

154452

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Prof. Dr. Hüseyin Sönmez

BALİSTİK KORUMA AMACIYLA KULLANILAN
MALZEMELER ve BU MALZEMELERİN BALİSTİK
DEFORMASYONUNA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Makina Mühendisi Semih ÖZER

FBE Makina Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Prof. Dr. Ayşegül Akdoğan

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN

Prof. Dr. Cemalettin Yaman

İSTANBUL, 2004

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. BALİSTİK KORUMA AMACIYLA KULLANILAN MALZEMELER.....	3
2.1 Balistik Koruma Amacıyla Kullanılan Metalik Malzemeler	3
2.1.1 Çelik.....	4
2.1.2 Alüminyum Alaşımları	12
2.1.3 Titanyum Alaşımları	16
2.2 Balistik Koruma Amacıyla Kullanılan Seramik Malzemeler	18
2.2.1 Alüminyum Oksit.....	21
2.2.2 Bor Karbür	22
2.2.3 Silisyum Karbür	23
2.2.4 Titanyum Diborür	24
2.2.5 Üretim Metotları	25
2.2.5.1 Sinterleme	26
2.2.5.2 Sıcak presleme	26
2.3 Balistik Koruma Amacıyla Kullanılan Polimer Esaslı Malzemeler	28
2.3.1 Aramid Lifleri	28
2.3.1.1 Aramid Liflerinin Özellikleri.....	28
2.3.1.2 Aramid Liflerinin Çeşitleri ve Kullanım Alanları.....	32
2.3.1.2.1 Kevlar.....	34
2.3.1.2.2 Twaron.....	38
2.3.1.3 Aramid Liflerinin Üretim Metotları.....	39
2.3.2 Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen.....	41
2.3.2.1 Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen Liflerinin Özellikleri	41
2.3.2.2 Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen Liflerinin Çeşitleri ve Kullanım Alanları....	45
2.3.2.2.1 Dyneema.....	46
2.3.2.2.2 Spectra.....	47
2.3.2.3 Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen Liflerinin Üretim Metotları	48
3. PATLAYICI REAKTİF ZIRHLAR	49
4. BALİSTİK ÇARPMA MEKANİĞİ	52
4.1 Metalik Malzemelerin Balistik Davranışı.....	54
4.2 Seramik Yüzeysel Kompozit Malzemelerin Balistik Davranışı	65
4.2.1 Seramik Zırhlarda Sıkıştırma Etkisinin Balistik Davranışa Etkisi.....	69

4.2.2	Seramik Kompozit Zırhlarda Tabakalaşma Etkisi	70
4.2.3	Seramik Kompozit Zırhlarda Destek Levhasının Balistik Davranışa Etkisi.....	73
4.3	Polimerik Esaslı Malzemelerin Balistik Davranışı	76
4.3.1	Polimerik Matrisin Balistik Davranışa Etkisi	87
5.	BALİSTİK KORUMA MALZEMELERİYLE İLGİLİ BAZI ÖNEMLİ STANDARTLAR	91
6.	DENEYSEL ÇALIŞMA.....	93
6.1	Deney Malzemeleri.....	93
6.2	Deney Teçhizatı	94
6.2.1	Sarkaçlar	96
6.3	Deneyin Yapılışı	98
6.4	Deneyin Sonuçları.....	99
6.5	Deney Sonuçlarının İrdelenmesi.....	99
7.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	102
	KAYNAKLAR	104
	ÖZGEÇMİŞ.....	107



SİMGE LİSTESİ

C	Boyuna gerilim dalga hızı
E	Elastiklik modülü
E_0	Kaybolan enerji
g	Yerçekimi ivmesi
h	Salınım yüksekliği
h_C	Seramik levha kalınlığı
m_p	Parçacık kütlesi
m_k	Sarkaç kütlesi
V	Hız
V_R	Mermi ve tapa çıkış hızı
V_{50}	Balistik limit hız
W	Tapa oluşumu sırasında kayma kuvvetlerini yenmek için harcanan iş
ε	Gerinim
ρ	Yoğunluk
ρ_B	Destek levhası yoğunluğu
ρ_C	Seramik malzeme yoğunluğu
Δh_B	Seramik levha konulması sonucu destek levhasında oluşan penetrasyon derinliğindeki azalma



KISALTMA LİSTESİ

AISI	American Iron and Steel Industry
AMRA	Army Materials Research Agency
AP	Armor Piercing
DSM	Dutch State Mines
ELI	Extra Low Interstitial
ESR	Electro Slag Remelting
HHA	High Hardness Armor
NATO	North Atlantic Treaty Organisation
NIJ	National Institute of Justice
RHA	Rolled Homogenous Armor
SAE	Society of Automative Engineering
UD	Unidirectional
UHA	Ultra High Hardness Armor



ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Mil-A-46100 standardına uygun olarak imal edilmiş yüksek sertlikli civatalanabilir çelik zırh seti8
Şekil 2.2	Seramik kompozit zırha bir örnek20
Şekil 2.3	Sıcak pres şeması27
Şekil 2.4	Sıcaklığın aramid ve polimer esaslı liflerin dayanımı üzerine olan etkisi.....30
Şekil 2.5	Kevlar liflerinin tekrar eden kimyasal birimi34
Şekil 2.6	Sıcaklığın Kevlar 29 lifinin çekme dayanımı üzerine etkisi.....36
Şekil 2.7	Kevlar 29 ve Technora liflerinin yüksek sıcaklıkta zaman bağlı olarak çekme dayanımlarında meydana gelen azalma.....37
Şekil 2.8	Kevlar 49 ve bazı liflerin gerilim-gerinim eğrisi.....38
Şekil 2.9	Değişik Kevlar lifleri için elastiklik modülü-gerinim ilişkisi.....38
Şekil 2.10	Lif üretiminde kullanılan bir makara.....40
Şekil 2.11	Kuru jet ıslak döndürme işlemi40
Şekil 3.1	Kontakt-5 patlayıcı reaktif zırh bir tankın kulesine monte edilmiş haliyle50
Şekil 4.1	Balistik limitin altındaki hızlarda gerçekleşen çarpmalar53
Şekil 4.2	Balistik limitin üzerindeki çarpmalar54
Şekil 4.3	Çelik bir merminin 2.54 cm kalınlığındaki 6061-T6 alüminyum hedefi delmesi, deney ve sayısal modelleme57
Şekil 4.4	Küresel bir çelik merminin bir alüminyum hedefi delmesinin hesaplanması ..58
Şekil 4.5	Düz çelik bir merminin alüminyum hedefi delmesi58
Şekil 4.6	Monolitik çelik plakalarda sertliğin balistik dirence olan etkisi.....61
Şekil 4.7	Uranyum ve çelik mermiler için 6.35 mm kalınlıktaki haddelenmiş çeliğin balistik limiti63
Şekil 4.8	Sivri ve küt uçlu mermiler için 4340 çeliğinin değişik kalınlıklar için balistik limiti.....64
Şekil 4.9	Balistik limit hız ve hedef kalınlığı/mermi çapı arasındaki bağıntı.....64
Şekil 4.10	AD85 alumina ve 6061-T6 alüminyum destek plakasının çelik bir mermiye karşı gösterdiği balistik davranışın simülasyonu67
Şekil 4.11	Anderson-Timmons'un deney konfigürasyonu69
Şekil 4.12	Sherman ve Ben Shushan'ın sıkıştırma etkisi deneyinin şeması.....70
Şekil 4.13	Roeder ve Sun tarafından yapılan çalışmadaki üç katmanlı kompozit ve dokuz katmanlı kompozitin yapıları.....72
Şekil 4.14	Roeder ve Sun tarafından yapılan çalışma sonucu farklı katman sayısına sahip seramik/metal kompozit zırhların balistik performansları.....73
Şekil 4.15	Lee ve Yoo'nun çalışması sonucu aynı alansal yoğunluğa sahip olan farklı seramik/metal zırh konfigürasyonlarında, kalınlık oranının balistik performansa etkisi75
Şekil 4.16	Hetherington'un yaptığı deneyler sonucu, aynı alansal yoğunluk için farklı alumina/alüminyum kalınlık değerlerine sahip zırh konfigürasyonları için 7.62 mm zırh delici mermiye karşı görülen balistik limit.....76
Şekil 4.17	Statik yükleme sonucu tahrip olmuş bir lifin görüntüsü.....77
Şekil 4.18	Alansal yoğunluğa bağlı olarak kompozit lamineler ile kumaş yığınlarının balistik limitlerinin karşılaştırılması78
Şekil 4.19	Dinamik yükleme sonucu tahrip olmuş bir lifin görüntüsü.....78
Şekil 4.20	Twaron kumaşları için "düşük" gerinim hızlarında gerilim-gerinim eğrileri...82
Şekil 4.21	Twaron kumaşları için "yüksek" gerinim hızlarında gerilim-gerinim eğrileri.83
Şekil 4.22	Twaron kumaşları üzerinde yapılan deneyler sonucu çarpma enerjisine göre zırhın emdiği enerji miktarı.....83

Şekil 4.23	Tan'ın farklı geometriye sahip mermilerle Twaron kumaşı üzerine yaptığı deneyler sonucu ortaya çıkan enerji sönümleme grafiği.....	85
Şekil 4.24	200 m/s hızla çarpan mermiler için ipliklerin bükülme şekli	86
Şekil 4.25	Bir merminin çarpması sonucu lifçik oluşumuna uğramış bir lifin elektron mikroskobu altındaki görüntüsü.....	87
Şekil 4.26	Değişik hız ve mermi geometrileri için sürtünme sonucu oluşan lif kırılmaları	89
Şekil 6.1	Deneyde kullanılan plakalar	94
Şekil 6.2	Deneyde kullanılan teçhizatın toplu görüntüsü	95
Şekil 6.3	Sivri uçlu sarkacın teknik resmi	96
Şekil 6.4	Sivri uçlu sarkacın önden, yandan, üstten görüntüşleri	97
Şekil 6.5	Düz uçlu sarkacın teknik resmi.....	97
Şekil 6.6	Düz uçlu sarkacın önden, yandan, üstten görüntüşleri	97
Şekil 6.7	Sivri uçlu sarkaç ile yapılan vuruşlar sonucu cam macununda oluşan çöküntüler.....	100
Şekil 6.8	Düz uçlu sarkaç ile yapılan vuruşlar sonucu cam macununda oluşan çöküntüler.....	101



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Uluslararası spesifikasyona göre haddelenmiş homojen zırh çeliğinin mekanik özellikleri ve kimyasal bileşimi..... 11
Çizelge 2.2	Uluslararası spesifikasyona göre yüksek sertlikli zırh çeliğinin mekanik özellikleri ve kimyasal bileşimi..... 12
Çizelge 2.3	Uluslararası spesifikasyona göre ultra yüksek sertlikli zırh çeliğinin mekanik özellikleri ve kimyasal bileşimi..... 12
Çizelge 2.4	Balistik koruma amacıyla kullanılan alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri..... 14
Çizelge 2.5	5083 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri 15
Çizelge 2.6	7039 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri 15
Çizelge 2.7	7.62 mm AP mermilerinin zırhın dik eksenine yönündeki çarpmalarına karşı değişik tipteki zırhların kütle etkinlikleri 16
Çizelge 2.8	Balistik koruma amacıyla kullanılan Ti-6Al-4V ELI alaşımının kimyasal bileşimi 17
Çizelge 2.9	Balistik koruma amacıyla kullanılan Ti-6Al-4V ELI alaşımının mekanik özellikleri 17
Çizelge 2.10	Çelik, alüminyum ve titanyum zırh malzemelerinin kıyaslaması 18
Çizelge 2.11	Sık kullanılan seramik zırh malzemelerinin bazı özellikleri 21
Çizelge 2.12	Alüminyum oksit seramiklerinin saflık derecelerine göre ısıl ve mekanik özellikleri 22
Çizelge 2.13	Bor karbürün genel özellikleri 23
Çizelge 2.14	Silisyum karbürün genel özellikleri..... 24
Çizelge 2.15	Titanyum diborürün genel özellikleri 25
Çizelge 2.15	Hacimsel olarak %50 oranında Kevlar 49 lifleriyle takviye edilmiş bir polimer kompozit için nem faktörünün mekanik özelliklere etkisi 31
Çizelge 2.17	Technora(HM-50) liflerinin kimyasal direnci 31
Çizelge 2.18	Değişik aramid lifleri için ortalama maliyet..... 33
Çizelge 2.19	Piyasadaki üç Kevlar türünün dayanım özellikleri..... 34
Çizelge 2.20	Balistik koruma amacıyla kullanılan Twaron liflerinin mekanik özellikleri..... 39
Çizelge 2.21	Bazı yüksek performanslı polietilen liflerinin aksenele yöndeki mekanik dayanım değerleri..... 43
Çizelge 2.22	Polietilen ve aramid liflerin belli bir süre için kimyasal ortamdaki dayanımlarının muhafazasının karşılaştırılması..... 44
Çizelge 2.23	Dyneema liflerinin mekanik özellikleri 46
Çizelge 2.24	Spectra 1000 lifinin bazı özellikleri..... 47
Çizelge 2.25	Spectra 2000 lifinin bazı özellikleri..... 47
Çizelge 4.1	S-camının kimyasal bileşimi 84
Çizelge 6.1	Deneysel çalışmada kullanılan plakalarının teknik özellikleri 93
Çizelge 6.2	Ölçülen çöküntü miktarları 99
Çizelge 6.3	Ortalama çöküntü değerleri 99

ÖNSÖZ

Özel ilgi alanım olan balistik koruma konusunda bana bu çalışmayı gerçekleştirme fırsatı veren ve her türlü desteği sağlayan sayın hocam Prof. Dr. Ayşegül Akdoğan'a teşekkürü bir borç bilirim.

Deneyisel çalışma için bana yol gösteren ve yardımlarını esirgemeyen Kara Kuvvetleri Komutanlığı Teknik ve Proje Yönetim Daire Başkanlığı'ndan Y. Müh. Yüzbaşı Can Candan'a saygılarımı sunarım.

Balistik koruma hakkında bana çeşitli dökümanlar veren Teknoteks firmasının genel koordinatörü Alparslan Demirural'a teşekkür ederim.

Deneyisel çalışma sırasında bana büyük yardımlarda bulunan babam Mehmet Tarık Özer'e ve dayım Fatih Gürsel'e teşekkürlerimi sunarım.



ÖZET

Silah teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak balistik koruma amacıyla kullanılan yeni malzemeler geliştirilmiştir. Bu amaçla kullanılan malzemelerin özelliklerini, malzeme türüne bağlı olarak değişik çarpma koşullarında gösterdikleri deformasyonları ve hangi tehdit türüne karşı kullanılmaları gerektiğini bilmek, zırh sistemlerinin tasarımı açısından hayati öneme sahiptir. Günümüzde balistik koruma amacıyla kullanılan malzemeleri metalik malzemeler, polimerik malzemeler ve seramik malzemeler olarak sınıflandırmak mümkündür.

Bu çalışmada balistik koruma amacıyla kullanılan malzemelerin özellikleri, kullanım yerleri ve balistik çarpma sonucu gösterdikleri deformasyon davranışları incelenmiştir. Bu deformasyon davranışları, zırh sistemini oluşturan malzeme veya malzemelerin özelliklerine olduğu kadar çarpan mermi malzemesi, hızı ve geometrisine de bağlıdır.

Deneysel çalışmada ise sarkaç şeklindeki bir kütle ile hedef plakalarına düşük hızlı vuruşlar gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar dünya standartları ile karşılaştırılmışlardır.

Anahtar kelimeler: balistik limit, kompozit, lif, seramik



ABSTRACT

New materials for ballistic protection applications have been introduced correspondent to the advances in weapon technology. It is vital for design of armour systems to know; the properties of these materials, the change in deformations under different impact conditions according to material types and which material should be used against specific threat types. The materials currently used for ballistic protection applications can be classified as metallic materials, polymeric materials and ceramic materials.

This work presents the properties of materials used for ballistic protection, their applications and deformation behaviour under ballistic impact conditions. These deformation behaviours depend on the properties of the material or materials making up the armour systems as well as the material, speed and geometry of the impacting projectile.

In the experimental study, low speed impacts on target plates were conducted using a pendulum like mass and the results were compared to the standart ballistic level.

Keywords: ballistic limit, composite, fiber, ceramic



1. GİRİŞ

İnsanlık tarihi incelendiğinde savaşların çok önemli bir yer tuttuğu ve savaşta başarılı olan toplumların tarihe yön verdiği görülmektedir. Bu yüzden sürekli olarak yeni silahlar geliştirilmiştir. Silahlardaki gelişmeye paralel olarak zırhlar da bronz, demir, örgü veya levha halinde çelik olarak sürekli gelişmişler ve kişisel zırh koruması, bugün zırh denince ilk akla gelen ortaçağ şövalyeleri zamanında doruk noktasına ulaşmıştır. Daha sonra ateşli silahların icadı ve gelişmiyle kişisel zırh kullanımı azalmış ve 1. Dünya Savaşı'nda Ortaçağ şövalyesinin tüm vücudunu saran zırh plakalarından geriye sadece miğfer kalmıştır. 1. Dünya Savaşı'ndan itibaren tankların ve zırhlı araçların ortaya çıkışıyla zırh malzemelerindeki gelişim yeni bir ivme kazanmış; dökme çelik, haddelenmiş homojen çelik, alüminyum ve titanyum gibi metalik zırhların yanısıra nylon gibi sentetik malzemeler, aramid lifleri, yüksek molekül ağırlıklı polietilen, seramik yüzeyli kompozit zırhlar ve patlayıcı reaktif zırhların geliştirilmesiyle günümüzdeki geniş malzeme yelpazesine ulaşılmıştır.

