruz kalan balistik uygulamalara daha uygundur.

Balistik termoplastik prepregler için ortak reçineler kauçuklu elastomerler, poliüretanlar, akrilikler veya çoklu reçine karışımlarıdır. Poliüretanlar iyi mekanik özellikler, sıcaklık dayanımı ve darbe sonrası düşük delaminasyon gösterir. Kauçuklu elastomerler, en düşük mekanik özelliklere ve en fazla delaminasyona sahip olma eğilimindedirler, fakat aynı zamanda en fazla enerji absorbe etme potansiyeli gösterirler. Polietilen reçineler sıklıkla

kullanılırlar, çünkü onlar düşük alansal yoğunluklu tabakalarla kullanılabilir, istenen reçine içeriği ile düşük alansal yoğunluklu tabakalara izin verir. Film temelli reçineler, sıvı reçinelere kıyasla daha kolay uygulanır ve daha ucuzdur. Fakat bu reçineler fiberlerin etrafını tam çevrelemez ve fiberlerde istenen tam ıslanma gerçekleşmez. Dokunmuş fiber veya tek yönlü fiberlerde laminasyon prosesi için ergiyen film tabakaları kullanılır. Isı ve basınç altında film tabakası fiberlere bağlanır ve termoplastik film laminasyon, prepreg malzemesini oluşturur.

2.7. Yüksek Hızlı Darbe Test Metotları

Kompozit malzemeler genellikle darbe hasarına maruz kalacakları ortamlarda kullanılırlar. Örneğin su üzerinde giden kompozit tekneler veya bir kurşun çekirdeğinin isabet ettiği kompozit zırh gibi. Darbe hasarı direnci kompozitler için önemli bir özelliktir.

Darbe testleri iki ana kategoriye ayrılır,

- Düşük hızlı darbe
- Yüksek hızlı darbe

Darbe testlerinde bu iki ana kategori üç tipe ayrılır. Charpy Darbe Testi ve Ağırlık Düşürme Darbe Testi, düşük hızlı darbe testleri kategorisine girer.(ASTM D 3763) Balistik Darbe Testi, yüksek hızlı darbe testlerine girer. Teknoloji, deneysel darbe testleri için artık gelişmiş ölçüm cihazlarının bulunduğu bir noktaya gelmiştir. Tüm düşük hızda deneysel darbe test cihazları için üç ana bileşen vardır. Bunlar; dinamik yük hücresi, veri görüntüleme sistemi ve sinyal ayarlama ünitesidir. Tüp içine numuneye vurmak için kullanılan çarpma tertibatı yerleştirilmiştir. Tüp içinde, çarpma tertibatının numuneye çarpması sonucu zorlanmanın zamana karşı değişimini ölçen zorlanma ölçer vardır. Sinyal koşullandırma birimi sinyale ilişkin gürültüyü kaldırır ve veri görüntüleme sistemi, ölçülen verileri gösterir. (Kessler 2004).

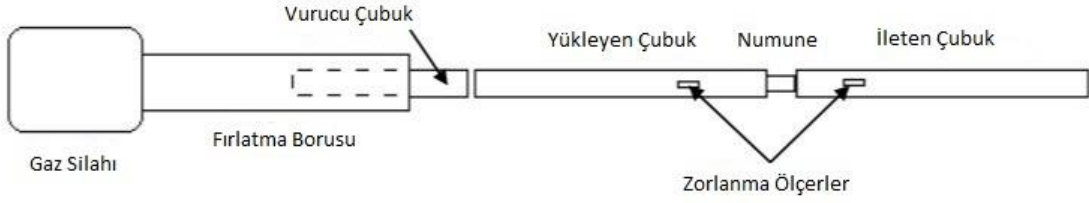
2.7.1 Split – Hopkinson Basınç Barı Test Yöntemi

Split - Hopkinson Basınç Barı (SHPB) tekniği metal malzemelerde, düşük değerli deformasyonlar için lazer tabanlı yüksek hız testlerini tamamlayıcı olarak geliştirilmiştir. Orijinal SHPB, basmaya maruz kalan malzemelerin davranışlarını karakterize edebilmek için tasarlanmıştır. Malzemelerin dinamik etkiler karşısında cevabını belirlemek için en çok kullanılan yöntemdir. Bununla birlikte diğer yapılan SHPB'ler aksel olmayan çekme, burulma ve çentikli numunelerin kırılma tokluğunu test etmek için tasarlanmıştır. SHPB test cihazı için evrensel standart tasarım olmamasına rağmen tüm SHPB 'ler ortak tasarım öğelerini paylaşır. Bunlar;

- Mermiyi fırlatmak için hava topu veya sıkıştırılmış gaz silahı
- Merminin hızını belirlemek için algılama cihazı
- İki uzun simetrik basınç çubuğu
- Basınç çubuklarının serbestçe hareket etmesi sağlamak için yataklar ve hizalama aletleri
- Her iki basınç çubuğuna monte edilen zorlanma ölçerler
- Test numunesi
- Gerilme ve zorlanma bilgilerini kaydetmek için aletler

Sıkıştırılmış gaz silahı, basınçlı gaz depolama tankı, hızlı açılan valf, fırlatma tüpü ve merminin hızını ölçen sensörlerden oluşur. Mermi ayrıca vurucu çubuk olarak da adlandırılır, Fırlatma borusundan ileriye doğru aksel yönde gider ve uzun basınç çubukları yüzünden darbe yapar. İki çubuktaki darbe, basınç dalgası üretir. Bu dalgalar daha sonra iki basınç çubuğu arasına sıkıştırılmış olan test numunesine aktarılır.

İki basınç çubuğu, yükleme çubuğu ve iletim çubuğu olarak adlandırılır. Yükleme çubuğu, vurma çubuğunun fırlatma borusundan çıktıktan sonra temas ettiği çubuktur. İletim çubuğu test numunesinin diğer tarafında yer almaktadır. Bu çubuklarda ölçülen elastik yer değiştirmeler, numunenin her bir ucundaki gerilme – zorlanma koşullarını belirlemek için kullanılır. SHPB'nin bir şeması Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. SHPB şeması (Lang 2012'den değiştirilerek alınmıştır)

Split Hopkinson Basınç Çubuğu kurulumunda kullanılan çubuklar, geleneksel olarak 4340 çeliği gibi yüksek mukavemetli bir metal veya İnkonel gibi bir metal alaşımıdır. Çünkü basınç çubuklarının akma dayanımı, deforme olacak numunede elde edilebilecek maksimum gerilmeyi belirler. İnkonel çubuklar genellikle yüksek sıcaklık gerektiren SHPB'lerde kullanılır. Bunun temel nedeni, İnkonel malzemenin elastik özellikleri 800 °C'ye kadar çok az değişiklik gösterir.

Basınç çubuklarının uzunluğu (L) ve çapı (d), test geçerliliği için bir takım kriterleri karşılayacak şekilde ve numunede istenen maksimum gerilme oranını elde edecek şekilde seçilir. Bu kriterlerden bazıları ASTM el kitabı 8. ciltte belirtilmiştir. Bir kriter, basınç çubuğunun uzunluğunun belirli bir darbe uzunluğu için tek boyutta dalga yayılımı sağlaması gerektiğini belirtir. Çoğu mühendislik ölçümleri için yayılma, uzunluğun yaklaşık olarak on çubuk çapında olmasını gerektirir. Bir diğer kriter, zorlanma ölçümü ve osiloskop okumalarında netlik için her çubuk (L/d) oranında yaklaşık olarak 20 değerini aşmalıdır.

SHPB'nin doğru çalışması ve bir boyutlu dalga yayılımını sağlamak için çubuklar fiziksel olarak düz olmalı ve harekete engel olmaması için serbest olmalıdır. Çubuklar serbest olduklarından emin olunması için, dikkatli bir şekilde monte edilmeli ve hizalanmalıdır. Çubuklar serbestçe hareket edemiyorsa ölçümlerde gürültü olur ve gerilme – zorlanma ilişkilerini belirleme zorlaşır.

Vurucu çubuk normal olarak basınç çubukları ile aynı malzemeden ve aynı çapta imal edilir. Vurucu çubuğun çapı ve hızı, numunedeki toplam gerekli zorlanmanın üretilmesi ve zorlanma değerine göre seçilir. Vurucu çubuk, yükleme çubuğunu etkilediğinde tek

boyutlu uzunlamasına bir dalga oluşur. Bu dalga yükleme çubuğundan geçip test numunesinin ara yüzeyine ulaştığında boyuna dalganın bir kısmı numune boyunca iletilir, geri kalanı ise yükleme çubuğuna geri yansıtılır. Numunedeki zorlanma oranı, yansıyan dalganın genliği ile doğru orantılıdır.

Geleneksel olarak kompozit malzemeler, metal malzemelerden daha düşük darbe enerjilerine sahiptir. Çünkü onların enine ve tabakalar arası kayma dayanımları düşüktür, kompozit malzemeler plastik deformasyona uğramaz. Belli bir gerilme seviyesine ulaştıklarında kalıcı olarak hasar görürler. Bu durum yerel veya yapısal zayıflamalara neden olabilir.

2.7.2 Balistik Test Yöntemi

Balistik testler, kompozitlerin en yüksek darbe dayanımını test etmek için kullanılan yüksek hızlı darbe test yöntemidir. Mermilerin boyutunu ve hedefin kalınlığını göz önüne alırsak merminin hedefe nüfuz işleminin zaman süresi, (300-1200 m/s aralığında hızı değişen mermiler için) 10 - 50 pikosaniye arasındadır. Hedefteki kesme dalgalarının hızı 2mm/ps olmak üzere, darbe etkisi yaklaşık 3 – 10 cm'lik bir doğrusal mesafe boyunca uzanır. Yüksek hızlı darbe koşulları için yapısal tepki, düşük hız durumunda olduğundan daha az önemlidir ve hasar alanı daha bölgesel olur. Bu yüzden geometrik hususlar daha az önemlidir. Eğer ateş hattı ile hedef yüzeyi arasındaki açığı belirtirsek (eğiklik açısı) gerçek hedef noktası ile kıyaslandığında sapma etkisinde $1/\sin(x)$ oranında bir artış olur. Numune boyutları belirlenirken bu faktör dikkate alınmalıdır. Bölgesel hasarlı alan aynı oranda artar. Ancak kesme dalgalarının yayılmasına bağlı darbenin etkisi, önden çarpma ile neredeyse aynıdır (Kessler 2004).

Balistik testler, bir nesneye yüksek hızlı bir kurşunun ateşlenmesinden ve hedef üzerinde bölgesel hasarın etkisinin belirlenmesinden oluşur. Bu yöntem kompozitlerin darbe direncini test etmek için iyi bir yöntemdir ve kompozit zırh gibi ürünleri test etmek için kullanılır.

Balistik test yapılırken veri değerlendirmesine genellikle oluşan hasarı tanımlamak için farklı bir yöntem eşlik etmelidir. Balistik testlerde hesaplamalar yapılırken bazı varsayımlar yapılmalıdır. Bir varsayım, kurşun çekirdeğinin hızının namludan çıktıktan sonra hedefe vardığı ana kadar hızının sabit kabul edilmesidir. İkincisi ise kurşun çekirdeğinden kaybolan enerji, hedef tarafından absorbe edilen enerji ile orantılıdır. Kurşun çekirdeğinin kalan enerjisi, geri tepme hızını algılamak için sensörler kullanılarak ölçülebilir. Balistik test ile gerekli bilinmeyenler hesaplanırken denklemler oldukça karmaşık olabilir.

2.7.3 Tahribatsız Test Yöntemleri

Kompozitlerin darbe testleri karakterizasyon tanımlamaları için ihtiyacı karşılamayabilir. Hasar mekanizması veya hata tiplerini görmek için bazen hasarlı bölgede darbe sonrası analiz gerekebilir. Hasar görmüş bir kompozit numuneyi test etmek için birkaç farklı yol vardır.

