

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ÇELİK TEL ÖRGÜ ARAMİD TAKVİYELİ KOMPOZİT
TABAKA ÜRETİMİ VE BALİSTİK PERFORMANSININ
İNCELENMESİ**

AHMET SABAH

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇELİK TEL ÖRGÜ ARAMİD TAKVİYELİ KOMPOZİT
TABAKA ÜRETİMİ VE BALİSTİK PERFORMANSININ
İNCELENMESİ

AHMET SABAH

Doç. Dr. Abdulkadir CENGİZ
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Mehmet UÇAR
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Mustafa AY
Jüri Üyesi, Marmara Üniversitesi


.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 28.06.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüzde zırhlı araçlardan yüksek koruma sağlaması, belirli bir atış gücüne sahip olması, görev donanımları için yeterli kapasiteyle birlikte en zorlu arazi ve iklim koşullarında üstün performans göstermesi beklenmektedir. Bu özellikleri bir arada sağlayabilmenin yanında maliyetleri de düşük tutmak tüm üretici firmalar açısından piyasada tutunabilmek için önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada zırhlı araç koruma sisteminde parçacık kalkanı (spall astarı, spall liner) olarak kullanılabilen kompozit tabaka üretimi ve üretilen alternatiflerin balistik testlerle değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Bu araştırma konusunun ortaya çıkarılmasını sağlayan, çalışmalarımı teşvik eden, yakın ilgisini, değerli zamanını, maddi ve manevi katkılarını esirgemeyen danışman hocam Doç.Dr. Abdulkadir CENGİZ'e, ders seçimleri ve seminer sürecime katkılardan dolayı Prof.Dr. Tamer SINMAZÇELİK'e, deneysel çalışma numune üretimlerinin sağlanmasında büyük yardımı olan değerli arkadaşım Tarık AKKOYUNLU'ya, deneysel çalışmada Otokar balistik test laboratuvarının tüm imkanlarını kullanmamı sağlayan yöneticilerden Erdal USTA ve Hakan CANPOLAT'a, numune malzemelerinin tedarikleri, hazırlanması ve test süreçlerine katkılarından dolayı diğer Otokar yöneticileri ve çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca çalışmalarım için verdiği her türlü destek, sabır ve anlayışından dolayı değerli eşim Hülya DURAN SABAH'a teşekkür ederim.

Haziran - 2018

Ahmet SABAH

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ÖZET	vii
ABSTRACT.....	viii
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER.....	2
1.1. Kapsam ve Amaç.....	3
1.2. Literatür Değerlendirmesi	4
2. BALİSTİK KORUMA SİSTEMLERİ.....	10
2.1. Balistik Koruma Sistemleri Kullanım Alanları.....	10
2.2. Balistik Koruyucu İmalatında Kullanılan Ana Malzemeler.....	10
2.2.1. Sert korucuyu malzemeler	11
2.2.1.1. Metaller	11
2.2.1.2. Seramikler	12
2.2.1.3. Camlar	13
2.2.2. Yumuşak korucuyu malzemeler	14
2.2.2.1. Aramid lifler	14
2.2.2.2. HPPE lifler	15
2.2.2.3. Cam lifler.....	16
2.2.2.4. PBO lifler	16
2.2.2.5. PPID lifler	17
2.2.2.6. Nylon lifler	17
2.2.3. Yumuşak korucuyu malzemelerin karşılaştırılması.....	17
2.2.4. Balistik koruyucularda kullanılan reçine malzemeleri	18
2.2.5. Balistik koruyucularda kullanılan reçine malzemelerinin karşılaştırılması	19
2.3. Kompozit Malzemeler ve Kompozit Zırh Sistemleri.....	20
2.4. Balistik Darbe Sonucu Kompozit Malzemelerde Hasar Mekanizmaları	22
2.5. Balistik Koruma Testleri ve Standartları.....	26
2.5.1. MIL-STD-662-F V50 testi.....	27
2.5.2. Stanag 2920 testi	28
3. MATERYAL VE YÖNTEM	29
3.1. Kompozit Tabaka Üretiminde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	29
3.1.1. Aramid kumaş.....	29
3.1.2. Çelik tel örgü	30
3.1.2.1. Çelik tel örgü tip 1.....	30
3.1.2.2. Çelik tel örgü tip 2.....	31
3.1.3. Epoksi reçine ve sertleştirici	32
3.2. Kompozit tabaka konfigürasyonları	33
3.3. Kompozit tabaka üretim prosesi.....	34

3.4. Numune Tartımları ve Kalınlık Ölçümleri.....	37
3.5. Balistik Test Laboratuvarı ve Test Metodu.....	37
3.6. Balistik Testlerde Kullanılan Mühimmat ve Hazırlanışı.....	39
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	41
4.1. Çelik Tel Örgü Takviyesinin Ağırlığa Etkisi	41
4.2. Çelik Tel Örgü Takviyesinin Tabaka Kalınlığa Etkisi.....	41
4.3. V50 Testi Bulguları	42
4.3.1. 10 kat aramid tabakalı numune V50 testi	42
4.3.2. 10 kat aramid 5 kat tip 1 çelik tel örgü tabakalı numune V50 testi	43
4.3.3. 10 kat aramid 9 kat tip 1 çelik tel örgü tabakalı numune V50 testi	43
4.3.4. 10 kat aramid 9 kat tip 2 çelik tel örgü tabakalı numune V50 testi	45
4.4. V50 Test Sonuçlarının Karşılaştırılması	46
4.5. Numuneleri Delmek İçin Gereken Enerji Miktarı.....	47
4.6. Alanal Yoğunluğa Göre Numunelerin Enerji Sönümlene Kapasiteleri	47
4.7. Numune Hasar Mekanizmaları Örnekleri	48
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	50
KAYNAKLAR	52
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	58
ÖZGEÇMİŞ	59

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Spall astar tipleri	2
Şekil 2.2.	Spall astarının rolü	3
Şekil 2.1.	Balistik koruma sistemleri kullanım alanları	10
Şekil 2.2.	Balistik koruyucu üretiminde kullanılan ana malzemeler	11
Şekil 2.3.	Sert koruyucu malzemeler	11
Şekil 2.4.	Yumuşak koruyucu malzemeler	14
Şekil 2.5.	Kompozitlerin sınıflandırılması	20
Şekil 2.6.	Kumaş dokuma tipleri	21
Şekil 2.7.	Kumaşlarda balistik dayanım faktörleri	21
Şekil 2.8.	Tabakalı kompozitlerde balistik darbe hasar mekanizmaları	22
Şekil 2.9.	Balistik limit kavramı üzerine farklı yaklaşımlar	23
Şekil 2.10.	Zırhta atıştan sonra meydana gelen çöküntü	25
Şekil 2.11.	Çeşitli balistik liflerin dalga hızı - enerji sönmleme grafiği	25
Şekil 2.12.	Bazı yumuşak koruma malzemelerin darbe dayanımları	26
Şekil 2.13.	US-MIL-P-46593'te tanımlanan FSP'ler	28
Şekil 3.1.	Aramid kumaş numunesi	29
Şekil 3.2.	Çelik tel örgü numunesi tip1	31
Şekil 3.3.	Çelik tel örgü numunesi tip2	32
Şekil 3.4.	Epoksi reçine ve sertleştirici numuneleri	33
Şekil 3.5.	Kompozit tabaka üretim prosesi	34
Şekil 3.6.	Rulo malzemenin kesim için serilmesi	34
Şekil 3.7.	Konfigürasyonlara göre numune katlarının dizilimi	35
Şekil 3.8.	Reçinenin uygulanması	35
Şekil 3.9.	Vakum infüzyon kalıbı ve infüzyon işlemi	36
Şekil 3.10.	Üretim sonrası çelik tel örgü içeren ve içermeyen numune örnekleri	36
Şekil 3.11.	Vakum infüzyon öncesi ve sonrası numune tartımları	37
Şekil 3.12.	Otokar balistik test laboratuvarı genel görünüm	38
Şekil 3.13.	Otokar balistik test laboratuvarı atış ve hız ölçüm sistemi	38
Şekil 3.14.	Otokar balistik test laboratuvarı yerleşimi	38
Şekil 3.15.	Numune ve şahit plaka bağlama aparatı	39
Şekil 3.16.	Testlerde kullanılan 0.30 kalibre FSP	40
Şekil 3.17.	Mühimmat hazırlamada kullanılan malzemeler	40
Şekil 4.1.	Çelik tel örgü ve reçine takviyesinin ağırlığa etkisi	41
Şekil 4.2.	Çelik tel örgü ve reçine takviyesinin kalınlığa etkisi	42
Şekil 4.3.	Numune 1 ve şahit plakasının atış sonrası görüntüleri	43
Şekil 4.4.	Numune 2 ve şahit plakasının atış sonrası görüntüleri	44
Şekil 4.5.	Numune 3 ve şahit plakasının atış sonrası görüntüleri	45
Şekil 4.6.	Numune 4 ve şahit plakasının atış sonrası görüntüleri	46
Şekil 4.7.	V50 test sonuçlarının karşılaştırılması	46
Şekil 4.8.	Palaka bazında enerji sönmleme kapasiteleri	47
Şekil 4.9.	Alansal yoğunluğa göre enerji sönmleme kapasiteleri	48
Şekil 4.10.	Numune hasar mekanizmaları örnekleri 1	48
Şekil 4.11.	Numune hasar mekanizmaları örnekleri 2	49

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Para-aramid liflerin genel özellikleri	15
Tablo 2.2. Zırh tasarımında kullanılan fiberlerin karşılaştırılması	18
Tablo 2.3. Zırh tasarımında kullanılan reçine malzemeleri	19
Tablo 2.4. Zırh tasarımında kullanılan reçine malzemelerinin karşılaştırılması	20
Tablo 2.5. Çeşitli balistik koruma için kullanılan standartlar	27
Tablo 3.1. Kompozit tabaka konfigürasyonları.....	33
Tablo 3.2. Numune tartımları ve kalınlık ölçümleri	37
Tablo 3.3. Mühimmat hazırlama aparatları ve bileşenleri	40
Tablo 4.1. Numune 1 V50 hesabına dahil edilen atış hızları	42
Tablo 4.2. Numune 2 V50 hesabına dahil edilen atış hızları	43
Tablo 4.3. Numune 3 V50 hesabına dahil edilen atış hızları	44
Tablo 4.4. Numune 4 V50 hesabına dahil edilen atış hızları	45

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
Al5083	: Alüminyum 5083 alaşımı
B ₄ C	: Bor karbür
E	: Zırhın sönmlediği enerji, (J)
M	: Merminin kütlesi, (kg)
PVB	: Polivinil butiral
SiC	: Silisyum karbür
V _{bl}	: Balistik limit hızı, (m/s)
V _i	: Merminin çarpma hızı, (m/s)
V _r	: Merminin zırhı terk ettiği andaki hızı, (m/s)
V ₀	: Merminin zırhı geçemediği hız (m/s)
V50	: Merminin zırhı yüzde elli ihtimalle delinmenin olduğu hız, (m/s)

Kısaltmalar

A	: Numune Üretiminde Kullanılan Aramid Kumaş
AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
AFV	: Armoured Fighting Vehicle (Zırhlı Savaş Aracı)
BAD	: Behind Armour Debris (Zırh Arkasında Saçılma)
COEX	: Coconut Sheel Powder Epoksi Composite (Cam Takviyeli Polimer)
FSP	: Fragment Simulating Projectile (Parçacık Taklit Edici Mermi)
FST	: Fire, Smoke and Toxicity.(Yangın, Duman ve Zehirlilik Kontrolü)
GRP	: Glass Reinforced Polymer (Cam Takviyeli Polimer)
HEAT	: High Explosive Anti Tank (Yüksek Patlayıcı Tanksavar)
HPPE	: High Performance Polyethylene (Yüksek Performanslı Polietilen)
IED	: Improvised Explosive Device (El Yapımı Patlayıcı)
MIL-STD	: American States Military Standart (ABD Askeri Standartları)
MRAP	: Mine Resistant Ambush Protected (Mayın Korumalı Zırhlı Araç)
NATO	: North Atlantic Treaty Organization (Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü)
NIJ	: National Institute of Justice (Ulusal Adalet Enstitüsü)
PBO	: Polybenzobisoxazole
PPID	: Polypyridobisimidazole
RHA	: Rolled Homogenous Armour (Haddelenmiş Zırh Çeliği)
STANAG	: Standardization Agreement (NATO Standart Anlaşması)
T1	: Numune Üretiminde Kullanılan Çelik Tel Tip 1
T2	: Numune Üretiminde Kullanılan Çelik Tel Tip 2

ÇELİK TEL ÖRGÜ ARAMİD TAKVİYELİ KOMPOZİT TABAKA ÜRETİMİ VE BALİSTİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, zırhlı araçlarda patlama ve balistik saldırılar sonucunda araç içinde meydana gelen parçaçık saçılmalarını azaltmaya ve tutmaya yönelik olarak kullanılabilir çelik tel örgü takviyeli ve takviyesiz aramid kompozit tabakalar üretilmiş ve balistik performansları deneysel olarak incelenmiştir.

Vakum infüzyon yöntemiyle başarıyla gerçekleştirilen tabaka üretimlerinde balistik özellikleri ile ön plana çıkan Twaron T750 aramid kumaşı kullanılmıştır. Çelik tel örgü takviyesi olarak ise mesh tipi ve tel çapları farklı olan iki farklı tipte AISI 304 kalite tel örgü kullanılmıştır. Testler, balistik test laboratuvar ortamında MIL-STD-662F V50 ve STANAG 2920 standartlarında yapılmıştır. Testlerde, öncelikle tel örgü içermeyen numunenin, ardından tel örgü içeren 3 farklı numunenin V50 balistik hız limitleri bulunarak enerji sönümlenme kapasiteleri hesaplanmıştır. Sonuçta çelik tel örgü takviyesi içermeyen numune 1'in enerji sönümlenme kapasitesi, üretilen tabaka bazında 107,01 j, alansal yoğunluğa göre ise 16,59 j/m²/kg olarak bulunmuştur. Tabaka bazında 168,89 j ile en iyi ikinci balistik dayanıma sahip olduğunu gösteren numune 2, aynı zamanda alansal yoğunluğa göre de 18,65 j/m²/kg ile en iyi balistik performansı sergilemiştir. Tabaka bazında 180,11 j ile en iyi balistik dayanıma sahip olan numune 3 ise alansal yoğunluğuna göre 15,78 j/m²/kg ile en kötü performansı göstermiştir. Numune 4 ise numune 2'ye yakın özellikler göstermiştir. Böylece çelik tel örgü takviyesinin balistik dayanım özelliklerine etkileri ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Aramid, Balistik, Çelik Tel Örgü, Kompozit, Zırhlı Araç.

STEEL WIRE ARAMID REINFORCED COMPOSITE LAMINATE PRODUCTION AND INVESTIGATION OF BALLISTIC PERFORMANCE

ABSTRACT

In this study, steel wire mesh reinforced and unreinforced aramid composite laminates produced which could be used to reduce and prevent spall effects in the vehicle as a result of explosions and ballistic attacks on armored vehicles. And the ballistic performances of the laminates investigated experimentally.

Composite laminates produced by vacuum infusion successfully. Twaron T750 ballistic aramid fabric used in the laminate production and two types of AISI 304 wire mesh with different mesh type and wire diameters used as steel wire mesh reinforcement. The tests carried out in the ballistic test laboratory environment on the MIL-STD-662F V50 and STANAG 2920 standards. In the tests, firstly energy absorption capacities calculated by finding the V50 ballistic speed limits of the sample without wire mesh, followed the 3 different samples with wire reinforced. As a result, the energy absorption capacity of the steel wire unreinforced sample 1 found to be 107,01 j on the laminate basis and 16,59 jm^2/kg on the area density basis. The sample 2, which showed the best second ballistic resistance with 168,89 j on the laminate basis, also showed the best ballistic performance with 18,65 jm^2/kg according to the area density basis. The sample 3 with the best ballistic resistance with 180,11 j on the laminate basis showed the worst performance with 15,78 jm^2/kg according to the area density basis. Sample 4 showed properties close to sample 2. Thus, effects on the ballistic resistance properties of the steel wire mesh reinforcement have been demonstrated.

Keywords: Aramid, Ballistic, Steel Wire Mesh, Composite, Armored Vehicle.

GİRİŞ

Geçmişten günümüze gelen süreçte yaşanan savaş tecrübeleri ve gelişen silah teknolojileri ile beraber zırh teknolojisinde de büyük gelişmeler yaşanmaktadır. Savaş alanındaki tehditlerin çeşitlenmesi ve gelişmesiyle birlikte, zırhlı aracın ve personelin korunması tasarımcıları sürekli yeni arayışlara itmektedir ve bu durum sürekli gelişme ihtiyacı olan bir zırh dünyası yaratmaktadır. Bugünün zırhlı araçları, içerisindeki personeli korumak için aracın performansını olumsuz etkilemeyen gelişmiş zırh sistemlerine ihtiyaç duymaktadır. Zırh sistemleri aracın koruma özelliklerini artırırken bir takım dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Koruma seviyesi, çevresel şartlara dayanım, hafiflik, tasarımda esneklik, montaj ve güçlendirme kolaylığı, üstün dayanıklılık, düşük hacim, düşman tarafından algılanma, mobiliteye etki ve maliyet zırh tasarımını oluşturan önemli parametrelerdir.

Zırhlı araçlar görevleri esnasında el yapımı patlayıcılar (IED), yüksek patlayıcılı tanksavar (HEAT) sistemleri, kinetik enerjili mermiler gibi çeşitli mühimmatların balistik ve patlama tehditlerine maruz kalabilmektedirler. Bu tehditler aracın zırhını delebileceği gibi, delmeden de dış yüzeylere sarsıcı şekilde basınç kuvveti oluşturacak özelliklere sahip olabilmektedirler. Dolayısıyla tehde maruz kalan aracın zırhı delinirse mühimmat parçacıkları araç içine saçılmaktadır veya zırh delinmese bile basınç nedeniyle zırh oluşturan yüzeylerden parçacık (spall) saçılmaları meydana gelebilmektedir. Bu yüzden bu tür tehditlere karşı araç içinde koni şeklinde oluşan parçacık saçılmalarının açılarını azaltıcı veya önleyici bir yapıya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaç ilk olarak Birinci Dünya Savaşı sırasında üretilen ilk tanklarda görülmüştür ve tank içindeki personel parçacık saçılmalarından korunabilmek için ham vücut zırhları giymek zorunda kalmışlardır. İlerleyen zamanlarda da mayın korumalı (MRAP) ve zırhlı savaş araçlarının (AFV) metal gövdelerinin arkasında dokuma kumaş battaniyesi (gömlek tipi spall astarı) veya katı plastik/kompozit (panel tipi spall astarı) tabaka olması gerektiği anlaşılmıştır [1].

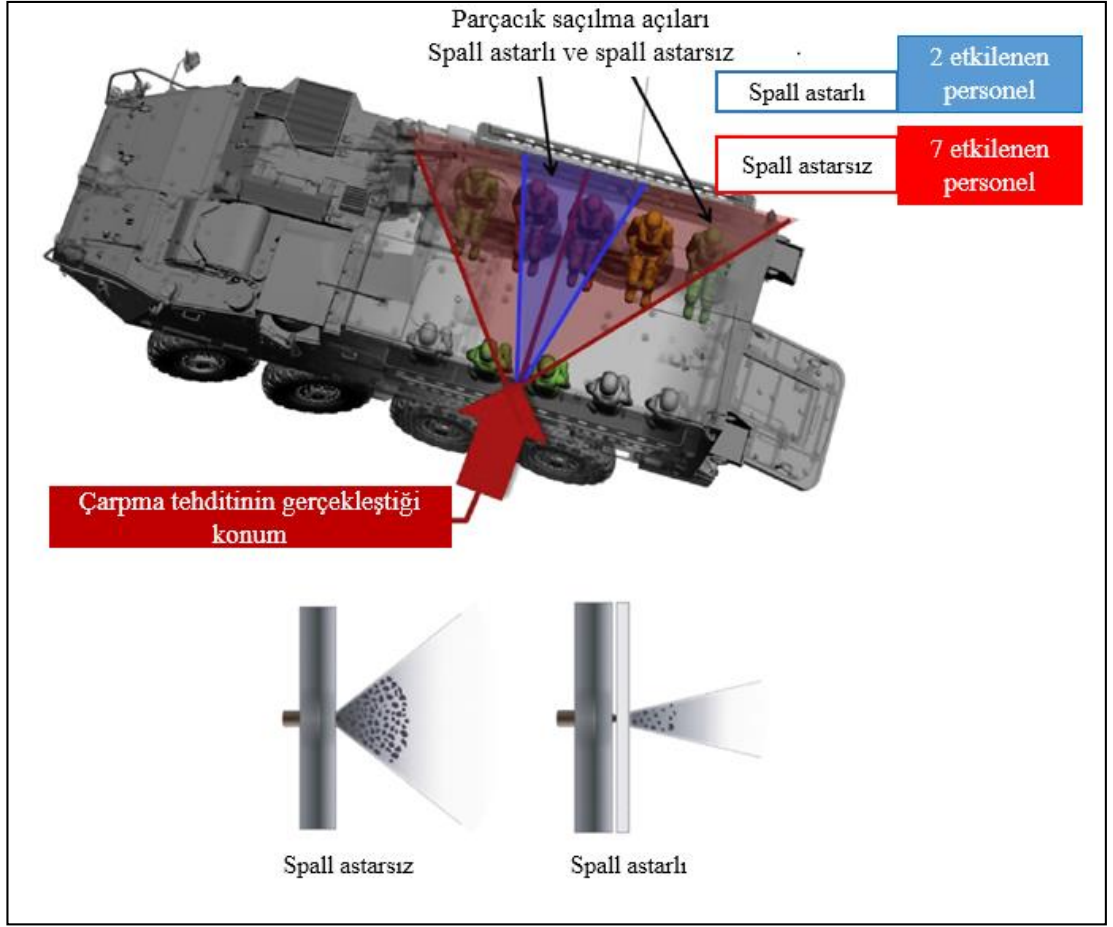
1. GENEL BİLGİLER

Zırhlı araçlar için tasarlanan spall astarları tipik olarak cam elyaflar, yüksek yoğunluklu polietilen (HPPE) fiberler, aramid gibi güçlü darbe dayanımı sağlayan malzemelerden üretilmektedir. Şekil 1.1'de panel tipinde veya gömlek tipinde uygulamaları gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Spall astar tipleri [3]

Spall astarları zırhın iç yüzeyine veya araç iç tarafına sabitlenirler ve son koruma tabakası olarak işlev görür. Bu katmanın iki ana işlevi vardır, birincisi; penetrasyon performansı balistik sınırdan olduğunda, delici parçaların ve/veya parçalanmış zırh malzemesinin araç içine girişini önlemelidir. İkincisi; aşırı yük performansına sahip bir delici zırhı delindiğinde, araç içine yayılan kıymık konisini Şekil 1.2'de görüldüğü gibi önemli ölçüde azaltmalıdır. Bu performans ile spall astarları, personelin hayatta kalma kabiliyetinin iyileştirilmesi ve personel bölmesi içindeki hasarların en aza indirilmesi için önemli bir işleve sahiptir [4-5].