Zırhın önceden belirlenmiş belli bir hıza, geometriye ve ağırlığa sahip bir mühimmat gibi bir tehdiye karşı gerekli korumayı sağlamayıp sağlamadığı hem teçhizatın, hem de personelin korunması açısından hayati öneme sahip bir soru olduğundan bu konuda sürekli olarak çok çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalar zırhın malzemesi kadar zırh tasarımı üzerinde de yapılmaktadır. Bir zırhın istenen şartlar altında görevini yerine getirip getirmeyeceğini anlayabilmek için mühimmatın zırha çarptığı zaman zırhta oluşan hasar mekanizmalarının iyi anlaşılması gerekmektedir. Bazı çarpmalar, küçük bir bölgede deformasyona sebep olurken bazıları da yapının tamamını etkileyebilirler. Kullanılan malzemenin mekanik özelliklerine ve çarpma şartlarına bağlı olarak çok farklı tipte hasarlar oluşabilmektedir.

Zırhın kullanımına etki eden tek faktörün koruma seviyesi olmadığı bilinmektedir. Zırhın ağırlığından dolayı hareket kabiliyetini kısıtlaması bazen yarardan çok zarar getirmiştir. Ateşli silahların gelişmesiyle çelik levha zırhların yeterli koruma seviyesi sağlaması için kalınlıklarının, buna karşılık da zaten oldukça fazla olan ağırlıklarının artmasını gerektirmiş, bunun sonucunda da tüm vücudu saran plaka zırhların kullanımı terk edilmiştir. 13. Yüzyılda yüksek hareket kabiliyetine sahip Moğol süvarilerinin, zırh delebilen kısa kompozit yaylar kullanarak ağır zırhlı şövalyeleri her muharebede yenilgiye uğratmaları ağır zırhın

dezavantajına bir başka örnek olarak verilebilir. Yüzyıllardır zırh tasarımcıları hareket kabiliyeti ve koruma seviyesi arasında bir denge kurmaya çalışmışlardır.

Zırh malzemeleri hakkında yapılan araştırmalar gizlilik içinde yürütölmektedir, bu yüzden bu konudaki en son yenilikler hakkında ayrıntılı bilgi sahibi olmak pek mümkün değildir. Örneğin, günümüzün son nesil ana muharebe tanklarında kullanılan zırh malzemelerinin özellikleri kesinlikle gizli tutulmaktadır. Bu konuda bazı kaynaklarda yeralan bilgiler de çoğunlukla spekülasyondan ibarettir.

Bu çalışmada, günümüzde balistik koruma amacıyla kullanılan zırh malzemeleri, bu malzemelerin özellikleri ve çok kısa olarak üretim metotları açıklanmıştır. Ayrıca bu malzeme türlerinin farklı koşullar altında gösterdiği balistik deformasyon davranışları ve bu davranışlara etki eden faktörler incelenmiştir. Balistik koruma konusu ile ilgili standartların bazıları da liste olarak verilmiştir. Deneysel çalışmada ise, değişik katmanlı aramid plakalarının balistik dayanımının ölçümü amacıyla kullanılan standart yüksek hızlı parçacık çarpması deneyi yerine, yaklaşık aynı enerji seviyesini koruyarak düşük hızlı sarkaç düşürme deneyi yapılmıştır. Sarkaç deneyinden elde edilen sonuçlar bu konudaki en yaygın kullanılan standart olan NIJ ile karşılaştırılmıştır.

2. BALİSTİK KORUMA AMACIYLA KULLANILAN MALZEMELER

Günümüzde balistik koruma amacıyla kullanılan zırh malzemelerini malzeme cinslerine göre gruplara ayırmak mümkündür. Bu malzemelerden bazıları hem tek başlarına hem de diğer malzemelere destek olarak kullanılabilirdiği halde, bazı malzemeler ise yardımcı bir destek malzemesine ihtiyaç duyarlar.

Balistik koruma amacıyla kullanılan malzemeleri şu şekilde sınıflandırmak mümkündür:

1-Metalik Malzemeler

- Çelikler
- Aluminyum alaşımları
- Titanyum alaşımları

2-Seramik esaslı malzemeler

- Aluminyum oksit
- Silisyum karbür
- Bor karbür
- Titanyum dibörür

3- Polimer esaslı malzemeler

- Aramid lifleri
- Yüksek molekül ağırlıklı polietilen

Günümüzde zırhlı araçlarda kullanılan patlayıcı reaktif zırhlar da, her ne kadar klasik anlamda zırh malzemesi olmasalar da, bu sınıflandırmaya dahil edilebilir.

2.1 Balistik Koruma Amacıyla Kullanılan Metalik Malzemeler

20.yüzyılın ikinci yarısına kadar metalik zırhların yüzyıllar boyunca sağladıkları koruma seviyesi açısından rakipsiz olduklarını söylemek yanlış olmaz. Metalik malzemeler kolay bulunabilirlik, maliyet, esneklik ve şekillendirilebilme gibi özelliklerinden dolayı, zırh sistemlerinin geliştirilmesinde her zaman özel yerlere sahip olmuşlardır (Laible, 1980).

Tüm metalik zırh malzemeleri, alaşımlama, ısıl işlem ve bazı başka işleme teknikleriyle değişik tehditlere karşı değişik karakteristiklere sahip olabilirler.

Metalik zırhlar, demir esaslı veya demir dışı alaşımlardan yapılır ve haddeleme, dövme, döküm gibi yöntemlerle imal edilirler. Haddeleme ve dövme işlemleri levha üretimi için kullanılırken, döküm yöntemiyle daha özel şekle sahip parçalar üretilebilmektedir. Çoğunlukla dövme veya haddeleme işlemlerinden sonra malzemeye, ilave balistik özellikler kazandırmak amacıyla ek işlemler uygulanmaktadır. Homojen zırh plakası monolitik zırh olarak kullanılabilirdiği gibi, bazı plakalar boşluklu veya katmanlı konfigürasyon halinde de kullanılabilir. Homojen plakalara, çeşitli tehdit tiplerine karşı, diken şeklinde çıkıntılar eklenebilir.

2.1.1 Çelik

Metalik zırh malzemelerinden bahsederken homojen çelik zırhla başlamak, konuya en uygun giriş şekli olur. Tankın 1. Dünya Savaşı'nda ortaya çıkışıyla beraber homojen çelik zırh plakaları kullanılmaya başlanmış ve uzun süre standart zırh olarak kalmıştır. Bu zaman dilimine ait zırh çelikleri %0.25-%0.4 arası karbon ve başta nikel(%0.5-3.75) ile krom(%1.8) olmak üzere çeşitli alaşım elementlerinden imal edilmiştir (Ogorkiewicz, 1991). Zırh çeliğinin çekme dayanımı da 850-1700 N/mm² arasında değişmekteydi fakat en düşük değerinde bile bu değer, çekme dayanımı yaklaşık 350 N/mm² olan düşük karbonlu çeliklere göre çok daha fazladır.

Zırh çeliği her zaman ısıl işleme tabi tutulur. Isıl işlemin amacı zırhın sertleştirilerek mermilere karşı delinme direncini arttırmak ve çarpan mermilerin kinetik enerjisini daha iyi absorbe edebilmek için temperleme ile zırh çeliğini toklaştırmaktır. Temperleme sırasında kaçınılmaz olarak sertlikte bir düşüş meydana gelir. 1. Dünya Savaşı'nda kullanılan tanklardaki 8-14 mm arasında değişen kalınlıklara sahip çelik levhalar, 420 ile 650 Brinell Sertlik Değeri(HB) arasında değişen değerlere ısıl işlemle sertleştirilmişlerdir. Çelik levhalar birbirlerine perçinleme ile tutturulmuşlardır. Fakat levha kalınlığı arttıkça ve perçinleme yerine kaynak ile birleştirme metodu kullanıldıkça, zırhın sertliği azaltılmak zorunda kalmıştır. Bu yüzden 30'lu yıllardan itibaren zırh levhaları, ince levhalar için 280-390 HB ve kalın levhalar için de 220 HB sertliğindeki talaşlı işlenebilir kalitedeki çelikten yapılmıştır. Tankların alt kısmı için kullanılan ince plakalar da sadece 260 HB sertliğe sahipti. Bunun

sebebi, bu levhaların çarpan mermilerin kinetik enerjisine karşı değil, mayınlardan kaynaklanan patlamalara karşı koruma sağlayacak olması ve bu yüzden de sertlikten çok tokluğun ön planda olmasıdır.

1930'lu yılların ortalarında bile zırh levhalarının tipik kalınlığı 15 mm değerini geçmezken, 2.Dünya Savaşı'nın patlak vermesiyle levha kalınlıkları hızla artmıştır. 1941 yılında Sovyet yapımı KV tanklarındaki levha kalınlıkları 75 mm, 1944 yılında Alman yapımı Tiger 2 tanklarının gövdelerinin ön tarafındaki levha kalınlığı 150 mm, kulelerinin ön kısmındaki levha kalınlığı ise 185 mm dir. 2.Dünya Savaşı'nın sonlarında ortaya çıkan Alman yapımı Jagdtiger ise, ön kısmında 250 mm kalınlığında çelik zırh plakasına sahip olup, 71.7 ton ağırlığıyla 2. Dünya Savaşı'nda kullanılan en ağır zırhlı araç olmuştur.

2. Dünya Savaşı sırasında haddelenmiş homojen çelik zırh, savaş sırasındaki hammadde kıtlığı sebebiyle bazı değişikliklere uğramıştır (Laible, 1980). Bunun sonucunda düşük alaşımli, düşük karbonlu ve yeterli tokluğa sahip bir zırh ortaya çıkmıştır. Bu zırhın karakteristikleri MIL-A-12560 standardında belirtilmiştir. Günümüzdeki haddelenmiş zırh spesifikasyonu olan MIL-A-12560B, Class I ve Class II olmak üzere iki çeşit zırhtan bahseder. Class I maksimum delinme direnci, Class II ise maksimum şok direnci sağlayacak şekilde ısıtılma tabii tutulur. Günümüzde haddelenmiş homojen zırh çeliği(RHA-Rolled Homogenous Armor), zırh malzemesi olarak geliştirilen diğer malzemelerin, zırhlı araçlar için performans derecelendirilmesi için karşılaştırıldığı standart zırh malzemesi durumuna gelmiştir.

1945 yılından günümüze kadar Jagdtiger aracındaki kadar kalın zırh levhaları kullanılmamıştır (Ogorkiewicz, 1991). RHA yaygın olarak kullanılmaya devam edilmiş olsa da tipik kalınlıkları, Sovyet T-54 ve T-62 tanklarının gövdelerinin ön kısımlarında olduğu gibi, 100 mm kadardır. Diğer zırh malzemelerinin ortaya çıkmasından önce yapılan en ağır tank olan 66 tonluk İngiliz Conqueror tankında bile, RHA levhalarının ön gövde kalınlığı 125 mm'yi geçmez.

Çelik zırh döküm yöntemiyle de imal edilebilir. 1.Dünya Savaşı sırasında döküm zırh sınırlı da olsa kullanılmıştır. Buna örnek olarak Renault FT hafif tankların kuleleri verilebilir.

Döküm zırhların kullanımı ekonomik sebeplerden dolayı 2.Dünya Savaşı sırasında yaygınlaşmış ve savaştan sonra hemen hemen tüm tankların kulelerinde döküm zırh kullanılmıştır.

Döküm zırhın kimyasal bileşimi, haddelenmiş zırh levhaları ile aynı olmasına karşın kaliteleri daha değişkendir ve imalat sırasında kalınlıklarının kontrolü, haddelenmiş levhalar kadar hassas yapılamaz. Döküm parçaların levhalara göre bir diğer dezavantajı, genellikle değişken kalınlıkta ve karmaşık şekilli olmalarından dolayı uniform bir ısıtma işlemine tabi tutulamamalarıdır. Bunun balistik özelliklere olumsuz etkisi olur. Bu sebeplerden dolayı döküm zırhın, aynı balistik koruma seviyesini veren RHA'ya göre %5 kadar daha kalın olması gerekir. Yine de daha düzgün kontürlü ve daha fazla eğime sahip bir tasarımla, haddelenmiş levhalara göre daha iyi bir balistik korumaya sahip yapıların üretimi mümkündür (Laible, 1980).

Diğer taraftan, döküm yöntemiyle haddelenmiş levhalara göre çok daha karmaşık şekillerin imal edilebilmesi sebebiyle, döküm zırh imalat açısından büyük kolaylıklar sağlamaktadır (Ogorkiewicz, 1991). Bu sayede zırhın etkili bir şekilde dağılımı mümkündür. Ayrıca kaynaklı bağlantıların sayısını ve buna bağlı olarak gerekli hazırlıkları da azaltmaktadır. Bu konudaki en iyi örnekler gövdeleri ve kuleleri tek parça halinde dökülen tanklardır. Günümüzde döküm zırhlar MIL-A-11356 standardıyla gövde, kule, kupola ve kapakların yapımında halen bazı zırhlı araçlarda kullanılmaktadır.

Teoride RHA ve döküm zırhın sağladığı balistik koruma, çok daha sert çelik zırhların kullanımıyla artırılabilir. Fakat, delinmeye karşı direncin artması için sertlik artışının yanısıra, zırhın aldığı darbe ile parçalanmaması için yeterince tokluğa sahip olması gerekir. Bu tür zırhların dış kısmı daha sert olup kalan kısmı daha yumuşak, dolayısıyla daha tok olduğu için gevrekleşme sorunu ortadan kalkmıştır. Bu tür yüzeyi sertleştirilmiş zırhların sertleştirilmiş kısmı kalınlıklarının %15 ile %40'ı kadardır (Laible, 1980).Sertleştirme işlemi karbürleme veya nitrüleme ile yapılabilir.

Yüzeyi sertleştirilmiş zırhların kullanımına örnek olarak, 1920'li ve 30'lu yıllarda Vickers-Armstrongs tarafından üretilen tanklar verilebilir (Ogorkiewicz, 1991). 20 mm kalınlığında

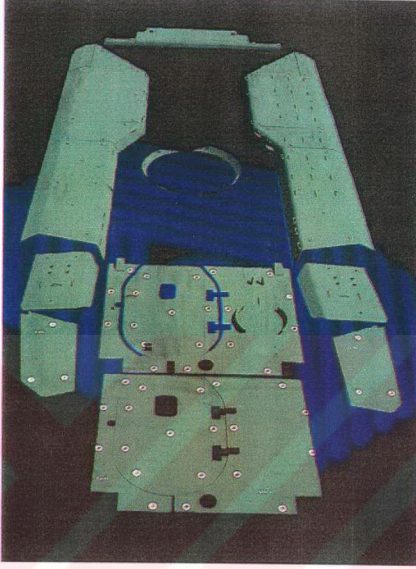
levhalar halinde üretilmiş olan bu zırhların, %1.8 karbon içeren 600 HB sertliğinde karbürize ön yüzü ve 400 HB sertliğinde daha yumuşak bir arka yüzeye sahiptir. 2. Dünya Savaşı'nda Pz.Kpfw.III tanklarında kullanılan 20 mm kalınlığında yüzeyi sertleştirilmiş zırhlar, İngilizlerin 40 mm zırh delici mermiler atan tank toplarına karşı etkili olduğu görülmüştür. Fakat 2. Dünya Savaşı'nda yüzeyi sertleştirilmiş zırhların kullanımıyla ilgili başka önemli bir örnek mevcut değildir.

Yüzeyi sertleştirilmiş zırhların kullanımlarının çok sınırlı sayıda kalmasının sebebi imalat ve montaj sorunlarıdır. Isıl işlemden sonra levhaların talaşlı olarak işlenmesi ve kaynak edilmesi neredeyse imkansızdı, bu yüzden montajı sadece perçinleme veya civatalama ile yapılabiliyordu. Maliyeti ve seri imalatının zor olması sebebiyle bu tür zırhların kullanımı terk edilmiştir.