Kompozitleri analiz etmek için ultrasonik yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ultrasonik yöntem, nesnenin içine sürekli ses dalgaları göndererek ve yansıyan dalgaları yakalayarak çalışır. Yansıyan ses dalgaları nesnenin bir görüntüsünü oluşturur ve bu şekilde hata ve kusurların, boyut ve şekilleri belirlenir. Geleneksel ultrasonik test yöntemlerinin ana dezavantajı, malzeme katmanlarının iyi bir görüntüsünü elde etmek için ölçüm cihazının empedansını en aza indirmek yani ölçüm cihazı ile malzemenin temas halinde olması gerekir. Yeni teknolojiler temassız ultrasonik test tekniklerinin kullanılmasını sağlayabilir. Şu anda farklı tipte ultrasonik test cihazları bulunmaktadır.

Mikrodalga testi, kompozit malzemelerdeki darbe hasarını analiz etmenin başka bir yoludur. Mikrodalga testinde malzeme üzerine mikrodalga ışınları gönderilir, kusurlu kısımlar mikrodalgaların değişmesine neden olur. Bu dalgalar daha sonra numunedeki hataları göstermek için kullanılan ince bir film tarafından absorbe edilir. Mikrodalga test teknikleri, kompoziti çevreleyen havanın mikrodalga ışınlarına çok az empedans vermesinden dolayı faydalıdır. Mikrodalga testleri, sağlık sorunlarına neden olabileceği

için zararlı olabilir. Ultrasonik testlerde olduğu gibi mikrodalga testlerinde de farklı tipler vardır.

2.7.4 Diğer Test Yöntemleri

Darbe sonrası sıkıştırma testi, ilk testten sonra etkilenen numunenin ne kadar dayanıklı olduğunu belirlemenin bir yoludur. Sıkıştırma testi önceki iki teknikten farklıdır, çünkü bu testte numune üzerinde tahribat yaratılır. Darbe sonrası sıkıştırma, numunedeki en yüksek gerilme ve en yüksek zorlanma değerlerini belirlemede kullanılabilir. Veriler hasar almış numunenin, istenen ve belirlenen işlevi yerine getirecek kadar güçlü olup olmadığını görmek için yararlıdır.

Birçok farklı sıkıştırma testi türü vardır ve bu nedenle birçok farklı türde sıkıştırma aparatı vardır. Farklı tipte sıkıştırma testleriyle uğraşan birkaç farklı ASTM standardı vardır. Matematiksel ilişkilerin iyi bir özeti ve test prosedürleri SACMA SRM 2R'de bulunabilir. SACMA standardı, kompozit malzemelerin çarpışma sonrası sıkıştırma testi üzerinde bulunan iki standarttan biridir, diğeri ise Boeing tarafından geliştirilmiş bir standarttır (Kessler 2004).

Ayrıca çoğu tahribatsız test metodu olan birkaç darbe sonrası hasar testi de vardır. Diğer test tiplerinin bazıları üç veya dört noktalı eğilme, x ışını, optik, Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) ve termografik testlerdir. Üç ve dört nokta eğilme testi, darbe almış örnek numune üzerinde eğilme testi yapılarak gerçekleştirilir. Bununla birlikte bu test, darbe sonrası numune üzerinde yapıldığı için test performans yönetimi için standartlar yoktur. X ışını testi, x ışınlarının malzemeye gönderilmesi sonucu malzemedeki yansıyan ışınların gönderilen ışınlarla farkının ölçülmesi temeline dayanır. Optik test, kırık yüzeyi analiz etmek için darbe almış numuneyi mikroskop altına yerleştirerek yapılır. SEM tekniği, numuneye elektronlar göndererek ve geri dönen elektronları ölçerek kırık yüzeyinin görsel görüntüsünü elde etmek için yapılır. Hem optik yöntem hem de SEM yöntemi incelenen malzemenin iç katmanlarını görebilmek yerine sadece malzemenin yüzeyini gösterir. Termografik testler, malzemeyi ani bir şekilde ısıtıldıktan sonra

malzemeden yayılan ısınn kızıl ötesi kamera kullanılarak ölçülmesi temeline dayandır. Termografik testler, doğruluğu ve etkinliği nedeniyle popülerlik kazanmaktadır.

2.8. Kaynak Araştırması

Bulut (2003) ‘Balistik Koruyucu Teğizatın İmalatında Kompozit Malzeme Kullanımı’ konulu tez projesinde balistik koruyucu teğizatın imalatında kullanılan Aramid ve UHMWPE malzemelerin balistik dayanım değerleri, mekanik özellikleri, korozyon ve kimyasallara karşı dayanım özellikleri, tasarım kriterleri, imalat aşamaları ve test yöntemlerini incelemiştir. Sonuç olarak bir malzemenin balistik performansının, onun sınırlı bir alanda enerjiyi emmesine ve emdiği bu enerjiyi hızlı ve etkin bir şekilde yaymasına bağlı olduğu, fiber esaslı koruyucularda çekme dayanımı, uzama miktarı ve fiber içinde ses iletme hızının en önemli parametreler olduğu anlaşılmıştır.

Ünaler (2005) ‘Development And Characterization Of Light-Weight Armor Materials’ konulu tez projesinde örgü ve kıvrımsız dikişli cam elyaf kumaş ve izoftalik ve ortoftalik polyester reçinelerden RTM (reçine transfer kalıplama) tekniğini kullanarak e-cam ve doymamış polyester kompozit lamina malzemeler üretmiştir. Kompozit laminalara ek olarak kompozit yapının balistik dayanımını artırmak amacıyla alüminyum plakalar ve alümina tabakalar ilave edilmiştir. Alüminyum (Al) plakaları ve alümina (Al_2O_3) tabakalar kullanılarak çok tabakalı sandviç laminalar üretilmiştir. Alüminyum ve alümina içeren ve içermeyen E-Cam/Doymamış Polyester kompozit laminaların mekanik ve balistik performansını belirlemek amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Sonuç olarak çok tabakalı kompozit yapıların balistik tehditlere karşı kapasitesinin olduğu ve hafif zırh malzemesi olarak kullanılabileceği gözlemlenmiştir.

Lamberts (2007) ‘Numerical Simulation Of Ballistic Impacts On Ceramic Material’ konulu tez çalışmasında uygun seramik malzeme modeli oluşturmuş ve simülasyonla seramik zırh malzemesi doğrulanmıştır. Sonuç olarak yüksek zorlanma ve yüksek basınç değerleri için Johnson-Holmquist-Beissel modelinin en uygun olduğu tespit edilmiş, model doğrulama amacı için Silikon Karbür plaka üzerinde darbe deneyleri gerçekteşirilmiş ve deney verileri karşılaştırılmıştır.

Başaran (2007) ‘Computational Analysis Of Advanced Composite Armor Systems’ konulu tez projesinde Silikon Karbür zırh destekli Kevlar kompozit plakaya 7,62 zırh delici merminin 850 m/s hızla dik çarpmasını AUTODYN Hydrocode kullanarak, sayısal benzetimini yaparak incelemiştir. Sonuç olarak arka malzeme kalınlığı 4,6 ve 8 mm olduğu koşullarda zırh sistemi delinmemiştir. 2 mm kalınlık için mermi nüfuz edebilir ve zırh delinebilir. Bu sonuçlardan Silikon Karbür ve Kevlar tasarımı için optimum kalınlık oranının yaklaşık eşit olduğu çıkarılmıştır.

Candan (2007) ‘Hafif Silahlara Karşı Preslenerek ve Preslenmeden Üretilen Yüksek Yoğunluklu Polietilen (UHMWPE) Zırh Plakalarının Terminal Balistik Özelliklerinin İncelenmesi’ konulu makale çalışmasında aynı kat sayısında preslenen ve preslenmeden üretilen Yüksek Yoğunluklu Polietilen (UHMWPE) zırh plakalarının, hammadde aşamasından nihai mamul haline gelene kadar takip edilen genel üretim aşamalarını, dünya standartlarına uygun olarak zırhlara uygulanan test yöntem ve sonuçları ile hasar bölgesinin görüntülenmesinin terminal balistik açıdan değerlendirilmesini araştırmıştır. Sonuç olarak preslenerek üretilen zırh plakalarında elde edilen ortalama çöküntü değerinin, preslenmeden üretilen zırh plakalarında elde edilen ortalama çöküntü değerinden %65 daha küçük olduğu anlaşılmıştır.

Koçer (2007) ‘Balistik Uygulamalar İçin Lamine ve Hibrit Yumuşak Zırh Sistemleri’ konulu tez projesinde laminasyon ve hibrit olarak birleştirilmiş yumuşak zırh sistemlerindeki balistik etkiyi araştırmıştır. Araştırmada çekme, ağırlık düşürme ve gerçek balistik test kullanılmıştır. Bu araştırmadan türetilmiş en önemli sonuç; çok düşük reçine içeriğine sahip lamine sistemler, lamine edilmemiş çoklu sistemlere göre daha üstündür ve bu konu üzerine ilerleme gerçekleştirilebilir. Darbeli tarafta dokunmamış kumaş katmanları, katlar arasında nispeten daha sıkı dokuma kumaşları kullanan hibrit sistemler ile daha da geliştirilmiştir.

Chelluru (2007) ‘Finite Element Simulations Of Ballistic Impact On Metal And Composite Plates’ konulu tez çalışmasında LS-DYNA’da hazırlanan benzetim kullanılarak ince metal hedeflerde oluşan balistik tepki üzerine bir çalışma

gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada aynı mermi tipi fakat farklı çıkış hızları ve farklı kütleler ile hedef üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır.

Demir ve ark. (2008) 'Investigation On The Ballistic Performance Of Alumina / 4340 Steel Laminated Composite Armor Against 7,62 mm Armor Piercing Projectiles' konulu makale çalışmasında destek plakasının mekanik özelliklerinin etkisini ve lamine kompozitin balistik performansı üzerindeki alan yoğunluğunu araştırmışlardır. Alümina / 4340 çelik lamine kompozitlerin balistik performansı, kompozitin alan yoğunluğuna ve destek tabakasının sertliğine göre incelenmiştir. En iyi balistik performansın 40 HRC sertliğe sahip çelik ve seramik hibrit kompozit yapısında olduğu görülmüştür. Balistik koruma beklendiği gibi kompozitlerin artan alansal yoğunluğu ile artmıştır.

Demir (2008) 'Metal ve Katmanlı Zırh Malzemelerinin 7,62 mm'lik Zırh Delici Mermiler Karşısında Balistik Başarılarının İncelenmesi' konulu tez projesinde, mühendislik malzemelerinden bazı çelikleri (AISI 1050, AISI 4140, AISI 4340, 100Cr6,), alüminyum alaşımlarını (AA 5083 ve AA 7075) ve katmanlı kompozitleri 7,62mm'lik zırh delici mermiler karşısında balistik olarak incelemiştir. Sonuç olarak incelenen malzemeler içinde en iyi balistik başarıyı önde seramik katman kullanılan numuneler göstermiştir. Seramik ön katman kullanılan numunelerden arka destek katman kalınlığı 50 ve 60 HRC olanları, 55 kg/m² alan yoğunluğundaki numuneler tam balistik koruma sağlamıştır. Katmanlı olarak denenen numuneler haricinde bütüncül malzemelerden en iyi başarıyı ~53 HRC sertliğe sahip AISI 4340 numuneleri sergilemiştir. Yüksek sertlikli numuneler, düşük toklukları nedeniyle ani şekilde kırılmış ve balistik başarıları düşük çıkmıştır. Yüksek başarı sergilemesi beklenen ve mermi çekirdeği ile aynı malzeme olan 100Cr6 oldukça kötü başarı sergilemiştir. Seramik takviyeli numuneler, zırh çeliğine ve yüksek sertlikli zırh çeliğine oranla sırasıyla %56 ve %48 ağırlıktan kazanç sağlamıştır. AISI 4340 çeliği, ~53 HRC sertlikte zırh çeliğine ve yüksek sertlikli zırh çeliğine oranla sırasıyla %39 ve %29 ağırlıktan kazanç sağlamıştır. Alüminyum alaşımları içinde en iyi balistik başarıyı AA7075 T651 ısıl işlem koşulundaki numuneler sergilemiştir. Alüminyum alaşımları için sertlik arttıkça belirgin şekilde balistik başarı artmıştır. Diğer taraftan çelik numuneler için durum belirli bir sertlik değerine kadar aynı şekilde artarken, çok yüksek sertliklere ulaşıldığında başarı düşmektedir.