Şekil 1.2. Spall astarının rolü [4]

1.1. Kapsam ve Amaç

Tez kapsamında, zırhlı araçlarda spall astarı olarak kullanılabilen aramid kompozit tabaka üretimi gerçekleştirilip, bu tabakaya eklenen farklı tipte ve kat sayıda çelik ağ takviyelerinin, balistik dayanıma olan etkilerinin uluslararası standartlara uygun balistik testlerle değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.

Giriş bölümünde zırhlı araçlarda parçalanma (spall) etkisini azaltıcı veya önleyici spall astar sistemleri ile ilgili genel bilgilendirme yapılmaktadır. Bu alanda ve benzer konularda yapılmış olan çalışmalara literatür bölümünde detaylıca değinilmektedir. İkinci bölümde balistik koruma sistemleri, kompozit zırh malzemeleri, kompozit malzemelerde balistik darbe mekanizmaları, balistik bilimi ve balistik test standartları ile ilgili genel bilgilendirme yapıp balistik koruma sistemleri hakkında farkındalık sağlanması amaçlanmaktadır. Üçüncü bölümde test için üretilen numunelerin

malzeme detayları, numunelerin üretim prosesi, balistik test metodu ve testlerin gerçekleştirildiği laboratuvarla ilgili bilgiler verilmektedir. Dördüncü bölümde araştırmadan elde edilen bulgular raporlanmaktadır ve son bölümde sonuçlar kapsamlı olarak değerlendirilip öneriler sunulmaktadır.

1.2. Literatür Değerlendirmesi

Literatürde sentetik fiberlerle üretilen kompozit tabakalara ilave olarak çelik fiber, çelik örgü ve doğal lifler gibi ilave katmanlar eklenerek balistik performansı artırmaya yönelik çalışmalar mevcuttur. Çelik ağ takviyesi içeren kompozit yapılar için çeşitli patentlerin de alındığı görülmektedir. Bu patenlerde çelik ağ takviyesinin yapısal [6-7] veya elektromanyetik yalıtım sağlama amaçlı olarak [8] ele alındığı görülmektedir. Literatürde parçacık tutucu etkilere yönelik çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Ancak balistik darbelere ve tehditlere yönelik çeşitli deneysel, nümerik ve analitik birçok akademik çalışma bulunmaktadır.

Lin ve diğ. (2009), paslanmaz çelik ağ ve iğne ile zımbalanmış iki kat dokuma olmayan polyamid kumaşı sandviç benzeri bir laminant oluşturma amacıyla birleştirmişlerdir. Ardından bu sandviç yapıyı Kevlar® kumaşların içine yerleştirip oluşturduğu tampon etkisini ağırlık düşürme darbe testi ve mermi atış testleriyle ölçmüşlerdir. Çalışmalarında paslanmaz çelik ağın özelliklerini ve bileşik kumaşların yerleştirilme sıralarını çeşitlendirilerek kırılma yayılma enerjisi ve tampon etkisine olan etkileri için farklı parametreleri gözlemlemeyi amaçlamışlardır. Sonuçta bileşik kumaş balistik direnci azaltmadan çelik ağın Kevlar® kumaş yapısının birkaç katmanının yerini alacağını bulmuşlardır [9].

Zhou ve diğ. (2014), çelik fiberle takviyeli edilmiş iki katmanlı patlayıcı kaynaklı çelik/alüminyum hedeflerin hasar mekanizmasını ve balistik direncini, balistik deney metotları ve sonlu yöntemleriyle incelenmişlerdir. Geleneksel tek ve çok katmanlı metal hedeflerden farklı olarak, hedef katmanları arasında iyi yüzey-yüzey kombinasyonları oluşturulmasını ve çelik ağ takviyeli yapıyı ele almışlardır. Deneysel çalışma sonucunda toplam numune kalınlığı ve eklenen çelik fiber yoğunluklarının balistik direnç üzerine etkilerini tartışmışlardır. Ek olarak çelik fiber takviyesi olmayan aynı yapının kombinasyonunu test edilerek karşılaştırmışlardır. Sonuçta çelik liflerle

takviye edilmiş hedefin balistik direncinin, genellikle takviyeli çelik lifleri olmayan aynı kalınlık hedefine göre daha iyi olduğunu ve elyaf yoğunluğunun azalmasıyla balistik direncin azaldığını belirtmişlerdir [10].

Arnold ve Paul (2001), balistik tehditler sonucunda zırh sacı arkasında oluşan parçalanma bulutu (BAD) üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında hedef plakaları desteklemek amacıyla polietilen malzemedan üretilen tabakalar kullanmışlardır ve kalınlık etkilerinin balistik özelliğe etkilerini incelemişlerdir. Elipsoit BAD bulutunu tanımlamak için çeşitli testler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaların sonucunda hedef plakayı destekleyen polietilen tabakaların parçacık sayısını ve ayrıca buluttaki dağılımlarını önemli derecede değiştirdiklerini gözlemlemişlerdir [11].

Arnold ve Rottenkolber (2003), BAD bulutu içerisindeki parçacıkların enkaz hız ve kütle dağılımı ölçümlerini, eşleşme, yayılmalarını inceledikleri çalışmalarında zırh tabakası kalınlığı ve eğim açısının etkilerini ortaya koymuşlardır [12].

Horsfall ve diğ. (2007), tek ve çift çelik plaka zırh sistemlerinde şekillendirilmiş yük tehdidine karşı farklı aralıklarla E-cam spall astar materyalinin performansını araştırmışlardır. Araştırmalarında altı farklı hedef konfigürasyonu oluşturmuşlardır. Malzeme olarak düz örgü E-cam elyaf ve polyester reçine kullanmışlardır. Sonuçta parçacık yayılmasının ve fragmanlarının sayısının spall astarının aralığına özellikle duyarlı olmadıkları sonucuna varmışlardır. Son olarak, en iyi performansın alan yoğunluk dezavantajıyla beraber spall astarlı çift çelik plakanın gösterdiğini bulmuşlardır [13].

Arnold ve Rottenkolber (2006), 70 mm kalibrelik HEAT ile delinmiş olan farklı spall gömleklerinin davranışlarını araştırmak için bir dizi test gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında 25 adet spall liner konfigürasyonunu test etmişlerdir. BAD bulutunun, alan başına yeterli ekstra ağırlığın izin verildiği durumlarda, uygun astar konfigürasyonları ile büyük ölçüde azaltılabileceğini bulmuşlardır. Ayrıca spall astarın çalışma mekanizmalarını anlamak için sayısal simülasyonlar yapmışlar, ana mekanizmalarının sırasıyla geciktirme, geri çekilme, yerine geçme, büzülme ve dağılma olduğunu bildirmişlerdir [14].

Weber (2007), kinetik enerji uzun çubuk penetrator, haddelenmiş homojen zırh çeliği (RHA) yapısı ve homojen polietilen spall gömlekleri ile yapılan test sonuçlarını sunmuştur. Normal etkide, parçaların miktarının kütle ve yayılım açısının artan hedef kalınlık ile arttığı, maksimum 70 mm'ye ulaştığı ve artan kalınlıklar için tekrar azaldığı sonucuna varmıştır. Buna ek olarak, mermi ve hedef fragmanların miktarının ve yanal yayılımının, spall astar kalınlığının artmasıyla azaldığını bildirmiştir [15].

Yuan ve diğ. (2007), cam takviyeli polimer kompozitlerde (GRP) spall dayanıklılığını incelemek için deney serileri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında dokuma fitilli S-Cam-polyester ve saten örgülü E-cam-epoksi olmak üzere iki tip GRP konfigürasyonunu incelemiştirler. İki GRP kompozitin spall kuvvetlerinin, artan şok kuvvetiyle azaldığını gözlemlediler. Buna ek olarak, normal şok sıkıştırmasında bindirilmiş kesme gerilmesi spall kuvvetine oldukça zarar verici bulmuşlardır. Son olarak, E-cam GRP kompozitinin, S-2 Cam GRP kompozitine kıyasla hem normal şok sıkıştırma hem de kombine sıkıştırma ve kesme yüklemesi altında çok daha yüksek bir sıçrama gücü seviyesine sahip olduğu sonucuna varmışlardır [16].

Arıkan ve diğ. (2014), balistik tehdit ile oluşan parçalanma etkisini Ansys Autodyn yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile araştırılmışlar ve farklı modelleme yöntemleri kullanılarak problem için en doğru ve kesin yöntem seçmişlerdir. Yöntemi belirledikten sonra, sonlu eleman modelinde iki farklı tipte balistik zırh malzemesi (Al5083 & RHA) kullanmışlardır. Sonuçta spall dağılımı gözlemişler ve sonlu elemanlar ile deneysel çalışma arasında yakın sonuçlar elde etmişlerdir [17]. Arıkan (2015), deneysel ve sayısal çalışma arasında iyi bir mutabakata sahip olan araştırmalarını, spall dağılımını azaltmak için zırh plakasından sonra spall astarı (Kevlar® / epoksi) plaka üretimi ve balistik testleri ilavesiyle devam ettirmiştir [18].

Yahaya ve diğ. (2015), askeri zırhlı araçlarda spall astarı olarak kullanılmak üzere kenaf-aramid kompozit tabakası üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında aramid elyafı üç farklı tip kenaf elyafı (örgülü, tekyönlü keçe) ile birleştirerek farklı numuneler elde etmişlerdir. Test sonuçlarında örgü tipi kenaf hibrid kompozitin gerilme mukavemetinin, tekyönlü ve keçeli olana göre yaklaşık %20,78 ve %43,55 daha yüksek olduğu gözlemişlerdir. Ayrıca örgü kenaf kompozitlerin çentik (charpy) darbe

dayanımı, tekyönlü ve keçeli malzemeye göre %19,78 ve %52,07 daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Çalışma sonucunda örgülü tip kenaf elyafın yüksek gerilme mukavemeti, darbe dayanım özelliklerine sahip olduğunu ve spall astarı gibi kompozit tabakalarda destekleyici bir yapı olarak kullanılabilceği sonucuna varmışlardır [19].

Risby ve diğ. (2008), doğal lifler ve dolgu maddelerin; bolluklarına, kullanılabilirliklerine, yenilenebilirliklerine, çevre dostu olmalarına ve düşük yoğunluklarına dikkat çekip, hindistan cevizi kabuğu tozu-epoksi kompozit (COEX) paneli üretimi gerçekleştirmişlerdir. Bu panelleri sert kısmı oluşturan Twaron® CT716 kumaşı panelleri birleştirip balistik testlere tabi tutmuşlardır. Test sonuçlarında, COEX panelinin şok sönümlenme özelliklerine sahip olduğunu ve sert zırhlı sistemde bir zırh bileşeni olarak kullanılabilceğini göstermişlerdir [20].

Braga ve diğ. (2017), doğal elyaflarla güçlendirilmiş kompozitleri; daha ucuz olmaları, çevre dostu olmaları ve düşük yoğunlukları nedeniyle zırh yapılarının ikinci katmanı olarak düşünmüşürler. Doğal elyaflar arasında, curaua olarak bilinen ananas erectifolius bitkisinin yapraklarından çıkarılanlar, olağanüstü yüksek mukavemeti ve yüksek modülü nedeniyle göze çarptığını değerlendirmişlerdir. Bu nedenle, yüksek enerjili 7,62 mm mühimmatın balistik etkisine maruz kalan curaua elyaf takviyeli polyester kompozitlerin performansı üzerine yoğunlaşmışlardır. 0, 10, 20 ve 30 hacim curaua elyafı ile takviye edilmiş kompozitler üretmişler ve sönümlenen enerjiyi değerlendirmek için zırh hedefi olarak tek başına test etmişlerdir. Sonuçta test edilen malzemeler arasında %30'luk fiber kompozitlerin Kevlar®'a en iyi alternatif olduğunu bulmuşlardır [21].

Delcourt ve diğ. (2009), doğal elyaf özellikli keten lifleri güçlü sentetik liflerle birleştirerek balistik performans ve maliyet arasında optimum bir denge sağlamak üzere çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kuru keten dokuma kumaşların balistik sınırını V50 testi ile incelenmiştir. Parçacık taklit edici mermilerden (FSP) etkilenen kuru kumaşların, polipropilen matris ile kompozitlere keten olarak fiber takviye olarak dahil edildiği önceki testlerden daha yüksek bir balistik limit sergilediğini gözlemişlerdir. Koruma kalınlığının V50 üzerindeki etkisi değerlendirmişlerdir. Ayrıca dokuma

yapıların farklı türleri de incelemişler ve bu kumaşların çarpışma altındaki davranışları değerlendirmişlerdir [22].

Faur (2016), farklı epoksi reçineleri ile karbon, cam (E ve S tipi), aramid ve polietilen kumaş takviyeli kompozitlerin mekanik davranışı ve balistik performansını incelemiştir. El yatırma yöntemiyle üretilen örnekleri düşük hız (çarpma ve ağırlık düşürme testleri) ve yüksek hız (iki farklı kalibreli balistik) darbe testi ile karakterize etmiştir. Kompozitlerin enerji sönümlenme kapasitesinin, takviye lifinin malzeme özelliklerinden, kumaş yapısının cinsinden ve reçinenin esnekliğinden büyük ölçüde etkilendiği bulduğunu bildirmiştir [23].

Yılmaz (2012), hafif silahlara karşı zırh yapımında kullanılan polimer matrisli, tabakalı ve elyaf takviyeli kompozit malzemelerin balistik özelliklerini deneysel olarak araştırmıştır. Çalışmasında SB21 polietilen fiber malzeme ile düzlem dokumalı E cam ve Kevlar® 129 elyaflardan çok fazlı, tabakalı ve epoksi reçine matrisli olarak el yatırma yöntemiyle üretilen levhaların balistik testlerini yapmıştır. Balistik testlerde mermi hızları ve darbe çöküntü değerlerini ölçmüştür. Yapılan deneylerde 2 ve 3 farklı malzeme cinsinden oluşan epoksi matrisli yapının farklı konfigürasyonlardaki balistik özelliklerinin incelenmesini hedeflemiş, 3 fazlı sistemlerin Kevlar® 129 tarafından yapılan atışlarda SB21 tarafından yapılan atışlara göre daha fazla enerji sönümlendiğini bulmuştur [24].

Özgültekin (2012), iki kademe olarak gerçekleştirdiği çalışmada, ilk kademe deneylerinde zırh numunelerindeki tabaka dizilişleri hakkında altyapı bilgisi elde etmeyi hedeflemiştir. İkinci kademe deneylerinde ise, ilk kademede çalışmalarından elde edilen diziliş bilgilerinin yanı sıra aramid kumaşının dizilişlerdeki önemi ve etkisi araştırmıştır. Farklı malzemelerden oluşan katmanlar, değişik kombinasyonlarda sıralanarak deney numuneleri hazırlamıştır. Bu katmanlar; aramid kumaşı, karbon fiber, epoksi reçine ile takviye edilmiş polipropilen bal peteği yapısı ve yine epoksi reçine ile tabakalaştırılmış çelik elek telidir. Safir T14 uzun namlulu tüfek ve Yavaşçalar 36 kalibre tek kurşun fişek kullanarak numunelerin balistik davranışlarını incelemiştir. Çalışmasının sonucunda aynı malzemelerin farklı şekilde dizilişleri ile birbirinden çok farklı davranışlar gösterdiğini saptamıştır [25].

Barut (2015), savunma sanayinde kullanılan aramid esaslı kompozit malzemelerin balistik özelliklerini ve mekanik davranışını deneysel olarak incelemiştir. İlk olarak; 16, 18, 20, 22 ve 24 kat aramid kumaş kullanarak, 10, 21, 42, 63 ve 84 bar basınçta plakalar hazırlamıştır. Aramid kumaştan yapılan plakalara farklı atış hızlarında mermi ve parçacık testi yaparak balistik mukavemetleri ölçmüştür. Hazırlanan plakadan ve atış yapılan plakanın mermi gelmeyen kısmından bir kesit alarak çekme mukavemetleri ölçmüştür. Deneyleri, laboratuvar ortamında National Institute Of Justice NIJ 0101.04 ve NATO STANAG 2920 standartlarında gerçekleştirmiştir [26].

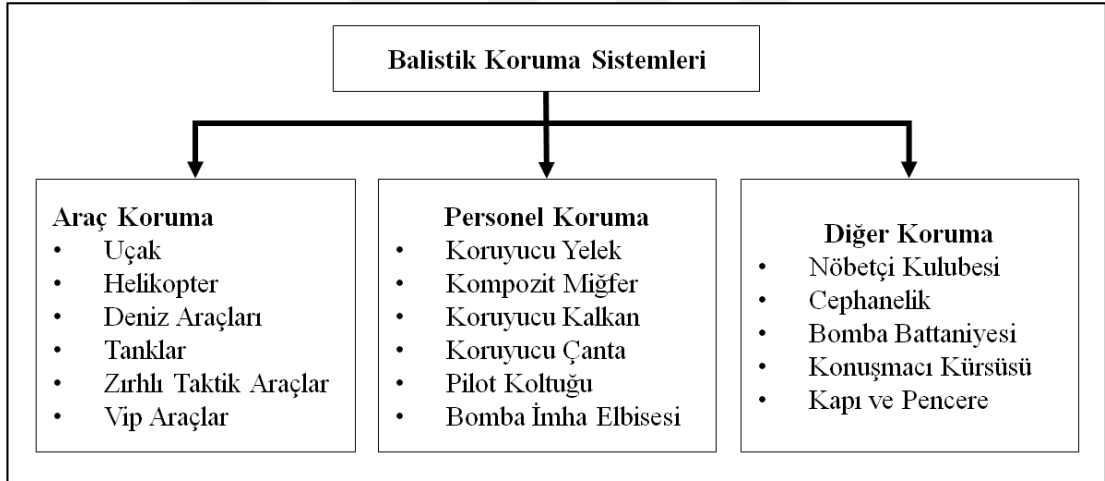
Yavaş (2009), hibrid kompozit zırh numuneleri hazırlamış, hazırladığı numunelerin balistik dayanım sınırı analizini yapmıştır. Koruyucu yapının mermi mühimmatını istenilen standartlar içerisinde durdurmasının yanı sıra kat adedi değişiklikleri ile de yapının tam delinme sınırı tespit etmiştir. Farklı çap ve kalibredeki mermilerle, uluslararası standartlar (NIJ STD 0101.04 ve STANAG 2920) ışığında balistik test laboratuvarında balistik test düzeneği kullanarak hazırlanan zırh numunelerine atışlar yapmış ve sonuçları değerlendirmiştir. Sonuçta hafif silahlara karşı bireysel korumada kullanılan kompozit malzemelerin farklı kat adetlerinde ve kalınlıkta hibrid biçimde gösterdiği tepkiler ve hasar analizleri gözlemiş ve yorumlamıştır [27].

Karahan ve diğ. (2008), farklı sayıdaki Twaron® CT 710 tipi kumaş tabakaları, panellerin oluşturulması için üç dikiş tipi kullanılarak birleştirip ve daha sonra bu panelleri, NIJ standartlarına göre balistik testlere tabi tutmuşlardır. Kumaş tabakaları tarafından sönmölen enerjiyi ve kumaş tabakalarının arkasına iletilen enerjiyi, farklı bir yaklaşım kullanılarak travma derinliği ve travma çap değerlerinden belirlemişlerdir. Kumaş kat sayısı ve dikiş çeşidinin balistik özellikler üzerinde önemli etkileri olduğu ve şartlandırma etkisinin sınırlı olduğunu göstermişlerdir [28].