1960'lı yıllardan itibaren yüksek sertlikli homojen çelik zırh kullanımı tekrar ele alınmıştır. Bu tür zırhların ilk olarak 1963 yılında ABD'de yapılan Cadillac Gage Commando zırhlı araçta görülmüş ve 1970'li yıllarda diğer hafif zırhlı araçlarda da kullanılmıştır. Bu yeni kuşak yüksek sertlikli homojen zırh, ucuz ve düşük alaşımli çeliklerin 500 HB sertliğine tavlanması ile imal edilmiştir. Başlangıçta bu malzemeden yapılmış zırhlar, araç gövdelerine kaynak edildiği zaman büyük çatlak oluşumları gözlenmekteydi. Bunun sebebi malzemenin gevrekliği ve ısıl işlem ile kaynak işlemlerinden oluşan gerilimdi. Zamanla malzemenin bileşiminde ve imalat prosesinde yapılan iyileştirmelerle çatlak oluşumu sorunu aşılmıştır. 500 ile 550 HB arasında sertliğe sahip olan yüksek sertlikli homojen zırh çelikleri, normal ve zırh delici mermilere karşı RHA'dan daha etkilidir. Örneğin; 7.62 mm NATO AP mermileriyle kör noktadan dik açıda yapılan atışları durdurmak için 12.5 mm kalınlığında yüksek sertlikli homojen çelik zırh yeterli olurken, aynı koruma seviyesi için 320-380 HB sertliğe sahip RHA'nın kalınlığı 14.5 mm olmak zorundadır. Bunun anlamı aynı koruma seviyesi için RHA'nın %16 daha ağır olması gerektiğidir. Yüksek sertlikli zırh çeliklerinin kullanımı MIL-A-46100 standardı altında devam etmektedir (Laible, 1980).

Daha önce değinildiği gibi, zırhın gevrekleşmeden dolayı kırılmasını önlemek için sertliğinin belli sınırlar altında tutulması gerekmektedir. Yüksek sertliğin getirdiği avantajlardan yararlanıp gevrekliğin getirdiği mahsurları aşmak için, çelik zırhın geliştirilmesinde iki yol

izlenmiştir; metal lamine kompozitleri oluşturmak ve ingot elde etmek için gereken döküm teknolojisini iyileştirmek.



Şekil 2.1 Mil-A-46100 standardına uygun olarak imal edilmiş yüksek sertlikli civatalanabilir çelik zırh seti [1]

Metal lamine zırhların geliştirilmesi alanındaki en önemli gelişme, 1960'lı yıllarda geliştirilen çift sertlikli çelik zırhlardır. Aslında çift sertlikli zırh düşüncesi yeni değildir. 14. yüzyıldan itibaren kullanılan çeşitli zırhlarda, farklı sertliklere sahip malzemelerin çeşitli yöntemlerle birbirlerine geçmesi sonucu çift sertlikli zırh elde edildiği görülür. 1960'lı yıllarda eldeki balistik dataya göre zırh delici mermileri yenmenin en iyi yolu, çarpma anından itibaren merminin kırılmasını sağlamaktır. Bu kırılmanın etkili bir şekilde sağlanması için zırhın en az 58-62 HRC sertliğine sahip olması gerekiyordu. Bu sertliğe sahip monolitik çelik zırhlar çarpma anında kırılacak veya büyük oranda çatlak oluşumu görülecekti. Bu sebepten dolayı daha sert olan çelik katmanı, daha yumuşak ve sünek olan arka katmana bağlama fikri ortaya çıkmıştır. Bu şekildeki çelik zırh ilk olarak 1930'lu yıllarda Hadfield'in Duplex zırhı olarak ortaya çıkmışsa da yüksek fiyatı sebebiyle uzun süre kullanılmamıştır.

1964 yılında ABD'de AMRA(Army Materials Research Agency) tarafından finanse edilen bir araştırma sonucu ilk çift sertlikli çelik zırh levhası üretilmiştir. Ön levha %0.5 karbon içeren 9Ni-4Co alaşımından, arka levha ise %0.3 karbon içeren çelikten yapılmıştır. Daha sonra ön levha malzemesi H-11 çeliği olarak değiştirilmiş ve ürün DP5A-2 adıyla pazarlanmıştır. Levhaların birbirleriyle eşleşen yüzeyleri taşlanmış ve malzemeler kenarlarından birbirlerine kaynak edilmiştir. Kaynak edilmiş olan levhalar 1149° C'de sıcak haddeleme yoluyla metalurjik olarak bağlanmış, 1038° C sıcaklığına tekrar ısıtılmış, 760-593° C arasında bir sıcaklığa havada soğutulmuş ve tekrar haddelenmiştir. Haddelenmeden sonra da yağda soğutulmuş ve temperlenmiştir.

Bu proses çift sertlikli düz levhaların imalatında etkili olsa da, proses sonucu çıkan malzeme düz ve sert olduğu için talaşlı ve talaşsız şekil verme işlemleri uygulamak zordur. Bu yüzden esnekliği artırmak için, levhalara şekil verildikten sonra istenen balistik sertliğin verilmesi için ısıtım işlemi yapılması öngörülmüştür. İşlem başarılı olmuştur ve malzeme bugün MIL-A-46099 standardı altında üretilmektedir.

Belli bir süre yüksek sertlikli ve çift sertlikli çelik zırhlar, 25 mm'den daha ince levhaların yapımında kullanılmışlardır (Ogorkiewicz, 1991). Bu yüzden sadece hafif zırhlı araçlarda kullanım alanı bulmuşlardır. 1980'li yılların ortalarından itibaren yüksek sertlikli çelik zırhların kalınlığı 50 mm'ye, çift sertlikli çelik zırhların kalınlığı ise 100 mm'ye çıkmış, böylece bu malzemeleri daha ağır zırhlı araçlarda kullanma imkanı doğmuştur.

Sert bir ön tabakayla daha yumuşak ve sünek bir arka tabakanın güçlü bir metalurjik bağ ile bağlanmasından dolayı, çatlak oluşumunun ön tabakada hapsolmesi sebebiyle çift sertlik çelik zırhlar, yüksek sertlikli çeliklere göre balistik açıdan daha etkilidirler. Daha önce verilen 7.62 mm NATO AP mermisi örneği için 9 mm kalınlığındaki çift sertlikli çelik zırh yeterlidir. Bu da RHA'ya göre %38, yüksek sertlikli çeliğe göre %28 ağırlık tasarrufu demektir.

Metalurjik olarak yüksek kaliteli çeliklerin üstün balistik performansa sahip oldukları uzun süreden beri bilinmektedir(Laible, 1980). Bu düşünceden hareketle 1960'lı yıllarda ABD'de tek yönlü katılaşmış çeliklerden zırh üretme fikri doğmuştur. Bu yöntemde metal öyle bir dökülür ki, tüm yapıdaki ısının tek bir yüzeyden çekilmesiyle soğuma yüzeyinden tüm döküm

boyunca tane oluşumu sağlar. Ortaya çıkan katılaşmış çelik kütüğün, gözeneksiz çok iyi bir iç yapıya sahip olduğu görülmüştür. Bu yöntemle üretildikten sonra haddelenip ısı işleme tabi tutulan ve 50-60 HRC arası sertliğe sahip olan zırh çeliklerinin, yapılan balistik testler sonucu çok iyi tokluğa ve balistik performansa sahip olduğu görülmüştür. Maalesef, tek yönlü katılaşma işleminde döküm kalınlığı belli bir değeri geçtikten sonra ısı, soğuma yüzeyinden etkili bir şekilde çekilemez. Bu sebepten dolayı yöntem büyük kütüklerin imalatı için elverişli değildir. Çelik zırh levhaların imalatında büyük kütüklerin üretimi şart olduğu için, bu yöntemle hiçbir zaman çelik zırh üretilmemiştir.

Yine de yüksek metalurjik kaliteye sahip çeliklerden zırh üretme fikri oldukça cazip gelmiştir. 1960'lı yılların ortalarında, RHA veya döküm zırha göre daha yüksek sertlik derecelerine tavlatabilip, yine de daha temiz mikroyapıdan dolayı tokluğunu kaybetmeyen zırh çeliği üretimi konusunda çalışmalar yapılmıştır(Ogorkiewicz, 1991). Bu çalışmalar sonucunda doğan Yüksek Performanslı Zırh adındaki ürün; vakum ark ergitme yöntemiyle üretilmiş, %9 nikel ve %4 kobalt içeren, 500 HB sertliğine tavllanmış 40 mm kalınlığında çelik zırh levhalarıdır. Vakum ark ergitme yöntemiyle üretilen bazı çeliklerde bu değerler %18 nikel, %10 kobalt ve 590 HB seviyelerine ulaşmıştır. Bu tür levhaların 7.62 mm NATO AP mermilerini yenmesi için kalınlıklarının 9 mm olması yeterlidir, ki bu özellik onları çift sertlikli çeliklerle eşdeğer kılmaktadır. Fakat maliyetleri çok fazladır, bu yüzden de pratikte pek kullanılmamışlardır.

Bu konudaki bir başka çalışma da elektro cüruf ergitme(ESR) yöntemiyle yapılan zırh çelikleridir. Bu yöntemin yüksek sertlikli homojen kalın çelik zırh levhalarının yapımında en iyi yöntem olduğu anlaşılmıştır. ESR çelik zırhı günümüzde yaygın olarak kullanılan 4340 alaşımına dayandırılmıştır. Ergitme yöntemiyle üretilen diğer zırhların aksine sadece %1.7 nikel ve %0.8 krom içermektedir. Bu yöntemle üretilen çeliklerin metalurjik kalitelerinin, diğer ergitme yöntemleriyle üretilen çeliklere göre daha üstün olduğu görülmüştür. Üstelik daha ekonomik bir yöntemdir.

4340 ESR çeliği Apache helikopterlerindeki yüzden fazla kritik parçanın yapımında kullanılmıştır (Laible, 1980). Fakat ilk başlarda tanklarda yapısal zırh olarak kullanılmamıştır. Yapısal tank zırhından beklenen önemli bir özellik, sıfırın altındaki

sıcaklıklarda mermiler isabet ettiği vakit yapısal bütünlüğün korunmasıdır. Bu çeliğin düşük sıcaklıklarda yeterli tokluğa sahip olmadığı görülmüş, bunun üzerine karbon oranı azaltılıp nikel oranı artırılmak suretiyle istenen tokluk sağlanmıştır. ESR çeliğinin tanklarda kullanımı MIL-A-46173 koduyla standartlaştırılmıştır.

Tipik 4340 ESR zırh çeliğinin çekme dayanımı 2190 N/mm^2 olup sertliği 550 HB'dir (Ogorkiewicz, 1991). Buna rağmen oldukça toktur. Sadece mermilerin nüfuziyetine karşı etkili olmakla kalmayıp, patlama etkisine sahip bir mermi çarptığı zaman oluşan gerilim dalgalarından dolayı meydana gelen parça fırlaması tehlikesini de ortadan kaldırır.

Günümüzde balistik koruma amacıyla kullanılan çelik zırh plakaları sertlik derecelerine göre haddelenmiş homojen zırh(RHA), yüksek sertlikli zırh(HHA) ve ultra yüksek sertlikli çelik zırh(UHA) olarak üç grup haline getirilmiştir. Uluslararası spesifikasyona göre bu tür levhaların kimyasal bileşimleri, sertlik değerleri ve mekanik özellikleri Çizelge 2.1, 2.2 ve 2.3'te görünmektedir.

Çizelge 2.1 Uluslararası spesifikasyona göre haddelenmiş homojen zırh çeliğinin mekanik özellikleri ve kimyasal bileşimi [2]

a)Sınıf 1: Penetrasyona karşı iyi direnç amacıyla ısıtılmış işlem görmüş

Kalınlık(mm)	Sertlik(HB)	Charpy - V (Joule)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
3 - 20	380-430	Min. 18	1100-1400	Min. 9
20 - 40	340-390	Min. 20	1000-1300	Min. 10
40 - 80	300-350	Min. 30	900-1200	Min. 11

b)Sınıf 2: Şok etkisine karşı iyi direnç amacıyla ısıtılmış işlem görmüş

Kalınlık(mm)	Sertlik(HB)	Charpy - V (Joule)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
3 - 150	280-330	Min. 40	850-1150	Min. 12

c)Kimyasal Bileşim

%C	%P	%S
≤ 0.32	≤ 0.015	≤ 0.010

Çizelge 2.2 Uluslararası spesifikasyona göre yüksek sertlikli zırh çeliğinin mekanik özellikleri ve kimyasal bileşimi [2]

a)Sınıf 1: Penetrasyona karşı maksimum direnç amacıyla ısıl işlem görmüş

Kalınlık(mm)	Sertlik(HB)	Charpy - V (Joule)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
3 - 150	480-540	Min. 16	1400-1800	Min. 8

b)Sınıf 2: Şok etkisine ve penetrasyona karşı iyi direnç amacıyla ısıl işlem görmüş

Kalınlık(mm)	Sertlik(HB)	Charpy - V (Joule)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
3 - 150	420-480	Min. 27	1200-1600	Min. 9

c)Kimyasal Bileşim

	%C	%P	%S
Sınıf 1	≤ 0.32	≤ 0.015	≤ 0.010
Sınıf 2	≤ 0.24	≤ 0.015	≤ 0.010

Çizelge 2.3 Uluslararası spesifikasyona göre ultra yüksek sertlikli zırh çeliğinin mekanik özellikleri ve kimyasal bileşimi[2]

a)Sınıf 1: Penetrasyona karşı maksimum direnç amacıyla ısıl işlem görmüş

Kalınlık(mm)	Sertlik(HB)	Charpy - V (Joule)
3 - 100	570-640	Min. 10

b)Sınıf 2: Penetrasyona karşı maksimum direnç amacıyla ısıl işlem görmüş

Kalınlık(mm)	Sertlik(HB)	Charpy - V (Joule)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
3 - 100	530-590	Min. 12	1600-2000	Min. 7

c)Kimyasal Bileşim

	%C	%P	%S
Sınıf 1	≤ 0.5	≤ 0.015	≤ 0.010
Sınıf 2	≤ 0.46	≤ 0.015	≤ 0.010

2.1.2 Alüminyum Alaşımları

1950'li yıllara kadar zırhlı araçlarda zırh malzemesi olarak sadece çelik kullanılmaktaydı. Fakat bu yıllardan itibaren, çeliğe göre daha hafif bir zırh malzemesi geliştirme fikri ortaya

atılmış ve doğal olarak alüminyum hafifliğinden dolayı büyük ilgi çekmiştir. Bu tür zırhlar genellikle düşük kalibreli mermilere ve şarapnel parçalarına karşı geliştirilmiştir (Elaldı, 1997). Bu tip tehlikelere karşı öteden beri, 320-380 HB sertliğe sahip RHA levhalarıyla koruma sağlanmaya çalışılmıştır ve birçok hafif zırhlı araç halen böyle bir korumaya sahiptir. Alüminyum gibi demir esaslı olmayan metalik zırhlar ilk olarak ABD’de Kaiser Alüminyum ve Kimya Şirketi tarafından üretilmiş, FMC firması da pratik kullanımına öncülük etmiştir. Bu firma 1959 yılında, şu an halen kullanılan en yaygın zırhlı personel taşıyıcılarından biri olan M113’ü tasarlamış ve birçok diğer zırhlı araç bu örneği takip etmiştir. Bu araçlara örnek olarak M114 keşif aracı, M108 105 mm’lik öbüs ve M109 155 mm’lik kundağı motorlu öbüsler verilebilir.

Alüminyum alaşımları özel zırh uygulamaları için tasarlanmış ve 5083 ile 5456 Al alaşımları gerinim sertleşmesiyle şarapnel parçalarına karşı direnci artırılmıştır (Laible, 1980). Bu alaşımlar MIL-A-46027 standardı altında kullanılmaktadır. 5083 alaşımı bu alanda kullanılan ilk alaşım olup, yaklaşık %4.5 magnezyum ve %0.75 mangan içermekte ve 300-350 N/mm² çekme dayanımına sahiptir (Ogorkiewicz, 1991). Buna karşın sertliği sadece 75 HB’dir, bu yüzden daha düşük dayanımını da düşünürsek, aynı balistik koruma seviyesi veren RHA levhaya göre kalınlığının çok daha fazla olması gerekir. Örneğin 7.62 mm AP mermilerine karşı gerekli korumayı sağlamak için, 380 HB sertliğindeki RHA levhanın kalınlığının 14.5 mm olması yeterli iken, 5083 alüminyum zırh için bu rakam 48 mm’dir. RHA’nın 7850 kg/m³ yoğunluğuna karşın 5083 zırhın yoğunluğunun 2660 kg/m³ olmasına rağmen, RHA’nın 114 kg/m³’lük alansal yoğunluğuna (birim alan başına düşen kütle) karşın, 5083 zırhın alansal yoğunluğu 128 kg/m³ ile daha fazladır. Buna rağmen 14.5 mm çapındaki zırh delici mermiler için, 5083 alaşımının kütle etkinliği RHA’ya göre daha fazladır [3].

Top mermilerinin şarapnel parçalarına karşı koruma söz konusu olduğunda (kundağı motorlu topçu platformları için en büyük, zırhlı personel taşıyıcıları için de önemli bir tehdittir), 5083 alüminyum zırhın alansal yoğunluğu RHA’ya göre çok daha azdır (Ogorkiewicz, 1991). Bunun anlamı 5083 zırhın RHA’ya göre daha iyi şarapnel koruması sağladığı veya aynı koruma seviyesi için RHA’ya göre daha hafif olmasıdır.