Demircioğlu ve ark. (2011) ‘Organik Matrisli Kompozit Malzeme Kullanılarak Oluşturulan Hibrit Zırh Plakasının Terminal Balistik Özelliklerinin İncelenmesi’ konulu makale çalışmasında, askeri araçların zırhlandırılmasına yönelik 9 mm’lik mermi tehdidine karşı, Para-Aramid (Kevlar) ve St37 sac malzeme kullanılarak elde edilen zırh malzemesine dünya standartlarına uygun balistik test yöntemi uygulamışlardır. Sonuç olarak zırhlı araç için en uygun konstrüksiyonun 11 kat Kevlar ve St37 sac’tan oluşan zırh malzemesi olduğu, 9 mm kurşun atıldığında oluşan arka yüzeydeki çöküntü miktarınının 17,40 mm ölçüldüğü ve bu miktarın sayısal analizde 16,98 mm bulunarak uyum içinde olduğu görülmüştür. Ayrıca deneyde deforme olmuş kurşunun çapı yaklaşık 15.65 mm iken analiz sonucu bu değer 15.60 mm olarak bulunmuştur.

Carrillo ve ark. (2012) ‘Ballistic Performance Of Thermoplastic Composite Laminates Made From Aramid Woven Fabric And Polypropylene Matrix’ konulu makalede çok tabakalı Kevlar Aramid kumaş / Polipropilen (PP) kompozitlerin balistik davranışı, Laminat (CL) ve düz katmanlı Aramid kumaş (AF) numuneler üzerindeki darbe etkisini araştırmıştır. Sonuç olarak bu çalışmada, aynı koruma seviyesinde daha az Aramid kumaş gereksinimi elde etmek için birleştirilmiş termoplastik PP matrisi kullanılarak ağırlık tasarrufu ve düşük maliyetlere neden olabileceği bulunmuştur.

Grujicic ve ark. (2012) ‘The Role Of Adhesive In The Ballistic/Structural Performance Of Ceramic/Polymer–Matrix Composite Hybrid Armor’ konulu makale çalışmasında geçici doğrusal olmayan dinamik hesaplamalı sonlu elemanlar analizi, seramik vuruş yüzü / kompozit arka yüz hibrit zırhında kullanılan yapıştırıcının rolünü araştırmak için kullanmışlardır. Yapışkanın iki farklı rolü araştırılmıştır. A) Zırh yapısı, üstüne gelen zırh delici mermi beraberinde yüksek darbe yükleme koşulları ve B) Düşük yükleme hızlarında yüklerin girişiyle ilgili koşullar, yol / lastik temas ara yüzeylerinde üretilmesi ve araç çerçevesi yoluyla zırh yapısına iletilmesi.

Akman (2012) ‘Eskitmeye Tabi Tutulan Kompozit Başlıkların Balistik Testlerinin Yapılması Ve Analizi’ konulu tez projesinde Para-Aramid malzeme kullanılarak üretilen balistik özellikli kompozit başlığın, hammadde aşamasından nihai mamul haline gelene kadar takip edilen genel üretim aşamalarını ve başlığın üzerinden kademeli olarak

kaldırılan talaşın terminal balistik performansta meydana getirdiği değişimin incelenmesini araştırmıştır.

Shanel ve Spaniel (2013) 'Ballistic Impact Experiments And Modelling Of Sandwich Armor For Numerical Simulations' konulu makale çalışmasında birleşik zırh sistemleri üzerine deneysel ve sayısal modelleme ile çalışmalar yapmıştır. Sonuç olarak, zırh plakalarına değişken hızlarda çeşitli atış testleriyle beraber simülasyonlar yapılmıştır. Modelin hasar parametreleri bulunduktan sonra simülasyon sonuçları deney verileriyle eşleşmiştir. Bu model, araç balistik korumalarına uygun olarak geliştirilmeye hazırdır.

CEĞLA ve ark. (2014) 'Development of Lightweight Bulletproof Vest Inserts with Increased Protection Capability' konulu makale çalışmasında yumuşak zırh ve sert zırh malzemelerinden hazırlanan balistik plakalar üzerine 5,7x28mm ve 4,6x30mm standart dışı özel fişekler ile atışlar yapmışlardır. Sonuç olarak her iki karbür seramiklerde sert ön katmanlar etkilidir, balistik zırh plakaları alümina ile karşılaştırıldığında ağırlık azaltma sağlanmıştır.

O'Masta (2014) 'Mechanisms of Dynamic Deformation And Failure In Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Fiber-Polymer Matrix Composites' konulu tez çalışmasında UHMWPE takviyeli [0/ 90] polimer matris kompozitlerin balistik etki sırasında yapısını, mekanik özelliklerini, dinamik deformasyonunu ve arıza mekanizmalarını araştırmıştır. Analiz sonucunda ortaya çıkan birincil mekanizmalar şöyledir: UHMWPE üzerindeki penetrasyon, mermi altındaki lif katlarının aşamalı kırılması ile oluşur. Çatlamış kat sayısı, darbe hızı ile artmıştır. Merminin araya giren bir alüminyum plaka tarafından bölünmesi ve eşzamanlı uzamsal ve zamansal dağılımı mermi ve lamine malzeme arasındaki ara yüzey kuvvetlerini daha geniş bir alana dağıtır ve böylece temas basıncını düşürerek lamine malzemenin balistik limitini artırır.

Yumak ve ark. (2014) 'Zırh Tasarımında Kullanılan Kompozit Malzemelerin Deformasyon Karakteristiğinin Araştırılması' konulu makale çalışmasında kompozit zırhların darbe dayanımlarını belirleyen unsurların literatürde kullanılan malzeme cinsi,

kumaş yapısı, mermi hızı ve geometrisi, sürtünme ve sınır koşulları olduğunu deneysel olarak incelemişlerdir.

Yang ve Chen (2014) ‘Energy Absorption Among Layers In The Multiply System Under Ballistic Impact’ konulu makale çalışmasında zırh panel mühendisliği için balistik darbeye etki eden her tabakanın enerji emilimini deneysel ve sayısal olarak araştırmıştır. Sonuç olarak balistik testlerde çarpma sisteminin enerji absorbe etme kapasitesi, artan katman sayısı ile azalmıştır.

Yanen ve Solmaz (2015) ‘Tabakalı Hibrit Kompozitlerin Bireysel Zırh Malzemesi Olarak Üretimi Ve Balistik Performanslarının İncelenmesi’ konulu makale çalışmasında tabakalı hibrit kompozitlerin bireysel zırh malzemesi olarak kullanılabilirliğini deneysel olarak araştırmıştır. Çalışma kapsamında farklı fiber takviye açılarına, farklı tabaka sayılarına ve farklı kalınlıklara sahip cam fiber, aramid fiber ve karbon fiber tabakalı kompozit plakaların balistik deneyleri yapılmış ve sonuçları incelenmiştir. Bu amaçla 200x200mm boyutlarındaki 30 tabakalı farklı kalınlıkta 4 adet plaka, elle yatırma yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Farklı fiber takviye açılarının balistik performansının incelenebilmesi için 0°, 45°, plain ve twill kumaşlar kullanılmıştır. Sonuç olarak balistik testlerde en başarılı olan numunenin, en ağır ve en kalın numune olan B1 adlı $[45^G]_{10}$, $[0^{AR}/90^{AR}]_{10}$, $[45^C]_{10}$ dizilimine sahip numunesinin değil, $[0^G/90^G]_{10}$, $[0^{AR}/90^{AR}]_{10}$, $[0^C/90^C]_{10}$ dizilimli olan B4 adlı numunesi olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar neticesinde twill dokuma yapısına sahip kumaşların balistik dayanımının daha iyi olduğu ortaya çıkmıştır.

Nguyen (2015) ‘The Ballistic Performance of Thick Ultra High Molecular Weight Polyethylene Composite’ konulu tez çalışmasında kalın UHMWPE kompozit malzemenin balistik performansını incelemiştir. Sonuç olarak anahtar penetrasyon ve kırılma mekanizmaları sergilenmiştir. Darbe etkisinde kalan malzemenin analizinde kalın hedeflerin penetrasyonunun iki aşamada gerçekleştiği görülmüştür. İlk kesme kuvvetinin olduğu aşamadan sonra arka kısımda hedefin ayrıldığı yerde büyük küresel deformasyon oluşmuştur. İnce hedeflerde sadece şişme aşaması tespit edilmiştir. Bu çalışmada yapılan kapsamlı deneyler ile hedefteki kayma ve şişmede izin verilen oranlar

balistik sınıra yakın değerlerde ilk kez karakterize edilmiştir. Hedef kalınlığı ve darbe hızı ile kesme kuvvetini durdurma etkisinin arttığı gözlemlenmiştir.

Eken (2016) ‘Hava Araç Zırhlarının Balistik Performans Karakteristiğinin Sayısal İncelenmesi’ konulu makale çalışmasında hava araç zırhların balistik çarpması nı sayısal benzetim yoluyla gerçekleştirerek performans tayinlerini yapmıştır. Sayısal hesaplamalar; ileri sonlu farklar yöntemi kullanılarak yapılmış olup kumaş yapısını oluşturulan iplikler kütleyay-sönümleyici elemanlar yardımıyla modellenmiştir. Büküm faktörünün balistik performans üzerinde önemli bir etkisi olduğu gözlenmiştir. Bükümlü ipliklerden dokunmuş kumaşın, bükümsüz ipliklerden dokunmuş kumaşa göre daha düşük birim uzamalar verdiği görülmüştür. Bu etkinin kumaşın balistik performansına katkı sağladığı söylenebilir.

Fejdyş ve ark. (2016) ‘The Effect Of Processing Conditions On The Performance Of UHMWPE-Fibre Reinforced Polymer Matrix Composites’ konulu makale çalışmasında presle balistik kompozit malzeme imalatında, ana pres parametresi olan sıcaklığı değiştirmek sureti ile UHMWPE HB26 balistik kompozit malzeme üzerinde performans analizi yapmışlardır. Sonuç olarak bu çalışma balistik ve kişisel koruyucu uygulamalarda en uygun presleme koşullarının bulunmasına imkan vermiştir. Optimum sıcaklık HB 26 için $T_{press} = 130 \text{ }^\circ\text{C}$ and $T_{packet} = 115 \text{ }^\circ\text{C}$ bulunmuştur. Sıcaklık $130 \text{ }^\circ\text{C}$ ’yi aştığı zaman malzemenin özellikleri olumsuz etkilenmiştir.

Ćwik ve ark. (2016) ‘Design And Ballistic Performance Of Hybrid Composite Laminates’ konulu makale çalışmasında pahalı balistik kompozitler yerine maliyeti en uygun hibrit kompozit malzemeyi bulmaya çalışmışlardır. Çalışmanın ilk evresinde % 100 UHMWPE kompozit malzeme referans alınarak, 20 farklı hibrit kompozit malzeme üzerine 20 milimetrelilik, 1 km/s hızında mermi gönderilmiştir. En iyi performanslı hibrit kompozit malzemeler çalışmanın ikinci evresine taşınmış, STF içeren diğer hibrit kompozit malzemeler ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak pahalı olan yüksek performanslı kompozitlerin yerine daha düşük maliyetli geliştirilmiş hibrit kompozit malzemelerin kullanılabil-dięi görülmüştür. Yapılan örneklerden en iyi hibrit konsept olarak, fiber takviyeli Polipropilen önde ve UHMWPE’nin arkada olduğu dizilim seçilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Katmanlı Kompozitler

Katmanlı kompozitlerle ilgili yapılan çalışmada, zırhlı araçlardaki kompozit zırh malzemelerinde takviye malzemesi olarak kullanılan; UHMWPE, Aramid, Karbon, Karbomid ve Cam elyafı türleri ile matris malzemesi olarak kullanılan PE film tabakaları laminasyon yapıldıktan sonra pres ile sıcaklık ve basıncın etkisiyle birleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan elyaflar ve teknik özellikleri Çizelge 3.1 de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan elyaflar ve teknik özellikleri

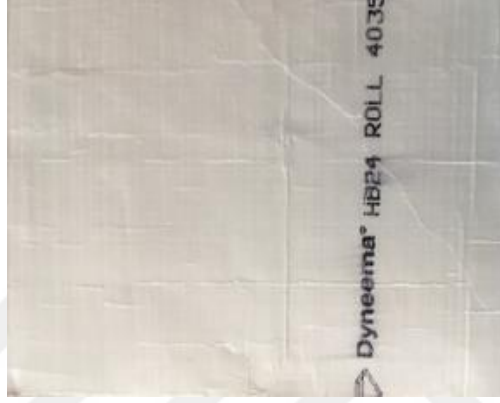
	UHMWPE ¹	ARAMİD ²	KARBON ²	KARBOMİD ²	CAM ³
Kod Numarası	HB24 / SK78	AX 340 (UD)	CW 600B	CAW 170A	HPT 1230 (3D)
Yoğunluk (g/cm ³)	0,97	1,44	1,8	2,14	2,55
Çekme Modülü (Gpa)	109-132	58	220-240	150	73
Çekme Dayanımı (Mpa)	3300-3900	2700	3450-4850	–	2000
Elastisite Modülü (Mpa)	116000	70500	300000	–	40000
Kopma Uzaması	% 3-4	% 3,7	% 1,6-2,2	% 2,3	% 2,0
Alansal Yoğunluk (g/m ²)	260	340	600	170	1226

¹ DSM firmasından alınmıştır.