2. BALİSTİK KORUMA SİSTEMLERİ

2.1. Balistik Koruma Sistemleri Kullanım Alanları

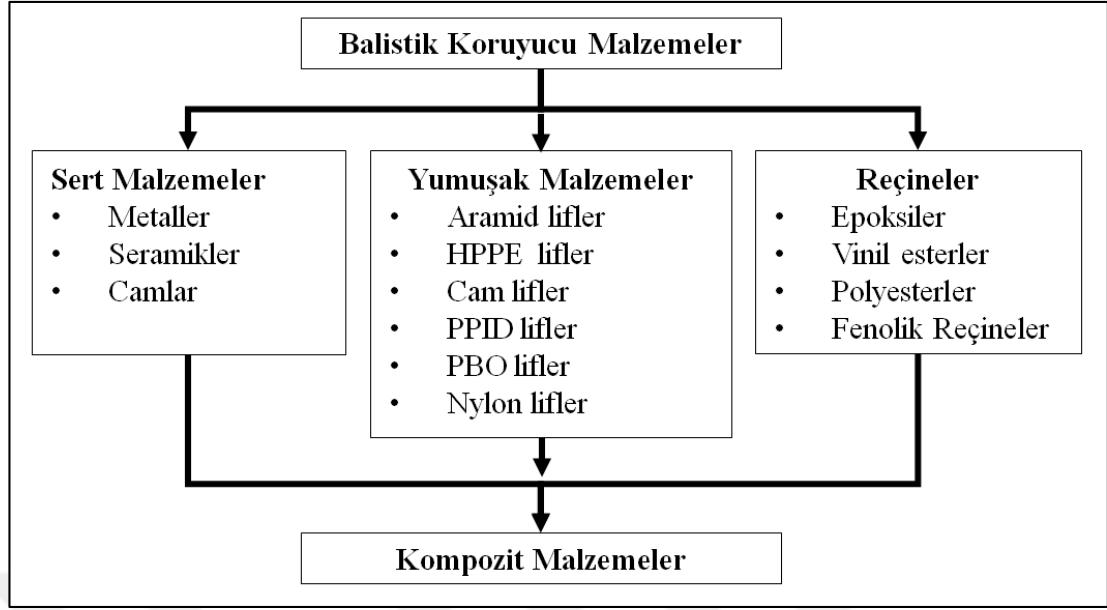
Gelişen silah teknolojisiyle birlikte balistik koruma sistemleri de gelişmekte ve kullanım alanları da yaygınlaşmaktadır. Koruma sistemleri Şekil 2.1’de görüldüğü gibi sınıflandırılabilir. Malzeme teknolojisi özellikle de kompozit alanındaki gelişmelerle birlikte günümüzde balistik koruma sistemlerinde büyük gelişmeler yaşanmaktadır. Hafifliğin önemli olduğu araç ve personel koruma sistemlerinde kompozit malzeme kullanımları ön plana çıkmaktadır. Nöbetçi kuleleri, cephanelik gibi sabit sistemlerde ise ağırlığın önemli olmaması ve fiyat avantajları nedeniyle zırh çelikleri kullanılması tercih edilmektedir [29].



Şekil 2.1. Balistik koruma sistemleri kullanım alanları [29]

2.2. Balistik Koruyucu Üretiminde Kullanılan Ana Malzemeler

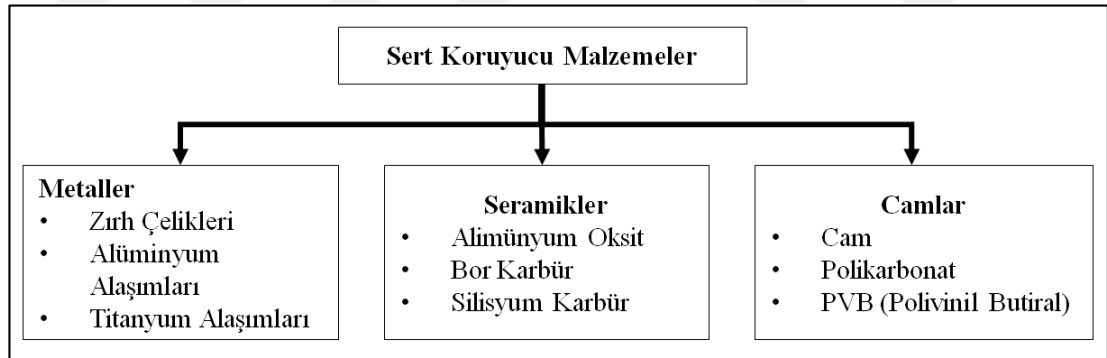
Balistik koruyucu imalatında kullanılan malzemeler; Şekil 2.2’de görüldüğü gibi yumuşak malzemeler, sert malzemeler ve reçineler olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılabilirler. Bu üç ana malzeme kombinasyonlarından kompozit balistik korucu sistemler elde edilir [30].



Şekil 2.2. Balistik koruyucu üretiminde kullanılan ana malzemeler [30]

2.2.1. Sert koruyucu malzemeler

Balistik koruma sistemlerinde, metaller, seramikler ve camlar Tablo 2.3’de görülen sert koruyucu malzemeleri oluşturmaktadırlar.



Şekil 2.3. Sert koruyucu malzemeler [30]

2.2.1.1. Metaller

Zırh çelikleri balistik koruma sistemlerinde genel olarak gövde yapısını oluşturan yapı olarak kullanılmaktadır. MIL-A-12560 en popüler zırh çeliği kalitesi olup; RHA olarak bilinir. MIL-A-46100 çelik kalitesi ise, MIL-A-12560’a göre daha yüksek sertliğe sahiptir ve uygulanan ısıl işlem şartlarının değiştirilmesiyle özelliklerde belirgin değişiklikler elde edilmektedir [31-32]. Zırhlı araç yapımında kullanılan zırh

çelikleri; balistik darbelere karşı yüksek direnç, üretim işlemlerinde kolaylık (ör.; kesme, kaynak yapma, şekillendirme) ve iyi bir bakım davranışı çerçevesinde uzun kullanım ömrü (ör.; yüksek yorulma direnci) gibi temel gereksinimleri karşılayacak mekanik özelliklere sahip olacak şekilde üretilmektedir. Genel olarak incelendiğinde kinetik enerjili cisimlerin çarpma etkilerine karşı etkili bir koruma sağlayabilmeleri için yüksek sertliğe ve mukavemete sahiptirler. Diğer yandan meydana gelen darbenin olumsuz etkisini bertaraf içinse, tokluk özellikleri geliştirilmiştir. Böylece zırh çeliklerinde bir yandan yüksek sertliğe ve mukavemete gereksinim duyulurken, aynı zamanda tersinir bir özellik olan toklukta muhafaza edilebilmektedir [33].

Alüminyum alaşımları hafiflikleri nedeniyle zırh çeliğe alternatif olarak oldukça fazla kabul görmüştür. Ancak sertliğinin ve dayanımının düşük olması nedeniyle belirli düzeyde balistik koruma sağlayabilmek için çelik zırhtan daha kalın olmalıdır, bu sebeple daha fazla hacim gerektirir. Ayrıca alüminyum alaşımlarının kaynak edilmesini güçleştiren özellikleri vardır. Kullanılacak kaynak yöntemi, alüminyumun bu özellikleri ile uyumlu olmalıdır. Bu yönleri maliyetlerini yükseltmektedir. Zırhlı muharebe araçlarında günümüzde en fazla kullanılan alüminyum alaşımları 5083 ve 7039'dur. Alüminyum zırh alaşımların balistik özellikleri şekil değiştirme sertleştirilmesi ile geliştirilmektedir [4-34].

Titanyum alaşımları ise genel olarak gövde yapısı yerine, kompozit zırh sistemlerinde tabaka malzemesi olarak kullanılmaktadır. Düşük yoğunluğu ve yüksek mukavemetleri ile bir zırh sistemi entegrasyonunda toplam performans değerlendirildiğinde büyük balistik avantajlar sunabilmektedir. Ancak günümüze kadar algılanan yüksek titanyum maliyeti askeri kara taşıtlarında daha fazla uygulama yapılmasının önüne geçmiştir. Son yıllarda ise yeni işleme teknolojileri ile maliyetler düşürülmeye başlandığından yüksek maliyet gerektiren kompozit ve seramik zırhlara karşı titanyum alaşımlarına yönelimi artırmaya başlamıştır [35].

2.2.1.2. Seramikler

Seramikler kompozit zırh sistemlerinde düşük yoğunluk, yüksek sertlikleri nedeniyle yoğun olarak kullanılmaktadırlar. Kompozit zırh sistemlerinde en üst katman olarak kullanılan seramik tabaka, sertliği sayesinde merminin aşınmasını ve parçalanması

sağlamaktadır. Kırılan seramik parçalarını tutmak ve merminin kinetik enerjisini sönmölemek için ise seramik tabakanın arkasına sünek bir plaka ekleme gereksinimi daha olmaktadır. Bu plakanın malzemesi metal olabileceği gibi, fiber takviyeli kompozitler de tercih edilmektedir. Bu şekilde hazırlanmış zırh sistemlerinde zırh delinse bile merminin etkisinin önemli azaldığı görölmektedir [36].

Seramik kompozit zırh sistemlerinde yaygın olarak kullanılan seramik türleri; alüminyum oksit (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC) ve bor karbür (B_4C)'dür. Tüm seramik malzemeler arasında Al_2O_3 daha ucuz olup yüksek sertlik ve kırılma direncine sahiptir [36]. Al_2O_3 seramikler performans ve yönünden vücut koruyucuları için en uygun seramik türü olarak ön plana çıkmaktadır [29].

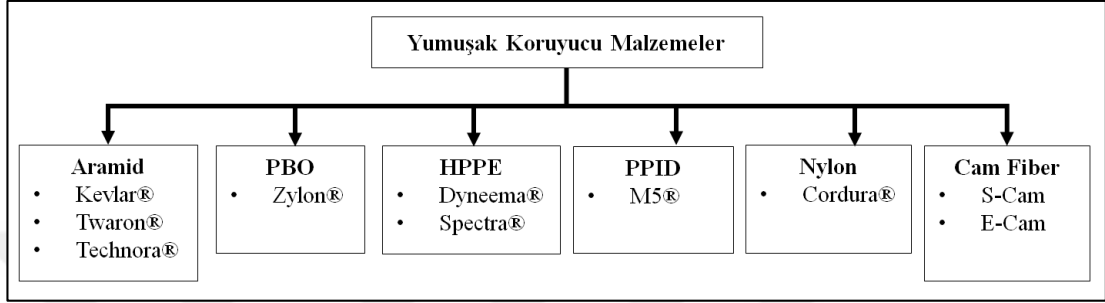
Literatürde yer alan birçok çalışmaya rağmen henüz ideal bir zırhın nasıl olması gerektiğine dair bir kanıya varılmamıştır. Seramik plakanın kalınlığı ve şekli, destek plakasının malzemesi, kalınlığı ya da kombinasyonu gibi konular üzerine çalışmalar hızla türetilmektedir [36].

2.2.1.3. Camlar

Sert koruyucu malzemelerin diğer bir çeşidi de cam ve polikarbonat kombinasyonlarıdır. Kurşungeçirmez ve bombalara karşı dirençli olan bu camlar ilk bakışta normal camlardan ayırt edilemezler. Her ikisi de şeffaf ve aynı görüş özelliklerine sahiptirler. Sıradan camlar en ufak bir darbede kırılabilirken kurşungeçirmez camlar bir yada bir kaç kurşuna dayanabilecek sağlamlıktadırlar. Sıradan cam tabakalar arasına polikarbon malzeme yerleştirilerek yapılan laminasyonlarla kurşungeçirmez zırh camları elde edilmektedir. Polikarbon sert ve sağlam bir plastiktir. Zırh camı üretiminde 4-6 mm kalınlıktaki camlar ve 6-8 mm kalınlıkta polikarbonat plakalar kullanılmaktadır. Polikarbonat ve cam laminasyonunu sağlayan en uygun yapıştırıcı ve saydamlık özelliğini sağlayan reçinenin HE 1908 olduğu bilinmektedir. Farklı koruma seviyelerinde balistik koruyucu cam üretebilmek için, camlar ve polikarbonatlar farklı kombinasyonlarda reçineyle birleştirilmektedir. Tek yönden kurşun geçiren cam yapmak için polikarbonat levha kullanılır. Polikarbonat levhanın olduğu taraf kurşun geçirmektedir [37].

2.2.2. Yumuşak koruyucu malzemeler

Zırh tasarımında en çok tercih edilen yüksek performanslı lif türleri; aramid, HPPE, cam lifler ve son yıllarda zırh tasarımında kullanımları artan polybenzobisoxazole (PBO) ve polypyridobisimidazole (PPID) lifleridir [38]. Tablo 2.4’de yumuşak koruyucu malzemeler görülmektedir.



Şekil 2.4. Yumuşak koruyucu malzemeler [38]

2.2.2.1. Aramid lifler

Aramidler yapı ve özelliklerine göre meta-aramid ve para-aramid olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Meta-Aramidler ısıya karşı yüksek dirençleri, olağan oksijen seviyelerinde erimemeleri ve alev almamaları sebebiyle koruyucu giysiler, ısı ve elektrik yalıtım malzemeleri gibi alanlarda kullanılırlar. Aramid kumaşların balistik uygulamalarda kullanılan türleri ise para-aramid fiberlerdir. Bu fiberlerden üretilen kumaşların en bilinen türleri ise Kevlar®, Twaron® ve Technora®’dır [39].

Para-aramid lifleri, yüksek modülleri ve yüksek sıcaklığa dayanım özellikleri nedeniyle balistik koruma malzemelerinde sıkça kullanılmaktadırlar. Aramid lifler merminin kinetik enerjisini enine ve boyuna dalga yayılması ve sürtünme enerjisine dönüştürerek sönmeler. Darbe enerjisinin %50’ye yakını dalga yayma özellikleri ile sönmektedirler. Darbe yayılma hızı lif modülünün karekökü ile doğru ve lif öz kütlesinin karekökü ile ters orantılıdır. Bu nedenle yüksek modüllü para-aramid lifleri balistik kullanım açısından çok uygundur. Bununla birlikte yüksek dalga yayılma hızları sağlayan çok yüksek bir modül, tek başına yeterli olmamaktadır. Örneğin, karbon liflerinin kırılma hızı, balistik kumaşlarda kullanımlarını sınırlandırmaktadır. Böylece liflerin darbe etkisi ile deformasyonu ve uzaması da büyük önem taşımaktadır. Kurşun penetrasyonundan önce ve darbe etkisiyle liflerin

ve/veya kumaş yapısının maksimum uzamasından sonra, merminin kumaş/mermi ara yüzündeki sürtünme kuvvetlerinin üzerinden gelebilmesi ilave bir enerji kaybı gerekmektedir. Bu nedenle sürtünme kuvveti de balistik korumada önemli bir faktördür ve bu sürtünme sebebiyle darbe bölgesinde büyük bir ısı açığa çıkmaktadır. Diğer polimerlere göre para-aramidlerin termal dirençleri oldukça yüksek olduğundan kullanımları daha uygundur [40]. Para-aramid kumaşların genel özellikleri aşağıda Tablo 2.1’ de özetlenmektedir.

Tablo 2.1. Para-aramid liflerin genel özellikleri [41]

Para-Aramid	Avantaj	Dezavantaj
	<ul style="list-style-type: none"> • Düşük yoğunluk • Yüksek esneklik modülü • Yüksek çekme mukavemeti • Yüksek darbe mukavemeti • Yüksek yorulma mukavemeti • Yüksek sürtünme mukavemeti • Yüksek kimyasal dayanıklılık • Düşük kopma uzaması • Düşük ısı genleşme • Ateşe dayanıklılık (Erime noktası yok, 500°C de bozulma başlar) • Yalıtkanlık 	<ul style="list-style-type: none"> • Morötesi ışınlar karşı hassasiyet • Lif veya kumaş halindeyken katlama, büzme gibi etkilerle zarar görebilmesi ve ham ürünün depolama zorluğu • Kesme ve işleme zorluğu • Bünyesine nem almaya meyilli olması • Tuzlara ve asitlere karşı hassasiyet • Düşük basma mukavemeti

2.2.2.2. HPPE lifler

HPPE’ler düşük yoğunluklarıyla (ortalama 0,97 g/cm³) zırh sanayinde kullanılan en hafif malzemelerdir. Piyasada en bilinen türleri Spectra® ve Dyneema®’dır [40]. Dyneema ağırlık bazında çelikten 15 kat daha güçlü, aramidden %40 daha güçlüdür ve suda yüzmeye özelliği olduğu bilinmektedir. Bu aşırı güç ve hafiflik kombinasyonu, geniş bir uygulama yelpazesine uygun olmasını sağlamaktadır, ürün bu özellikleri nedeniyle zırh uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir [42].

HPPE lifleri çok yüksek mukavemete ve elastisite modülüne sahiptir. Polietilenin esnek yapısından darbe dayanımı, mukavemeti ve yorulma dayanımı oldukça yüksektir. Aramid ve karbon lifleri ile karşılaştırıldığında üç lifin de darbe dayanımı ve aşınma dayanımının birbirlerine yakın, karbon ve HPPE liflerinin kopma mukavemetleri arasında çok az fark olduğu ve aramid liflerinin kopma mukavemetinin

bu liflere göre daha düşük olduğu belirtilmektedir. HPPE liflerinin yoğunluğunun hem karbon hem de aramid liflerinden çok daha az olmasına rağmen, yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı aramid ve karbon lifleri ile kıyaslandığında oldukça düşüktür [43].

2.2.2.3. Cam lifler

Yüksek dayanımları, kolay işlenebilirlikleri ve düşük yoğunlukları sebebiyle askeri uygulamalarda tercih edilen cam lifleri E (Electrical)-cam ve S (Strength)-camdır. S-camın maliyeti E-cam'a göre daha yüksektir ancak daha yüksek oranda çekme-yorulma dayanımına, düşük yoğunluğa ve neme karşı daha yüksek dirence sahip olması gibi nedenlerle balistik uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. S-cam yüksek oranda yorulma dayanımına ve neme karşı yüksek direnci sahiptir ancak sürünme oranı düşüktür [44].

2.2.2.4. PBO lifler

PBO (Polybenzobisoxazole) lifleri 1980'li yıllarda Amerika Hava Kuvvetlerinin aramid fiberlerden daha güçlü bir malzeme üretme hedefleri sonucunda ortaya çıkmıştır [45]. Piyasada Toyobo firmasının ticari ismi olan Zylon® ismiyle bilinmektedir. Aramid elyaflardan (Kevlar®, Nomex®) neredeyse iki kat daha güçlüdür ve çeliğe göre yaklaşık 10 kat daha güçlüdür. Ayrıca aramidten 100 °C daha yüksek ayrışma sıcaklığına sahiptir ve yüksek sürekli yükler altında çok az kayma gösterir [46].

PBO lifleri rijit polimer yapısından gelen üstün mukavemet, yanma ve alev dayanımı sayesinde teknik tekstillerin neredeyse tüm alanlarında kullanılabilirler. Balistik, alev, yüksek sıcaklık, çarpma, darbe, patlama vb. sıra dışı durumlarda başarılı bir koruma yeteneğine sahiptirler. Bu lifler güneş ışınları ve neme karşı fazla hassas olduğundan liflerin bozunmasını engellemek ve kullanım ömrünü uzatmak için liflerin kuru ve ışıksız ortam şartlarında depolanması, uygulama esnasında ortam şartlarının özenle seçilmesi ya da koruyucu bir tabaka ile korunması gerekmektedir. Liflerin bu hassasiyetinin azaltılması ya da giderilmesini hedefleyen çalışmalar hala devam ettiğinden, PBO liflerinin üstün özellikleri ile gelecekte çok daha geniş bir kullanıma sahip olacağı düşünülmektedir [47].

2.2.2.5. PPID lifler

Yeni bir yüksek performanslı fiber olan PPID Akzo Nobel tarafından geliştirilmiştir, firma ürünün ticari ismini M5® olarak belirlemiştir. Güçlü moleküller arası hidrojen bağ yapısına sahip olan ürün PPO'ya oranla daha gelişmiş basınç mukavemetine sahiptir. PPID lifleri PBO lifleri gibi yüksek çekme gerilmesi, yüksek elastisite modülü ve yüksek elektriksel iletkenliğe sahip lif grubudur. PPID liflerinin üretim teknolojileri liflerin dayanım arttırmak ve kullanım alanlarını yaygınlaştırmak için geliştirilmeye devam etmektedir [48].

2.2.2.6. Nylon lifler

Nylon lifleri polyamid esaslı malzemelerdir ve balistik koruma amaçlı olarak kullanılan ilk liflerdendir. Polyamid lifleri şarapnellere karşı koruma amaçlı olarak çok katlı olarak kullanılmışlardır. Ancak bunlar sadece düşük hızdaki mermi ve şarapnellere karşı koruma sağlayabilmekteydiler. İstenilen koruma seviyelerini sağlayabilmeleri için çok sayıda katman kullanılması gerektiğinden ağır olmaktadır. Ayrıca naylonun ıslanmaya karşı hassas olması ve bu nedenle dayanımında zafiyetler oluşması sebebiyle balistik özellikleri azalmaktaydı [49].

Günümüzde Cordura® markası ile piyasaya sürülen ve Nylon 66 polyamid liflerden üretilen kumaşlar balistik özellikleri yanında gelişmiş yırtılma, aşınma direnci ve uzun ömürlü özelliklerine sahiptir [50].

2.2.3. Yumuşak koruyucu malzemelerin karşılaştırılması

Yumuşak koruyucu malzeme grupları farklı polimer ve moleküler arası bağ yapılarına sahiptirler. Bu sebeple mekanik ve fiziksel özellikleri birbirinden farklıdır. Tablo 2.2'de kumaş türleri ve mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmektedir, tablonun en alt kısmına referans olması amacıyla metal malzemenin de özellikleri eklenmiştir. Yumuşak koruyucu malzemeler içerisinde en hafif grubu HPPE'ler en ağır grubu ise cam lifler oluşturmaktadır. Ağırlık yanında cam lifler bu malzeme grupları içerisinde en zayıf balistik özelliklere sahip olsalar da düşük maliyetleri nedeniyle balistik uygulamalarda tercih edilmektedirler.