5083 alüminyum zırhı, RHA'ya göre yaklaşık üç kat daha kalın olmak zorunda olduğu için, ağırlığına oranla eğilme rijitliği çok daha fazladır. Gerçekte alüminyumun elastiklik modülü 71 GN/m², çeliğin ise 206 GN/m² dir. Fakat eğilme rijitliği levhaların sadece elastiklik modülü değil, kalınlıklarının kübü ile de doğru orantılıdır. Bu yüzden aynı ağırlıktaki çelik levhalara göre alüminyum levhalar yaklaşık 9 kat daha rijittir. Bu sayede, zırhlı araç gövdelerinde rijitliği sağlayan bazı yapısal elemanlara gerek kalmaz. Buna bağlı olarak M113 aracının alüminyum gövdesi, çelik gövdeye göre %10 daha hafiftir ve bunun sonucu olarak aracın toplam ağırlığında %6 lık bir azalma sağlanmıştır.

Ağırlık tasarrufunun yanısıra, alüminyum zırhın talaşlı işlenmesi daha kolaydır ve levha kalınlıkları da daha fazla olduğu için kademeli bağlantı kullanmak mümkündür. Bu sayede kaynak işlemine duyulan gereksinim azalır. Tüm bu etkenler alüminyum zırha sahip araçların maliyetini azaltmakla birlikte, alüminyumun ton başına olan maliyeti RHA'ya göre çok daha fazladır.

5083 alaşımının eksikleri sebebiyle 1960'lı yıllarda, ısıl işleme uygun alüminyum-çinko-magnezyum 7000 serisi alaşımlar geliştirilmiştir (Elaldı, 1997). Bu alaşımlara örnek olarak; İngiltere'de Alcan Plate tarafından üretilen 7017 alaşımı, ABD'de Alcoa tarafından üretilen 7039 alaşımı ve Fransa'da Pechiney tarafından üretilen 7020 alaşımları verilebilir.

7039 alaşımı %5 çinko ile %2.5 magnezyum içerir (Ogorkiewicz, 1991). 5083 alaşımına göre daha sert(150 HB) ve çekme dayanımı daha fazladır(485 MPa). Bu sebeple balistik açıdan daha üstündürler ve kalınlıklarının 5083 alaşımları kadar fazla olması gerekmez. Örneğin 7.62 mm AP mermilerine direnebilmesi için kalınlıklarının 38 mm olması yeterlidir. Buna mukabil olarak alansal yoğunlukları daha azdır(106 kg/m²). Alansal yoğunluk açısından 7039 alaşımı, RHA'ya göre daha hafif fakat yüksek sertlikli çeliklere göre daha ağırdır. Ayrıca 14.5 mm zırh delici mermilere karşı, dik atımda RHA'ya göre alansal yoğunluğu %26 daha azdır.

Çizelge 2.4 Balistik koruma amacıyla kullanılan alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri[4]

Alaşım	Si(%)	Fe(%)	Cu(%)	Mn(%)	Mg(%)	Cr(%)	Zn(%)	Ti(%)	Al
5083	0.40	0.40	0.10	0.40 1.0	4.0 4.9	0.05 0.25	0.25	0.15	Kalan
7039	0.30	0.40	0.10	0.10 0.40	2.3 3.3	0.15 0.25	3.5 4.5	0.10	Kalan
7017	0.10	0.20	0.10	0.30	2.3	0.17	5.0	-	Kalan

7018	0.10	0.20	0.10	0.30	1.1	0.17	5.0	-	Kalan
7020	0.35	0.40	0.20	0.05 0.50	1.0 1.4	0.10 0.35	4.0 5.0	-	Kalan

Çizelge 2.5 5083 alüminyum alaşımasının mekanik özellikleri [4]

Sertlik (HB)	85
Çekme dayanımı (MPa)	228
Kopma uzaması (%)	16
Elastiklik modülü (GPa)	70.3
Poisson oranı	0.33
Kırılma tokluğu (MPa.m ^{0.5})	43
Kayma dayanımı (MPa)	190
Basma modülü (GPa)	71.7

Çizelge 2.6 7039 alüminyum alaşımasının mekanik özellikleri [4]

Sertlik (Brinell)	123
Çekme dayanımı (MPa)	330
Kopma uzaması (%)	13
Elastiklik modülü (GPa)	69.6
Poisson oranı	0.33
Kayma dayanımı (MPa)	235

Üstün balistik özelliklerine karşın 7039 alaşımasının dezavantajları da mevcuttur. Bu alaşımlar gerilim korozyonu çatlaklarına karşı duyarlıdır. Özellikle kaynak işlemleri sırasında, ısı tesiri altındaki bölgede gerilim korozyonu oluşumunu önlemek için, ısı girişinin sıkı bir şekilde kontrol edilmesi gerekir. Ayrıca bu sebepten dolayı, kaynak bağlantılarına yakın yerlerde talaşlı işlem yapılmasından kaçınılması gerekir. Gerilim korozyon çatlama tehlikesini azaltmak için alınan önlemler hem imalatı zorlaştırmakta, hem de maliyeti artırmaktadır.

Yine de alınan tüm önlemlere rağmen 7039 alaşımından imal edilen zırhlarda gerilim korozyonu çatlama önemli bir sorun olmaya devam etmiştir. Örneğin, LVTP 7 amfibik taşıyıcılarında kullanılan 7039 alaşımlı zırh daha sonra 5083 alaşımıyla değiştirilmiştir. Fransız AMX-10 araçlarında, daha düşük dayanımlı fakat daha tok ve korozyon direnci daha fazla olan 7020 alaşımının kullanılmasıyla bu sorun en aza indirilmiştir. Gerilim korozyonu sorununu azaltmak amacıyla Alcan firmasının geliştirdiği 7017 alaşımının, 5083 alaşımına göre 7.62 mm AP mermilerine karşı %16 daha fazla balistik direnç sağladığı görülmüştür[3].

Yüksek hızlı mermilere karşı balistik dirençlerinin daha az olması sebebiyle alüminyum alaşımlarının, dış yüzeylerinde yüksek sertlikli ince bir çelikle oluşturduğu kombinasyonun kullanımı düşünülmüştür. Gerçekten de, 5083 alaşımlarının yüksek sertlikli çeliklerle oluşturduğu kombinasyonların 7.62 mm AP mermilerine karşı, gerek 7039 alaşımı, gerekse salt yüksek sertlikli çeliğe göre daha az alansal yoğunluğa sahiptir.

Çizelge 2.7 7.62 mm AP mermilerinin zırhın dik eksenini yönündeki çarpmalarına karşı değişik tipteki zırhların kütle etkinlikleri* (Elaldi, 1997)

Zırh Malzemesi		Yoğunluk(kg/m ³)	Alansal Yoğunluk(kg/m ³)	Kütle Etkinliği
Çelik	RHA(380HB)	7830	114	1.00
	Yüksek sertlikli çelik(550HB)	7850	98	1.16
	Çift sertlikli çelik(600-440 HB)	7850	64	1.78
Al	5083	2660	128	0.89
	7039	2780	106	1.08
	2519	2807	100	1.14

2.1.3 Titanyum Alaşımları

Titanyumun zırh malzemesi olarak kullanımı için yapılan araştırmalar 1950'li yılların başlarına kadar uzanır (Laible, 1980). Titanyuma olan ilgi de, alüminyumda olduğu gibi, çeliğe göre daha hafif olmasından kaynaklanmıştır. 1955 yılında şarapnel parçalarına karşı mükemmel balistik dayanım gösteren bir alaşım geliştirilmiştir. %6 alüminyum ve %4 vanadyum içeren bu alaşımın(Ti-6Al-4V), balistik açıdan diğer tüm titanyum alaşımlarına göre daha üstün olduğu görülmüştür. Zaten bu alaşım endüstride en yaygın olarak kullanılan titanyum alaşımıdır. İlk zamanlarda geliştirilen alaşımlardan yapılan levhalar, balistik testlere tabi tutulduğu vakit çatlamalar görülmüştür. Karbon, hidrojen, oksijen ve azot gibi katışıkların levhaların gösterdiği gevrekliğe etkisi olduğu anlaşılmıştır(Montgomery vd., 1997). Bu

* Kütle Etkinliği: Bir malzemenin birim alandaki kütle miktarı olan alansal yoğunluğuyla, bir tehdite karşı aynı balistik korumayı sağlayan RHA'nın alansal yoğunluğunun karşılaştırılmasıdır. RHA'nın alansal yoğunluğunun verilen malzemenin alansal yoğunluğuna bölünmesiyle bulunur ve elde edilen oran, söz konusu zırh malzemesinin belli bir tehdite karşı kütle etkinliği olarak tanımlanır. Doğal olarak kütle etkinliği ne kadar büyük olursa, belli bir tehdite karşı aynı korumayı sağlamak için gerekli olan ağırlığın o derece azalması demektir ki, bu da arzu edilen bir durumdur.

sorunu aşmak için Ti-6Al-4V alaşımının daha sünek versiyonu olan ELI(ekstra düşük katışıklı) cinsi geliştirilmiştir. Bu alaşım günümüzde Mil-a-46077 standardı altında kullanılmaktadır.

Balistik koruma amacıyla kullanılan Ti-6Al-4V ELI alaşımının kimyasal bileşimi çizelge 2.8'de görülebilir.

Çizelge 2.8 Balistik koruma amacıyla kullanılan Ti-6Al-4V ELI alaşımının kimyasal bileşimi [4]

Aluminyum	% 6
Demir	Maksimum % 0.14
Oksijen	Maksimum %0.13
Titanyum	% 90
Vanadyum	% 4

Çizelge 2.9 Balistik koruma amacıyla kullanılan Ti-6Al-4V ELI alaşımının mekanik özellikleri [4]

Sertlik (Brinell)	326
Sertlik (RHC)	35
Çekme dayanımı(MPa)	790
Kopma uzaması (%)	15
Elastiklik modülü (MPa)	113800
Basma dayanımı (MPa)	860
Poisson oranı	0.32
Charpy darbe dayanımı (J)	24
Kırılma tokluğu (MPa-m ^{0.5})	100
Kayma Dayanımı (MPa)	550

Titanyum alaşımları birçok avantaja sahiptir. Birçok balistik tehdit için RHA ve aluminyum alaşımlarından yapılan zırhlara göre daha yüksek kütle etkinliğine sahiptirler. Birden fazla yapılan atışlara karşı balistik performansları iyidir. Yüksek dayanım/ağırlık oranına ve mükemmel korozyon direncine sahiptir, bu sayede zırhlı araçların bakım masrafları azalır. Mevcut imalathanelerde üretimi ve geri kazanımı kolaydır.

Yine de titanyum alaşımların dezavantajları da mevcuttur. Küçük parçaların kopmasına karşı özel bir muhafaza kullanımı gerektirirler. RHA'ya göre işleme masrafları daha yüksektir.

Geçmiş yıllara bakıldığında, titanyum alaşımlarının kara araçlarında kullanımında bir artış görülmektedir ve bu trendin de devam edeceği tahmin edilmektedir. Bunun sebebi zırhlı araçların ağırlıklarının acil olarak azaltılması isteğidir. Örneğin ABD kara kuvvetlerinin ana muharebe tankı olan M1A2 Abrams'ın mevcut çelik gövdesi, ağırlığının %70'ini teşkil etmesine rağmen toplam maliyetin sadece %23'ü kadardır. Bu yüzden, çeliğe göre daha hafif fakat daha pahalı bir zırh malzemesi kullanmanın aracın toplam maliyetinde fazla bir değişikliğe yol açmayacaktır. Kendine has özelliklerinden dolayı titanyum alaşımları, en maliyet-etkin şekilde, araçların tehditlere karşı koyma kabiliyetlerinden fedakarlık etmeden ağırlıklarının azaltılmasına olanak sağlar. Günümüzde mevcut titanyum alaşımlarını daha ucuza imal etme çalışmaları sürmektedir. Çizelge 2.10'da balistik koruma amacıyla kullanılan titanyum alaşımının diğer metalik zırh malzemeleriyle olan kıyaslaması verilmiştir.

Çizelge 2.10 Çelik, alüminyum ve titanyum zırh malzemelerinin kıyaslaması (Montgomery vd., 1997)

	RHA MIL-A-12560	Alüminyum 5083 MIL-A-46026	Ti-6Al-4V MIL-A-46077
Çekme dayanımı (MPa)	1170	350	970
Yoğunluk(g/cm ³)	7.86	2.70	4.50
Özgül dayanım (MPa.cm ³ /g)	150	130	220
Kütle etkinliği	1	1.0-1.2	1.5

Titanyum alaşımlarının balistik koruma alanında kullanımına çeşitli örnekler verilebilir. ABD yapımı M2 Bradley zırhlı araçlarındaki araç komutanının kapaklarında dövme titanyum alaşımı kullanılmasına karar verilmiştir. Daha önceden dövme alüminyum alaşımından yapılan kapaklarda, titanyum alaşımı kullanılması sayesinde hem balistik koruma seviyesi artmış, hem de %35 ağırlık tasarrufu sağlanmıştır. Daha önce bahsedilen M113 personel taşıyıcılarının ilave zırh taşıyan bir versiyonunda kullanılan ilave zırhlar titanyum alaşımıdır. İlave zırh, bir aracın yük taşıyan yapısına yapıştırma veya mekanik bağlama ile ayrıca monte edilen zırh paketleridir. M1 ana muharebe tankındaki bazı parçaların da titanyum alaşımları ile değiştirilmesi söz konusudur.

2.2 Balistik Koruma Amacıyla Kullanılan Seramik Malzemeler

Seramik zırh malzemelerinden bahsetmeden önce seramik teriminin açıklanması gerekir (Laible, 1980). En geniş anlamda seramik sözcüğü, metal ve metal alaşımları haricinde tüm inorganik malzemeleri kapsar. Bu malzemeler yoğun bir polikristalin malzemedir camı

yapıya kadar değişebilir. Çimento, refrakterler, silikalar, killer ve tüm camlar, ister kristalin ister amorf yapıya sahip olsun, bu gruba dahil edilebilir. Beton ve çimento uzun zamandır sabit koruganlar için koruyucu malzeme olarak kullanılmıştır. Fakat burada bahsedilenler doğal inşaat malzemeleridir ve korugan inşası sırasında, zırhlı araçlar ve kişisel korumanın aksine, herhangi bir ağırlık problemi söz konusu değildir. Seramikler genel olarak gevrekler ve basma yönünde dayanımları çekme yönündeki dayanımlarına göre çok daha fazladır.

2. Dünya Savaşı sırasında, kalın çelik plakaları delme yeteneğine sahip çukur imla mühimmatın geliştirilmesi ve zırhların ağırlığının düşürülmesinin istenmesi sonucu, metal dışı malzemeler üzerine araştırmalar yapılmıştır (Ogorkiewicz, 1991).

1950'li yıllarda ABD'de yapılan bir araştırmada, tanklarda kullanılmak üzere silika esaslı çekirdeğe sahip dökme çelik zırhlar geliştirilmiştir. Silikanın kütle etkinliği 3 olmasına rağmen sistemin toplam kütle etkinliği sadece 1.4'tür. Bu değer, o zamanlarda geliştirilmeye başlanan yüksek sertlikli çeliklerin kullanımıyla zaten elde edilebilen bir değerdi. Ayrıca imalatın pahalı ve zor olması sebebiyle de bu fikirden vazgeçilmiştir.

1950'li yıllarda tanklar için üzerinde çalışılan bir başka fikir de, çelik muhafaza içinde cam bloklarının kullanılmasıdır. M48 tankları üzerine ilave zırh olarak düşünülen bu sistem de silika esaslı zırhla yaklaşık aynı kütle etkinliğine sahipti. Bu düşünce de uygulamaya konmamıştır.

Seramiklerin gerçek anlamda zırh malzemesi olarak kullanılmaya başlanması 1960'lı yılların başlarında olmuştur (Matchen, 1997). Vietnam Savaşı sırasında helikopterlerin ve personelin balistik koruması için hafif zırh sistemlerine ihtiyaç duyulmuş, bunun sonucunda da yaklaşık üçte bir inç kalınlığında, sinterlenmiş alüminyum oksit(Al_2O_3) levhaların sünek bir destek levhasına bağlanması sonucu ilk seramik zırhlar ortaya çıkmıştır. Kullanılan destek levhası genellikle alüminyum veya cam takviyeli plastiktir. İki farklı malzemedен oluşan levhalar birbirine bağlandıktan sonra parçalanmanın önlenmesi için bir muhafaza içine konmuştur. Daha sonra alüminyum oksitin yerine, daha hafif ve daha sert olan bor karbür(B_4C) kullanılmıştır. Daha sonraki yıllarda seramik yüzey olarak silisyum karbür(SiC) ve titanyum diborür(TiB_2) de kullanılmaya başlanmış ve bu malzemelerden yapılan seramik levhalar

Kevlar, Spectra ve cam takviyeli plastik gibi malzemelerden yapılan destek plakalarına bağlanıp kullanılmışlardır.