² Telateks – Metyx firmasından alınmıştır.

³ PD Interglas Technologies firmasından alınmıştır.

Şekil 3.1, Şekil 3.2, Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de proses öncesi elyaflar görülmektedir. Şekil 3.6’da ise kullanılan fişek ölçüleri verilmiştir.



Şekil 3.1. UHMWPE elyafi



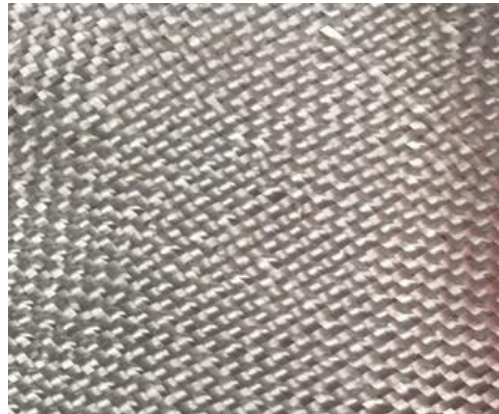
Şekil 3.2. Aramid elyafi



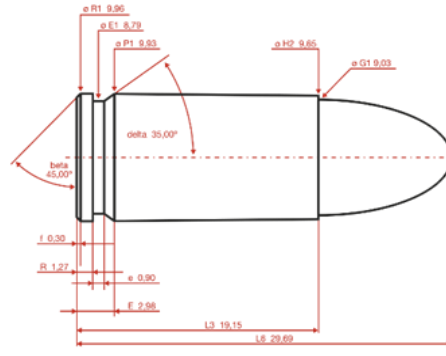
Şekil 3.3. Karbon elyafı



Şekil 3.4. Karbomid elyafı



Şekil 3.5. Cam elyafı



Şekil 3.6. 9x19 Parabellum fişek ölçüleri*

*https://en.wikipedia.org/wiki/9×19mm_Parabellum adresinden alınmıştır.

Matris malzemesi için kullanılan polietilen, laminasyon polietileni olarak geçmekte olup ergime sıcaklığı $130\text{ }^\circ\text{C}$, kalınlığı $60\text{ }\mu\text{m}$ 'dir.



Şekil 3.7. İmalatta kullanılan pres



Şekil 3.8. Presin basınç göstergesi



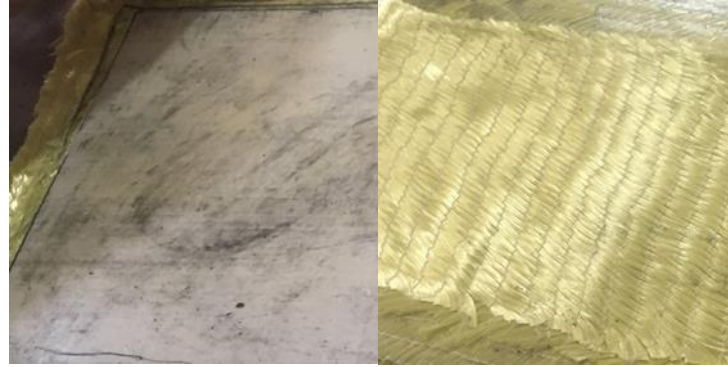
Şekil 3.9. Presin sıcaklık göstergesi

İmalatta kullanılan pres ve göstergeleri Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da görülmektedir. Üretimi yapılan kompozit plakaların proses özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. Cam elyafı için herhangi bir proses ile birleştirme uygulanmamış, sadece üst üste koyulup kalıplanmıştır ve kenarlarından bant ile tutturulmuştur. Karbon elyafı dışında toplam ağırlık birbirine yakın alınmış, karbon elyafında ise belirli bir kat sayısından gidilmiştir.

Bu katsayıda özkütlesi en düşük olan UHMWPE malzemeye uygun olarak 24 kat seçilmiştir. Şekil 3.10, 3.11 ve 3.12’de preslenmiş plakalar görülmektedir.

Çizelge 3.2. Üretimi yapılan kompozit plakaların proses özellikleri

	UHMWPE	ARAMİD+ UHMWPE	KARBON	KARBOMİD	CAM
Basınç (Bar)	80	100	185	185	–
Sıcaklık (°C)	110	120	130	130	–
Süre (Dakika)	5	20	30	30	–
Boyut (mm)	200x200	200x200	200x200	200x200	200x200



Şekil 3.10. Aramid+UHMWPE plaka



Şekil 3.11. Karbon plaka



Şekil 3.12. Karbomid plaka

Şekil 3.13 ve Şekil 3.14’de kullanılan fişekler ve poligon görülmektedir. Test atışları uzman kişiler tarafından yapılmıştır.



Şekil 3.13. Kullanılan fişekler



Şekil 3.14. Atış yapılan poligon

NIJ Standartlarına göre kısa namlulu silahlar için atış testi mesafesi 5 metredir. Şekil 3.15’de görüldüğü gibi atış mesafesinin ayarlanması için lazer metre kullanılmıştır.

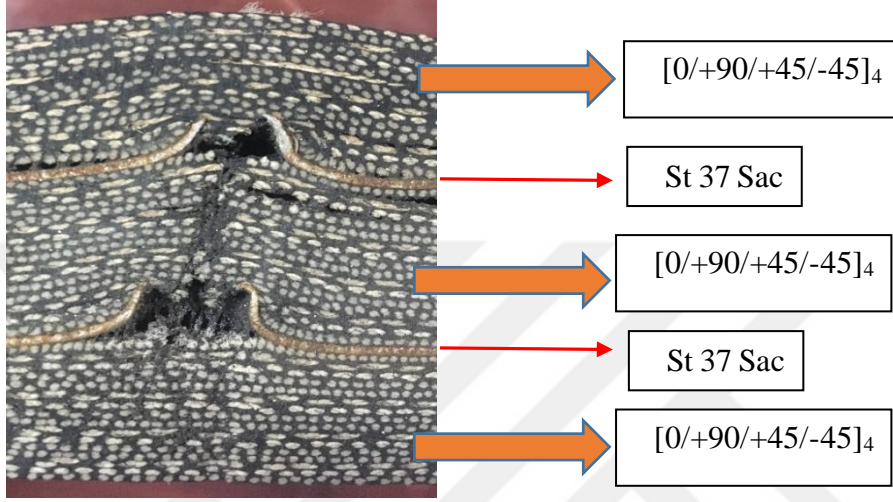


Şekil 3.15. Lazer metre ile atış mesafesinin ayarlanması

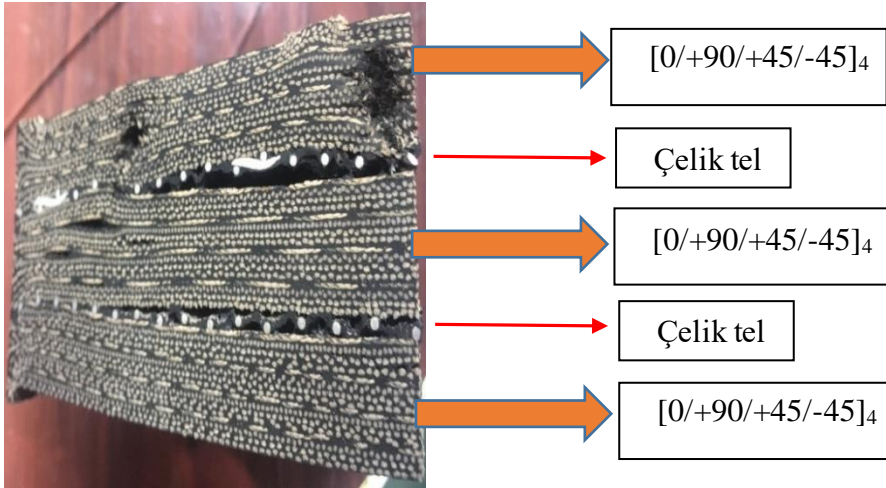
Sapma % 1’in altında olduğu için uygun mesafe olarak 5,038 m. kabul edilmiştir. Ortalama atış hızı 363 m/s dir.

3.2. Hibrit Kompozitler

Hibrit kompozitlerle ilgili yapılan çalışmada önceden kauçuk içine gömülmüş Nylon 6.6 iplikler ve çelik tel veya sac ile oluşturulan kompozit yapılar kullanılmıştır (Şekil 3.16 ve Şekil 3.17).



Şekil 3.16. İçinde St 37 sac olan kompozit tasarımı



Şekil 3.17. İçinde çelik tel olan kompozit tasarımı

Kullanılan 1400x2–120dtex Kord ipi (Nylon 6.6) özellikleri, Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. 1400x2–120dtex Kord ipi (Nylon 6.6) özellikleri (Kapucu 2017’den değiştirilerek alınmıştır)

Özellikler	En Az	Hedef Değer	En Çok
Büküm sayısı(t.p.m.)	280,0	300,0	320,0
Büküm sayısı(t.p.m.)	280,0	300,0	320,0
dm’deki çözgü sayısı(End/1dm)	–	120,0	–
dm’deki atkı sayısı(End/1dm)	5,0	6,0	7,0
Kopma kuvveti(kgf)	22,0	–	–
Kopma uzaması(%)	21,5	24,5	32,0
4,5 kg’da uzama yüzdesi(%)	6	7,5	9
8,0 kg’da uzama yüzdesi(%)	10	11,5	13
Metrekare ağırlığı(g/m ²)	325	400	475
Kısalma yüzdesi(%)	2,8	3,5	4,2
Kord kalınlığı(mm)	0,63	0,68	0,73
Bez uzunluğu(m)	1344,0	1400,0	1456,0
Bez genişliği(mm)	1360	1400	1440

Kullanılan kauçuk özellikleri (Kasım ve Yazıcı 2017),

Matris malzemesi aşağıdaki malzemelerin bir karışımından oluşan elastomerik bir kompozit malzemedir:

SVR 10	: 37.3	phr
SBR 1502	: 28.8	phr
CBR 1203	: 33.9	phr
FEF N.550	: 59.8	phr
ZNO	: 2.2	phr
Stearik asit	: 2	phr
IPP D	: 1	phr
Ozon koruyucu:	1	phr

TMQ : 1 phr

Parafinik yağ : 20.3 phr

S80 : 2.03 phr

CBS : 1.19 phr

Kauçuk Kaplı Nylon 6.6 iplikler, Şekil 3.18 ve Şekil 3.19 da görüldüğü gibi 150x150mm kare şeklinde kesilmiştir.