Tablo 2.2. Zırh tasarımında kullanılan fiberlerin karşılaştırılması [29-38-41]

Malzeme	Fiber	Üretici Firma	Yoğunluk (g/cm ³)	Kopma Uzaması (%)	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)
Cam	S-cam	O.Corning	2,48	5,7	90	4600
	E-cam	O.Corning	2,62	4,6	80	3450
Aramid	Technora	Tejin	1,39	4,4	70	3000
	Twaron	Tejin	1,45	2,0	121	3100
	Kevlar 29	Dupont	1,44	4,2	70	2965
	Kevlar 49	Dupont	1,44	3,5	96	3390
	Kevlar 129	Dupont	1,44	2,6	113	2965
Nylon	Nylon 6.6		1,14	19		2930
HPPE	Spectra 900	Honeywell	0,97	2,8	73	2400
	Spectra 1000	Honeywell	0,97	2,8	103	2830
	Spectra 2000	Honeywell	0,97	3,0	124	3340
	Dyneema	DSM	0,97	3,5	87	2600
PBO	Zylon AS	Toyobo	1,54	3,5	180	5800
	Zylon HM	Toyobo	1,56	2,5	270	5800
PPID	M5 (2001)	A.Nobel		1,4	271	3960
	M5(Final)	A.Nobel	1,70	2,5	450	9500
Metal	RHA		7,9	Min. 9	180	850-1800

2.2.4. Balistik koruyucularda kullanılan reçine malzemeleri

Matris katılaştığında uygulandığı takviye malzemesini belli bir doğrultu tutmasını sağlayan ve dayanımını artıran dolgu malzemesine verilen isimdir. Kompozit yapılarda matris malzemelerinin birden çok görevi olmakla birlikte en önemli görevi yapısal performansı artırmasıdır. Bunun yanında kompozit yapının iyi bir yüzey kalitesine sahip olmasına imkan verir ve fiberlerin çevresel etkilerden korunması sağlar [48].

Kompozit tabaka üretimlerinde kullanılan polimer esaslı matris malzemeleri moleküller arası bağ kuvvetine ve nihai yapı durumuna göre termoset ve termoplastik olarak iki gruba ayrılırlar. Termoplastiklerin işlenebilirlikleri ve darbe dayanımları termosetlere göre daha iyi olmakla beraber ısı ve kimyasal dayanımları termosetlere

göre daha kötüdür. Bu yüzden termoplastikler zırh uygulamalarında genelde tercih edilmezler. Dolayısıyla termosetlerden olan epoksi, polyester, vinil ester ve fenolik reçineler zırh dereceli kompozitler için birincil derece reçine malzemeleridir. Fenolik reçineler yangın, duman ve zehirlilik kontrolü (FST) gerektiren uygulamalarda tercih edilirler. Bazı zırh uygulamalarında üç reçineden biri balistik zırh koruma amaçlı kullanılırken fenolik bir arka plaka FST direncini sağlar [48]. Tablo 2.3’de balistik koruyucularda kullanılan reçine malzemelerinin avantaj ve dezavantajları verilmektedir.

Tablo 2.3. Zırh tasarımında kullanılan reçine malzemeleri [39]

Malzeme	Avantaj	Dezavantaj
Polyester	<ul style="list-style-type: none"> • Düşük maliyet • Kolay işlenebilirlik • İyi kimyasal direnç • İyi nem direnci • Hızlı kürlenme • Oda sıcaklığında kürlenme 	<ul style="list-style-type: none"> • Alev alabilir • Yanma sırasında zehirli duman salınımı
Vinil Ester	<ul style="list-style-type: none"> • Düşük maliyet • Kolay işlenebilirlik • Düşük viskozite • İyi mekanik özellikler • Nem direnci • Oda sıcaklığında kürlenme 	<ul style="list-style-type: none"> • Alev alabilir • Yanma sırasında duman salınımı
Epoksi	<ul style="list-style-type: none"> • Mükemmel mekanik özellikler(vinil estere kıyasla) • İyi kimyasal direnç • İyi ısı direnç • İyi yapışma özelliği • İyi nem direnci • Çeşitli bileşimleri mevcut • İyi kırılma tokluğu 	<ul style="list-style-type: none"> • Yüksek maliyet • İyi mekanik özellikleri sağlayabilmesi için yüksek kürlenme sıcaklıklarına ihtiyaçları vardır.

2.2.5. Balistik koruyucularda kullanılan reçine malzemelerinin karşılaştırılması

Epoksiler tüm reçineler arasında en iyi yapısal ve mekanik özellikleri sağlar, çeşitli malzemelere yapışma özelliklerine sahiptirler fakat yüksek bir kaliteye ulaşmak için yüksek ısı işlem sıcaklıklarına ihtiyaç duyarlar. Polyesterler ve vinil esterler ise düşük maliyetli, kolayca işlenen ortalama mekanik özelliklerin üstünde ancak düşük basınç dayanımı sahip malzemelerdir. Bu eksikliğin bir sonucu olarak normal olarak yapısal

olmayan uygulamalarda tercih edilirler [49]. Tablo 2.4’de balistik koruyucularda kullanılan malzemelerin karşılaştırılması verilmektedir [29].

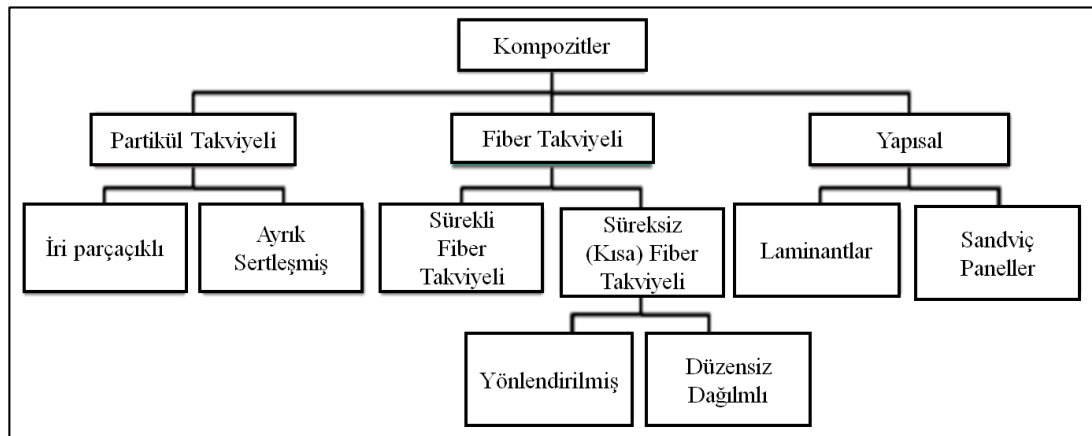
Tablo 2.4. Zırh tasarımında kullanılan reçine malzemelerinin karşılaştırılması [29]

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Kopma Uzaması (%)	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)
Epoksi	1.11-1.25	3-7	7	70-95
Polyester	1.04-1.46	42	3.4	41-90
F.Reçine	1.24-1.32	1.5-2.0	4.8	34-62

2.3. Kompozit Malzemeler ve Kompozit Zırh Sistemleri

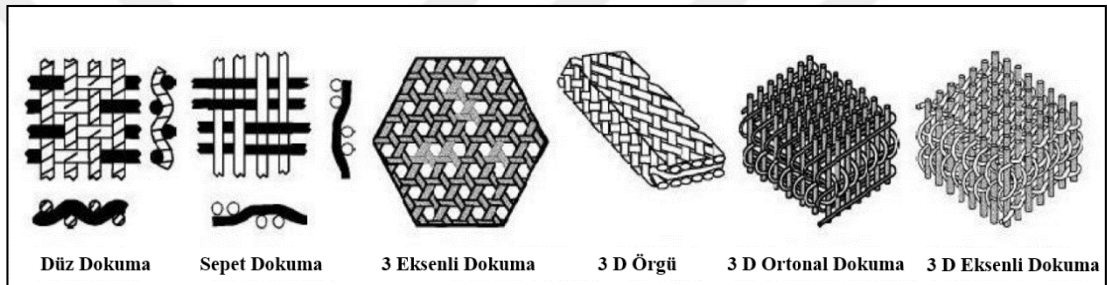
Kompozit malzeme, en az iki farklı malzemenin makro seviyede (birbiri içerisinde çözünmeyecek şekilde) birleştirilmesiyle oluşturulan yeni yapıdır. Buradaki amaç, bileşenlerin hiçbirinde tek başına mevcut olmayan bir özelliğin elde edilmesidir. Diğer bir deyişle, amaçlanan doğrultuda bileşenlerinden daha üstün özelliklere sahip bir malzeme üretilmesi hedeflenmektedir [51].

Kompozit malzemeler araç içine ve dışına eklenen ilave zırh katmanlarında sıklıkla kullanılmaktadırlar. Araç dışında kullanılan kompozitler Şekil 2.5’de verilen kompozit sınıflandırmada yapısal grubun altında görülen laminant ve sandviç panellerden oluşmaktadır. Laminant paneller genel olarak partikül ve fiber takviyeli malzemelerin polimer matris sistemleriyle birleştirilmeleriyle (epoksi, vinil ester ve polyester) oluşturulmuş tabakalardır. Sandviç paneller ise seramikler, metaller ve kompozit laminantların montajlı veya yapıştırma yoluyla birleştirilmeleriyle oluşmaktadır.



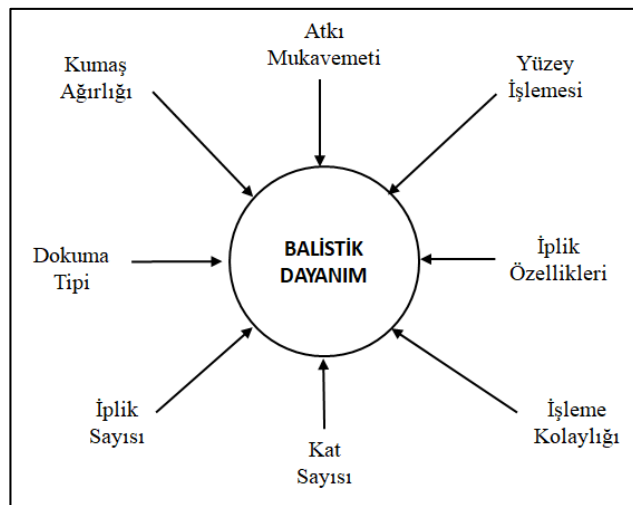
Şekil 2.5. Kompozitlerin sınıflandırılması [52]

Tezin konusu olan parçacık tutucu özelliği sağlamaya yönelik geliştirilen spall astar tabakaları, yapısal grup altındaki laminant malzeme sınıfına girmektedirler. Bu laminantların üretiminde ise sürekli yüksek mukavemetli fiber takviyeleri ile oluşturulan dokuma veya örgü kumaşlar kullanılmaktadır. Örgü kumaşlar dokuma kumaşlara göre daha dayanıklıdır ancak üretim yöntemleri zorluğu nedeniyle maliyetleri yüksektir, bu sebeple askeri uygulamalarda çoğunlukla balistik direnci yüksek olan dokuma kumaşlar tercih edilmektedir. Farklı örgü ve dokuma türleriyle üretilmiş kumaşlar Şekil 2.6’da gösterilmektedir [53]. Dokuma tiplerinin de darbelere karşı enerji sönümleme özelliğine etkileri bulunmaktadır. Örneğin sepet dokuma düz dokumaya göre %10 daha fazla enerji sönümlemesi sağlamaktadır [54].



Şekil 2.6. Kumaş dokuma tipleri [53]

Balistik kompozit zırh tabakalarının üretiminde kullanılan kumaşların iplik mukavemeti, örgü ve dokuma özelliklerinin yanında diğer özelliklerinin de balistik yapıya etkileri vardır. Balistik performansı etkileyen bu özellikler Şekil 2.7’de gösterilmektedir [30].



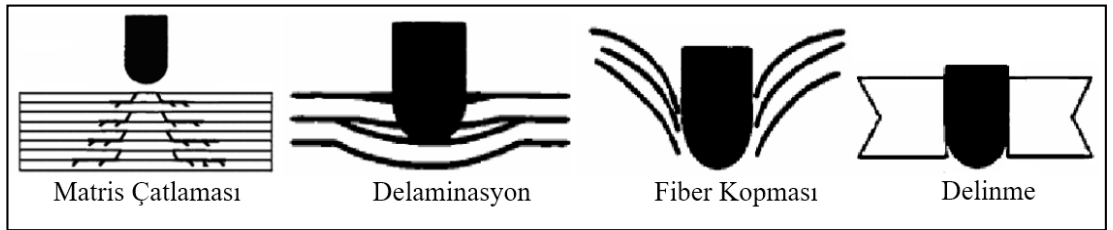
Şekil 2.7. Kumaşlarda balistik dayanım faktörleri [30]

2.4. Balistik Darbe Sonucu Kompozit Malzemelerde Hasar Mekanizması

Balistik bilimi mermi çekirdeğinin silah namlusunun içinde ve dışında geçirdiği tüm evreleri (basınç, yiv-set etkisi, izlediği yol, güç, vuruş, penetrasyon) detaylıca incelemektedir. Balistik inceleme iç balistik ve dış balistik olarak iki ana gruba ayrılır, mermi çekirdeğinin hedefe çarptıktan sonra, duruncaya kadar delme gücü, enerjisini çarptığı cisme iletmesi gibi etkiler dış balistik kapsamındaki terminal balistiğin konusudur [55].

Kinetik enerjili mühimmatlara karşı balistik performansı etkileyen temel faktörler; zırhın malzeme özelliklerine (elastisite modülü, alansal yoğunluk, kayma modülü, poisson oranı, sertlik, basma mukavemeti), yapısına (kalınlık, tabaka dizisi) ve merminin fiziksel özelliklerine (ağırlık, kalibre, uç geometrisi, sertlik, hız, vuruş açısı, yoğunluğuna) bağlıdır [56-57].

Polimer matrisli kompozit malzemeler genel olarak kırılgen yapıdadırlar, enerjiyi sadece elastik defarmonyon ve bazı hasar mekanizmaları sayesinde sönümlerler. Bu hasar mekanizmaları Şekil 2.8’de görüldüğü gibi; matris kırılması, delaminasyon, fiber kopması ve delinme (perforasyon) olarak ifade edilmektedir. Enerji sönümlemede plastik defarmonyon katkısı ise hemen hemen hiç yoktur [58].

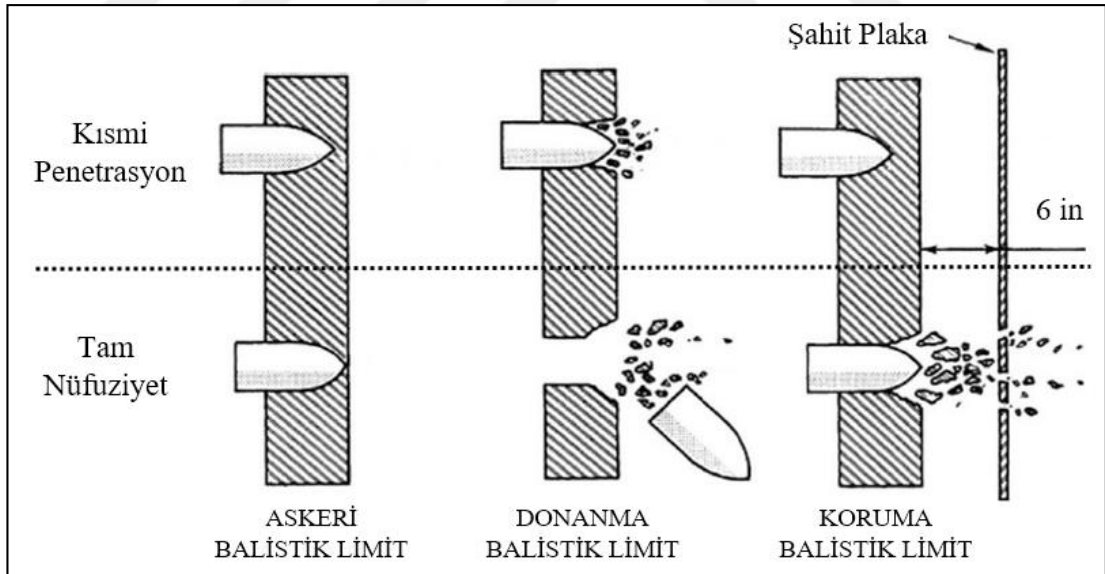


Şekil 2.8. Tabakalı kompozitlerde balistik darbe hasar mekanizmaları [59]

Kesme delinmesi ve matris çatlaması hasar mekanizma başlangıcının ilk modunu oluşturur ve delaminasyon başlangıcı için gerekli bir faktördür. Matris çatlamaları çapraz kesme çatlaması ve eğilme çatlaması şeklinde 2 tip olup, her ikisi de delaminasyon için başlangıç mekanizmasıdır [60]. Kompozit dokuma tabakalarda, kesme delinmesinin ardından mermi fiberleri zorlamaya başlar, fiberlerin kopma dayanımı aşana kadar zorlanması sonucunda fiber kopması ve ardından da delaminasyon hasar modu ortaya çıkar [61]. Merminin kinetik enerjisinin yayılma hızı,

lifler arasında bağlantı noktalarının sayısına bağlıdır. Merminin darbe anından itibaren, kompozit yapının balistik dayanım sınırına kadar enerji transferi gerçekleşir. Mermi hızı balistik sınıra ulaştığında kompozit yapının enerji sönmleme yeteneğinin ortadan kalkması ile delinme oluşur [62].

Balistik limit hızı merminin hedefe tamamen nüfuz edemediği hız ve bu hızın altındaki hızlar olarak tanımlanmıştır. Balistik limitin altındaki çarpmalar için, merminin çarpma enerjisi doğrudan zırhın sönmlediği enerjiye eşittir. Merminin zırhı delip geçtiği durumlarda sönmlenen enerji miktarı ise merminin çarpma enerjisinin zırhı delip geçtiği an sahip olduğu enerji çıkartılarak bulunur [63]. Şekil 2.9’da balistik limit kavramı üzerine farklı yaklaşımlarla zırhta delinme olayının tanımlanmasındaki farklı kriterler gösterilmiştir. Merminin hedefi delmemesi veya hedef üzerinde kalması durumunda, şahit plakada herhangi bir delinme gerçekleşmemiş ise bu durum hedefte kısmi penetrasyon meydana gelmiş olarak değerlendirilmektedir. Ancak merminin veya hedeften kopan bir parçanın şahit plakayı delmesi durumunda atış tam nüfuziyetli (tam penetrasyon veya perforasyon) bir atış olarak değerlendirilmektedir [64].



Şekil 2.9. Balistik limit kavramı üzerine farklı yaklaşımlar [64]

Balistik darbe sonucu gerçekleşen enerji transferi aşağıdaki formülle hesaplanır [63];

E = Zırhın sönmlediği enerji

m = Merminin kütlesi

V_i = Merminin çarpma hızı

V_r =Merminin zırhı terk ettiği andaki hızı

V_{bl} =Balistik limit hızı

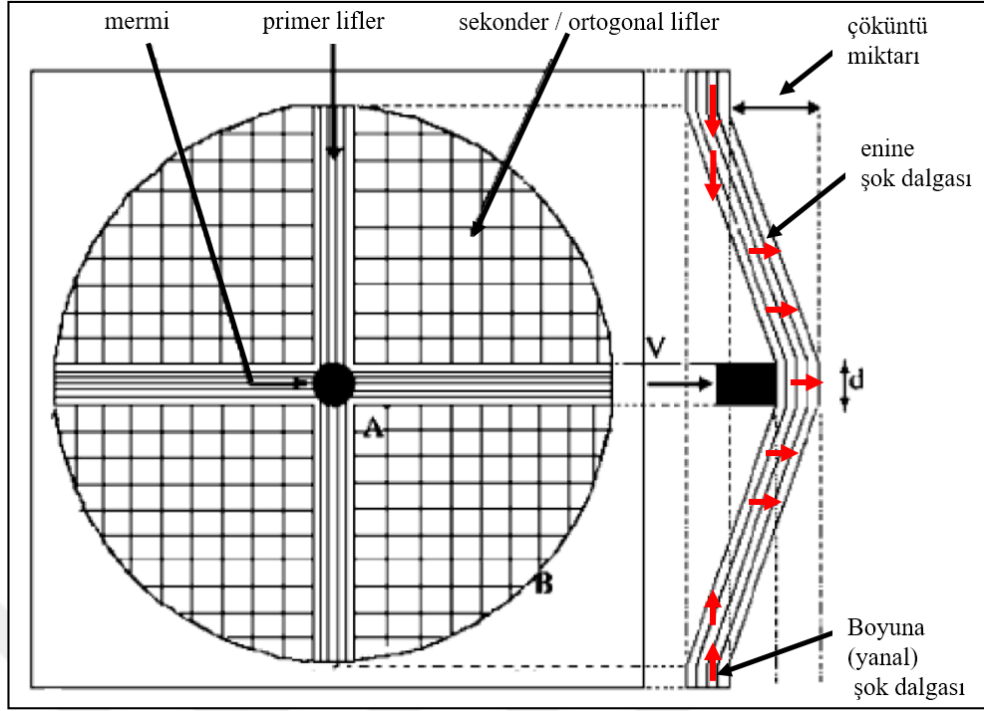
Balistik limitin üzerindeki hızlar için sönmömlenen enerji;

$$E = \frac{1}{2} m (V_i^2 - V_r^2) \quad (2.1)$$

Balistik limitin altındaki hızlar için sönmömlenen enerji;

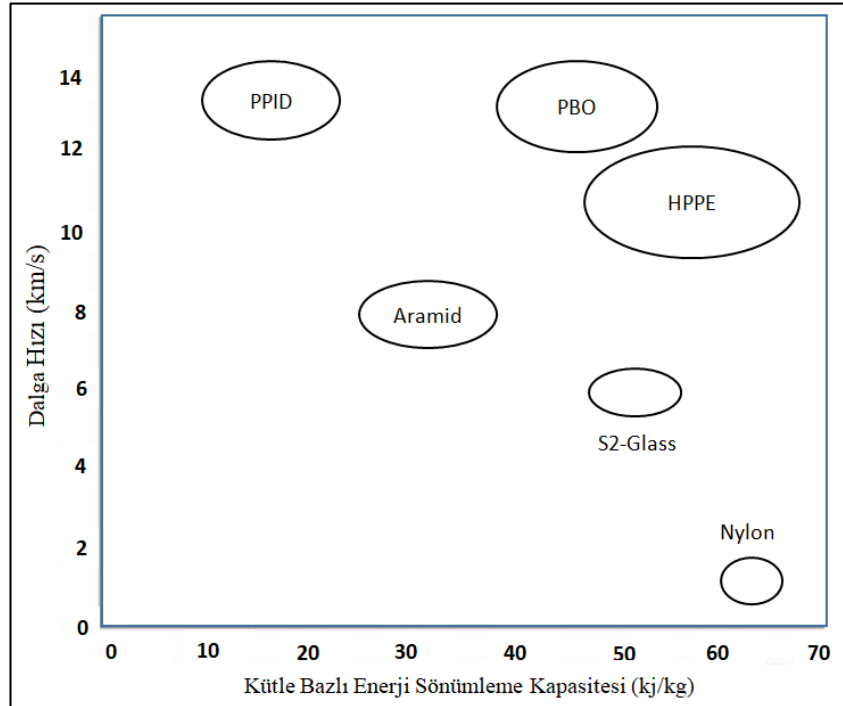
$$E = \frac{1}{2} m (V_{bl}^2) \quad (2.2)$$

Balistik koruyucuların görevi yüksek darbeleri hızların çarpma etkisini en aza indirmektir. Darbenin balistik koruyucu üzerinde oluşturduğu çöküntü miktarının düşük olması, korucunun darbe esnasındaki oluşan enerjiyi geniş alana yayabilme yeteneği ile ilişkilidir. Koruyucu malzemeyi oluşturulan liflerin özellikleri bu açıdan oldukça önemlidir. Merminin koruyu yüzeyine çarpması ile birlikte liflerden darbe noktasından Şekil 2.10'da görölen enine ve boyuna dalga yayılmaları görölmektedir. Boyuna çekme dalgası malzemenin ses hızında lif ekseni boyunca hareket etmektedir. Çekme dalgası darbe noktasından yayıldıkça, çarpan merminin hareket doğrultusunda eğilen materyal darbe noktasına doğru akmaktadır. Malzeme hızından daha düşük bir hızda yayılan bu enine yönde olan hareket ise enine dalga olarak adlandırılmaktadır. Çarpma anında darbe noktasından başlayan ve merminin hızına bağı olan ani şok dalgası meydana gelmektedir. Mermi, enerjisinin büyük bir bölümünü şekil değıştirme ve kinetik enerji olarak doğrudan temas liflere aktarır. Bu lifler primer lifler olarak adlandırılmaktadır. Şok dalgasının etkisiyle balistik koruyucu dokumanın yapısında yüksek çekme gerilmesine, şekil değıştirmeye ve hasara uğrayan primer lifler önemli miktarda enerjiyi sönmömlerler. Sekonder lifler ise mermi ile doğrudan temas etmeyen liflerdir. A ile gösterilen bölgelerde sekonder liflerdeki gerilme, primer liflerdeki gerilmeye yakın seviyededir. Sekonder liflerdeki gerilme şekil üzerinde B olarak gösterilen konuma doğru darbe noktasından uzaklaştıkça azalır [65].