Şekil 2.2 Seramik kompozit zırha bir örnek: soldaki parça seramik malzemeden yapılmış vuruş yüzeyi, sağdaki parça ise destek plakasıdır [6]

Seramikleri diğer metal esaslı zırh malzemelerine balistik açıdan üstün kılan özellikleri yüksek sertlikleri ve düşük yoğunluklarıdır. Tüm seramik zırh sistemlerinin ortak bir yönleri vardır. Hepsi de sert ve gevrek olan seramik bir yüzeye sahip olup, yumuşak ve sünek bir arka destek plakasına sahiptir. Sert bir çekirdeğe sahip olan zırh delici bir mermi seramik zırha çarptığı zaman, çok sert olan seramik yüzey mermiyi ilk birkaç mikrosaniye içinde parçalamaktadır. Merminin kinetik enerjisinin büyük çoğunluğu seramik tarafından, geriye kalanı ise destek levhası tarafından sönmülmektedir. Destek levhasının seçimi yapısal, balistik ve ağırlık beklentilerine göre yapılır. Malzeme özelliklerinin etkileşimleri ve arayüzey teması sebebiyle seramik kompozit zırhlarda optimizasyon yapmak önemli bir faktördür.

Seramik malzemelerin tahribatı genellikle yapısal hatalardan dolayı oluşur (Smith, 2001). Seramik kristallerinde görülen ana hatalar; yüzey işlemleri sırasında oluşan yüzey çatlakları, gözenekler, kalıntılar ve üretim sırasında oluşan iri tanelerdir.

Gevrek seramik malzemelerdeki gözenekler gerilmenin yoğunlaştığı bölgelerdir ve bir gözenekteki gerilme kritik değere ulaştığında bir çatlak oluşup ilerler. Sünek metallere aksine seramik malzemelerin iç yapısında büyük miktarlarda enerji soğuran süreçler yoktur. Bu

nedenle çatlak ilerlemeye başladığında kırılma oluncaya kadar devam eder. Gözenekler yük uygulanan kesit alanını azaltırlar, bu yüzden de dayanıma olumsuz etki ederler. Bu sebepten dolayı gözeneklerin büyüklüğü ve hacim oranı, seramiklerin dayanımlarını etkileyen en önemli faktörlerden biridir.

Seramik malzemeler düşük tokluğa sahip olmakla beraber, tokluğu artırmak için geçmişte birçok araştırma yapılmıştır. Katkı ilavesiyle sıcak presleme ve reaksiyon bağlama gibi yöntemler kullanılarak tokluğu artırılmış seramikler üretilmiştir.

Çizelge 2.11’de seramik kompozit zırhlarda kullanılan seramik malzemelerin bazı özellikleri verilmektedir.

Çizelge 2.11 Sık kullanılan seramik zırh malzemelerinin bazı özellikleri (Matchen, 1997)

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertlik (Knoop)	Eğilme dayanımı (MPa)
Al ₂ O ₃ (%94)	3.45-3.9	2260	330
SiC	3.10	2800	410
B ₄ C	2.48	2850	634

2.2.1 Aluminyum Oksit

Teknikteki diğer adı alumina olan aluminyum oksit, sadece balistik koruma alanında değil, tüm mühendislik alanlarında en çok kullanılan seramik malzemedir. Aluminyum oksit için gerekli olan hammaddelerin uygun fiyatlı ve kolay bulunabilmeleri sebebiyle en ucuz seramiktir. Bu yüzden de balistik koruma amacıyla kullanılan seramik malzemeler üzerindeki araştırmalar en çok alumina üzerine yoğunlaşmaktadır.

Aluminanın bilimsel keşfi geçen yüzyılda gerçekleşmiştir (Geçkinli, 1991). Ticari olarak ilk kullanımı 1907 yılındaki bir patent ile başlamakla birlikte, kullanımının yaygınlaşması 1920’lerin sonu ile 1930’ların başına denk gelir.

Alumina hekzagonal sıkı paket yapısına sahiptir. Birçok metastabil yapı varolsa da hepsi sonuçta hekzagonal alfa fazına dönüşürler.

Alumina boksitten Bayer prosesiyle elde edilir. Yaklaşık 2000° C sıcaklığa kadar ısıya dayanıklı olup mükemmel kimyasal dirence sahiptir. Asitlere ve bazlara karşı dayanıklıdır. Çok yüksek sıcaklıklarda bile flor gazı dışında bütün gazlara dayanıklıdır. Saflık derecesine göre aluminanın özellikleri değişir. Malzeme özellikleri sadece saflığa değil, mikroyapıya ve poroziteye de bağlıdır. Seramikteki alumina miktarı arttıkça dayanım ve diğer birçok özellik iyileşir fakat üretim zorluğu ve maliyeti de artmaktadır.

Gevrek bir malzeme olan aluminanın kırılma dayanımını ve tokluğunu artırmak için çalışmalar yapılmış ve zirkonya ilavesiyle bu özelliklerin iyileştiği görülmüştür.

Alumina ürünler slip dökümle, ekstrüzyonla, enjeksiyon kalıbı yöntemiyle ve soğuk-sıcak presleme ile şekillendirilirler. Şekillendirmede un, polivinil alkol, mum, doğal reçine gibi organik bağlayıcılar ve yağlayıcılar kullanılır. Bunların haricinde inorganik bağlayıcılar da kullanılabilir.

Çizelge 2.12 Alüminyum oksit seramiklerinin saflık derecelerine göre ısı ve mekanik özellikleri (Mostaghachi, 1996)

	%94	%96	%99.5
Yoğunluk (g/cm ³)	3.69	3.72	3.89
Eğilme dayanımı (MPa)	330	345	379
Sertlik (kg/mm ²)	1175	1100	1440
Kırılma tokluğu (MPa/m ^{0.5})	3.5	3.5	4
Elastiklik Modülü (GPa)	300	300	375
Poisson oranı	0.21	0.21	0.22
Isıl iletkenlik-25°C (W/m.K)	18	25	35
Isıl genişleme katsayısı (°C)	8,1.10 ⁶	8,2.10 ⁶	8,4.10 ⁶

7 mm kalınlığındaki alüminyum destek plakasıyla takviye edilen 8 mm kalınlığındaki alüminyum oksit levha, 7.62 mm NATO AP mermilerini durdurmak için yeterlidir (Ogorkiewicz, 1991). Böyle bir sistemin alansal yoğunluğu sadece 47 kg/m²'dir. Bu da 2.4 kütle etkinliği demektir.

2.2.2 Bor Karbür

Bor karbür(B₄C), elmas ve kübik bor nitrürden sonra bilinen en sert üçüncü malzemedir [5]. İlk olarak 19.yüzyılın ortalarında bulunmasına rağmen üzerinde kapsamlı araştırmaların yapılması 1930'lu yıllarda başlamıştır.

Bor karbür tozunun üretimi, bir elektrik ark fırınında karbon ile B_2O_3 'ün karbotermal indirgenme veya gaz fazı reaksiyonlarıyla birbirleriyle reaksiyona girmesi sonucu gerçekleşir. Bor karbür tozlarının ticari kullanımı söz konusu olduğu zaman, tozlardaki metalik safsızlıkların giderilmesi için tozların ezilmesi ve saflaştırılması gerekir.

Yüksek ergime sıcaklığı, yüksek sertlik, düşük yoğunluk ve üstün kimyasal direnç gibi özellikler bor karbürün başlıca karakteristikleridir (Geçkinli, 1991). Ceradyne firması tarafından balistik koruma amacıyla üretilen bor karbürün bazı özellikleri çizelge 2.13'te verilmiştir.

Çizelge 2.13 Bor karbürün genel özellikleri [7]

Yoğunluk (g/cm^3)	2.50
Eğilme dayanımı (MPa)	410
Sertlik (kg/mm^2)	3200
Kırılma tokluğu ($MPa/m^{0.5}$)	2.5
Elastiklik Modülü (GPa)	460
Poisson oranı	0.17
Isıl iletkenlik-25°C (W/m.K)	90
Isıl genleşme katsayısı (°C)	5.10^{-6}

Seramik zırh malzemeleri arasında bor karbür hem en yüksek sertliğe, hem de en düşük yoğunluğa sahip olup balistik açıdan en etkili olan seramik malzemedir. Buna rağmen maliyeti diğerlerinden daha fazla olduğu için kullanımı çok yaygın değildir. Bor karbür pahalı bir üretim tekniği olan sıcak presleme veya sıcak izostatik pres yöntemleriyle şekillendirilebilmektedir. Bor karbür daha çok, ağırlığın daha kritik bir faktör olduğu helikopterlerin zırhlanmasında kullanılmaktadır. Ayrıca maliyetin fazla problem teşkil etmediği zaman personel ve zırhlı araçlarda da kullanılabilir. Düşük ve orta kalibreli mermilere karşı en iyi balistik dayanıma sahip olan seramik olmasına rağmen, yüksek kalibreli mermilere karşı kırılma davranışındaki değişim sebebiyle fazla etkili değildir.

2.2.3 Silisyum Karbür

Silisyum karbür(SiC) tetrahedral bir yapıya sahip olup silisyum ile karbürün oluşturduğu bilinen tek bileşiktir (Mostaghachi, 1996). Her iki elementin de dış kabuklarında dört elektron mevcut olup, tek bir atom diğer dört atomla bağ yapar. Bu sayede 1600° C sıcaklığa kadar hidrojen ve azottan etkilenmeyen çok kararlı bir yapı ortaya çıkar. Silisyum karbür havada

1000° C sıcaklığın üzerinde bozulur. Diğer bileşiklerde olduğu gibi, silisyumun üzerinde bozulma hızını azaltan bir oksit tabakası meydana gelir. Silisyum karbürün asitlere ve bazlara karşı dayanımı çok yüksektir.

Silisyum karbürün seri üretimi Acheson prosesi ile gerçekleştirilir (Geçkinli, 1991). Bu yöntemde yüksek saflıktaki silisyum ve petrol koku bir elektrik direnç fırınında reaksiyona girerek silisyum karbür oluşur. Balistik koruma amacıyla kullanılan silisyum karbürün genel özellikleri Çizelge 2.14'te görülmektedir.

Çizelge 2.14 Silisyum karbürün genel özellikleri [7]

Yoğunluk(g/cm ³)	3.20
Eğilme dayanımı(MPa)	634
Sertlik (kg/mm ²)	2300
Kırılma tokluğu (MPa/m ^{0.5})	4.3
Elastiklik Modülü (GPa)	450
Poisson oranı	0.17
Isıl iletkenlik-25°C (W/m.K)	115
Isıl genleşme katsayısı (°C)	4.8.10 ⁻⁶

Silisyum karbür hem balistik performans açısından, hem de maliyet açısından bor karbür ile alumina arasındadır. Bu yüzden alumindan daha fazla balistik performans istenen fakat bor karbürün maliyetinin fazla geldiği yerlerde kullanılır. Bor karbür yüksek kalibreli mühimmata karşı etkili olmadığından ağır zırhlı araçlarda en yaygın olarak kullanılan seramik zırh malzemesidir.

2.2.4 Titanyum Diborür

Titanyum diborür(TiB₂) titanyum ile borun yaptığı bileşikler içinde en kararlı olanıdır[5]. Bu malzeme doğada bulunmaz fakat titanyum oksit(TiO₂) ile bor oksitin(B₂O₃) karbotermal indirgenmesi sonucu elde edilir.

Titanyum diborür sinterleme, sıcak pres veya sıcak isostatik pres yöntemleriyle yoğunlaştırılır. Titanyum diborürün sıcak preslemesi 1800-1900° C arası sıcaklıklarda gerçekleşir. Basıncsız sinterleme işlemi için ise metalik ve karbür sinter ilaveleri ve 2000° C'nin üzerinde sıcaklık gerekir.

Titanyum diborür 1000° C sıcaklığa kadar havada oksidasyona dirençlidir. Hidroklorik ve hidroflorik asitlere karşı dirençli olmasına karşın sülfirik ve nitrik asitle reaksiyona girer. Alkalilere karşı da zayıftır. Balistik koruma amacıyla kullanılan titanyum diborürün genel özellikleri Çizelge 2.15'te görülmektedir.

Çizelge 2.15 Titanyum diborürün genel özellikleri [7]

Yoğunluk(g/cm ³)	4.5
Eğilme dayanımı(MPa)	265
Sertlik (kg/mm ²)	2100
Kırılma tokluğu (MPa/m ^{0.5})	5.47
Elastiklik Modülü (GPa)	540
Poisson oranı	0.22
Isıl iletkenlik-25°C (W/m.K)	25
Isıl genişleme katsayısı (°C)	8.2.10 ⁻⁶

Titanyum diborürün zırh malzemesi olarak kullanımına örnek olarak 1989 yılında FMC firması tarafından deneysel amaçlı üretilen M2 zırhlı aracı verilebilir (Ogorkiewicz, 1991). Bu aracın gövdesinde polyester termoset bir reçine matris içinde S-camı lifleriyle takviye edilmiş kompozit malzeme kullanılmıştır. Balistik korumayı artırmak amacıyla da dik yüzeylere titanyum diborür levhalar monte edilmiştir. Bu kombinasyon sayesinde M2A1 aracının standart alüminyum alaşımı zırhına göre %27 oranında ağırlık tasarrufu sağlanmıştır.

Titanyum diborür balistik koruma açısından alüminyum oksitten daha etkili olmasına rağmen, yüksek yoğunluğu ve maliyeti sebebiyle diğer seramik malzemeler kadar kullanımı yaygın değildir.

2.2.5 Üretim Metotları

Seramik malzemelerin şekillendirilmesinde birçok değişik yöntemden yararlanılır(8). Kullanılacak şekillendirme yönteminin seçiminde üretilen parça miktarı, parçanın boyutları ve fiziksel özellikleri gibi faktörler etkilidir.

Seramik malzemelerin şekillendirilmesi işleminden önce seramik tozlarının boyutlarının belirlenmesi gerekir. Tozların dağılımı da özellikle yoğunlaşma için çok önemlidir. Seramik tozlarının dağılımının mümkün olduğunca üniform olması istenir.

Kullanılan şekillendirme yöntemine göre seramik tozlarına aşağıda belirtilen çeşitli katkılar ilave edilmektedir:

Pişmemiş, yaş haldeki ürünün mukavemetini artırmak amacıyla bağlayıcı,

Presleme sırasında tozlar arasındaki sürtünmenin azaltılması amacıyla yağlayıcı,

Sinterleme sırasında yoğunlaştırmayı artırmak amacıyla katkı maddeleri,

Bazı şekillendirme yöntemleri için plastisiteyi ve ıslatma özelliklerini artırıcı katkılar

Bağlayıcılar organik veya inorganik olabilir. Organik bağlayıcılar suda çözünmedikleri için ıslak proseslere uygun değildir. Şekillendirme sonunda organik bağlayıcılar yanar. İnorganik bağlayıcılar ise, şekillendirme sonrası yapının içinde kalıp malzemenin bir bileşeni haline gelir. Organik bağlayıcılara örnek olarak reçine ve balmumu verilebilir. İnorganik bağlayıcılara ise kil, silikat ve fosfat örnek olarak verilebilir.

Balistik koruma amacıyla kullanılan seramik malzemeler sinterleme ve sıcak presleme yöntemleriyle şekillendirilir.

2.2.5.1 Sinterleme

Seramik malzemenin küçük tanelerinin bir katı hal yayınımla bağlanmasına sinterleme adı verilir. Bu işlem sonucunda seramik yoğun ve bağlanmış bir ürün haline gelir. Seramik tozları sıkıştırılmış halde iken, seramik malzemenin teorik yoğunluğunun yaklaşık olarak yarısına sahiptir [8]. Yüksek sıcaklıkta sinterleme ile gerçek yoğunluğa ulaşılır. Sinterleme işlemiyle, toz tanelerinin birbirlerine bağlanması için ve sıkıştırma sonucu oluşan gözenekliğin giderilmesi için gereken enerji sağlanır. Bu yöntem alumina zırh parçalarının üretiminde yaygın olarak kullanılır.

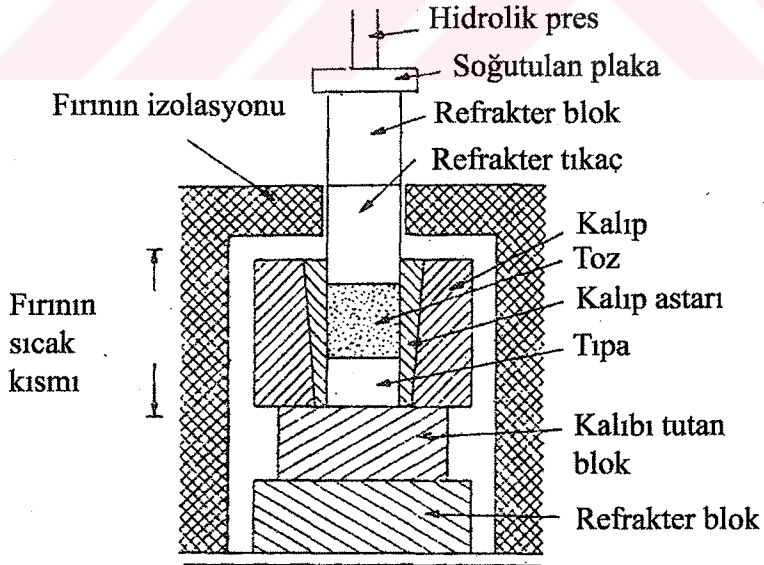
2.2.5.2 Sıcak presleme

Seramik malzemeler kovalent oldukları ve yüksek ergime sıcaklıklarına sahip olduklarından dolayı, sıcak presleme yöntemi balistik koruma amacıyla kullanılan seramik malzemelerin şekillendirilmesinde en çok kullanılan yöntemdir (Matchen, 1997). Bu yöntem pahalı olmasına karşın diğer yöntemlerle sinterlenemeyen malzemelerin sinterlenmesi mümkündür.