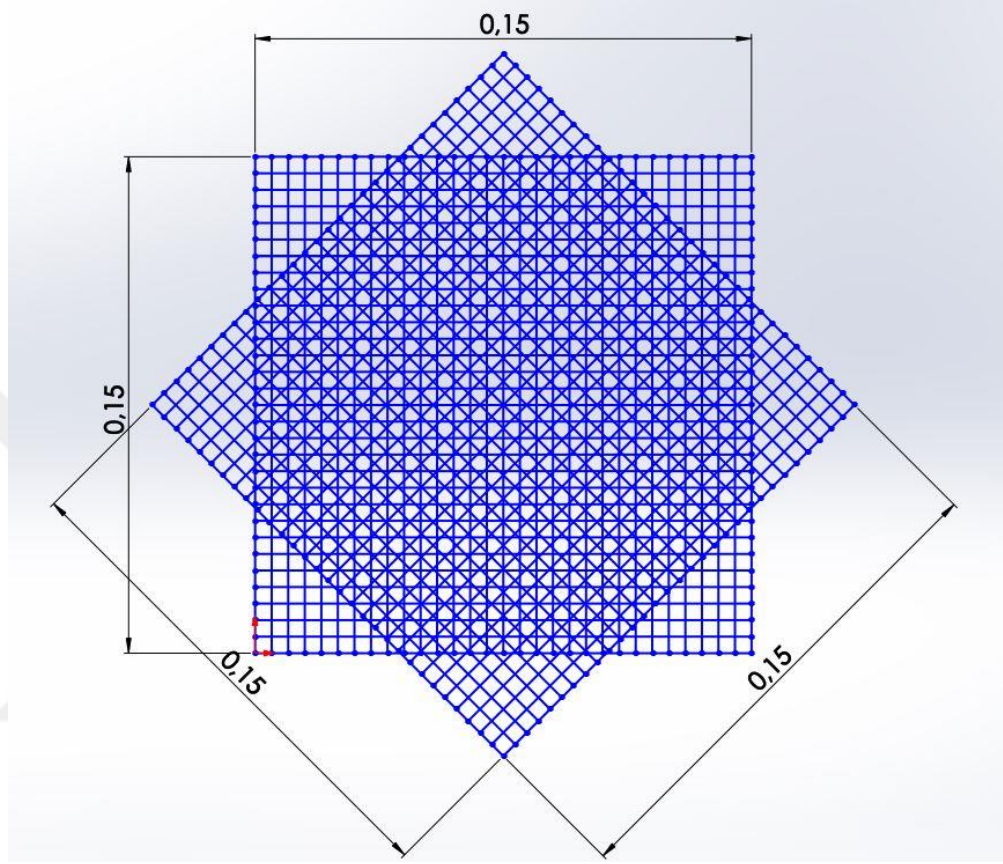
Şekil 3.18. Kord iplerinin istenen ölçüde hazırlanması



Şekil 3.19. Kord iplerinin istenen ölçüde hazırlanması

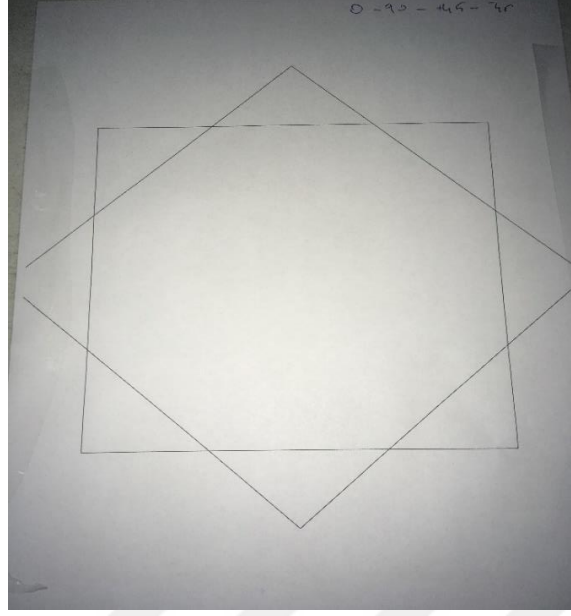
Kauçuk üzerindeki beyaz çizgiler, malzeme şablon üzerine koyulduğu zaman eksenlerin karışmaması amacıyla iplik yönünü belirtmek için kalem ile çizilmiştir. Malzemenin

içinde iplik diziliminin nasıl görüneceğine dair fikir elde edebilmek için Solidworks programında çizimi yapılmıştır. Şekil 3.20’de $[0/+90/+45/-45]$ iplik dizilimi görülmektedir.

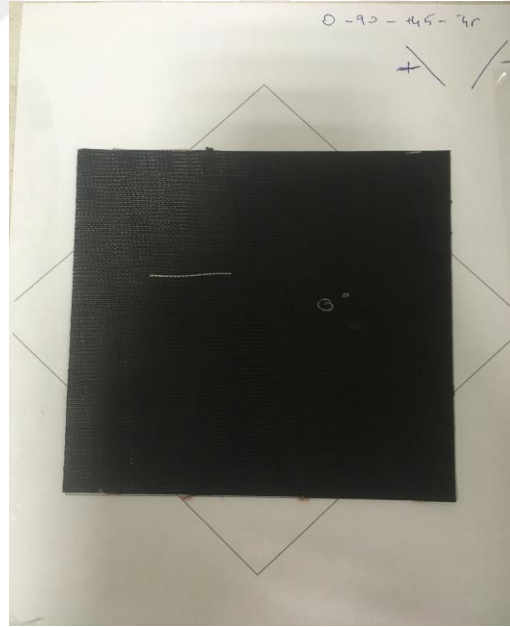


Şekil 3.20. $[0/+90/+45/-45]$ iplik dizilimi

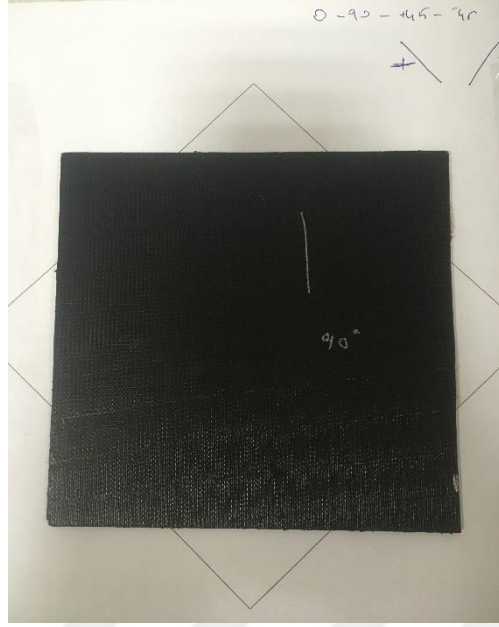
Şekil 3.21’de hazırlanan şablon, Şekil 3.22, 3.23, 3.24 ve 3.25’de ise kord iplerinin dizilimi görülmektedir.



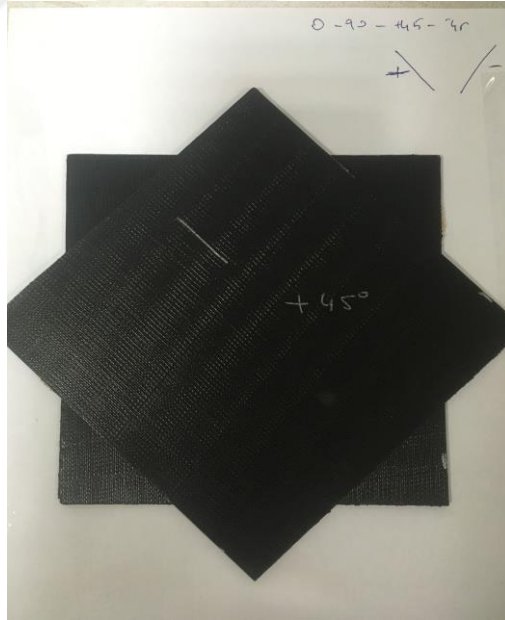
Şekil 3.21. Şablon



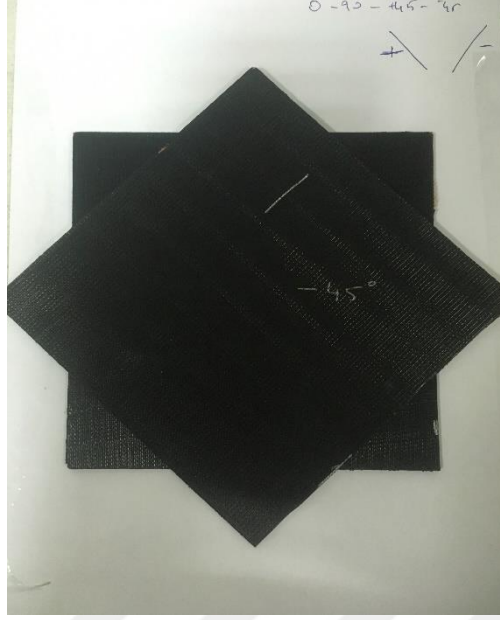
Şekil 3.22. Kord iplerinin dizilimi



Şekil 3.23. Kord iplerinin dizilimi



Şekil 3.24. Kord iplerinin dizilimi



Şekil 3.25. Kord iplerinin dizilimi

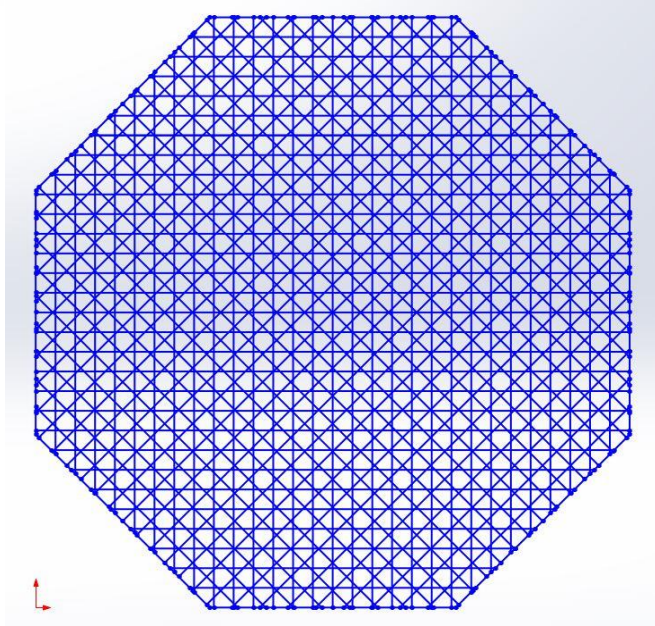


Şekil 3.26. Köşelerin kesimi



Şekil 3.27. Köşelerin kesimi

Şekil 3.26 ve Şekil 3.27’de malzemenin kalıp içerisine rahatça girebilmesi için fazla olan köşelerinin kesilmesi görülmektedir.



Şekil 3.28. İplik diziliminde köşelerin kesilmiş hali

Şekil 3.28’de ise iplik diziliminde köşelerin kesilmiş hali sonucu oluşan içyapı görülmektedir.

Metal malzemelerin kauçuk ile tam yapışmasının sağlanabilmesi için kemosil(chemosil) adlı yapıştırıcı malzeme kullanılmıştır. Kullanılan St37 sacın kalınlığı 3 mm’dir.



Şekil 3.29. Kemosil ile kaplama



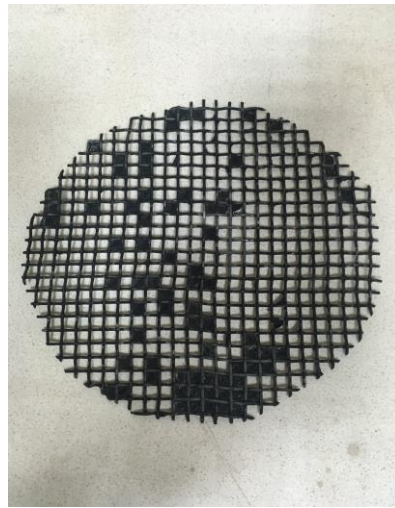
Şekil 3.30. Kemosil kaplama sonrası

Şekil 3.29’da ince telin kemosil ile kaplanması, Şekil 3.30’da ise kaplama sonrası hali görülmektedir. Preslenmeden önce ince telli kompozit malzemenin ağırlığı 1046 g olarak Şekil 3.31’de görülmektedir.