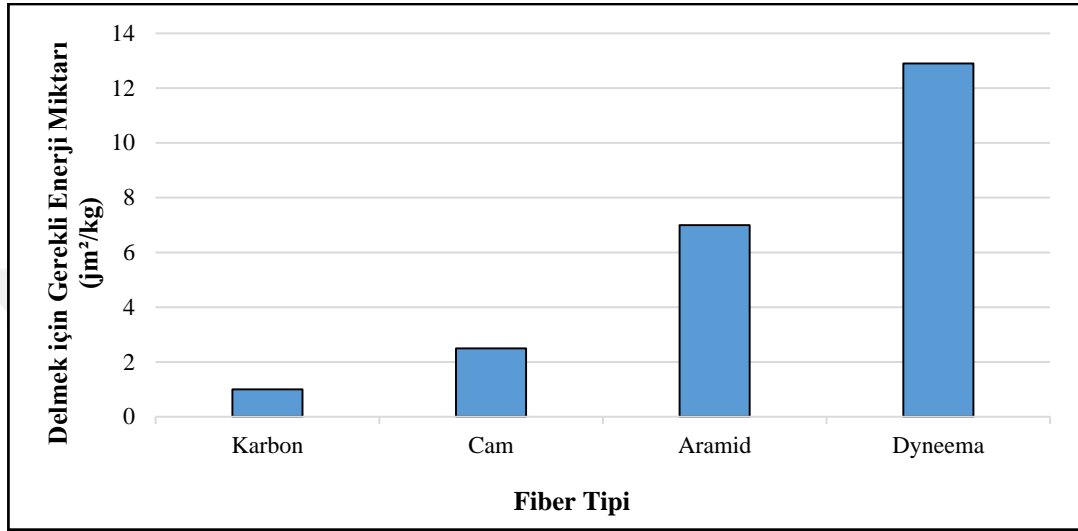
Şekil 2.10. Zırhta atıştan sonra meydana gelen çöküntü

Balistik korumada lifin enerji sönümleme yeteneği oldukça önemlidir. Şekil 2.11’de balistik amaçla kullanılan farklı lif cinslerinin dalga hızı-enerji sönümleme grafiği görülmektedir [66].



Şekil 2.11. Çeşitli liflerin dalga hızı - enerji sönümleme grafiği [66]

Şekil 2.12’de ise karbon, cam, aramid ve Dyneema® malzemelerinin balistik darbe dayanımları alansal ağırlıklarına göre karşılaştırmaktadır. Dyneema® düşük yoğunluğu ve yüksek dayanımı sayesinde karşılaştırmada en yüksek performansı göstermektedir. Tez kapsamında üretilen numunelerde benzer şekilde alansal ağırlık açısından karşılaştırılıp değerlendirilecektir.



Şekil 2.12. Bazı yumuşak koruma malzemelerin darbe dayanımları [29]

2.5. Balistik Koruma Testleri ve Standartları

Balistik koruma testleri ve standartları; zırh tasarımcısı, üreticisi ve alıcısı için temel öğelerdir. Hafif balistik malzemeler nispeten yeni olduğundan, bazı alanlarda hem test standartları hem de test yöntemleri hala gelişmektedir. Balistik test standartları ve test değerlendirme gereksinimlerinin başlıca nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir [67];

- Yeni ve daha yüksek performanslı balistik malzemeler elde etmek.
- Balistik liflerin, kumaşların ve dokunmamış keçe ve çapraz katlanmış malzemelerin kısa ve uzun vadeli davranışlarının daha iyi anlaşılmasını sağlamak.
- IED gibi yüksek güç ve daha öldürücü balistik tehditlere karşı önlemler alabilmek.
- İnsan organlarında balistik travmaların anlaşılmasını sağlamak.

Tablo 2.5’de balistik koruma testlerinde kullanılan çeşitli standartlar verilmiştir. Tez kapsamında üretilen numuneleri MIL-STD-662 F V50 ve STANAG 2920’ye uygun olarak test edilmiştir.

Tablo 2.5. Çeşitli balistik koruma için kullanılan standartlar

STANDART NO	STANDART ADI
MIL-STD-662 F V50	Ballistic Test ForArmor (Zırhlar İçin V50 Balistik Testi)
TS 13349	Askerî zırhlar - V50 balistik hız deneyi
STANAG 2920	Ballistic Test MethodForPersonalArmor (Kişisel Zırhlar İçin Balistik Test Metotları)
BS EN 1063:2000	Glass in building - Security Glazing - Testing and Classification of Resistance Against Bullet Attack(Cam / Plastik Kompozitlerin Sınıflandırılması için Test Metotları)
STANAG 4569	Protection Levels for Occupants of Logistic and Light Armored Vehicles (Lojistik ve Hafif Zırhlı Araçların Personelleri İçin Koruma Seviyeleri)
NIJ-STD-0101.06	BallisticResistance of Personal Body Armor (Kişisel Vücut Zırhlarının Balistik Dayanımları)
TS 11164	Balistik Koruyucu Yelek
TS 13348	Kompozit hafif zırhlar ve deneyler

2.5.1. MIL-STD-662-F V50 testi

Merminin zırhı geçemediği hız V0 olarak tanımlanır. Ancak V0 hızının ölçülmesi balistik testlerin değişkenlerinden dolayı (zırh, destek malzemeleri, mermi, gövde ve namlu) zordur. Bu nedenle V50 (balistik limit) olarak adlandırılan ikinci bir kavram geliştirilmiştir. Bu kavram merminin zırha dik konumda isabet ettirildiği durumda, hedefin %50 oranında delinme veya delinmeme olasılığını gösteren hız olarak tanımlanır. Bu durumda mermi V50 hızında ise zırhın delinme ihtimali %50'dir. V50'den yüksek hızlar malzemede tam delinme meydana getirirken, düşük hızlar ise malzemede kısmi delinme meydana getirir [68].

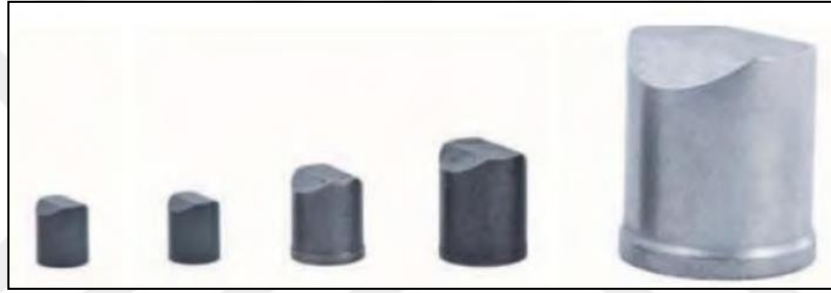
MIL-STD-662-F standardın amacı, küçük silah mermilerine karşı metalik, metalik olmayan ve kompozit zırhın balistik direncini belirlemek için prosedürler, ekipman, fiziksel koşullar ve terminoloji için genel kurallar sağlamaktır. Bu standartta belirtilen balistik test prosedürü, V50 balistik zırh sınırını belirler. Standartta göre ilk tur, zırha şartnamede istenen V50 değerinin minimum 75 ile 100 ft/s (23 ile 30 m/s) üzerinde çarpıcı hızla vurulur. İlk tur tam bir penetrasyon ile sonuçlanırsa, ikinci turun hızı birinci turun hızından 50 ile 100 ft/s azalır. Eğer penetrasyon olmazsa veya kısmi penetrasyon ile sonuçlanırsa, hız 50 ile 100 ft/s artırılır. Sonraki atışlarda, bir kısmi ve bir tam penetrasyon elde edilinceye kadar, hız, mümkün olduğu kadar arttırılır veya azaltılır. En az bir kısmi ve bir tam penetrasyon elde ettikten sonra, hız 50 ft/s'lik artışlarla arttırılır veya azaltılır. Sözleşmede belirtildiği üzere en yüksek kısmi ve en

düşük tam penetrasyonun eşit bir sayısına karşılık gelen hızların ortalaması alınarak V50'yi hesaplamak için yeterli kısmi ve tam penetrasyonlar elde edilene kadar atışlara devam edilir [69].

2.5.2. Stanag 2920 testi

Stanag 2920 standardı, NATO Standartlaştırma Anlaşması çerçevesinde geliştirilmiş olup personel zırh malzemeleri ve savaş giysileri için balistik test metodlarını açıklar.

Test sırasında Şekil 2.13'de gösterilen US-MIL-P-46593'te tanımlanan FSP serisinden biri seçilerek kullanılır. Tek çeşit mermi kullanılarak farklı tipteki zırhların birbiriyle karşılaştırılmasının yapılması mümkün olur [70].



Şekil 2.13. US-MIL-P-46593'te tanımlanan FSP'ler [70]

Bu standarda göre V_{50} balistik zırh sınırını belirlemek için, ilk mermiye zırhın V_{50} balistik hız sınırı değerine yakın hızla atış yapılır. İlk mermi zırh yüzeyinde tamamen delme oluşturursa, ikinci mermi ilk mermiye göre 30 m/s daha az hızlı olacak şekilde atılır. İlk mermi zırh yüzeyinde kısmi delme oluşturursa, ikinci mermi ilk mermiye göre 30 m/s daha fazla hızlı olacak şekilde atılmaktadır. Balistik zırhı delen ilk atışlar tamamlandıktan sonra, atışlar mermi hızları 15 m/s aşağı ya da yukarı büyüklükte olacak şekilde gerçekleştirilmektedir. V_{50} balistik sınır hızı elde etmek için standartta yer alan prosedüre göre ateş etmeye devam edilmektedir. Belirli bir sayıdaki atıştan sonra, V_{50} sonuçların 3 tanesi kısmi delinmenin gerçekleştiği diğer 3 tanesi ise tamamıyla delinmenin gerçekleştiği hızlardan olmak üzere altı hız değerinin ortalamasının alınmasıyla hesaplanır. Kısmi delinmenin ve tam delinmenin gerçekleştiği gruplarda tespit edilen en yüksek ve en düşük hız değerleri arasındaki farkın 40m/s'den fazla olmaması gerekir [70].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kompozit Tabaka Üretiminde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Deneysel çalışmada kullanılan hammadde özellikleri bu bölümde verilmektedir.

3.1.1. Aramid kumaş

Çalışmada aramid kumaş malzemesi olarak TEIJIN firmasının balistik uygulamalar için geliştirdiği, zırh sektöründe genellikle kask ve spall astar malzemesi olarak kullanılan Twaron® T 750/2 modeli tercih edilmiştir. Kumaşın özellikleri aşağıda verilmektedir. Ticari gizli nedenlerden dolayı kumaşa ait teknik detaylar verilememektedir.

- İplik tipi : 3360 dtex f2000
- Dokuma tipi : Düz ISO 7211/1
- Atkı ve çözgü sayısı : 67 adet/10 cm DIN EN 1049-2
- Alansal ağırlık : 460 ± 10 g/m² ISO 3801
- Kalınlık : $0,65 \pm 0,10$ mm ISO 5084



Şekil 3.1. Aramid kumaş numunesi

Malzeme piyasadan rulo halinde temin edilmektedir. Rulo genişliği 124 cm'dir. Numune tabaka üretim aşamasına hazırlığa yönelik olarak Şekil 3.1'de görüldüğü gibi 620x600 mm olacak şekilde kesildi.

3.1.2. Çelik tel örgü

Paslanmaz çelik tel örgüler endüstride temel olarak filtre ve süzgeç teli amaçla kullanılmakta olup, bunun yanı sıra ambalaj sanayi, gıda endüstri, elektronik ve bilgisayar ürünlerinde vb. birçok alanda kullanılmaktadır. Tez kapsamında üretilen tabakalarda iki farklı tipte düz örgü tipinde paslanmaz tel örgü kullanılmıştır.

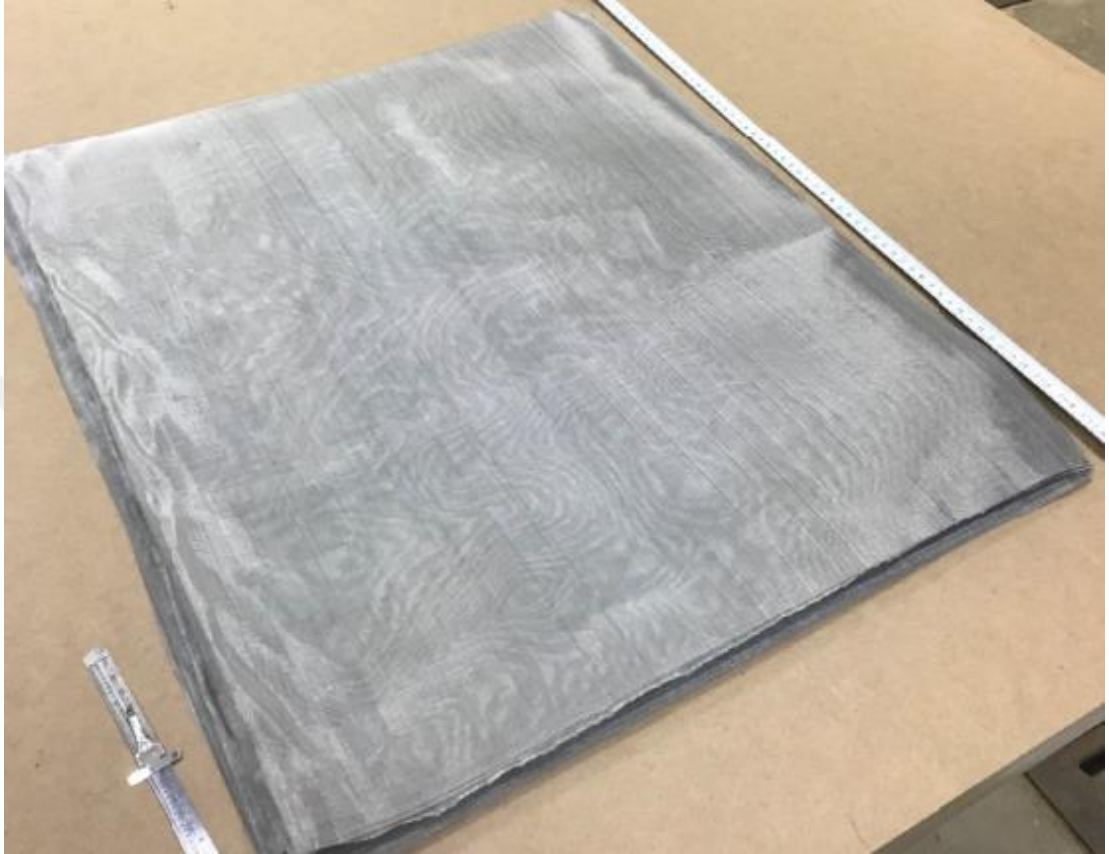
Piyasada bulunan paslanmaz çelik telleri AISI 304 ve AISI 316 kalitededir. AISI 304 kalite paslanmaz çeliğin temel çeşididir. 450 °C ısıya kadar yüksek oksidasyon mukavemeti sağlar. Mekaniksel direnç, sürtünme ve korozyon direncine dayanıklılığı çok iyidir. AISI 304 kalite paslanmaz filtre telin içeriğinde minimum %8 Nikel ve %18 Krom bulunması gerekmektedir. AISI 316 kalite paslanmaz çelik telinde ise minimum %10 Nikel ve %16 Krom bulunması gerekir. Ayrıca içeriğinde %2 ekstra Molibden içerir. Bu madde telin tuz, asit ve deniz suyuna karşı ekstra dayanıklı hale gelmesini sağlar [71]. Çelik örgü tellerin ölçü birimi mesh olarak bilinmektedir. Mesh başlı başına olarak bir ölçü birimini ifade eder. Mesh'in anlamı 2,54 cm'deki bir sıranın içinde bulunan delik adedidir. Kısacası 1 mesh 1" (inç)'dir [71].

3.1.2.1. Çelik tel örgü tip1

Numune üretiminde kullanılan iki farklı telden biri olan ve "tip 1" olarak adlandırılacak olan paslanmaz çelik tel örgünün özellikleri aşağıda verilmektedir.

- Malzeme : AISI 304
- Mesh : 40
- Tel kalınlığı : 0,25 mm
- Delik aralığı : 280 mikron
- Delik adedi : 576 cm²
- Açık alan : %44
- Alansal ağırlık : 460 ± 10 g/m² ISO 3801

Malzeme piyasadan rulo halinde temin edilmektedir. Rulo genişliği 100 cm'dir. Numune tabaka üretim aşamasına hazırlığa yönelik olarak Şekil 3.2'de görüldüğü gibi 600x500 mm olacak şekilde kesildi.



Şekil 3.2. Çelik tel örgü tip 1

3.1.2.2. Çelik tel örgü tip 2

Numune üretiminde kullanılan diğer ürün “tip 2” olarak adlandırılacak olan paslanmaz çelik tel örgünün özellikleri aşağıda verilmektedir.

- Malzeme : AISI 304
- Mesh : 150
- Tel kalınlığı : 0,063 mm
- Delik aralığı : 106 mikron
- Delik adedi : 3500 cm²
- Açık alan : %39
- Alansal ağırlık : 170 ± 10 g/m² ISO 3801

Şekil 3.3’de 600x500 mm olacak şekilde kesilen çelik tel örgü tip 2 numunesi görülmektedir. Bu çelik tel örgü mesh tipinden ve tel kalınlığından dolayı daha yumuşak, şekil alabilir, katlanabilir yapıdadır ve aramid kumaşa benzer davranış göstermektedir.



Şekil 3.3. Çelik tel örgü tip 2

3.1.3. Epoksi reçine ve sertleştirici

Çalışmada matris malzemesi olarak epoksi reçine sistemi tercih edildi. Epoksi reçine malzemesi olarak Şekil 3.4’de görülen Biresin CR82, sertleştirici olarak ise Biresin CH80-6 kullanıldı. Sertleştirici teknik özelliklerine göre %30 oranında kullanıldı. İki ürünün birleşiminin tam kürlenmesiyle elde edilen bazı özellikler aşağıda verilmektedir.

- Malzeme : %100 Biresin CR82, %30 Biresin CH80-6
- Yoğunluk : 1,17 gr/cm³
- Darbe dayanımı : 67 kJ/m²
- Kopma uzaması : %6,3
- Çekme gerilmesi : 83 MPa



Şekil 3.4. Epoksi reçine ve sertleştirici numuneleri

3.2. Kompozit Tabaka Konfigürasyonları

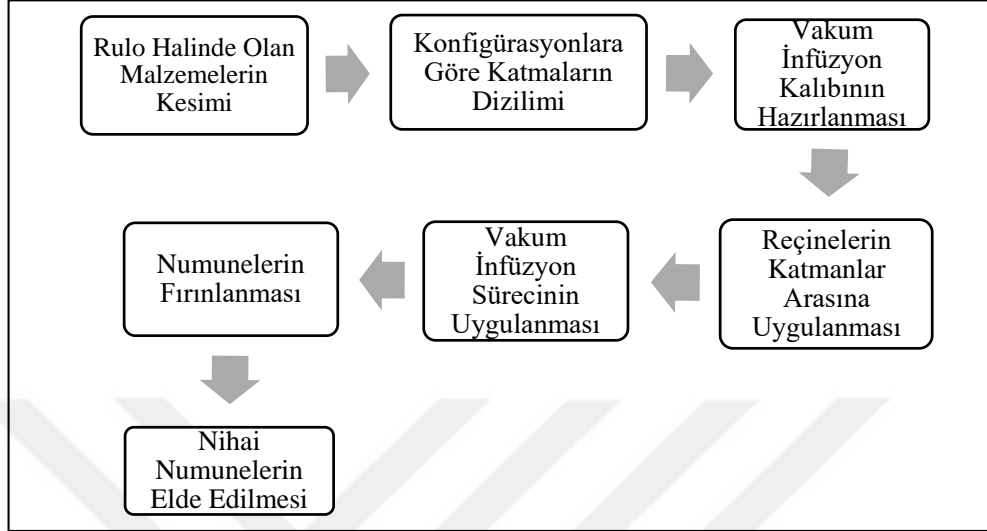
Çalışmada 4 farklı konfigürasyonda 620x600 mm boyutlarında plaka üretimi gerçekleştirildi. Tablo 3.1’de üretilen plaka konfigürasyonlarının katman sıralaması gösterilmektedir. Balistik testler tabloda oluşturulan sıralamaya göre yapılacaktır. Oluşturulan konfigürasyonlarda çelik tel örgüsü içeren ve içermeyen tabakalar arasındaki balistik farkların değerlendirilmesi, çelik tel örgü tiplerinin arasındaki ve aynı tipte farklı katmanlardaki çelik tel örgü ilavelerinin balistik farklarının değerlendirilmesi mümkün olacaktır.