Sıcak presleme yönteminde sıkıştırma ve sinterleme işlemleri aynı anda yapılarak yüksek yoğunluklu ve daha iyi mekanik özelliklere sahip parçalar elde edilir (Geçkinli, 1991).

Sıcak presleme yöntemi iki şekilde uygulanabilir. Bunlardan birincisi şekil 2.3'te görüldüğü gibidir. Seramik tozları uygun yağlayıcı ve bağlayıcı ile karıştırılır ve bir fırının içindeki metal bir kalıp içinde tek eksenli olarak sıkıştırılır. Bu yöntemde toz boyutunun dağılımı önemlidir. Bu yöntemde levha gibi düz parçalar üretilir.

İkinci yöntem sıcak izostatik presleme yöntemi olarak bilinir. Bu yöntem, jeolojide yüksek basınç ve sıcaklık altında kaya ve elmasın oluşumuna benzer. Bu yöntemde seramik toz, basıncın uygulandığı hidrolik sıvı veya hava içerisinde bulunan esnek bir kalıbın içersine konulur (Smith, 2001). Uygulanan basınç tozu her yönde eşit olarak sıkıştırır ve parça esnek kalıbın şeklini alır. Bu yöntemde yoğunlaşma, atom yayınması ile değil toz malzemenin hareketiyle gerçekleşir. Bu sebepten dolayı yoğunlaşma olayı daha düşük sıcaklıklarda ve/veya daha kısa sürede oluşur.



Şekil 2.3 Sıcak pres şeması (Geçkinli, 1991)

Sıcak izostatik presleme yönteminin kinetiğine etki eden parametreler; sıcaklık, basınç, toz boyutu ve malzemenin mekanik davranışdır (Geçkinli, 1991).

2.3 Balistik Koruma Amacıyla Kullanılan Polimer Esaslı Malzemeler

Balistik koruma alanında polimer esaslı malzemeler, polimer esaslı bir bağlayıcı matris içine ilave edilerek kompozit malzeme halinde veya reçinesiz olarak tek başlarına kullanılırlar. Bu bağlayıcı matrislere örnek olarak polyeşter ve epoksi verilebilir. Bu tür malzemeler düşük ağırlıklarından dolayı daha çok vücut zırhı yapımında kullanılırlar. Balistik koruma amacıyla kullanılan lifleri aramid ve yüksek moleköl ağırlıklı polietilen olarak iki gruba ayrılabilir.

2.3.1 Aramid Lifleri

Aramid lifi terimi, aromatik poliamid polimer moleküllerinin hidrojen bağlarıyla birbirlerine bağlanması sonucu oluşan organik lifleri kapsar [9]. Aramid sözcüğü, ABD Federal Ticaret Komisyonu'na göre "lifi oluşturan malzemenin uzun bir poliamid sentetik zincir olduğu ve amid bağlantılarının en az %85'inin doğrudan iki aromatik halkaya bağlandığı sentetik bir lif" olarak tanımlanır [10]. Aramidlerde amid gruplarının çoğu doğrudan aromatik halkalara bağlı olduğu için, nylon gibi diğer konvansiyonel amidlerle kıyaslandıkları zaman oldukça değişik özelliklere sahiptirler (Peters, 1998).Güntümüzde en yaygın olarak kullanılan aramid lifi DuPont tarafından üretilen Kevlar olup, bunun yanısıra Teijin tarafından üretilen Twaron ve Technora da benzer özelliklere sahip diğer aramid lifleridir [10].

2.3.1.1 Aramid Liflerinin Özellikleri

Aramid liflerinin genel özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Düşük ağırlığa karşın yüksek çekme dayanımı

Yüksek kırılma modülüne karşın düşük kopma uzaması(yapısal rijitlik)

Düşük elektrik iletimi

Yüksek kimyasal direnç

Yüksek tokluk

Mükemmel boyutsal kararlılık

Yüksek kesme dayanımı

Yüksek yanma direnci

Yüksek sürünme dayanımı

İç yapılarının aromatik ve çok düzenli olmalarından dolayı organik malzemeler için aramid liflerinin ısıl direnci çok yüksektir (Peters, 1998). Her ne kadar termoplastik malzeme olarak

sınıflandırılırsalar da bozulmadan önce ergimezler. Bunun sebebi, kristalin fazının erimesi için iki molekül arasındaki tüm hidrojen bağlarının aynı anda kırılmasının gerekliliğidir. Yine de sıcaklığa olan dayanımları inorganik elyaflarınki kadar yüksek değildir. Yapılan deneyler sonucu, aramid liflerinde 350° C'nin üzerine çıktığında ağırlık kaybının başladığı, 427°-482° C sıcaklıkları arasında ise tamamen bozulma olduğu görülmüştür.

Sıcaklık artışı ile beraber aramid lifleri de diğer çoğu lif malzemedede olduğu gibi enine yönde genişlerler. Buna karşılık, boyuna yönde ise sıcaklık artmasıyla bir miktar büzülürler. Bu özellik bazı kompozit parçaların tasarımında avantaj haline gelebilir.

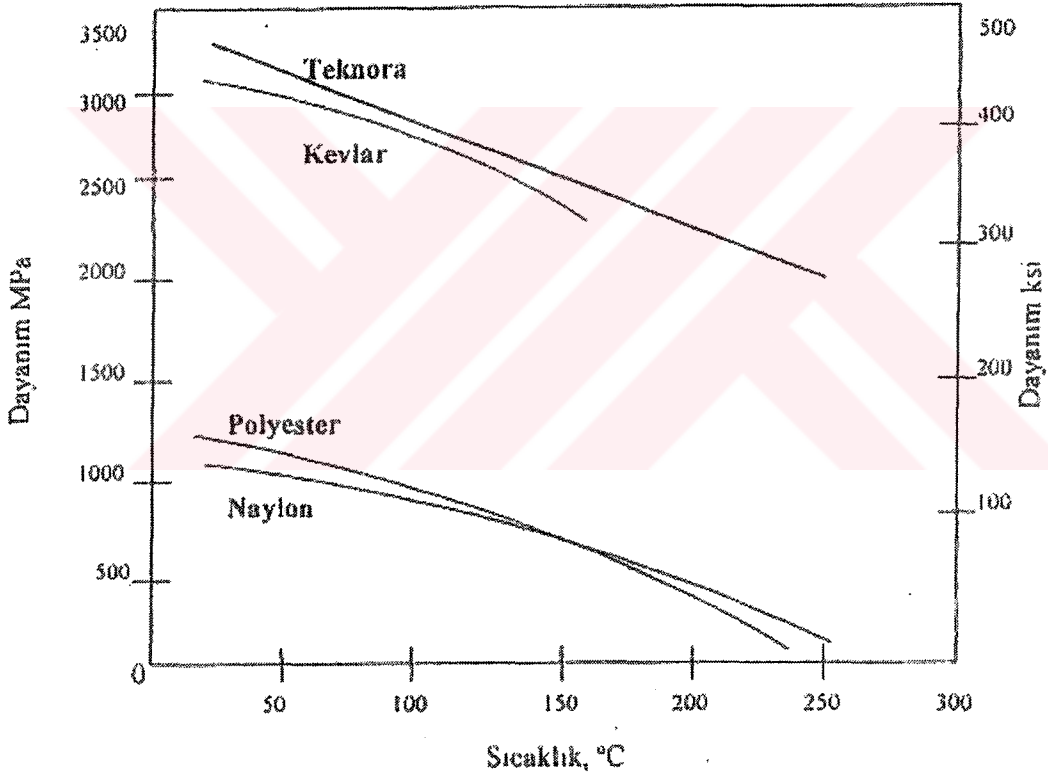
Aramid lifleri, ateşe dirençli olmalarına rağmen tutuşabilirler. Aramid kumaşları yine de alev kaynağı giderildiği vakit yanmaya devam etmezler. Aramid liflerinin inorganik liflere göre daha düşük olan ısı iletim katsayıları, kullanıldıkları kompozitlerin ateşe olan dirençlerini artırır. Bunun sebebi aramid liflerinin kompozitin matrisine daha az ısı iletmeleridir.

Aramid liflerinin bazı sınırlamaları da mevcuttur. Eğilme ve basma dayanımları düşüktür. Aramid zinciri oldukça polar bir yapıya sahip olmasına rağmen, neredeyse tüm polar grupları diğer moleküllere zayıf hidrojen bağları ile bağlıdır. Bunun sonucunda kompozit matrisleri gibi diğer malzemeler ile güçlü bağ oluşturmazlar. Tüm zırh sistemleri için sorun olan nem, aramidlerin balistik özelliklerini olumsuz etkiler. Yapılan deneyler sonucu Kevlar yeleklerin ıslandığı zaman, 0.22 kalibrelik tabanca mermilerine karşı balistik etkinliklerinin %40 kadar azaldığı görülmüştür (Laible, 1980). Bunun sebebi liflerin ıslandığı zaman, mermi geçerken kırılma olmaması ve enerjinin sönmüdenmeden merminin geçmesidir. Bu yüzden Kevlar yeleklere su geçirmemesi için özel bir işlem uygulanır.

Değişik aramid liflerindeki mekanik özelliklerin farklılığı, liflerin temel kimyasal yapılarındaki farklılıklarından kaynaklanmaktadır (Peters, 1998). Isıl işlemler ve imalat sırasındaki aşamalar da, Kevlar 29 ve 49 liflerinde olduğu gibi, mekanik özellikleri önemli ölçüde etkileyebilir.

Aramid liflerini bükülmeye dayanıksız kılan mikroyapı aynı zamanda malzemeye mükemmel tokluk vermektedir. Eğilme sırasında lifler tahrip olurken büyük miktarlarda enerji absorbe ederler. Benzer şekilde aramid liflerinin dayanımı gerinim hızına çok fazla bağlı değildir: gerinim oranındaki dört kattan daha fazla bir artışın çekme dayanımını sadece %15 kadar düşürdüğü görülmüştür. Sadece bu özellik bile inorganik lifler ve diğer birçok organik liflere göre tasarım avantajları sunar.

Aramid liflerinin çekme dayanımı artan sıcaklıkla beraber azalmaktadır. Örneğin Kevlar liflerinin 177°C sıcaklıktaki modülü oda sıcaklığındaki modülünün %80'i kadardır. Şekil 2.4'te aramid liflerinin diğer bazı polimer esaslı liflere göre sıcaklık dayanımları verilmiştir.



Şekil 2.4 Sıcaklığın aramid ve polimer esaslı liflerin dayanımı üzerine olan etkisi (Bulut, 2003)

Nem etkisi de aramid liflerinin ve kompozitlerinin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu etki lif yönündeki çekme özellikleri için az olmasına rağmen aksenel olmayan yöndeki özellikler için önemlidir. Çizelge 2.16'da Kevlar 49 için nem faktörünün mekanik özelliklere olan etkisi görülmektedir.

Çizelge 2.15 Hacimsel olarak %50 oranında Kevlar 49 lifleriyle takviye edilmiş bir polimer kompozit için nem faktörünün mekanik özelliklere etkisi (Peters, 1998)

(MPa)	23° C, kuru	23° C, %52 bağıl nem	23° C, su içinde	100° C, su
Boyuna çekme	1370 ± 62	1340 ± 112	1190 ± 62	1150 ± 124
Boyuna basma	188 ± 12	169 ± 20	126 ± 22	107 ± 21
Enine çekme	7.6 ± 1.6	74 ± 1.2	3.9 ± 0.7	3.6 ± 0.2
Enine basma	31.3 ± 3.2	29 ± 4.0	22.5 ± 3.2	22.1 ± 23.6

Aramid lifleri oldukça kararlı kimyasal yapıya sahiptirler. Nötr kimyasallara karşı olan dirençleri genellikle çok yüksektir. Buna karşılık asit ve bazların, özellikle de güçlü asitlerin etkilerine karşı duyarlıdırlar. Technora lifinin üretimi için kullanılan döndürme prosesi çok saf bir polimer ortaya çıkardığı için bu lifin kimyasal dayanımı, diğer aramid liflerine göre daha iyidir. Çizelge 2.17'de Technora lifinin çeşitli ortamlardaki kimyasal direnci verilmiştir.

Çizelge 2.17 Technora(HM-50) liflerinin kimyasal direnci (Bunsell, 1988)

Ortam	Konsantrasyon (%ağırlık)	Sıcaklık (°C)	Zaman(saat)	Kalan dayanım(%)
<i>Asit</i>				
Sülfirik asit	20	95	100	97
Sülfirik asit	40	95	100	89
Sülfirik asit	40	20	100	98
Hidroklorik asit	20	20	100	98
Nitrik asit	10	20	100	99
Fosforik asit	10	20	100	96
Formik asit	90	95	100	82
Asetik asit	40	95	100	97
<i>Baz</i>				
Sodyum hidroksit	10	95	20	98
Sodyum hidroksit	10	95	100	84
Portland çimentosu	Doymuş	95	100	93
Portland çimentosu	Doymuş	180	15	70
<i>Organik çözücüler</i>				
Benzin	100	20	784	98
Benzen	100	20	784	98
Metil etil keton	100	20	1000	97
Etil asetat	100	20	1000	96
Etil klorür	100	20	1000	100

Etil glikol	100	95	300	94
Fenol	100	95	300	95
Deniz suyu	3	95	1000	98

Aramid liflerinin UV ışınlarını emme kapasitesi yüksektir. UV ışınlarına maruz kalan aramid lifleri, eğer ortamda oksijen varsa belli bir süre sonra bozulmaya başlarlar. Bu bozulma işlemine nem veya diğer atmosferik faktörler etki etmemektedir. Uzun süreli maruz kalmalarda mekanik özelliklerde azalma görülmektedir. Örneğin Kevlar 29 için, bir ay süren maruz kalmadan sonra dayanımda %29 azalma, dört ay süren maruz kalmadan sonra ise %47 azalma görülmüştür. Bu yüzden UV ışınlarına karşı koruma amacıyla boyama veya kaplama gibi bazı önlemler alınmalıdır.

2.3.1.2 Aramid Liflerinin Çeşitleri ve Kullanım Alanları

Aramid liflerinin ticari kullanımı aslında ilk olarak araba lastiklerine takviye malzemesi olarak düşünülmüştür [11]. Aramid lifleriyle takviye edilmiş lastikler oldukça iyi performans göstermesine rağmen çeliğin yerini alamamış ve bu alandaki ticari kullanımı sona ermiştir. Buna karşılık kısa bir süre sonra aramid liflerinin geleneksel kompozit malzemelere takviye amacıyla kullanılması gündeme gelmiş ve çok başarılı uygulamalar gerçekleştirilmiştir [10]. Aramid lifleriyle takviye edilmiş kompozit malzemeler, cam ve karbon lifleriyle takviye edilmiş olanlara göre daha hafif ve daha tok olup, daha yüksek darbe direncine sahiptirler. Aramid lifleriyle takviye edilmiş kompozitlerin, karbon lifleriyle takviye edilenlere göre 2 ile 4 kat arası daha fazla darbe dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Günümüzde aramid lifleri ile takviye edilmiş kompozit malzemeler, her ne kadar yüksek fiyatlarından dolayı cam lifleri kadar yaygın olmasa da, geniş kullanım alanına sahiptirler. Uçak kanatları, otomobil parçaları, kablolar, tekneler ve çeşitli spor malzemeleri örnek olarak verilebilir. Aramid liflerini diğer elyaf malzemelere tercih edilmesinin sebebi yüksek dayanım, yüksek tokluk ve yüksek sürünme dayanımı özelliklerini birarada sunmasıdır. Bazı havacılık uygulamalarında aramid liflerinin yanma direncinin yüksek darbe dayanımı ve hafiflik ile olan kombinasyonu ön plana çıkmaktadır.

Aramid liflerinin kullanım alanına göre seçilen reçine malzemesi önemlidir (Peters, 1998). Epoksi reçineleri daha iyi kayma dayanımı ve eğilme dayanımı sağlamasına karşın daha düşük darbe direnci vermektedir. Vinil ester reçineleri ise iyi kayma dayanımı ve darbe direnci sağlamaktadır. Bunun dışında termoplastik reçineler de darbe dayanımı açısından iyi

sonuçlar vermektedir. Buna karşın, termoplastik reçineler için elyaf-matris bağının kalitesi her zaman sorun oluşturmaktadır.

Balistik koruma malzemesi olarak aramid lifleri daha çok kurşun geçirmez yeleklerin yapımında kullanılmaktadır. Özellikle emniyet güçlerinin kullandığı gizlenebilir ve hafif yeleklerin yapımında kullanılmaktadır. Aramid liflerinden yapılan kumaş zırhlar tek başlarına tabanca mermilerini durduracak güçtedir. Buna karşın, daha yüksek enerjiye sahip tüfek mermilerini durdurmak için aramid lifinden imal edilen zırh tek başına yeterli değildir. Ayrıca çelik çekirdekli zırh delici mermilere karşı, seramik gibi sert bir ön yüzeye ihtiyaç duyulmaktadır.