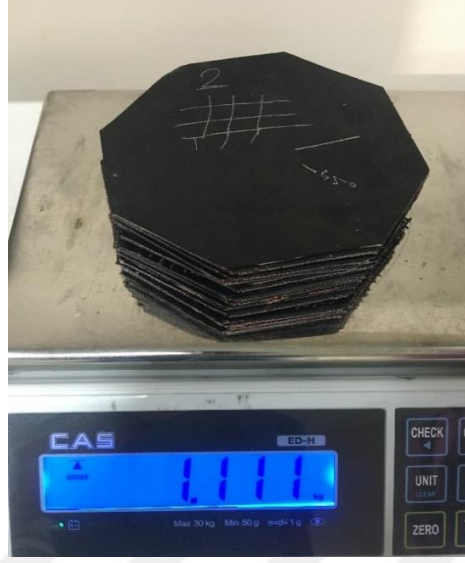
Şekil 3.31. Preslenmeden önceki ağırlık

İmalatta kullanılan kalın tel 4x100 örgü, ince tel ise 14x100 örgü (sineklik) telidir. Şekil 3.32’de kalın telin kaplama sonrası hali görülmektedir.



Şekil 3.32. Kemosil kaplama sonrası

Preslenmeden önce kalın telli kompozit malzemenin ağırlığı 1111 g olarak Şekil 3.33’de görülmektedir.



Şekil 3.33. Preslenmeden önceki ağırlık

Şekil 3.34’de St 37 sac parçanın kaplama sonrası hali görülmektedir.



Şekil 3.34. Kemosil kaplama sonrası

Preslenmeden önce St37 sac bulunan malzemenin ağırlığı 1189 g olarak Şekil 3.35’de görülmektedir. Kalıp içine yerleştirme Şekil 3.36’da görülmektedir.



Şekil 3.35. Preslenmeden önceki ağırlık

Uygulanan proses 160 °C, 150 Bar ve 10 dk’dır. Bütün numuneler aynı şekilde üretilmiştir.



Şekil 3.36. Kalıp içine yerleştirme

Kullanılan piston çapının buyk olmasından dolayı Şekil 3.37’de görülen kalıp aparatı kullanılmıştır.



Şekil 3.37. Kalıp aparatı koyulması



Şekil 3.38. Kalıptan çıkan numune

Uygulanan proses sonrası Şekil 3.38’de görülen malzeme oluşmuştur.

Proses sonrası ince telli numunenin ağırlığı Şekil 3.39’da görüldüğü gibi 904 g olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.39. Preslendikten sonraki ağırlık

Proses sonrası kalın telli numunenin ağırlığı Şekil 3.40’da görüldüğü gibi 1045 g olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.40. Preslendikten sonraki ağırlık

Proses sonrası St37 saclı numunenin ağırlığı ise Şekil 3.41’de görüldüğü gibi 1102 g olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.41. Preslendikten sonraki ağırlık



Şekil 3.42. Atışa hazırlık



Şekil 3.43. Atış anı

Şekil 3.42 ve Şekil 3.43’de atış poligonunun hazırlanması ve atış anı görülmektedir. İnce telli, kalın telli ve içinde sac olan numuneler presle sıkıştırma prosesinden önce ve sonra tartılmış, preslenme sonrasında ağırlıklarında azalma olduğu görülmüştür.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

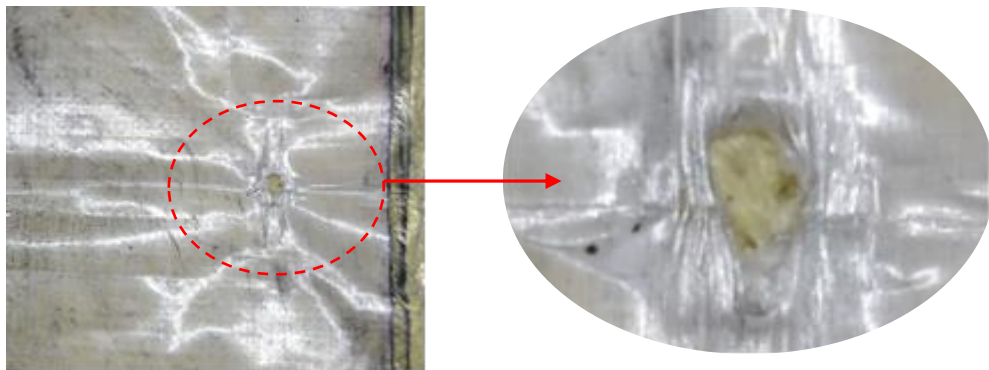
4.1 Katmanlı Kompozitler

UHMWPE, Aramid+UHMWPE, Karbon, Karbomid ve Cam elyafi numuneler üzerinde gerçekleştirilen balistik testler neticesinde, UHMWPE ve Karbon elyafi numunelerin kurşun çekirdeğini durdurduğu, Aramid+UHMWPE ve Cam elyafi numunelerde kurşun çekirdeğinin geçtiği, son olarak Karbomid elyaf numunede ise kurşun çekirdeğinin numunenin tam arka yüzeyinden çıkıp orada kaldığı görülmüştür.

Atış sonrası UHMWPE’de delinme olmamıştır. UHMWPE’de oluşan yüksek deformasyon değeri üretim sırasındaki basınç değerinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 4.1’de UHMWPE numune ve giriş deliği görülmektedir.

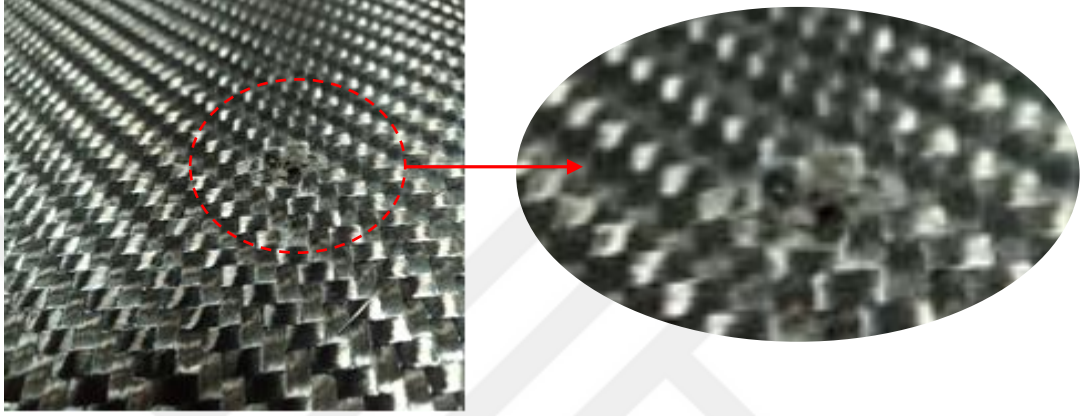


Şekil 4.1. Atış sonrası UHMWPE numune ve giriş deliği

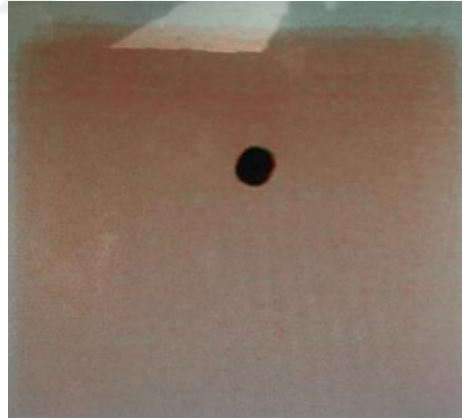


Şekil 4.2. Atış sonrası Aramid+UHMWPE numune ve giriş deliği

Aramid+UHMWPE plakada alansal yoğunluk aynı seviyelerde olmasına rağmen kat sayısı düşük olduğu için kurşun delmiştir. Şekil 4.2’de Aramid+UHMWPE numunenin giriş deliği net gözükmele beraber Aramid elyafının [+45/-45] Biaxial olmasından dolayı çıkış deliği görülememektedir. İmalatta uygulanmış olan basınç ile elyafın sertliğinin artması ve dolayısıyla mermi giriş deliği çapının küçük olması sonucuna ulaşılmıştır.



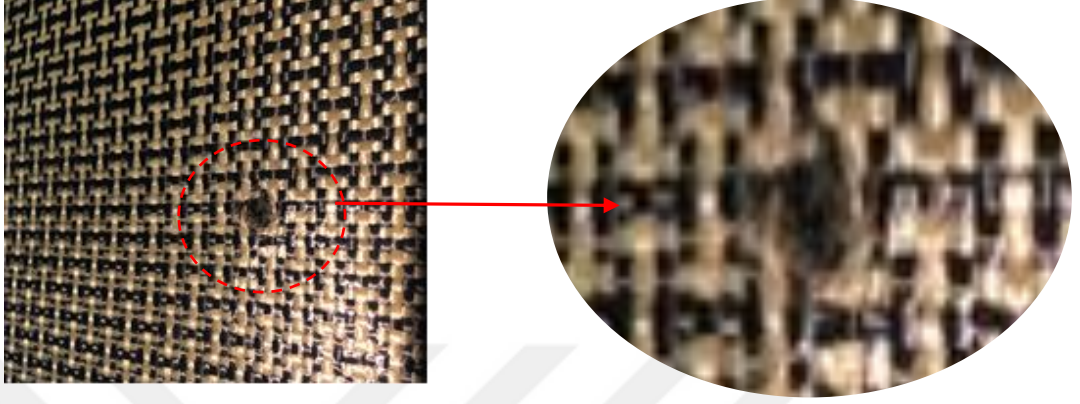
Şekil 4.3.Karbon giriş deliği



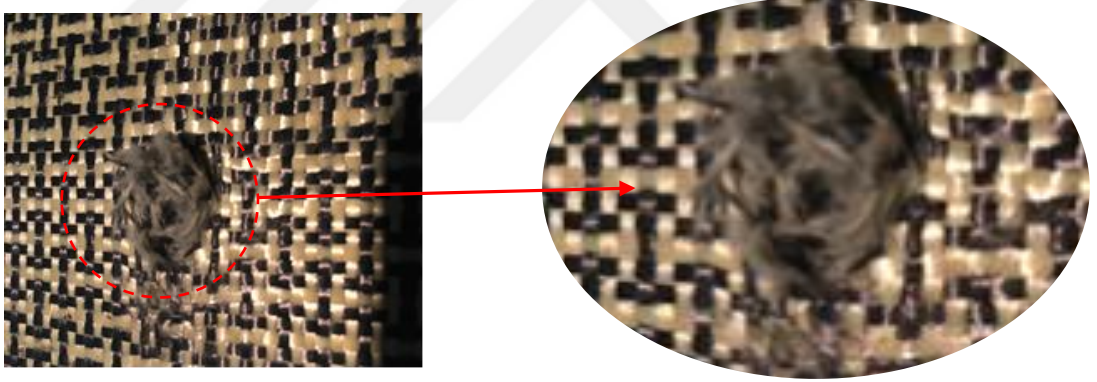
Şekil 4.4.Karbon plaka içinde kurşun

Karbon elyafında kat sayısı UHMWPE ile aynı seviyede tutulmuş, bu seferde ağırlık artmıştır. Delinme olmamış, deformasyon düşük gerçekleşmiş ve kurşun plakanın içinde kalmıştır. Röntgen filmi Şekil 4.4’de görülmektedir.

Karbon ve Karbomid plakalar, uygulanan proses sonrası önyüklemeye oluşturulup sertleştiği için kurşun çekirdeği giriş delikleri Şekil 4.3 ve Şekil 4.5’de görüldüğü gibi küçük olmuştur.