Tablo 3.1. Kompozit tabaka konfigürasyonları

NUMUNE	KATMAN SIRALAMASI
1	10 kat aramid [A-A-A-A-A-A-A-A-A-A]
2	10kat aramid / 5 kat tip 1 çelik tel örgü (Çelik tel örgü aramid katlar arasına 2 kat arayla yerleştirildi.) [A-T1-A-A-T1-A-A-T1-A-A-T1-A-A-T1-A]
3	10kat aramid / 9 kat tip 1çelik tel örgü (Çelik tel örgü her aramid kat arasına yerleştirildi.) [A-T1-A-T1-A-T1-A-T1-A-T1-A-T1-A-T1-A-T1-A]
4	10kat aramid / 9 kat tip 2çelik tel örgü (Çelik tel örgü her aramid kat arasına yerleştirildi.) [A-T2-A-T2-A-T2-A-T2-A-T2-A-T2-A-T2-A-T2-A]

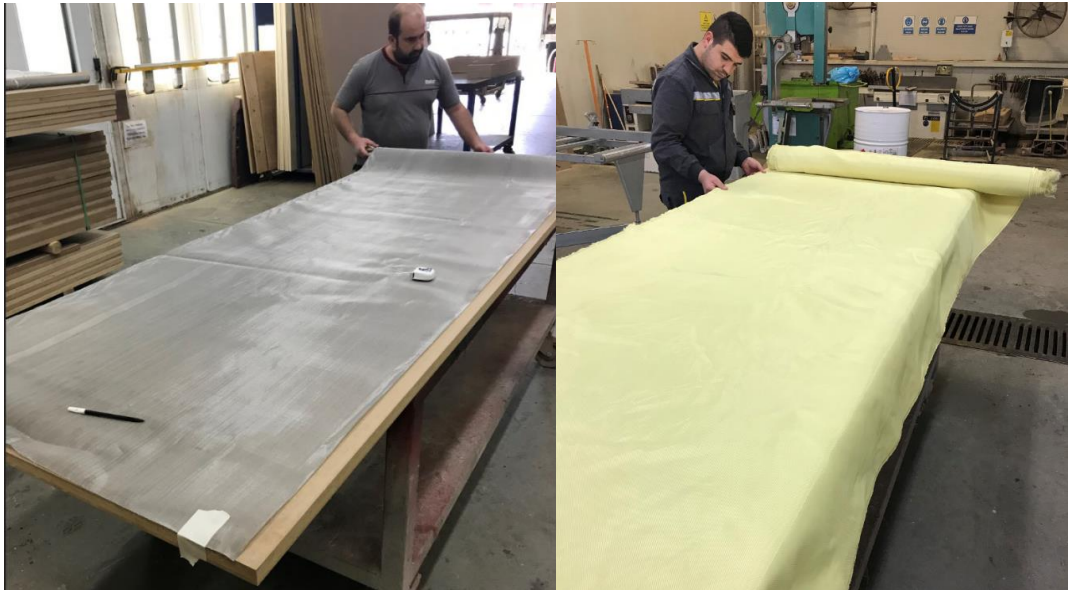
3.3. Kompozit Tabaka Üretimi Prosesi

Şekil 3.5’de kompozit tabaka üretim süreci gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Kompozit tabaka üretim süreci

Numune üretiminde kullanılan aramid ve çelik tel örgü malzemeler piyasada rulo halinde bulunmaktadır. Bu şekilde temin edilen malzemeler öncelikle Şekil 3.6’da görüldüğü gibi uygun bir tezgaha serilerek uygun ölçülerde kumaş kesme aparatı yardımıyla kesildi. Ardından Tablo 3.1’de verilen konfigürasyonlara göre Şekil 3.7’de görüldüğü gibi numune katlarının dizilimi yapıldı.



Şekil 3.6. Rulo malzemenin kesim için serilmesi

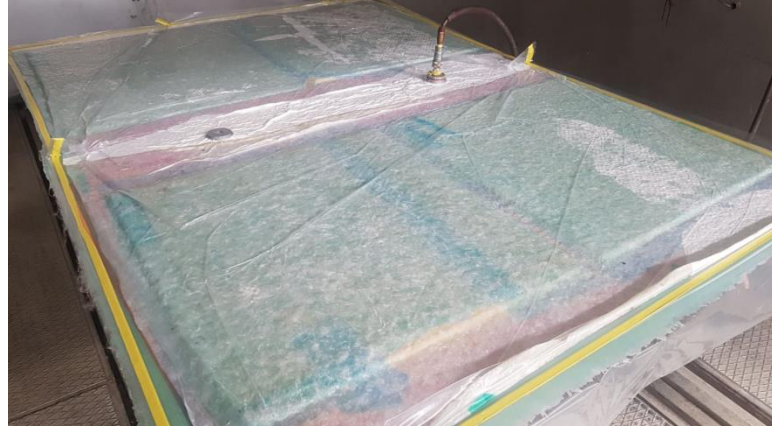


Şekil 3.7. Konfigürasyonlara göre nunume katlarının dizilimi

Üretim prosesi olarak öncelikle numunelerde her kat arasına homojen dağılımı sağlayacak şekilde Şekil 3.8’de görüldüğü gibi epoksi reçine uygulandı. Ürünlerin yüzeyinin kalıptan düzgün bir şekilde çıkmasını sağlamak amacıyla dış yüzeylere vakum soya kumaşı (peel-ply) uygulandı. Test edilecek numunelerin reçine oranları, ortam sıcaklığı ve vakum basınç oranı vs. gibi değişkenlerini sabit tutulması karşılaştırması istenen verilerden sağlıklı sonuç alabilmek için son derece önemlidir. Üretim yöntemi olarak seçilen vakum infüzyonda bunu sağlayabilmek için 4 adet plakayı aynı anda ve aynı koşullarda üretilmesini sağlayabilecek Şekil 3.9’da görülen vakum infüzyon kalıbı hazırlandı. Tüm numuneler kalıba yerleştirildikten sonra üzerleri vakum poşetiyle hava almayacak şekilde kapatıldı. Ardından sisteme 1 barlık vakum verilerek vakum infüzyon süreci tamamlandı. Epoksi reçine ile üretilen plakaların mekanik özelliklerinin en iyi şekilde sağlanabilmesi için fırınlama işlemine geçildi. Bu son işlem ile birlikte plaka üretim süreci tamamlandı.

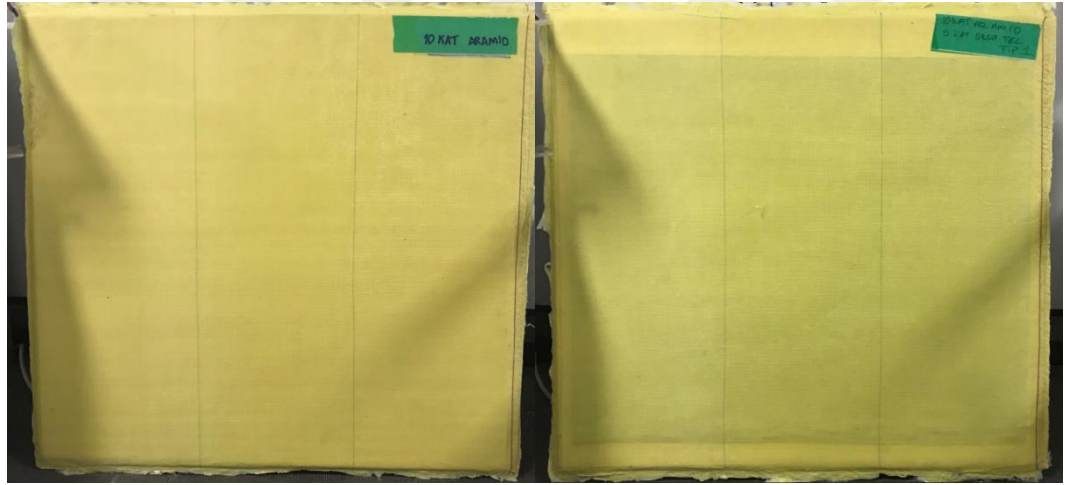


Şekil 3.8. Reçinenin uygulanması



Şekil 3.9. Vakum infüzyon kalıbı ve infüzyon işlemi

Üretimi gerçekleştirilen plakaların kenarlarının trimlenmesi düzgün bir görüntü elde edebilirdi. Ancak bu işlem su jetinde kesim gerektireceğinden ve ilave maliyet kalemlerine sebep olmasından dolayı kenar kesim işlemleri gerçekleştirilmedi. Şekil 3.10'da fırınlamadan sonra elde edilen ürünler görülmektedir. Ürünün yüzeyinde peel-ply görülmektedir. Ayrıca resimdeki iki numune arasındaki farka bakıldığında çelik tel örgü takviyesi numunelerde rahatlıkla görülebilmektedir.



a)

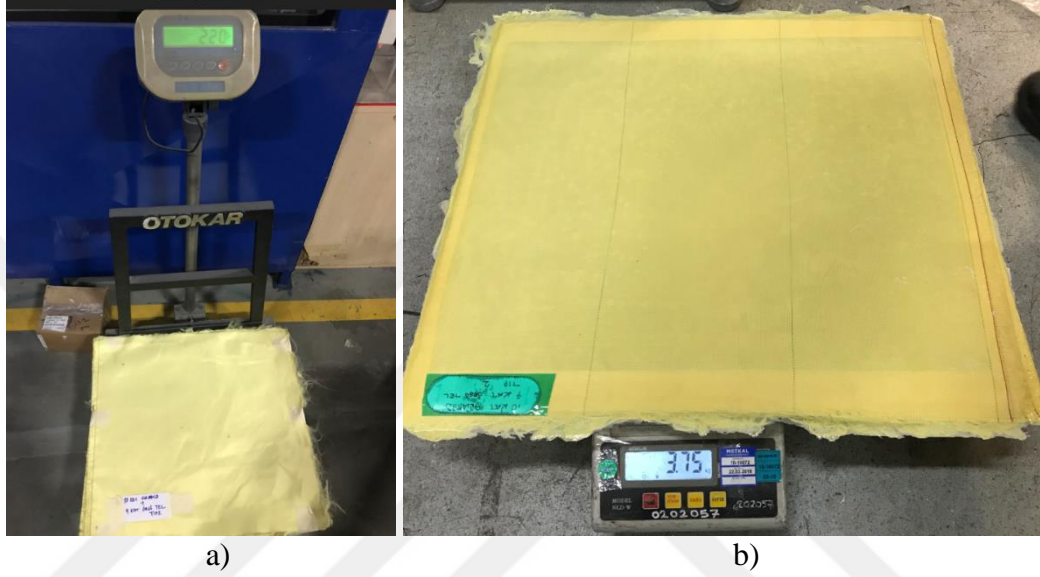
b)

Şekil 3.10. a) Çelik tel örgü içmeyen numune, b) Çelik tel örgü içeren numune

Kalıptan çıkan parçaların boyutları 600x620 mm ölçülerindedir. Stanag 2920 standardına uygun balistik testleri gerçekleştirmek için minimum 500x500 mm boyutlarında plaka istenmektedir. Dolayısıyla balistik laboratuvarlarda bulunan numune bağlama aparatlarıyla plakaların test düzeneğine bağlanması kolaylıkla ve standartlara uygun olarak sağlandı.

3.4. Numune Tartımları ve Kalınlık Ölçümleri

Numuneler vakum infüzyon öncesi reçine uygulamadan önce ve vakum infüzyondan sonra tartılarak Tablo 3.2’de görülen ağırlık kontrolleri sağlandı. Ayrıca çelik tel örgü takviyesinin getirdiği ilave ağırlık kontrolü sağlanarak ağırlığa karşın elde edilecek balistik performans katkısının analizleri yapılabilecektir.



Şekil 3.11. a) Vakum infüzyon öncesi tartım, b) Vakum infüzyon sonrası tartım

Tablo 3.2. Numune tartımları ve kalınlık ölçümleri

No	Katman Sıralaması	Vakum İnfüzyon Öncesi (kg)	Vakum İnfüzyon Sonrası (Balistik Test Öncesi) (kg)	Vakum İnfüzyon Sonrası Kalınlık Ölçümleri (mm)
1	10 kat aramid	1,74	2,60	5,5
2	10 kat aramid / 5 kat tip 1 çelik tel örgü	2,20	3,65	6,5
3	10 kat aramid / 9 kat tip 1 çelik tel örgü	2,98	4,60	7,7
4	10 kat aramid / 9 kat 150 tip 2 çelik tel örgü	2,42	3,75	6,7

3.5. Balistik Test Laboratuvarı ve Test Metodu

Balistik testler Otokar Otomotiv ve Savunma Sanayi A.Ş. balistik test laboratuvarında MIL-STD-662-F V50 ve Stanag 2920 standartlarına uygun olarak yapıldı. ISO/IEC 17025:2005 standartlarına uygun olarak hizmet veren laboratuvar test sonuçlarına sertifikasyon verme yetkisine sahiptir.

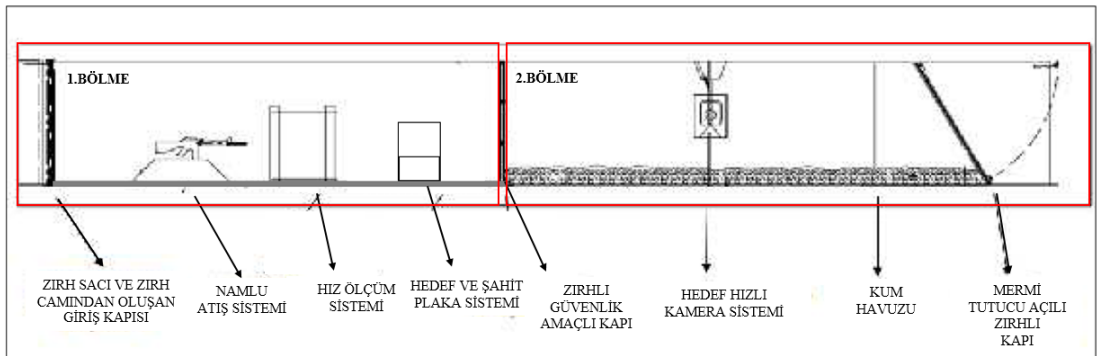


Şekil 3.12. Otokar balistik test laboratuvarı genel görünüm



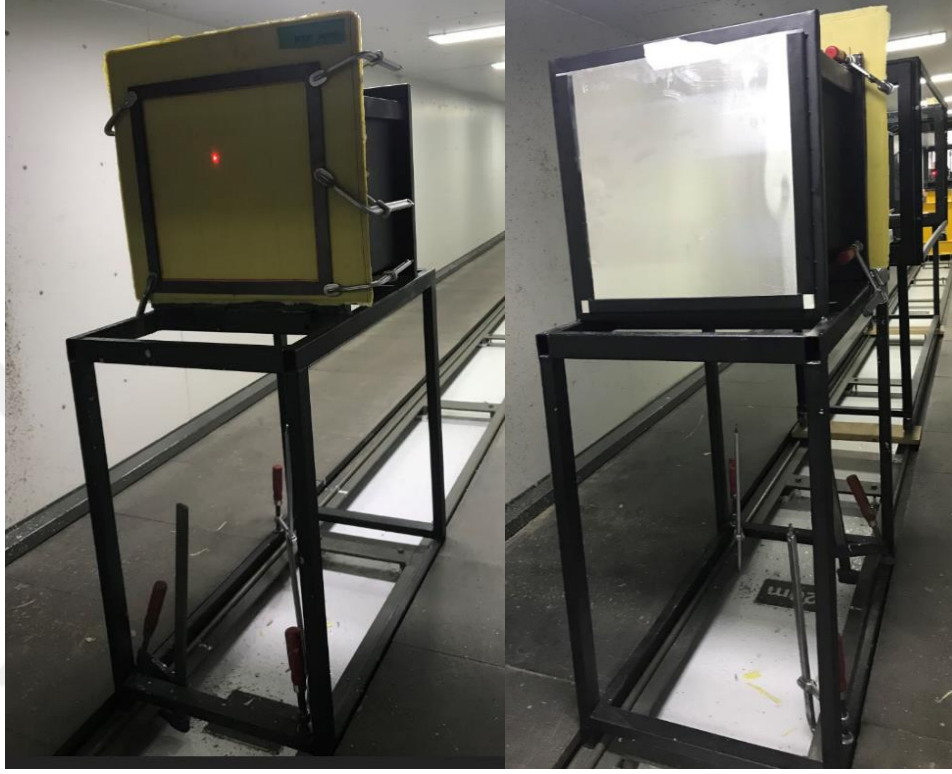
Şekil 3.13. Otokar balistik test laboratuvarı atış ve hız ölçüm sistemi

Şekil 3.14'de Otokar balistik test laboratuvarının yerleşimi görülmektedir. Testler laboratuvarın birinci bölümünde gerçekleştirildi.



Şekil 3.14. Otokar balistik test laboratuvarı yerleşimi

Testler sırasında laboratuvarında hali hazırda bulunan standartlara uygun olarak hedef ve şahit plaka yerleşimi sağlayabilecek Şekil 3.15’de görülen özel fikstür ve aparatlar kullanıldı. Test kurulumu Stanag 2920 ve MIL-STD-662-F V50 standartlarına uygundur.

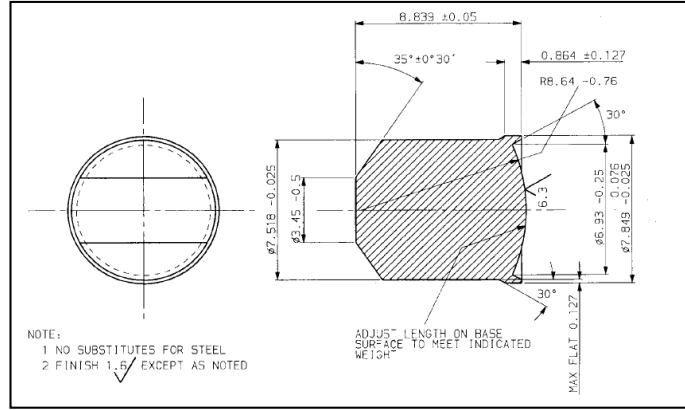


Şekil 3.15. Numune ve şahit plaka bağlama aparatı

Testlerde Stanag 2920’de belirtildiği gibi numunenin arkasına en az 150 mm mesafede olacak şekilde, Şekil 3.15’te görüldüğü gibi Alüminyum 2024 T3 levha şahit plaka olarak bağlandı. Şahit plaka V50 testlerinde merminin hedefe kısmi veya tam nüfuziyetinin değerlendirilmesi için kullanılmaktadır.

3.6. Balistik Testlerde Kullanılan Mühimmat ve Hazırlanışı

Testlerde NATO Standardı STANAG 2920’de A3/6723/1 FSP olarak tanımlanan serilerden 0.30 mm kalibre mermi kullanıldı. Parçacığın çekirdek ağırlığı 2,851 g, sertliği 30 HRC olup, çapı 7,518 mm’dir. Şekil 3.16’da gösterilen bu parçacık 7,62x51 mm’lik mühimmatın kovana kullanılarak hedefe doğru atılmaktadır [70].



Şekil 3.16. Testlerde kullanılan 0.30 kalibre FSP [70]

Şekil 3.17’de FSP’leri hazırlamada kullanılan malzemeler gösterilmektedir. V50 testinde standartlarda belirtilen mermi hız aralıklarının yakalanması barut miktarının ayarlanması ile sağlanmaktadır. Mermi hazırlama sürecinde ilk olarak barut ölçek aparatları ve hassas tartı ile istenilen ağırlıktaki barut miktarı ayarlanır. Ardından huni yardımıyla barut mühimmat kovanına yerleştirilir. Ardından kovan ile FSP birleştirilerek mermi hazır hale getirilir. Tablo 3.3’de FSP hazırlamada kullanılan aparat ve bileşenler verilmektedir.