Lif boyutuna ve üreticiye göre aramid liflerinin fiyatları büyük ölçüde değişebilir. Çizelge 2.18'de değişik türdeki aramid lifleri için ortalama fiyatlar görülmektedir.

Çizelge 2.18 Değişik aramid lifleri için ortalama maliyet [12]

Aramid Lifi	Maliyet(\$/kilo)
Kevlar 29	45-75
Kevlar 49	50-100
Kevlar 129	55-66
Kevlar 149	60-100
Twaron	Kevlara yakın
Technora	Kevlar 29 + %10

3 katmanlı Kevlar kumaşından yapılan balistik yeleklerin 0.38 kalibrelik tabanca mermilerini durdurabildiği görülmüştür (Laible, 1980). Buna karşılık laboratuvar hayvanları üzerinde yapılan deneyler göstermiştir ki, merminin durdurulmasına karşılık hayvanların hayati organlarında, ezilme travması sonucu önemli hasarlar oluşmuştur. Balistik koruma söz konusu olduğu zaman merminin durdurulması yeterli değildir, iç organların ezilme travmasından da korunması gereklidir. Bu yüzden merminin enerjisini sönmüleyebilmek için dokuz katmanlı Kevlar kullanılmıştır. Ayrıca kumaş zırhlarda sivri bir uca sahip olan merminin durdurulması her zaman daha zor olmuştur. Bu sebepten dolayı, daha az enerjiye sahip olan 0.22 kalibrelik sivri mermilere karşı gereken katman sayısı daha fazladır.

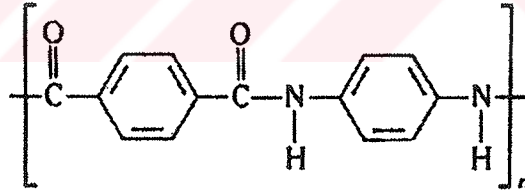
2.3.1.2.1 Kevlar

1965 yılında DuPont firması tarafından bulunan ve 1972 yılında piyasaya sürülen Kevlar, balistik koruma malzemeleri açısından devrim niteliğinde bir buluştur. Değişik kimyasal yapısı sebebiyle Kevlar, diğer lifli malzemelere göre daha değişik özelliklere sahiptir. Günümüzde Kevlar 29, Kevlar 49 ve Kevlar 129 gibi isimler altında değişik ticari ürünler mevcuttur. Bu üç ürünün özellikleri Çizelge 2.19'da görülmektedir.

Çizelge 2.19 Piyasadaki üç Kevlar türünün dayanım özellikleri [10]

Ürün	Yoğunluk(g/cm ³)	Çekme Dayanımı(MPa)	Çekme Modülü(GPa)	Kopma Uzaması(%)
Kevlar 29	1.44	3600	83	4.0
Kevlar 49	1.44	3600-4100	131	2.8
Kevlar 129	1.47	3400	186	2.0

Kevlar polimer zincirinin tekrar eden birimi, Şekil 2.5'te görülen aromatik poliamidin kimyasal birimidir (Smith, 2001). Hidrojen bağı polimer zincirini çapraz bağlamaktadır. Bu şekilde biraraya gelen lifler uzunlamasına güçlü ve enlemesine zayıftır. Aromatik halka yapısı sebebiyle, polimer zincirleri yüksek katılığa sahip olup çubuk gibi davranmaktadırlar.



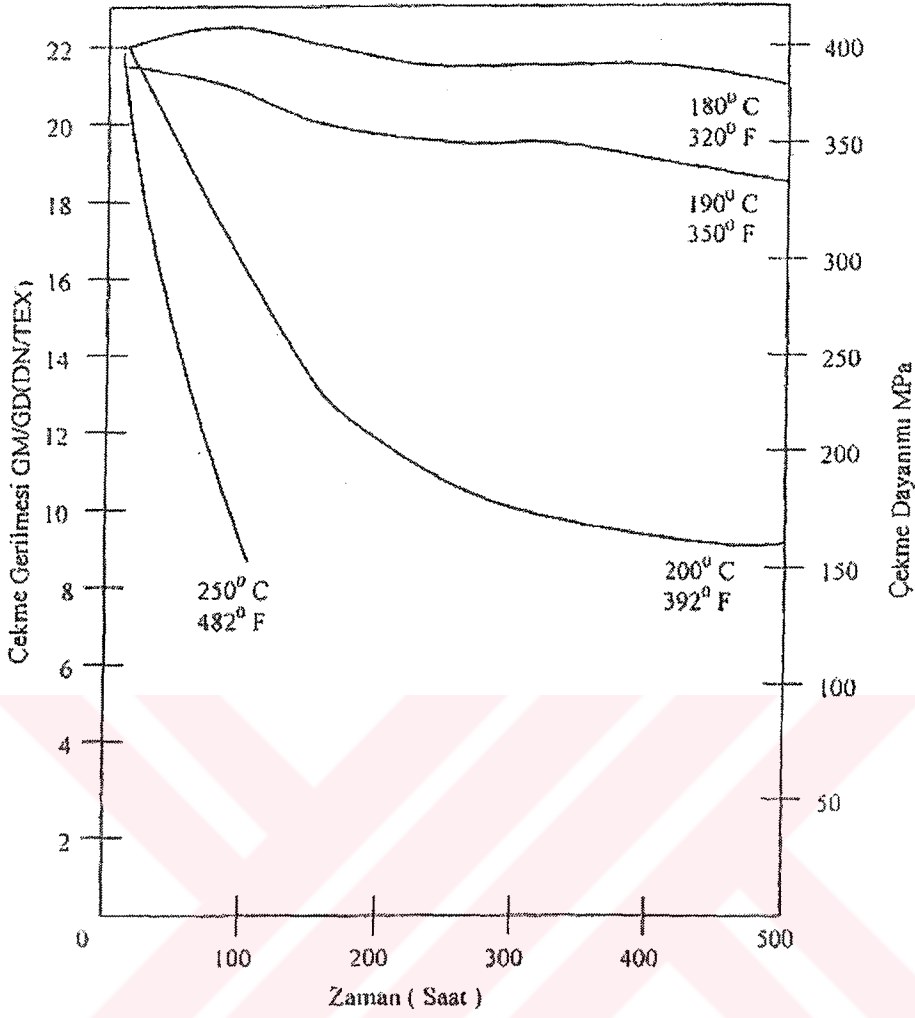
Şekil 2.5 Kevlar liflerinin tekrar eden kimyasal birimi (Smith, 2001)

Kevlar liflerinin dayanımı son derece düzgün olan iç yapısından kaynaklanmaktadır [10]. Kevlar lifinin mikroyapısını incelediğimiz zaman 14 karbon atomu, 2 azot atomu, 2 oksijen atomu ve 10 hidrojen atomu bulunmakta olup, molekül zincirleri arasında zayıf hidrojen bağları mevcuttur (Bulut, 2003). Molekül zincirler zayıf hidrojen bağlarla tutulduğu için, enine çekme ve basma dayanımı düşük ince iplik biçiminde elyaf özelliği taşır. Uzun polimer zincirleri sayesinde oluşan düzgün aralıklı hidrojen bağları sayesinde, kristale benzeyen çok güçlü kafes yapıları mevcuttur [10]. Liflerdeki hata sayısı çok azdır ve kırılmaları zordur. Cam veya karbon liflerinin aksine, aramid liflerinin tahribatı gevrek kırılma şeklinde değildir [11]. Kırılma, liflerle aynı yönde olan ve lifleri oluşturan moleküler bağların birçok yerden

kırılmasıyla olur. Bu kırılma olayı için yüksek miktarda enerji gerektiğinden dolayı Kevlar çok yüksek tokluğa sahiptir.

Balistik koruma alanında Kevlar-29 türü elyaf yoğun olarak kullanılmaktadır (Bulut, 2003). Kevlar 29 da diğer Kevlar lifleri gibi çok yüksek dayanıma ve düşük yoğunluğa sahiptir. Çekme dayanımı E-camından 2 kat, çelikten ise 5 kat daha fazladır. -196° C ile 150° C sıcaklıkları arasında mekanik özelliklerinde herhangi bir kayıp olmamaktadır. Fakat 160° C'den itibaren mukavemetinde belli azalmalar görülmüştür. Kevlar 29 lifi düşük elektrik iletim katsayıları sayesinde radyo dalgalarını geçirmesinden dolayı muhabere antenleri imalatında da kullanılmaktadır. Şekil 2.7'de Kevlar 29'un çeşitli kimyasal maddelere olan dayanımı görülmektedir.

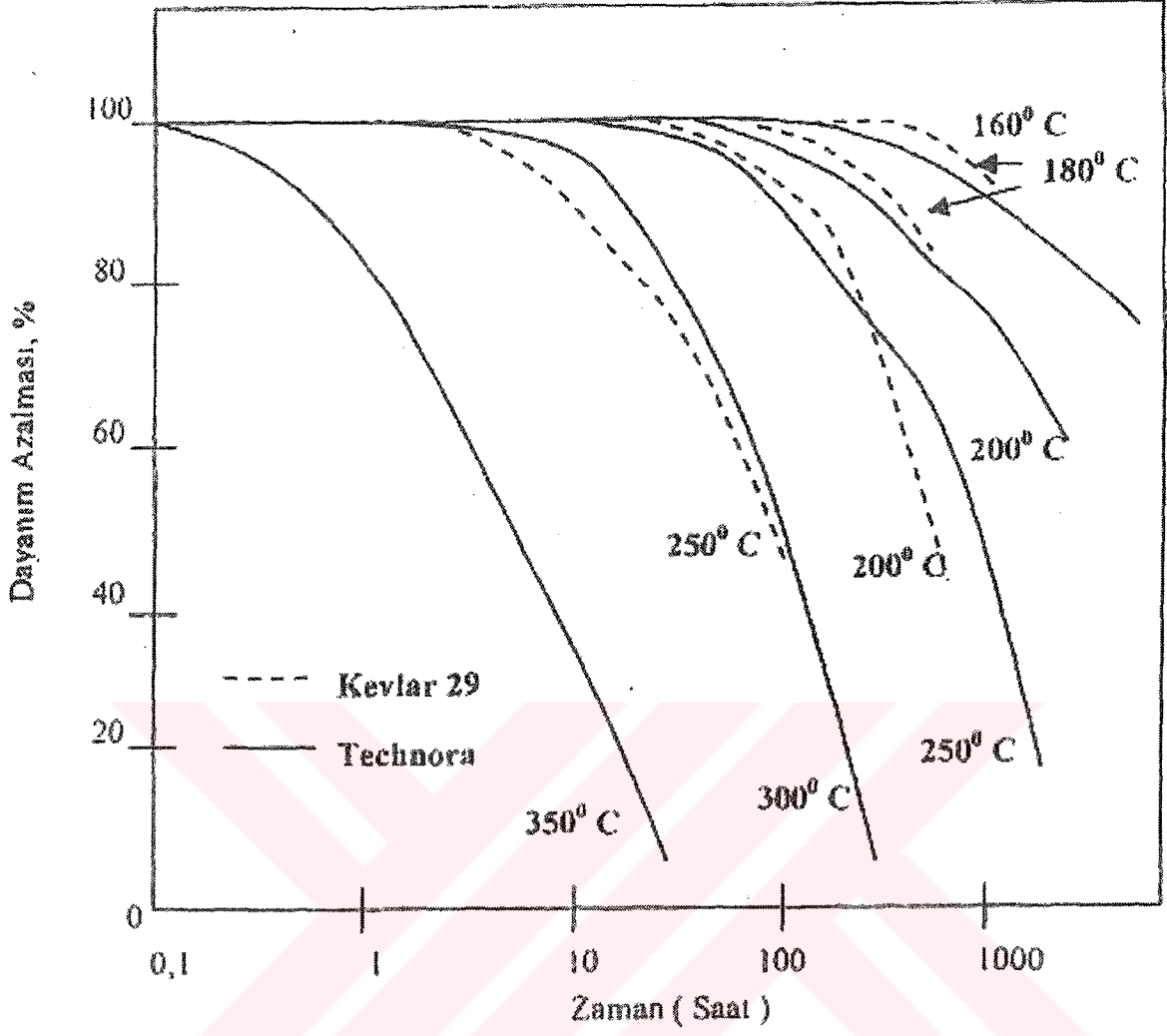
Balistik koruma alanında yoğun olarak kullanılan bir başka Kevlar lifi de Kevlar 49'dur. Kevlar 49, Kevlar 29'a göre daha az sünek olup ses iletimi ise daha iyidir. Bu yüzden genellikle daha yüksek performans göstermesi beklenmektedir.



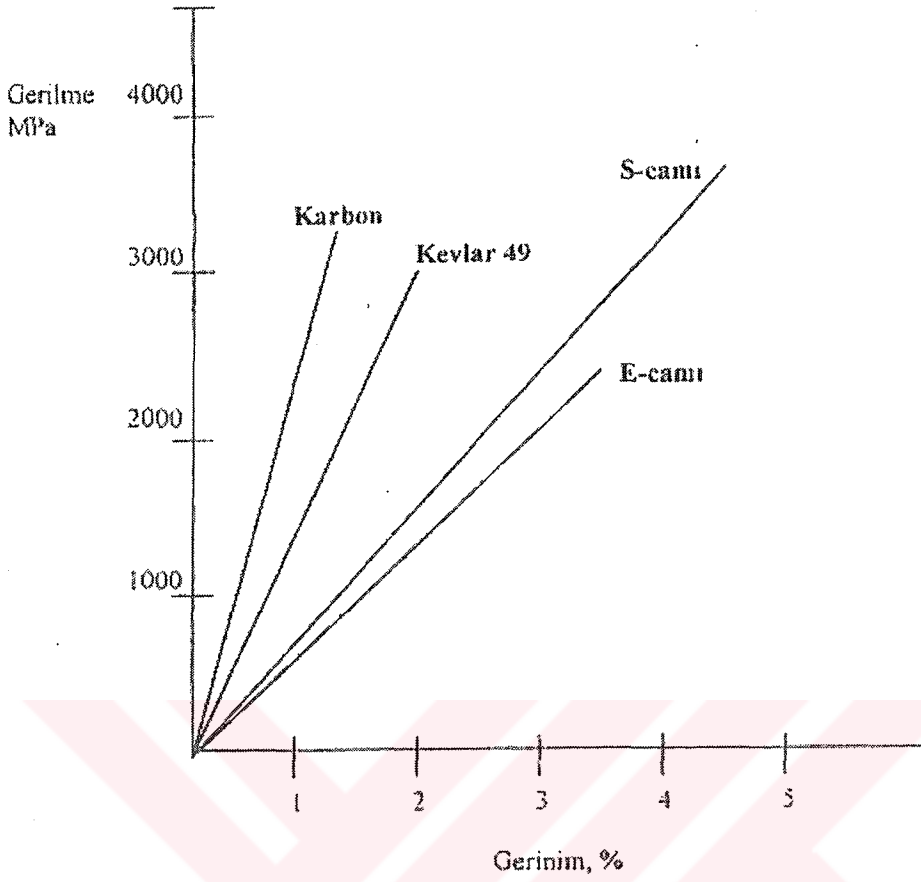
Şekil 2.6 Sıcaklığın Kevlar 29 lifinin çekme dayanımı üzerine etkisi (Bulut, 2003)

DuPont tarafından üretilen bir başka Kevlar lifi de Kevlar 129'dur. Bu lifin çekme dayanımının Kevlar 29'a göre %15-20 daha fazla, çekme modülünün ise %30 daha fazla olduğu belirtilmiştir (Kostikov, 1995).

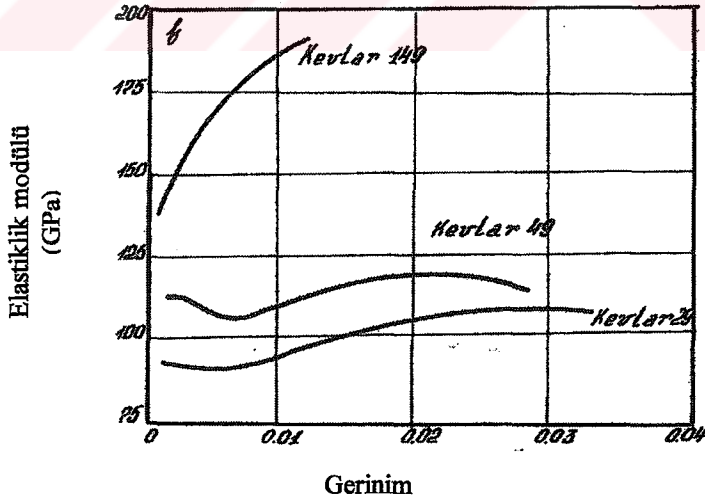
1987 yılında Kevlar 149 adlı bir başka aramid lifi piyasaya sürülmüştür. Bu lifin diğer Kevlar liflerine göre daha iyi kimyasal ve sıcaklık dayanımına sahip olduğu belirtilmektedir. Şekil 2.9'da görüldüğü gibi Kevlar 149 için elastiklik modülü-gerinim ilişkisi parabolik olup Kevlar 29 ve 49'dan farklıdır.