Şekil 4.5.Karbomid giriş deliği

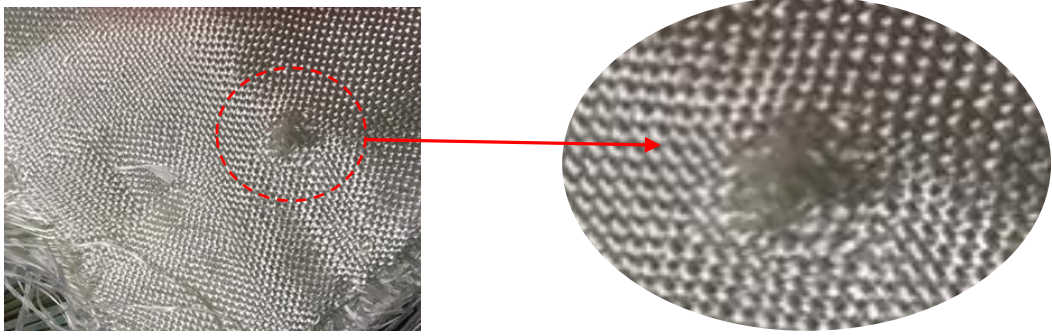


Şekil 4.6. Karbomid çıkış deliği

Karbomid yani hibrit elyafta da kat sayısı UHMWPE ile aynı seviyede tutulmuş fakat alansal yoğunluk az geldiği için kurşun delmiştir. Çekirdek, Şekil 4.6’da çıkış deliğinin ucunda ezilmiş şekilde bulunmuştur.

Çıkış deliğinin giriş deliği gibi küçük ve net olmamasının sebebi, kompozit malzemeyi oluşturan liflerin ani darbe sonucunda tepki olarak oluşturduğu kopma mukavemeti neticesinde kurşun çekirdeğinin temas alanının enerjinin emilimi sırasında genişleyerek

artmasının sonucudur. Temas alanı arttıkça kompozit malzemenin delinmeye karşı direnci de artmaktadır. Bu nedenle çıkış deliği daha geniş ve yüksek hasarlı olmuştur.

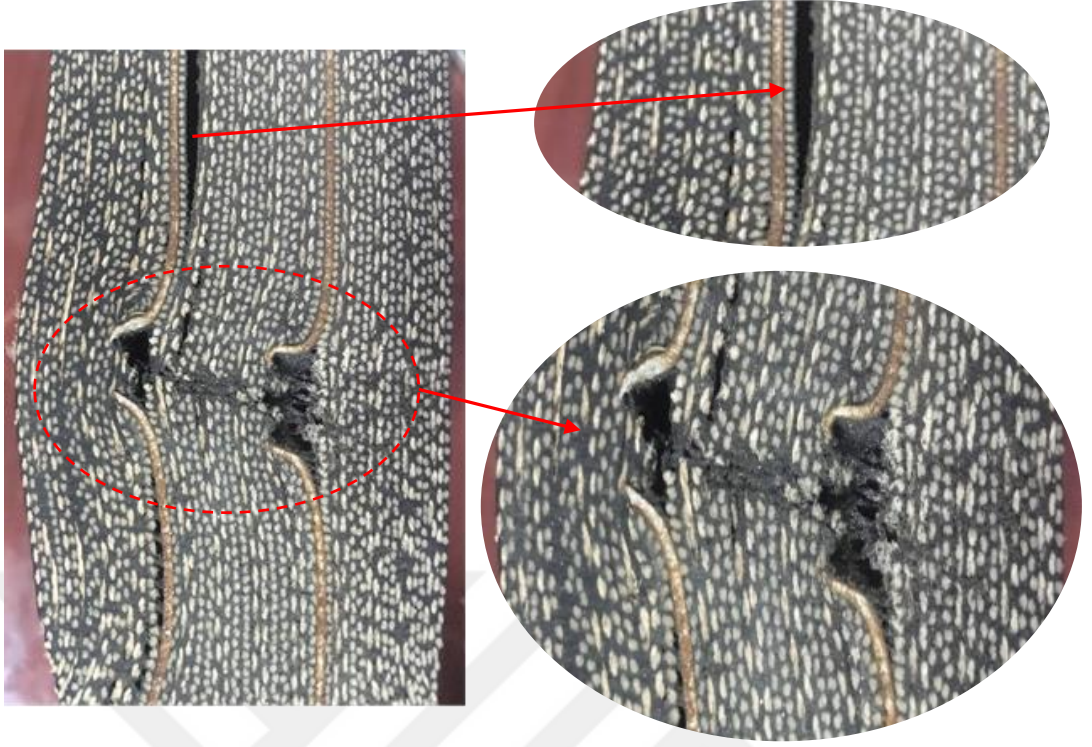


Şekil 4.7. Cam elyafı numune

Şekil 4.7’deki cam elyafı ile hazırlanan plakada da ağırlık diğer elyaflara yakın alınmış fakat elyafın alansal yoğunluğu yüksek olduğu için kat sayısı az olmuştur. Mermi çekirdeği giriş ve çıkış deliklerinin net olmamasının nedeni, elyafların herhangi bir işleme tabi tutulmayıp malzemenin yapısal bütünlüğünün oluşmamasından ve sert olmadığından kaynaklanmaktadır. 3 boyutlu dokuma özelliği elyafa oldukça esneklik sağlamıştır. Ölçülen giriş delik çapının daha büyük olması bu esneklikten kaynaklanmaktadır.

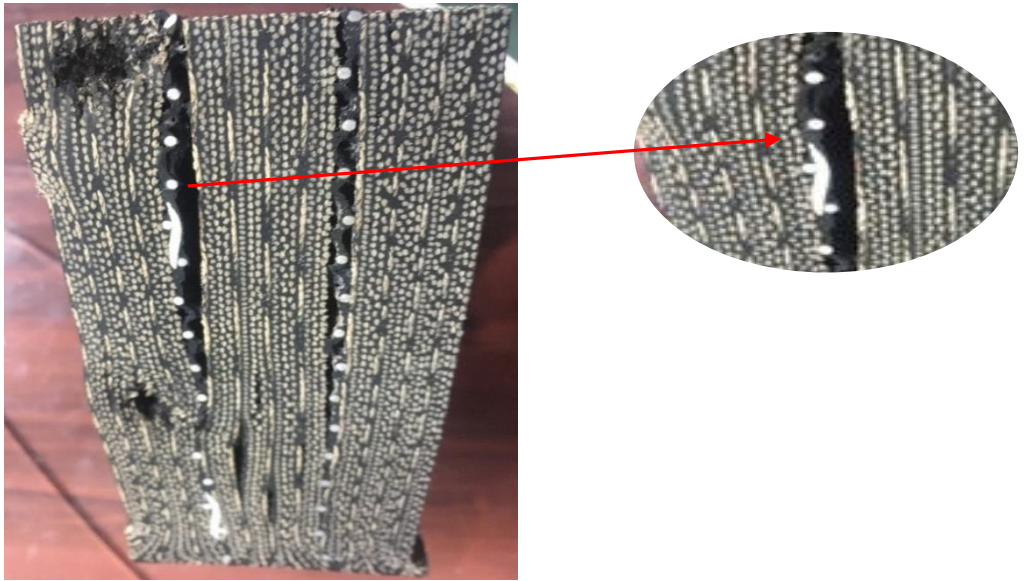
4.2 Hibrit Kompozitler

İnce çelik telli, kalın çelik telli ve St37 sac bulunan numuneler üzerinde gerçekleştirilen balistik testler neticesinde içinde ince çelik tel bulunan numuneden kurşunun geçtiği, içinde kalın çelik tel ve St37 sac bulunan numunelerin ise kurşunu durdurduğu görülmüştür. Kurşunu durduran numuneler su jeti ile belirli yerlerden kesilmiş ve hasar analizi içyapıya bakılarak yapılmıştır.



Şekil 4.8. St 37 sac içeren numunenin kesiti

Şekil 4.8’de St 37 sac bulunan numunede hasar mekanizmalarından delaminasyon ve taçlanma çok net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.9. Kalın çelik telli numune kesit

Şekil 4.9’da ise kalın çelik telli numunede oluşan delaminasyon çok net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.10. St 37 saclı numunenin çekirdeği



Şekil 4.11. St 37 saclı numunenin çekirdeği



Şekil 4.12. Kalın telli numunenin çekirdeği



Şekil 4.13. Kalın telli numunenin çekirdeği

Yukarıdaki şekillerde Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 St 37 sac bulunan numuneden çıkmış olan kurşunu, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 ise kalın çelik tel bulunan numuneden çıkmış olan kurşunu göstermektedir. Numune su jeti ile kesilirken kalın çelik tel bulunan numuneden çıkan kurşun da kesildiği için ucundaki deformasyonun daha iyi görülebilmesi nedeniyle kurşun, cam macununa batırılmıştır. Kesilme sonucunda çekirdek boyunu etkileyen herhangi bir durum olmadığı için sonuçlar kısmındaki çekirdek boyunun ölçümü rahatlıkla alınmıştır.

5. SONUÇ

5.1 Katmanlı Kompozitler İçin Sonuç

UHMWPE, Aramid+UHMWPE, Karbon, Hibrit ve Cam elyafi numuneler üzerinde gerçekleştirilen balistik testler neticesinde UHMWPE ve Karbon elyafi numunelerin kurşun çekirdeğini durdurduğu, Aramid+UHMWPE ve Cam elyafi numunelerde kurşun çekirdeğinin geçtiği, son olarak Karbomid elyaf numunede ise kurşun çekirdeğinin numunenin tam arka yüzeyinden çıkıp orada kaldığı görülmüştür. Katmanlı kompozitler için sonuç bilgisi Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Katmanlı kompozit plakaların atış sonrası deformasyon özellikleri

	UHMWPE	ARAMİD+ UHMWPE	KARBON	KARBOMİD	CAM
Kalinlik (mm)	3,96	4,08	14,24	5,25	23,29
Ağırlık(g)	312,3	286,9	1274	449,6	547,3
Kat Sayisi	24	8+1	24	24	4
Dokuma Tipi	unidirectional	multiaxial / unidi.	twill	plain	3d
Mermi Giriş Delik Çapı(mm)	7,18	6,84	6,20	6,10	16,56
Mermi Çıkış Delik Çapı(mm)	Delinmedi	9,28	_Delinmedi	6,41	13,58
Deformasyon(mm)	33,47	21,14	9,2	6,27	---

Çizelge 5.1’den görüldüğü üzere bir kompozit malzemenin balistik özelliğini, malzemenin alansal yoğunluğu ve laminasyon sayısı önemli ölçüde etkilemektedir. Optimizasyon için belirli bir fişek türü ve hız değerini, istenilen deformasyon değeri için

durdurabilen minimum kat sayısı ve minimum alansal yoğunluk değeri seçilmelidir. Prosesde kullanılan basınç değerlerinin artması ile malzemenin sertliği de artmakta ve oluşan deformasyon azalmaktadır. Mermi giriş deliğinin UHMWPE’de büyük olması, ilk katta merminin önemli ölçüde deformasyona uğradığını göstermektedir. Aramid+UHMWPE diziliminde de aynı durumu gözlemleyebiliriz. İlk katın UHMWPE olması, uç geometrisini önemli ölçüde bozmuş ve çıkış delik çapı yüksek çıkmıştır.

5.2 Hibrit Kompozitler İçin Sonuç

İnce çelik telli, kalın çelik telli ve St37 Sac’lı numuneler üzerinde gerçekleştirilen balistik testler neticesinde içinde ince çelik tel bulunan numuneden kurşunun geçtiği, içinde kalın çelik tel ve St37 sac bulunan numunelerin ise kurşunu durdurduğu görülmüştür. Kurşunu durduran numuneler su jeti ile belirli yerlerden kesilmiş ve hasar analizi içyapıya bakılarak yapılmıştır. Hibrit kompozitler için sonuç bilgisi Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Hibrit kompozit plakaların atış sonrası deformasyon özellikleri

	İnce Çelik Tel	Kalın Çelik Tel	St 37 Sac
Ağırlık (g)	904	1045	1102
Kalınlık (mm)	38	44	44
Kord Dizilimi	[0/90/+45/-45]	[0/90/45/-45]	[0/90/+45/-45]
Mermi Çıkışı	Delindi	Delinmedi	Delinmedi
Mermi Deformasyonu (mm)	–	1,7 (kısalma)	2,7 (kısalma)
Hedefteki Deformasyon	Delindi	Alt katlarda fazla	Alt katlarda az

Burada iki farklı durdurma mekanizması gözlemlenmiştir. Kalın çelik telli numune için,

birinci durdurma mekanizmasına göre kurşun çekirdeğindeki deformasyon oldukça az düzeydedir, bu da kurşun çekirdeğinin daha çok malzemelerin yoğunluk farkından etkilenip hızını kaybettiğini göstermektedir.