Şekil 3.17. Mühimmat hazırlamada kullanılan malzemeler

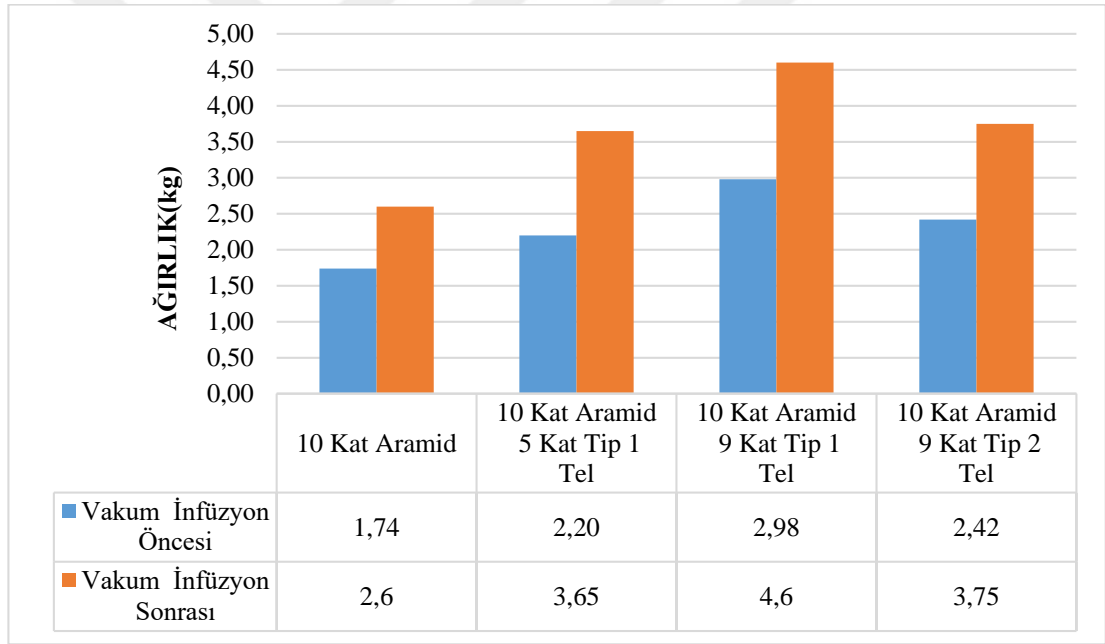
Tablo 3.3. Mühimmat hazırlama aparatları ve bileşenleri

Ekipman	No	Görev
Barut doldurma aparatı	1	Ölçekli barut dolumunu sağlamak
Barut tartım çanağı	2	Tartım işlemini sağlamak
Huni	3	Kovan içine barutun aktarımı sağlamak
Kovan	4	Barut, kapsül ve FSP’yi bir arada tutmak
FSP	5	Parçacık taklit edici mermi
Barut	6	
Hassas tartı	7	

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Çelik Tel Örgü Takviyesinin Ağırlığa Etkisi

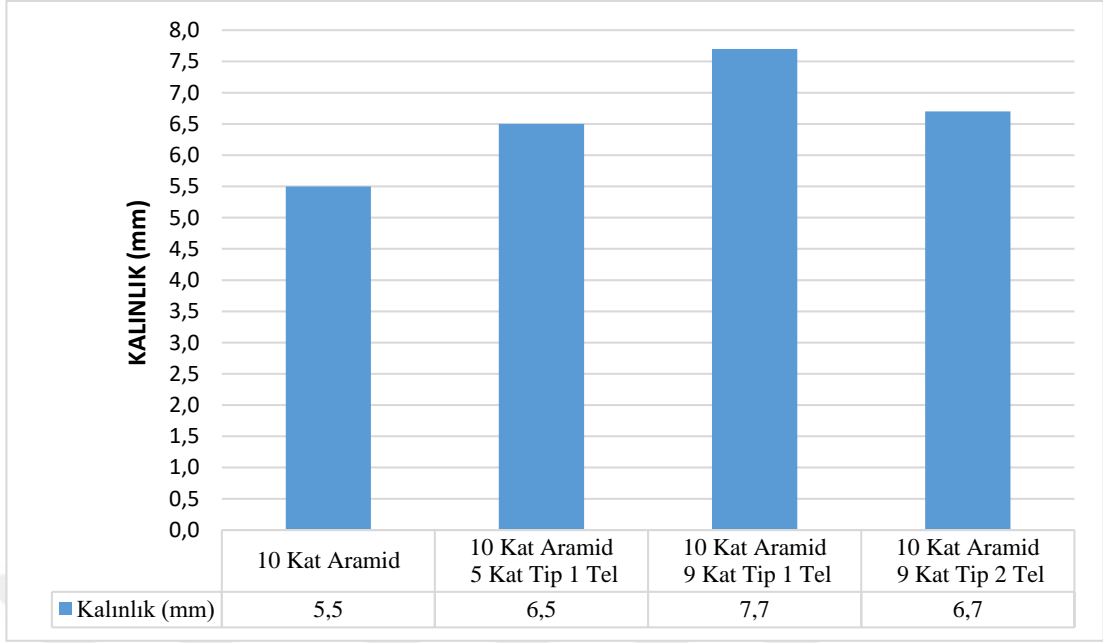
Ağırlık tartımları vakum infüzyon öncesinde ve sonrasında yapılmıştır. Tip 1 çelik tel örgünün alansal ağırlığı aramid kumaşla aynıdır ($460 \pm 10 \text{ g/m}^2$). Tip 1 çelik tel örgünün alansal ağırlığı ise ($170 \pm 10 \text{ g/m}^2$) daha düşüktür. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi normal olarak en ağır örnek 9 kat tip 1 çelik tel örgü takviyeli numune olmuştur. İlave gelen her katman ilave epoksi reçine ağırlığı getirdiğinden vakum infüzyon sonrası final ürünün ağırlığının da orantısız olarak arttığı Şekil 4.1’de görülmektedir.



Şekil 4.1. Çelik tel örgü ve reçine takviyesinin ağırlığa etkisi

4.2. Çelik Tel Örgü Takviyesinin Tabaka Kalınlığına Etkisi

Zırh tasarımında zırhın kapladığı hacim önemli tasarım parametrelerinden biridir. Zırhlı aracın gövde iç yüzeyine spall astarı olarak sabitlenen bu parçalarda mm bazında ölçüler bile bazen önemli olabilmektedir. Bu açıdan plakanın alansal yoğunluğu kadar, plakanın kalınlığı/hacimsel yoğunluğu da önem arz etmektedir. Şekil 4.2’de üretilen numunelerde çelik örgü takviyesinin kalınlığa olan etkisi gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Çelik tel örgü ve reçine takviyesinin kalınlığa etkisi

4.3. V50Testi Bulguları

4.3.1. 10 kat aramid tabakalı numune V50testi

Balistik testlere öncelikle çelik tel örgü takviyesi içermeyen dolayısıyla V50 hızı en düşük olacak olan 10 kat aramid plaka ile başlandı. Toplamda plakaya Şekil 4.3’de görüldüğü gibi 14 atış yapıldı, bu atışlardan 7 tanesi numuneyi ve şahit plakayı delerek geçti, diğer 7 tanesi ise plaka tarafından tutuldu. STANAG 2920’ye uygun olarak üç adet kısmi delinmenin gerçekleştiği, üç adet de tam delinmenin gerçekleştirdiği Tablo 4.1’de verilen değerler seçilerek plakanın V50 değeri bulundu.

Tablo 4.1. Numune 1 V50 hesabına dahil edilen atış hızları

Atış No	Hız (m/s)	Sonuç (Delinme)
1	255,20	yok
2	265,48	yok
3	270,54	yok
4	279,49	var
5	285,56	var
6	290,87	var
V50	274,52	

Tablo 4.1’de verilen değerlerin ortalaması alınarak numune 1 plakasının V50 değeri 274,52 m/s olarak bulundu. Bölüm 2.5’de verilen ($E = \frac{1}{2} m V^2$) formülü ile plakanın enerji sönümlenme değeri ise 107,01 joule olarak bulundu.



Şekil 4.3. 10 kat aramid tabakalı numune ve şahit plakasının atış sonrası görüntüleri

4.3.2. 10 kat aramid 5 kat tip 1 çelik tel örgü tabakalı numune V50 testi

Numune 2 testlerinde plakaya toplamda 14 atış yapıldı. Şekil 4.4’de görüldüğü gibi bu atışlardan 4 tanesi numune ve şahit plakayı delerken 10 tanesi ise numune tarafından tutuldu. Tablo 4.2’de bu atışlardan V50 değerini hesaplamak için alınan değerler verilmektedir.

Tablo 4.2. Numune 2 V50 hesabına dahil edilen atış hızları

Atış No	Hız (m/s)	Sonuç (Delinme)
1	341,77	yok
2	342,81	yok
3	343,08	yok
4	342,87	var
5	344,79	var
6	353,95	var
V50	348,11	

Tablo 4.2’de verilen değerlerin ortalaması alınarak numune 2 plakasının V50 değeri 348,11 m/s olarak bulundu. Plakanın enerji sönümlenme değeri ise 168,89 joule olarak bulundu.



Şekil 4.4. Numune 2 ve şahit plakasının atış sonrası görüntüleri

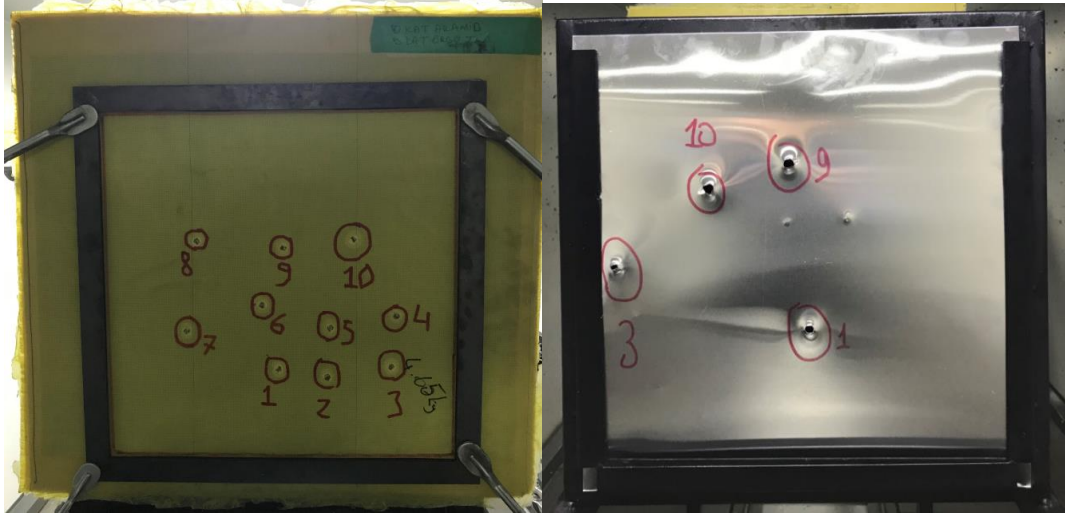
4.3.3. 10 kat aramid 9 kat tip 1 çelik tel örgü tabakalı numune V50 testi

Numune 3 testlerinde plakaya toplamda 10 atış yapıldı. Şekil 4.5’de görüldüğü gibi bu atışlardan 4 tanesi numune ve şahit plakayı delerken 6 tanesi ise numune tarafından tutuldu. Tablo 4.3’de bu atışlardan V50 değerini hesaplamak için alınan değerler verilmektedir.

Tablo 4.3. Numune 3 V50 hesabına dahil edilen atış hızları

Atış No	Hız (m/s)	Sonuç (Delinme)
1	344,78	yok
2	349,55	yok
3	350,73	yok
4	355,07	var
5	367,21	var
6	369,54	var
V50	356,14	

Tablo 4.3’de verilen değerlerin ortalaması alınarak numune 3 plakasının V50 değeri 356,14 m/s olarak bulundu. Plakanın enerji sönmleme değeri ise 180,11 joule olarak bulundu.



Şekil 4.5. Numune 3 ve şahit plakasının atış sonrası görüntüleri

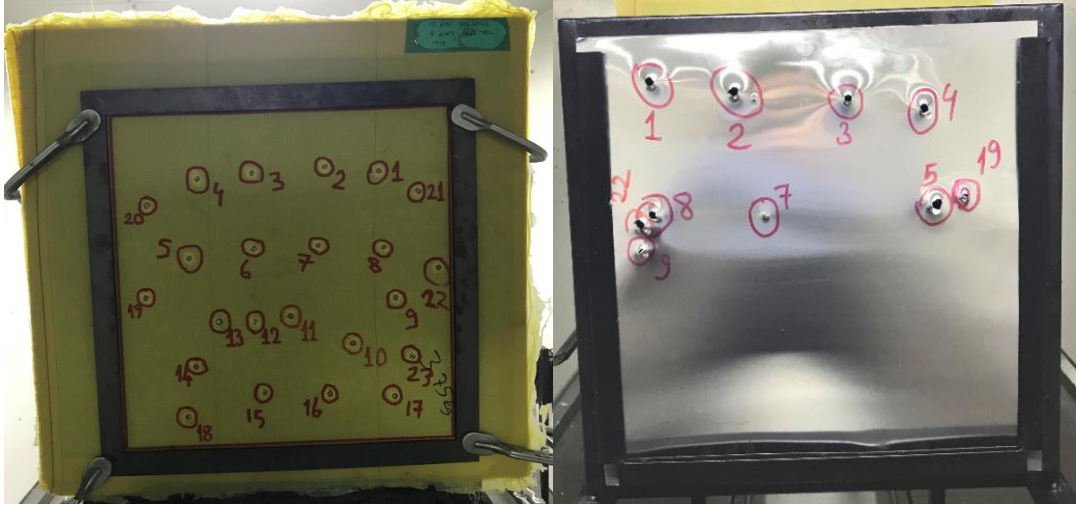
4.3.4. 10 kat aramid 9 kat tip 2 çelik tel örgü tabakalı numune V50 testi

Numune 4 testlerinde plakaya toplamda 23 atış yapıldı. Şekil 4.6’da görüldüğü gibi bu atışlardan 10 tanesi numune ve şahit plakayı delerken 13 tanesi ise numune tarafından tutuldu. Tablo 4.4’de bu atışlardan V50 değerini hesaplamak için alınan değerler verilmektedir.

Tablo 4.4. Numune 4 V50 hesabına dahil edilen atış hızları

Atış No	Hız (m/s)	Sonuç (Delinme)
1	342,07	yok
2	342,53	yok
3	342,86	yok
4	343,31	var
5	343,73	var
6	344,34	var
V50	343,30	

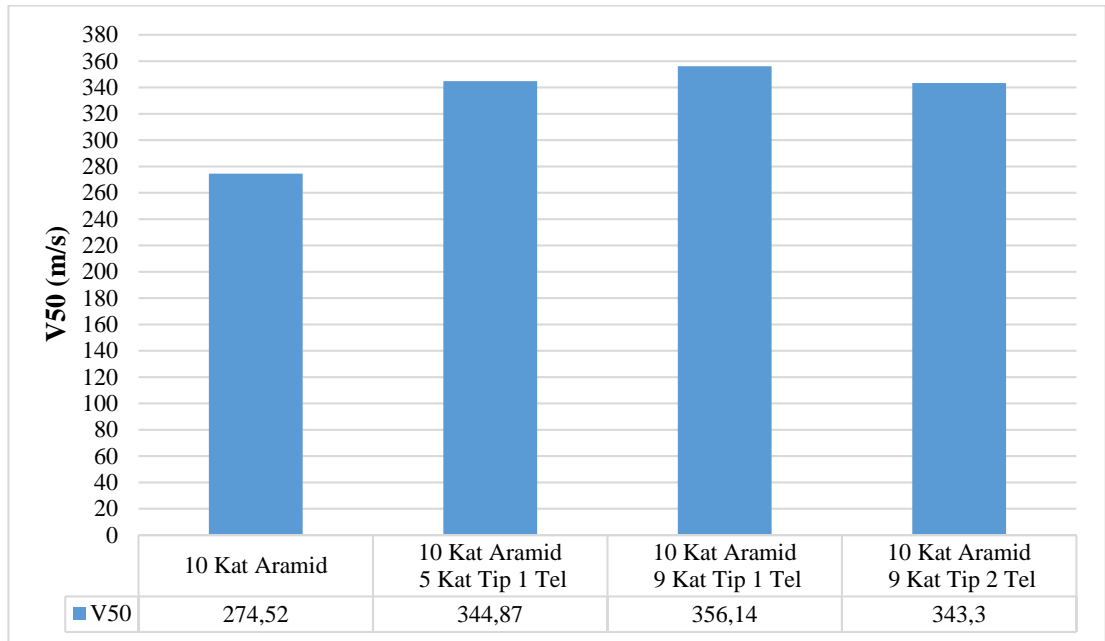
Tablo 4.4’de verilen değerlerin ortalaması alınarak numune 4 plakasının V50 değeri 343,30 m/s olarak bulundu. Plakanın enerji sönmleme değeri ise 167,35 joule olarak bulundu.



Şekil 4.6. Numune 4 ve şahit plakasının atış sonrası görüntüleri

4.4. V50 Test Sonuçlarının Karşılaştırılması

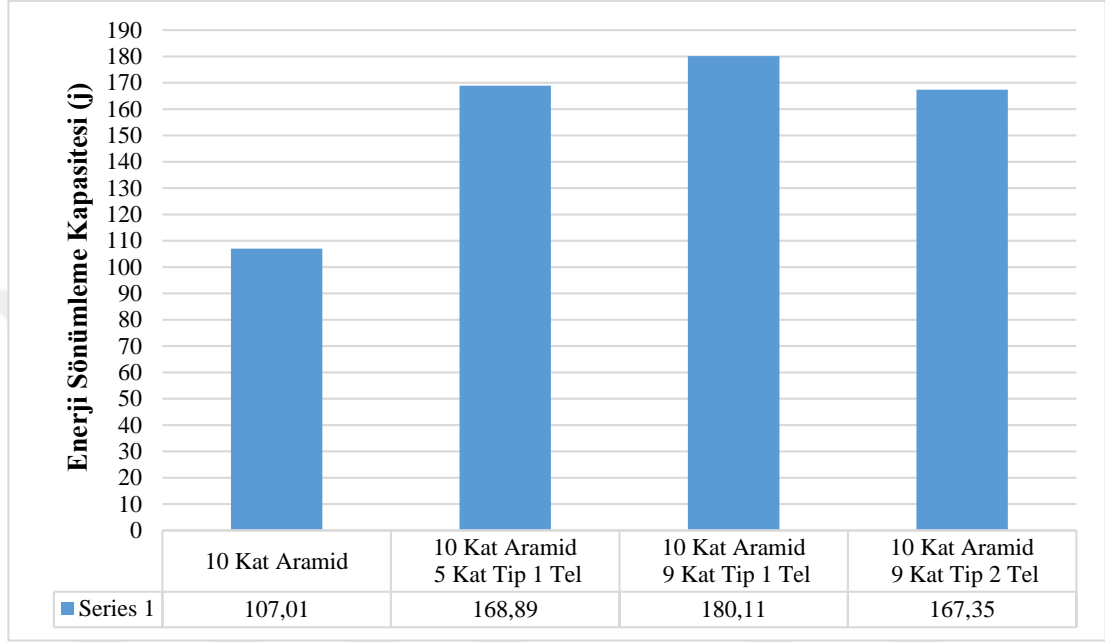
Toplamda 4 adet numunenin balistik testleri başarı ile tamamlanarak, plakaların sahip olduğu V50 değerleri bulundu. Şekil 4.7'de görüldüğü gibi 10 kat aramide ek olarak 9 kat tip 1 çelik tel örgü takviyesi yapılan numunenin balistik dayanımı en yüksek plaka olduğu görüldü. Dayanımı en yüksek ikinci plakanın aramid plakaya ek olarak 5 kat tip 1 tel örgü takviyesi yapılan numune olduğu görüldü. 9 kat tip 2 çelik tel takviyesi yapılan numune ise balistik dayanımda 3. sırada yer aldı.



Şekil 4.7. V50 test sonuçlarının karşılaştırılması

4.5. Numuneleri Delmek için Gereken Enerji Miktarı

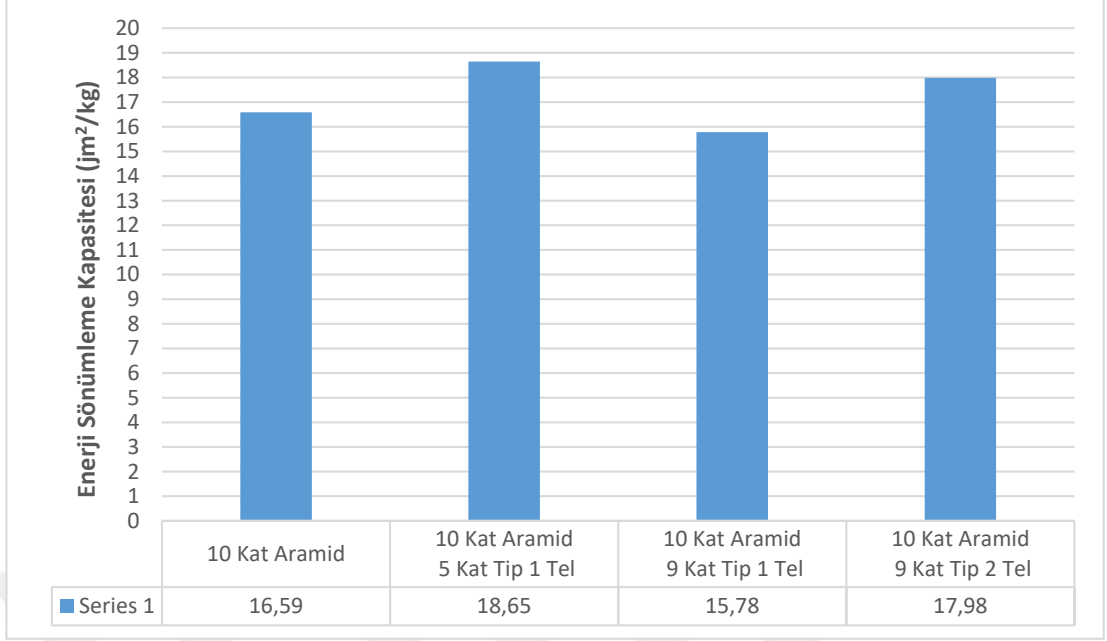
Numuneleri delmek için gereken enerji miktarı V50 hızları ile doğru orantılıdır. Bölüm 2.5’de verilen kinetik enerji formülü ile hesaplanır. Şekil 4.8’de plakaların enerji sönümleme kapasiteleri verilmektedir.