İkinci durdurma mekanizmasında ise içinde kalın çelik tel bulunan numuneden çıkan kurşun çekirdeklerinde telden kalan izler görülmektedir. Deformasyonun az oluşmasının sebebi temas alanının düşük olmasıdır.

Sac plakalı numunedeki durdurma mekanizmasında ise kurşun çekirdeği ile daha fazla temas oluştuğu için kurşun çekirdeğindeki deformasyon daha yüksek olmuş ve malzeme, daha sert malzeme etkisi göstermiştir. Şekillerde görüldüğü gibi sacın plastik şekil değiştirmesi ve Kord / Tabii kauçuk laminelerin ayrılmasına daha çok enerji harcanmıştır.

KAYNAKLAR

- Abrate, S. (Ed.) 2011.** Impact engineering of composite structures. Udine: Springer.
- Akman, Y. 2012.** Eskitmeye Tabi Tutulan Kompozit Başlıkların Balistik Testlerinin Yapılması Ve Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Anderson, C.E., Morris, B.L., Littlefield, D.L. 1992.** Penetration Mechanics Database. Southwest Research Institute. IN: DAAL03-91-C-0021.
- Aslantaş K., Yumak N. 2014.** Zırh Tasarımında Kullanılan Kompozit Malzemelerin Deformasyon Karakteristiğinin Araştırılması. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 10(2014): 1-21.
- Anonim, 1985.** NIJ standart 0108.01 Ballistic Resistant Protective Materials. U.S. Department of Justice, Washington, A.B.D.
- Başaran B. Eylül 2007.** Computational Analysis Of Advanced Composite Armor Systems. *Yüksek Lisans Tezi*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Doğal ve Uygulamalı Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- Bhatnagar, A. 2016.** Lightweight ballistic composites- Military and Law Enforcement Applications. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, ISBN-10: 0-8493-9119-9.
- Bulut, H. Mayıs 2003.** Balistik Koruyucu Teçhizatın İmalatında Kompozit Malzeme Kullanımı. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Candan C. Kasım 2007.** Hafif Silahlara Karşı Preslenerek Ve Preslenmeden Üretilen Yüksek Yoğunluklu Polietilen (UHMWPE) Zırh Plakalarının Terminal Balistik Özelliklerinin İncelenmesi. 8. Uluslar Arası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı, 7-9 Kasım 2007, İstanbul.
- Ceyhan, V., Turan, M. 2003.** Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı. *Mühendis ve Makine*, 516: 35-41.
- Chelluru, S. K. Aralık 2007.** Finite Element Simulations Of Ballistic Impact On Metal And Composite Plates. *Yüksek Lisans Tezi*, Wichita State University Fen Bilimleri Enstitüsü, Wichita.
- Cunniff, P. 2008.** Assessment of The Ballistic Impact Performance of Variable Response Armor Systems. Proceedings of 24th International Symposium on Ballistics, New Orleans, USA. https://www.researchgate.net/publication/256818721_ASSESSMENT_OF_THE_BALLISTIC_IMPACT_PERFORMANCE_OF_VARIABLE_RESPONSE_ARMOR_SYSTEMS.
- Çaylak, H., Genç, O. 2010.** Toraksı İlgilendiren Ateşli Silah Yaralanmaları. *TTD Toraks Cerrahisi Bülteni*. 1(1): 29-32.
- Cegła, M., Habaj, W., Podgórzak, P. 2014.** Development of Lightweight Bulletproof Vest Inserts with Increased Protection Capability. *Problems of Mechatronics Armament, Aviation, Safety Engineering*, 17(2014):23-34.
- Chabera, P., Boczkowska A., Morka, A., Kedzierski, P., Niezgodą, T., Ozieblo, A., Witek, A. 2015.** Comparison Of Numerical And Experimental Study Of Armour System Based On Alumina And Silicon Carbide Ceramics. *Bulletin of the polish academy of sciences*. 63(2) DOI: 10.1515/bpasts-2015-0040.
- Crouch, I.G. 2017.** The Science Of Armour Materials. ISBN: 978-0-08-100711-2.
- Ćwik, T. K., Iannucci, L., Curtis, P., Pope D. 2016.** Design And Ballistic Performance Of Hybrid Composite Laminates. *Applied Composite Materials*, DOI: 10.1007/s10443-016-9536-x

- Demirel, A. 2007.** Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Dağdelen, O. 2010.** Hasarlı Kompozit Plaklarda Onarım Optimizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Demir, T., Übeyli, M., Yıldırım, R. O., Karakaş, M. S. 2008.** Investigation On The Ballistic Performance Of Alumina / 4340 Steel Laminated Composite Armor Against 7,62 mm Armor Piercing Projectiles. *Metal* 2008, 13-15 Mayıs 2008, Hradec nad Moravicí.
- 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.
- Demircioğlu, T. K., Candan, C., Kasım, İ. A. 2011.** Organik Matrisli Kompozit Malzeme Kullanılarak Oluşturulan Hibrit Zırh Plakasının Terminal Balistik Özelliklerinin İncelenmesi. I. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, 17-19 Kasım 2011, İzmir.
- Eken, S. 2016.** Hava Araç Zırhlarının Balistik Performans Karakteristiğinin Sayısal İncelenmesi. *Sürdürülebilir Havacılık Araştırmaları Dergisi*, 1(2): 74-79.
- Fejdyś, M., Landwijt, M., Kucharska-Jastrzabek, A., Struszczyk, M. H. 2016.** The Effect of Processing Conditions on the Performance of UHMWPE-Fibre Reinforced Polymer Matrix Composites. *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe*, 24,4(118): 112-120. DOI: 10.5604/12303666.1201140
- Gray III, G.T., 2000.** Classic Split-Hopkinson Pressure Bar Technique. *Mechanical Testing and Evaluation, ASM - Handbook, Volume 8* (Kuhn, H. and Medlin, D., eds.), Metals Park, OH, ASM International, pp. 462-476.
- Grujicic, M., Pandurangan, B., d'Entremont, B. 2012.** The Role Of Adhesive In The Ballistic/Structural Performance Of Ceramic/Polymer–Matrix Composite Hybrid Armor. *Materials and Design*, 41(2012): 380-393.
- Haag, L.C., 1997.** Bullet penetration and perforation of sheet metal. *AFTER I*. 29 (4), 213–214.
- Heard, B.J. 2008.** Handbook Of Firearms And Ballistics: Second Edition. ISBN: 978-0-470-69460-2.
- Iannucci, L., Pope, D. 2011.** High velocity impact and armour design. *Express Polym Lett*. 5(3): 262–72.
- Jones, R.M. 1999.** Mechanics of Composite Materials. ISBN: 1-56032-712-X.
- Kapucu, O. A. 2017.** Kord Bezi Takviyeli Kauçuk Kompozitlerin Yorulma Davranışının İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Kasım, H., Yazıcı, M. 2017.** Electrical Properties of Graphene/ Natural Rubber Nanocomposites Coated Nylon 6.6 Fabric under Cyclic Loading. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*. doi: <https://doi.org/10.3311/PPch.12122>.
- Kessler, M.R., 2004.** Advanced Topics In Characterization Of Composites. ISBN: 1-4120-3639-9.
- Klarova, M. 2015.** Composite materials (course book/text book). VSB Technical University of Ostrava.
- Koçer, H. B. Aralık 2007.** Laminated and Hybrid Soft Armor Systems for Ballistic Applications. *Yüksek Lisans Tezi*, Auburn University Polimer ve Fiber Mühendisliği Bölümü, Auburn.

- Lamberts, A.P.T.M.J. Ağustos 2007.** Numerical Simulation Of Ballistic Impacts On Ceramic Material. *Yüksek Lisans Tezi*, Eindhoven University of Technology Makine Mühendisliği Bölümü, Eindhoven.
- Lang, S. 2012.** Design Of A Split Hopkinson Bar Apparatus For Use With Fiber Reinforced Composite Materials. *Yüksek Lisans Tezi*, Utah Devlet Üniversitesi Mekanik ve Havacılık Mühendisliği, Utah.
- Mallick, P. K. 2007.** Fiber-reinforced composites materials, manufacturing, and design (3rd ed.). NW: CRC Press.
- Metin, M. 2008.** E-Cam/Epoksi Tabakalı Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Hasarının Burkulma Özelliklerine Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Nicholas, T. 1967.** The Mechanics Of Ballistic Impact-A Survey. Technical report (AFML-TR-67-208).
- Nguyen, L.H., Ryan, S., Cimpoeru, S.J., Mouritz, A.P., Orifici, A.C. 2014.** The Effect Of Target Thickness On The Ballistic Performance Of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Composite. *International Journal of Impact Engineering* 75(2015): 174-183.
- Nguyen, L. H. 2015.** The Ballistic Performance of Thick Ultra High Molecular Weight Polyethylene Composite. *Doktora Tezi*, RMIT University Mühendislik Fakültesi, Melbourne.
- NIJ 0108.01** Balistik dayanımlı koruyucu malzemeler standardı.
<https://bayourenaissanceman.blogspot.com/2011/03/myth-of-handgun-stopping-power-part-1.html>, (Erişim Tarihi:09.2018).
https://en.wikipedia.org/wiki/9×19mm_Parabellum, (Erişim Tarihi:09.2018)
- Ulcay, Y., Akyol, M., Gemci, R. 2002.** Polimer esaslı lif takviyeli kompozit malzemelerin arabirim mukavemeti üzerine farklı kür metodlarının etkisinin incelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık fakültesi dergisi*, Bursa, 7(1):94-96.
- O'Masta, M.R. 2014.** Mechanisms of Dynamic Deformation And Failure In Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Fiber-Polymer Matrix Composites. *Doktora Tezi*, University of Virginia Mühendislik ve Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Virginia.
- Öğünç, G.İ., Özer, M.T., Coşkun, K., Eryılmaz, M., Uzar, A.İ. 2013.** Serbest düşme hareketi yapan mermi çekirdeklerinin yaralama potansiyelleri. *Ulus travma acil cerrahisi dergisi*. 19(5): 392-397.
- Resnyansky, A.D., Katselis, G. 2002.** Oblique Ballistic Impact Of Carbon Fibre Composite. 20th Int. Symp. on Ballistics, 23-27 September 2002, Orlando, USA, Proceedings, v. II, 949-956.
- Rosenberg, Z., Dekel, E. 2012.** Terminal Ballistics ISBN:978-3-642-25304-1
- Sayer, M. 2009.** Hibrit Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi. *Doktora Tezi*, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Shanel, V., Spaniel, M. 2014.** Ballistic Impact Experiments And Modelling Of Sandwich Armor For Numerical Simulations. *Procedia Engineering*, 79(2014): 230-237.
- Uslu, M. 2007.** DOCOL 22MnB5 Çeliğinin Balistik Özelliklerinin İncelemesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ünaler, E. Temmuz 2005.** Development And Characterization Of Light-Weight Armor Materials. *Yüksek Lisans Tezi*, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Yanen, C., Solmaz, M.Y., 2016. Tabakalı Hibrit Kompozitlerin Bireysel Zırh Malzemesi Olarak Üretimi Ve Balistik Performanslarının İncelenmesi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3(2): 351-362.

Yang, Y., Chen, X. 2014. Energy Absorption Among Layers In The Multiply System Under Ballistic Impact. Proceedings of the 89th Textile Institute World Conference, 2-6 Kasım 2014, Wuhan.

Zukas, J.A. 1980. Impact Dynamics: Theory And Experiment. Technical report (ARBRL-TR-02271).



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Baybora BİTLİSLİ
Doğum Yeri ve Tarihi : ANKARA / 21.09.1983
Yabancı Dil : İngilizce / Almanca / Rusca

Eğitim Durumu
Lise : Bursa Erkek Lisesi / Fen Bölümü
Lisans : Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi / Makine Müh.
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi / Otomotiv Mühendisliği

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : -----

İletişim (e-posta) : bayborabitlisli@hotmail.com

Yayımları : **BİTLİSLİ, B., YAZICI, M. 2019.** Araç Zırhlamada Kullanılan Kompozit Malzemelerin Balistik Performanslarının İncelenmesi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, Bursa, (Kabul Edildi).