Şekil 4.8. Plaka bazında enerji sönümleme kapasiteleri

4.6. Alansal Yoğunluğa Göre Numune Enerji Sönümleme Kapasiteleri

10 kat aramid plakaya eklenen ilave katların balistik dayanımı artırması beklenen sonuçtur. Ancak ilave katların getirdiği ağırlıkları da göz önünde bulundurulmalıdır. Tablo 4.9’da plakaların sahip olduğu enerji sönümleme kapasiteleri tabakaların alansal ağırlığına göre karşılaştırılmaktadır. Buna göre numune 2 sahip olduğu ağırlığa göre enerji sönümleme kapasitesi verimlilik oranı en yüksek numune çıktı. Numune 3 ise en kötü performansı gösterdi.



Şekil 4.9. Alansal yoğunluğa göre enerji sönümlleme kapasiteleri

4.7. Numune Hasar Mekanizmaları Örnekleri

Yapılan V50 testinde plaka üzerinde kısmi penetrasyon ve tam penetrasyon örneklerini görmek mümkündür. Şekil 4.10'da 4, 5, 7, 8, 9 ve 22 nolu atışlarda FSP'nin plakayı delip geçtiği görülmektedir, bu atışlar tam penetrasyon örnekleridir. 6 ve 20 nolu atışlarda plaka arkasında çöküntü oluşmuş ancak plaka delinmemiştir, bu atışlar kısmi penetrasyon örnekleridir. Tüm atışlarda temas noktasının çevresinde liflere geçen şok dalgası sebebiyle oluşan hasar mekanizmaları ve çöküntüler görülmektedir.



Şekil 4.10. Numune hasar mekanizmaları örnekleri 1

Şekil 4.11’de 12, 13 nolu atışlarda FSP’nin plaka tarafından tutulduğu, askeri balistik limitin altında olan kısmi penetrasyon örnekleri görülmektedir.



Şekil 4.11. Numune hasar mekanizmaları örnekleri 2

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, aramid kompozit tabakaya farklı tipte ve katmanda çelik tel örgü takviyelerinin eklenmesinin etkileri değerlendirilmiştir. Karşılaştırma amaçlı olarak 4 farklı konfigürasyonda tabaka üretimi gerçekleştirilmiştir. Aramid ve çelik tel örgü katmanları arasına epoksi reçine matrisi uygulaması ve vakum infüzyon yöntemi ile homojen yapıda tabakanın başarıyla üretilebileceği görülmüştür. Çelik tel örgü takviyesinin balistik etkilerinin değerlendirilmesinde V50 testlerinden yararlanılmıştır. Testler Otokar Otomotiv ve Savunma Sanayi A.Ş. balistik test laboratuvarında MIL-STD-662-F V50 ve Stanag 2920 standartlarına uygun olarak yapılmıştır.

Farklı numunelerin üretiminde reçine oranları, vakum basınç oranı, ortam sıcaklığı, yüzey kaliteleri gibi değişkenleri sabit tutmak, testlerde karşılaştırılması istenen verilerden sağlıklı sonuç alabilmek için bir gereksinimdir. Bu gereksinimi sağlayabilmenin 4 farklı numuneyi aynı anda ve şartlarda üretilebilecek vakum infüzyon kalıbı ile mümkün olacağı görülmüştür. Sonuçta, hazırlanan kalıp sayesinde homojen reçine dağılımı olan, aynı yüzey kalitesinde ve aynı çevresel şartlarda üretilmiş numuneler elde edilmiştir.

Numune ağırlık ölçümü reçine uygulamadan önce ve vakum infüzyon sonrasında yapılarak reçinenin getirmiş olduğu ağırlıkların da kontrolde tutulması sağlanmıştır. İlave çelik tel örgü katmanları ilave reçine gereksimi oluşturduğu için doğal olarak en ağır numune 4,6 kg ile 9 kat tip 1 çelik örgü içeren numune 3 olmuştur ve aynı zamanda 7,7 mm ile en kalın numune olarak ölçülmüştür. Numune 3 balistik testler sonucunda 180,11 j enerji sönümlenme kapasitesiyle tabaka bazında en iyi performansı göstermiş olsa da, ağırlık dezavantajı nedeniyle alansal yoğunluğa göre enerji sönümlenme kapasitesi 15,78 j/m²/kg ile en kötü performansı göstermiştir. Kalınlık artışı da diğer bir dezavantajı oluşturmaktadır. Zırhlı araçlarda araç içi hacim ve ağırlık tasarımı kritik önemlere sahip olduğundan, bu tipteki numunelerin tercih edilme ihtimali düşüktür.

Numune 2'nin balistik sonuçları incelendiğinde; 5 kat tip 1 çelik tel ilavesinin, tabaka bazında balistik dayanımı 107,01 j'den 168,89 j'e çıkararak tabaka bazında enerji sönümleme kapasitesini yaklaşık %58 oranında artırdığı görülmüştür. Alansal yoğunluk açısından incelendiğinde ise balistik dayanımı 16,59 jm²/kg'dan 18,65 jm²/kg'a çıkararak yaklaşık %12 oranında artırdığı görülmüştür. Bu sonuca göre alansal yoğunluk dezavantajı olmadan 5 kat çelik tel takviyenin bu tabakada 1 kat aramid takviyesi yerine kullanıldığında yaklaşık olarak aynı balistik dayanımı verilebileceği öngörülebilir. Böylece aynı balistik dayanımı çelik örgü takviyesi ile daha düşük maliyetle elde etmek mümkün olabilmektedir. Numune kalınlık açısından bir miktar dezavantaj getirirse de, bu tipteki numunelerin zırhlı araçlarda kullanılma ihtimali değerlendirilebilir. 9 kat tip 2 çelik örgü takviyesi yapılan numune 4 de numune 2'ye yakın özellikler gösterdiğinden aynı kapsamda değerlendirilebilir.

Diğer bir incelemede 5 kat tip 1 çelik örgü takviyesinin tabaka bazında enerji sönümleme kapasitesini yaklaşık %58 artırırken, 9 kat tip 1 çelik örgü takviyesinin enerji sönümleme kapasitesini yaklaşık %68 oranında artırdığı görülmüştür. Tabakaya 4 kat daha ilave eklenmesine rağmen artışın %10 mertebesinde kalması balistik dayanımın çelik tel katman ilavesiyle orantısız olarak artmadığını göstermiştir.

Sonuç olarak bu çalışmada çelik tel örgü takviyesinin aramid tabakaya getirmiş olduğu avantaj ve dezavantajlar değerlendirilmiş, balistik koruyucu kompozit malzemelerde alternatif takviye malzemesi olarak kullanılabileceği görülmüştür.

Deneysel çalışma için üretilen malzemelerin ve balistik laboratuvar ortamında gerçekleştirilen testlerin maliyetleri, ayrıca bu testler sonucunda elde edilmesi mümkün olan verilerin kısıtlı olması sebebiyle çalışmanın nümerik analizler kullanılarak ilerletilmesi zaman ve maliyet açısından faydalar sağlayacaktır.

Farklı üretim proseslerinin balistik performans özelliklerine etkileri olmaktadır. Vakum infüzyonla gerçekleştirilen tabaka üretimleri farklı olarak sıcak presleme yöntemiyle de gerçekleştirilerek, üretim proseslerinin getirmiş olduğu etkilerin deneysel olarak incelenmesi ayrı bir çalışma konusu olarak değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Uddin N., *Blast Protection of Civil Infrastructures and Vehicles Using Composites, 1st ed.*, Woodhead Publishing, USA, 2010.
- [2] Haug D., Development of Protection Technologies, *Defence Technology Review*, 2009, **6**, 8-15.
- [3] <http://www.scanfiber.dk/applications/land-applications/military-applications/scantex-enhanced-spall-liner.aspx> (Ziyaret tarihi: 10Mart 2018).
- [4] Ash R. A., Vehicle Armor, *Lightweight Ballistic Composites*, doi:10.1016/B978-0-08-100406-7.00009-X.
- [5] Erbil Y., Ekşi A. K., Bircan D. A., Spall Liner: From Fiber to Protection, *6th International Advanced Technologies Symposium*, Elazığ, Turkey, 16-18 May 2011.
- [6] Colliflower A. B., Colliflower G. B., Quinn G. L., Quinn J. G., Perry P. J., Anti Ballistic Materials and Process, 2009, U. S. Patent No. 0282968 A1, *U.S. Patent Application Publication*.
- [7] Henry J. M., Armor System, 2006, U. S. Patent No. 0065111 A1, *U.S. Patent Application Publication*.
- [8] Sudhakar A. E., Ballistic Panel with Configurable Shielding, 20012, U. S. Patent No. 0090452 A1, *U.S. Patent Application Publication*.
- [9] Lin C. C., Huang C. C., Chen Y. L., Lou C. W., Lin C. M., Hsu C. H., Lin J. H., Ballistic Resistant Stainless Steel Mesh Compound Nonwoven Fabric, *Fibers and Polymers*, 2009, **9** (6), 761–767.
- [10] Zhou N., Wang J., Peng C., Tong Z., Experimental and Numerical Study on the Ballistic Resistance of Steel Fibre Reinforced Two-Layer Explosively Welded Plates, *Materials and Design*, 2014, **54**, 104–111.
- [11] Arnold W., Paul W., Behind Armour Debris Investigation and Their Application into a New Vulnerability Model, *International Journal of Impact Engineering*, 2001, **26**, 21-32.
- [12] Arnold W., Rottenkolber E., Behind Armour Debris Investigation (Part II), *International Journal of Impact Engineering*, 2003, **29**, 95-104.
- [13] Horsfall I., Petrou E., Champion S. M., Shaped Charge Attack of Spaced and Composite Armour, *23rd International Symposium on Ballistics*, Tarragona, Spain, 16-20 April 2007.

- [14] Arnold W., Rottenkolber E., Physics of Behind Armour Debris Threat Reduction, *International Journal of Impact Engineering*, 2006, **33**, 53-61.
- [15] Weber K., Behind Armour Debris Distribution after KE Rod Perforation of RHA Plates for Distinct Overmatch Conditions, *23rd International Symposium on Ballistics*, Tarragona, Spain, 16-20 April 2007.
- [16] Yuan F., Tsai L., Prakash V., Rajendran A. M., Dandekar D. P., Spall Strength of Glass Fiber Reinforced Polymer Composites, *International Journal of Impact Engineering*, 2007, **44**(24), 7731-7747.
- [17] Arıkan V., Berk B., Karakuzu A., Toksoy K., Sayman O., Research for the Spall Effect after Ballistic Impact with Finite Element Method, *Usak University Journal of Material Sciences*, 2014, **1**, 87-96.
- [18] Arıkan V., Zırhlı Araçlarda Parçalanma (Spall) Etkisini Önleyecek Kompozit Yapının Tasarımı Ve Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2015, 387304.
- [19] Yahaya R., Sapuan S. M., Jawaid M., Leman Z., Zainudin E. S., Effect of Fibre Orientations on the Mechanical Properties of Kenaf-Aramid Hybrid Composites for Spall-Liner Application, *Defence Technology*, 2016, **12**, 52-58.
- [20] Risby, M. S., Wong, S. V., Hamouda, A. M. S., Khairul, A. R., Elsadig M., Ballistic Performance of Coconut Shell Powder/TwaronFabric Against non-Armour Piercing Projectiles, *Defence Science Journal*, 2008, **58**, 248-263.
- [21] Braga F. O., Bolzana L. T., Lima E. P., Monteiroa S. N., Performance of Natural Curaua Fiber-Reinforced Polyester Composites under 7,62 mm Bullet Impact as a Stand-Alone Ballistic Armor, *Journal of Materials Research and Technology*, 2017, **6**(4), 323-328.
- [22] Delcourt E., Gilson G., Rabet L., Pirlot M., Ballistic Performance of Dry Stacked Flax Fabrics, *9th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading*, doi:10.1051/dymat/2009123.
- [23] Faur G., Study on the Ballistic Performance of Composites, *Macromolecular Symposia*, 2016, **239**(1), 217-226.
- [24] Yılmaz H., Üç Fazlı Elyaf Tabakalı Karma Kompozit Yapının Balistik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2012, 318173.
- [25] Özgültekin S. E., Balistik Zırhlarda Kullanılan Kompozit Malzeme Kombinasyonlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2012, 318372.

- [26] Barut C., Aramid Esaslı Kompozit Malzemelerin Balistik Performanslarının ve Mekanik Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2015, 398587.
- [27] Yavaş M. O., Hafif Silahlara Karşı Bireysel Savunma Amaçlı Kompozit Malzeme Tasarımı ve Balistik Dayanımı, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2009, 245735.
- [28] Karahan M., Kuş A., Eren R., An Investigation into Ballistic Performance and Energy Absorption capabilities of Woven Aramid Fabrics, *International journal of Impact Engineering*, 2008, **35**, 499-510.
- [29] Bulut H., Balistik Koruyucu Teçhizatın İmalatında Kompozit Malzeme Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003, 142994.
- [30] Yücel T., *Balistik Koruyucu Elamanları Teknolojisi*, 2. HİBM K.lığı Yayınları, Kayseri, 1994.
- [31] MILA-12560H(MR), Armor Plate, Steel, Wrought, Homogeneous (for Use in Combat-Vehicles and for Ammunition Testing), *AM Rolled Armour Plate International Specification*, Öxelund, 2001.
- [32] Karagöz Ş., Zırh Çelikleri, *Zırh Teknolojileri Semineri*, Ankara, Türkiye, 10-11 Mart 2005.
- [33] Soykan H. Ş., Aslanoğlu Z., Karakaş Y., Zırh Çeliklerinin Metalurjisi, *Zırh Teknolojileri Semineri*, Ankara, Türkiye, 10-11 Mart 2005.
- [34] Sevinç C., Zırhlı Muharebe Araçlarında Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002, 127029.
- [35] http://c.ymcdn.com/sites/www.titanium.org/resource/resmgr/2010_2014_papers/GOOCHWilliam_2011.pdf (Ziyaret tarihi: 25Mart 2018).
- [36] Akdoğan M. A., Türkbaş O. S., Konkav ve Düz Yüzey Şekilli Seramik Zırhların Balistik Performansının Sayısal Modellenmesi, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2016, **2**(2), 91-106.
- [37] Özaydın M. B., Kompozit Malzemelerin Balistik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1999, 85860.
- [38] Yumak N., Pekbey Y., Aslanta K., Zırh Tasarımında Kullanılan Kompozit Malzemelerin Deformasyon Karakteristiğinin Araştırılması, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2013, **10**(4), 1-21.

- [39] Cavallaro P. V., Soft Body Armor: An Overview Of Materials, Manufacturing, Testing and Ballistic Impact Dynamics, *Defence Technial Information Center*, NUWC-NPT TR 12,057, 1-22, 2011.
- [40] Çay A., Süpüren G., Kanat Z. E., Gülümser T., Tarakçioğlu I., Balistik Lifler Bölüm 1, *Tekstil ve Konfeksiyon*, 2007, **4**, 232-236.
- [41] <http://www.asilmarine.com/tr/sss/70-para-aramid-Kevlar-nedir> (Ziyaret tarihi: 25Mart 2018).
- [42] <https://www.dsm.com/corporate/about/business-entities/dsm-dyneema.html> (Ziyaret tarihi: 12Nisan 2018).
- [43] Kalaycı E., Avinç O. O., Yavaş A., Yüksek Performanslı Polietilen (HPPE) Lifleri., *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 2016, **1**, 13-34.
- [44] Walling S. J., S-2 Glass Fiber: Its Role in Military Applications, *International Conference On Composite Materials*, 1985, **1**, 443-456.
- [45] Kitagawa T., Murase H., Yabuki K., Morphological Study on Poly-p-phenylenebenzobisoxazole (PBO) Fiber, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 1998, **36**(1), 39-48.
- [46] <http://polymerdatabase.com/Fibers/PBO.html> (Ziyaret tarihi: 19Nisan 2018).
- [47] Kalaycı E., Avinç O. O., Yavaş A., Yüksek Performanslı PBO (poli-p-fenilenbenzobisoksazol) Lifleri., *Tekstil ve Mühendis*, 2014, **22**(98), 63-83.
- [48] Lane R. A., High Performance Fibers for Personnel and Vehicle Armor Systems, *The AMPTIAC Quarterly*, 2005, **9**(2), 3-9.
- [49] Karakan, G., Teknik Tekstillerin Koruyucu Yapılarda Kullanımı, *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2009, 3(1), 65-70.
- [50] <http://www.cordura.com/en/fabric-technology/ballistic-fabric.html> (Ziyaret tarihi: 5Mayıs 2018).
- [51] Ersoy H. Y., *Kompozit Malzeme*, Literatür Yayıncılık Dağıtım, İstanbul, 2001.
- [52] Njuguna J., Introduction to Lightweight Composite Materials and Their Use in Transport Structure, *Lightweight Composite Structures in Transport Design*, <https://doi.org/10.1016/C2014-0-02646-9>.
- [53] Ko F., Geshury A., Textile Preforms for Composite Materials Processing, *Advanced Materials and Processes Information Analysis Center*, AMPT-19, 2002.
- [54] Csukat G. F., A Study On The Ballistic Performance Of Composites, *Macromol Symposia*, 2006, <https://doi.org/10.1002/masy.200690100>.

- [55] Candan C., Akdemir, A., An Investigation of Terminal Ballistic Properties and Design of Composite Armor Against the Light Weapons, *10. Denizli Malzeme Sempozyumu ve Sergisi*, Denizli, Türkiye, 14-16 Nisan 2004.
- [56] Gellert E. P., Cimpoeru S. J., Woodward R. L., A Study of the Effect the Target Thickness on the Ballistic Perforation of Glass-Fibre Reinforced Plastic Composites, *Elsevier International Journal of Impact Engineering*, 2000, **24**(5), 445- 456.
- [57] Hazell P. J., Appleby G., A study on the Energy Dissipation of Several Different CFRP-Based Targets Completely Penetrated by a High Velocity Projectile, *Elsevier Composite Structures*, 2009, **91**(1), 103-109.
- [58] Patts H.M., Ballistic Impact Damage and Penetration Mechanics of Fiber Reinforced Composite Laminates, Doktor of Philosophy, The Pennsylvania State University Engineering, *Science&Mechanics Instute*, Pennsylvania, 2000.
- [59] Zhu G., Goldsmith W., Dharan C., Penetration of Laminated Kevlar by Projectiles I. Experimental Investigation, *Intemational Journal of Solid and Structures*, 1992, **29**(4), 399-420.
- [60] Kumar S., Gupta D. S., Singh I., Sharma A., Behavior of Kevlar/Epoksi Composite Plates Under Ballistic Impact, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2010, **29**(13), 2048-2064.
- [61] Phoenix S. L., Porwal P. K., A New Membrane Model for the Ballistic Impact Response and V50 Performance of Multi-ply Fibrous Systems, *Elsevler International Journal of Solids and Structures*, 2003, **40**(24), 6723–6765.
- [62] Yong M., Iannucci L., Falzon B. G., Efficient Modelling and Optimisation of Hybrid Multilayered Plates Subject to Ballistic Impact, *Elsevier International Journal of Impact Engineering*, 2010, **37**(6), 605-624.
- [63] Dear J. P., Brown S. A., Impact Damage Processes in Reinforced Polymeric Materials, *Composites: Part A, Elsevier*, 2003, **34**(5), 411–420.
- [64] Laible R., Methods and Phenomena, *Ballistic Materials and Penetration Mechanics*, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-41928-6.50005-3>
- [65] Naik N. K., Shrirao P., Reddy B. C. K., Ballistic Impact Behaviour of Woven Fabric Composites: Formulation, *Elsevier International Journal of Impact Engineering*, 2006, **32**(9), 1521–1552.
- [66] Grujicic M., Glomski P. S., He T., Arakere G., Bell W. C., Cheeseman B. A., Material Modeling and Ballistic-Resistance Analysis of Armor-Grade Composites Reinforced with High-Performance Fibers, *ASM International*, 2009, **18**(9), 1169-1182.

- [67] Bhatnagar A., *Lightweight Ballistic Composites, Standards and Specifications for Lightweight Ballistic Materials, Lightweight Ballistic Composites*, <https://doi.org/10.1533/9781845691554.1.127>
- [68] Zukas J. A., *High Velocity Impact Dynamics*, John Wiley and Sons Inc., New York, 1990.
- [69] MIL-STD-662F, V50 Ballistic Test for Armor, *Department of Defense Test Method Standard*, Aberdeen, 1997.
- [70] STANAG2920, Ballistic Test Method for Personal Armour Materials and Combat Clothing, *NATO Standardization Agreement*, Brussels, 2003.
- [71] http://www.anadolutel.com.tr/paslanmaz_filtre_ve_suzgec_telleri.aspx (Ziyaret tarihi: 17Mayıs 2018).



KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] **Sabah A.**, Cengiz A., Producing and 3P Bending Characterisation of Steel Mesh Covered CFRP Laminates, 1. *Uluslararası Hafif Alaşımlar ve Kompozit Malzemeler Sempozyumu UHAKS'18*, Karabük Üniversitesi, Kocaeli, 22-24 Mart 2018.
- [2] Öztürk M. F., Cengiz A., **Sabah A.**, Delinmiş ve Delikli İmal Edilmiş GFRP Plakaların Mekanik Davranışlarının İncelenmesi, 1. *Uluslararası Hafif Alaşımlar ve Kompozit Malzemeler Sempozyumu UHAKS'18*, Karabük Üniversitesi, Kocaeli, 22-24 Mart 2018.



ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında Manisa’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Manisa’da tamamladı. 2005 yılında girdiği Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 2010 yılında mezun oldu. Çalışma hayatına Savunma Sanayii sektöründe ileri kompozit malzemeden sahil güvenlik botları tasarım ve üretimi üzerine faaliyet gösteren Yonca-Onuk J.V’de Mekanik Tasarım Mühendisi olarak başladı. 2012 yılında Zırhlı Taktik Araçlar Sistem Mühendisi olarak göreve başladığı Otokar Otomotiv ve Savunma Sanayi A.Ş’de Zırhlı Taktik Araçlar Uzman Sistem Mühendisi olarak görevine devam etmektedir.