Şekil 2.7 Kevlar 29 ve Technora liflerinin yüksek sıcaklıkta zaman bağı olarak çekme dayanımlarında meydana gelen azalma (Bulut, 2003)



Şekil 2.8 Kevlar 49 ve bazı liflerin gerilim-gerinim eğrisi (Bulut, 2003)



Şekil 2.9 Değişik Kevlar lifleri için elastiklik modülü-gerinim ilişkisi (Kostikov, 1995)

2.3.1.2.2 Twaron

Balistik koruma amacıyla kullanılan bir diğer aramid lifi de Twaron'dur. İlk olarak Hollanda merkezli Akzo Nobel firması tarafından piyasaya sürülen Twaron'un tüm hakları daha sonra

Japonya merkezli Teijin firması tarafından satın alınmıştır. Twaron liflerinin mekanik özellikleri Çizelge 2.20’de görülebilir:

Çizelge 2.20 Balistik koruma amacıyla kullanılan Twaron liflerinin mekanik özellikleri (Bulut, 2003)

	Yoğunluk(g/cm ³)	Çekme Dayanımı(MPa)	Elastiklik modülü(GPa)	Uzama miktarı(%)
Twaron Standart	1.44	1950	70	3.6
Twaron CT	1.44	2300	90	3.3
Twaron HM	1.45	1950	120	2.1

Twaron lifleri de Kevlar lifleri gibi aramid sınıfına dahil olduğundan Kevlar ile özellikleri hemen hemen aynıdır.

2.3.1.3 Aramid Liflerinin Üretim Metotları

Sentetik lif malzemeler genellikle vizkoz bir sıvının, makara denilen aletin çok küçük boyutlardaki delikleri arasından çekilmesi ile üretilmektedirler [13]. Böylece sıvı malzeme sürekli lif haline gelmektedir.

Ekstrüzyon ile lif üretimi için ilk olarak polimer malzemenin sıvı faza getirilmesi gerekmektedir. Eğer lif haline getirilecek olan polimerik malzeme termoplastik ise ergitilerek sıvı hale getirilmektedir. Malzemenin termoplastik olmaması halinde ise uygun bir çözücüde çözülerek malzeme sıvı hale getirme işlemi uygulanır. Polimerik malzeme eğer doğrudan ergitilemiyor veya çözünemiyorsa, gerekli kimyasal işlemler yapılarak ergitilebilir veya çözünebilir hale getirilmelidir.

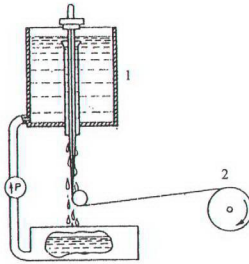
Lif üretiminde kullanılan makaralar, çalışma prensibi açısından banyolardaki musluk kafalarına benzemektedirler. Bir makaradaki delik sayısı bir ile birkaç yüz arası olabilmektedir. Makaranın delikleri safsızlıklara ve korozyona karşı çok hassastırlar. Deliklerin arasından geçen sıvı dikkatli bir şekilde filtrelenmelidir. Bazı durumlarda, makaraların oldukça pahalı olan korozyon direnci yüksek metallere imal edilmesi gereklidir. Zamanla deliklerin tıkanmaması için makaraların düzenli bir şekilde temizlenip bakımlarının yapılması gereklidir. Şekil 2.10’da lif üretiminde kullanılan bir makara görülmektedir.



Şekil 2.10 Lif üretiminde kullanılan bir makara [13]

amentlerin makaradaki deliklerden çekilmesiyle, sıvı haldeki polimer önce lastiksi bir hal ve daha sonra katılaştırılır. Filamentlerin sürekli olarak ekstrüzyonu ve katılaştırılması mine döndürme adı verilir. Filamentlerin lif haline getirilmesi için başlıca dört çeşit dörme metodu mevcuttur. Bunlar ıslak, kuru, ertirme ve jel döndürme yöntemleridir.

mid liflerinin ergime noktalarının bulunmaması ve birçok çözücüde çözünmemesi ebiyle klasik döndürme yöntemleriyle üretimi çok zordur (Peters, 1998). 1973 yılında des, sürekli kuru jet ıslak döndürme adıyla bilinen, anizotropik aramid çözeltilerini lif ne getirecek bir yöntem geliştirmiştir. Şekil 2.11'de bu yöntem şematik olarak terilmiştir (Bunsell, 1988). Çözelti, hava boşluğundan geçerek makara deliklerinden tılaşma banyosuna doğru ekstrüde edilir. Pıhtılaşmış filamentler daha sonra yıkanır, leştirilir ve kurutulur. Böylece yüksek dayanıma sahip lifler elde edilir. Çözelti banyosu 1, arın sarıldığı makara da 2 numara olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.11 Kuru jet ıslak döndürme işlemi (Bunsell, 1988)

2.3.2 Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen

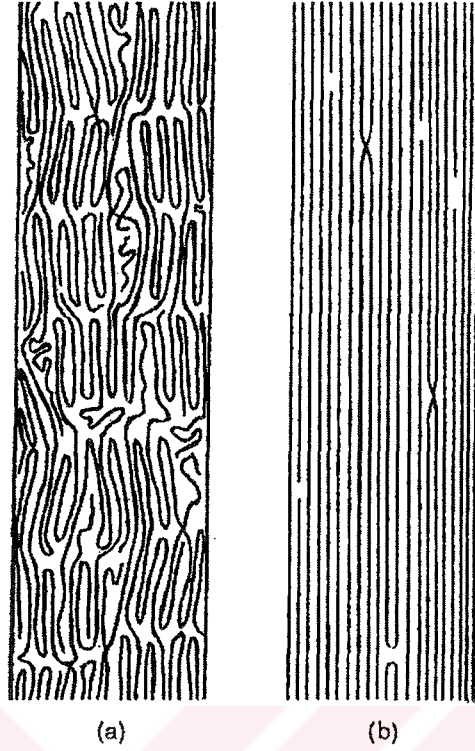
Yüksek molekül ağırlıklı polietilen, kimyasal olarak normal polietilen ile aynı formüle sahip olmasına rağmen molekül ağırlığı 10-100 kat daha fazladır ve bu yüzden de değişik özelliklere sahiptir [11]. Bu tür malzemelere örnek olarak Honeywell firması tarafından üretilen Spectra, DSM tarafından üretilen Dyneema ve Mitsui tarafından üretilen Tekmilon lifleri verilebilir.

1970'li yılların sonlarında Hollanda merkezli DSM firmasında çalışan Smith ve Lemstra ilk yüksek molekül ağırlıklı polietilen lifinin üretim patentini almışlardır (Peters, 1998). Aynı zamanlarda Japonya'da Toyobo Inc. ve Amerika'da Allied Chemical Company firmaları da aynı çalışma üzerine yoğunlaşmışlardı. DSM'nin temel patentinde yasal boşluklar bulamayacağını anlayan iki firma da polietilen fiberleri üretimi için DSM ile teknik anlaşma yoluna gitmişlerdir.

2.3.2.1 Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen Liflerinin Özellikleri

Şekil 2.12'de konvansiyonel polietilen lifleriyle, jel-döndürme yolu ile elde edilen uzun zincirli polietilen liflerinin yapısındaki fark görülmektedir. Lifler, çoğunlukla çekme yönünde dizilmiş olan katlanmış zincir kristalitlerinden oluşmaktadır. Bu zincir kristalitleri birbirlerine bağ molekülleri ile bağlanır ve aralarında kristalin olmayan malzemeler bulunmaktadır.

Bu lifler polietilen esaslı oldukları için yoğunlukları aramid liflerinin üçte ikisi, karbon liflerinin de yarısı kadardır. Buna karşın, polietilen kristalitleri güçlü hidrojen veya kovalent bağlara sahip olmayıp zayıf Van der Waals bağları ile birbirlerine bağlıdır ve bu da özellikleri etkilemektedir.



Şekil 2.12 (a)Konvansiyonel polietilen lifleriyle, (b)jel döndürme yöntemiyle üretilen polietilen liflerinin yapısı arasındaki fark

Yüksek molekül ağırlıklı polietilen liflerinin özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir [14]:

Su üstünde yüzebilecek kadar düşük yoğunluk

Yüksek kimyasal direnç

Yüksek ultraviyole direnci

Yüksek nem direnci

Düşük sürtünme katsayısı

Yüksek aşınma dayanımı

Düşük dielektrik sabiti

Çok yüksek çekme dayanımı

Yüksek kırılma enerjisi

Aramid liflerinde olduğu gibi, polietilen liflerinin mikroyapılarının anizotropik olmaları dolayısıyla mekanik ve diğer özellikler de anizotropiktir(Peters, 1998).

Polietilen liflerinin ergime noktası düşüktür(yaklaşık 147° C) bu yüzden de düşük sıcaklıklarda kullanılabilirler. Genel olarak 100° C'nin altındaki sıcaklıklarda kullanılmaktadırlar. Aramid liflerinde olduğu gibi, polietilen lifleri de ısı etkisi ile eksen yönünde büzülürken enine yönde genişlemektedirler. Polietilen lifleri tutuştukları vakit yavaşça yapı karbondioksit ve suya ayrılmaktadırlar.

Ticari polietilen liflerinin filament çapları diğer liflere göre yüksek olup yaklaşık 23-38 µm arasındadır. Yine de Mitsui'nin Tekmilon monofilament liflerinin çapları 121 µm kadar büyük olabilir. Filamentlerin kesiti bir miktar eliptiktir.

Bu tür lifler çok yüksek özgül dayanıma sahip olup tüm aramid liflerinden ve çoğu karbon liflerinden üstündür. Üstelik bu performansa oldukça makul bir fiyatla ulaşılır. Çizelge 2.21'de bazı yüksek performanslı polietilen liflerinin aksel yöndeki mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.21 Bazı yüksek performanslı polietilen liflerinin aksel yöndeki mekanik dayanım değerleri (Peters, 1998)

Lif Türü	Yoğunluk(g/cm ³)	Çekme dayanımı(MPa)	Çekme modülü (GPa)	Kırılma uzaması(%)
Dyneema SK60	0.97	2620	87	-
Spectra 900	0.97	2080-2400	86-103	3.6-3.7
Spectra 1000	0.97	2740-3000	128-171	2.8-3.1
Tekmilon	0.96	1470-3430	59-98	4-6

Aramid lifleri gibi polietilen lifleri de düşük basma dayanımına ve aksel olmayan yönde kötü özelliklere sahiptirler. Lifler sadece zayıf Van der Waals bağları ile bağlı olduklarından, enine dayanım aramid liflerinden bile daha kötüdür. Ayrıca polietilenin asallığı nedeniyle işlenmemiş lifin bir matrisle yaptığı bağ çok zayıftır. Bazı yöntemler arayüzey bağ dayanımını oldukça artırsa da polietilen lifli kompozitlerin aksel olmayan yöndeki özellikleri kötüdür.

Enine dayanımlarının kötü olmasına karşın, polietilenin yapışkan olmayan yapısından ve bu sebeple düşük olan sürtünme katsayısından dolayı polietilen liflerin aşınma direnci aramid liflerinden çok daha fazladır. Polietilen kumaşların aramid kumaşlarına göre zarar görmesi

çok daha zordur. Polietilen liflerin aşınma dayanımı aramid liflerine göre yaklaşık on kat daha fazladır ve yağlayıcı kullanımıyla daha da artırılabilir.

Polietilen lifleri çok yüksek kırılma enerjileri gerektirir. Ağırlık bazında, polietilen liflerinin darbe enerjisini sönmüleme kabiliyeti diğer tüm lif malzemelerden daha üstündür.

Aramid liflerinin ve kompozitlerinin tersine, polietilen lifleri ve kompozitleri neme maruz kaldıklarında, eksenel yönde olsun olmasın mekanik özelliklerinde önemli bir kayıp olmaz.

Diğer lif malzemelerin aksine, polietilen liflerinde sürünme olayı önemli bir sorundur. Düşük ergime sıcaklığı sebebiyle, oda sıcaklığında bile liflerin sürünme dayanımı yetersizdir.

Polietilen liflerinin yorulma dayanımı son derece yüksektir. İplerle yapılan bir yükleme testinde, polietilen liflerinden imal edilen iplerin aramid liflerinden imal edilen iplere göre yaklaşık sekiz kat daha fazla yorulma dayanımına sahip olduğu görülmüştür.

Polietilen lifleri kimyasal olarak asaldır. Hemen hemen tüm organik çözücülerde ve birçok kimyasal madde içerisinde kararlılığını korur. Ayrıca biyolojik olarak da asaldır. Alkalin ortamda da en dayanıklı lif malzemedir. Aramid liflerine göre hidroklorik, nitrik ve sülfirik asite olan direnci daha iyidir. Çizelge 2.22'de tipik bir polietilen lifi olan Spectra ile bir aramidin kimyasal dayanımlarının mukayesesi verilmektedir.

Çizelge 2.22 Polietilen ve aramid liflerin belli bir süre için kimyasal ortamdaki dayanımlarının muhafazasının karşılaştırılması (Peters, 1998)

	Dayanım Muhafazası (%)			
	Spectra		Aramid	
Ortam	6 ay	2 yıl	6 ay	2 yıl
Deniz suyu	100	100	100	98
Hidrolik akışkan	100	100	100	87
Karosen	100	100	100	97
Gazolin	100	100	93	*
Toluen	100	100	72	*

Asetik asit	100	100	82	*
1M hidroklorik asit	100	100	40	*
5M sodyum hidroksit	100	100	42	*
%29 amonyum hidroksit	100	100	70	*
%10 deterjan çözeltisi	100	100	91	*

* Test için yeterli dayanıma sahip değil

Yüksek molekül ağırlıklı polietilen lifleri vinilester, epoksi ve polyester gibi ticari matris reçineleri ile birlikte kullanılabilir. Fakat kimyasal özellikleri nedeniyle bu tür lifler bazı reçineler ile birlikte kullanıldığında reçineler lif yüzeyine tam olarak yapışmamakta, bu sebepten dolayı da liflerin kullanıldığı kompozitte liflerden tam olarak istenen verim alınmamaktadır. Reçine ile lif yüzeylerinin tam olarak bağlanması için bazı metotlar geliştirilmiş olsa bile, bu metotların başarıları sınırlıdır.

Yüksek molekül ağırlıklı polietilen liflerinin kullanımını sınırlayan bir başka faktör de yüksek sıcaklıklarda dayanımını yitirmesi ve sürtünmeye meyilli olmasıdır. Bu tür lifler 90 °C üzerindeki sıcaklıklarda veya oda sıcaklığında bile olsa uzun süre etki eden yükler altında kullanılmamalıdır.

2.3.2.2 Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen Liflerinin Çeşitleri ve Kullanım Alanları

Polietilen lifleri yapısal kompozitlerde fazla kullanılmazlar. En çok kullanıldıkları alanlardan biri ip ve kablo yapımıdır. Özellikle denizcilikteki ip ve kabloların yapımında çok sık kullanılırlar. Yüksek dayanımları, aşınma dirençleri, düşük ağırlıkları ve deniz suyuna olan dirençleri sayesinde bu alanda kullanıma çok uygundur. Ayrıca yelken yapımında da kullanımları son zamanlarda hızla artmıştır. Aramid liflerinin aksine polietilen lifleri birçok kez hasar görmeden katlanabilmektedir.

Polietilen kumaşlarının mükemmel kimyasal dayanımları sebebiyle kimyasal filtrelemede kullanılabilirler. Örnek olarak, 1991 yılındaki Körfez Savaşı'ndan sonra bölgede oluşan petrol kirliliğinin temizlenmesi amacıyla Spectra kumaşlarının kullanımı verilebilir. Kullanılan

kumaş, deniz suyunu geçiren fakat petrol ve denizde yüzen diğer istenmeyen maddeleri tutan özel bir işlemle geçirilmiştir. Kesmeye olan dayanımlarının çok yüksek olması ve sıvı emme özelliklerinin düşük olması sebebiyle tıbbi amaçlar için kullanılan eldiven yapımında da kullanılırlar.

Kompozit malzeme olarak polietilen, tekne gövdesi ve bazı spor malzemelerinin imalatı amacıyla kullanılır. Fakat maliyetlerinin cam liflerine göre çok daha fazla olması sebebiyle bu alanlardaki kullanımı, sadece performans ve/veya güvenliğin maliyetten daha önemli olduğu durumlar ile sınırlıdır.

Polietilen liflerinin en çok kullanıldığı alan ise konumuz olan balistik zırh yapımıdır. Darbe dayanımlarının çok yüksek olması, hafifliği ve çok yüksek kimyasal dirençleri sayesinde bu alanda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Balistik zırh amacıyla lifler tek başına veya bir matris ile beraber kullanılabilir.

Polietilen liflerinin fiyatı aramid liflerine göre biraz daha fazladır. Spectra ve Dyneema liflerinin ortalama fiyatı 60 \$/kilo civarındadır[12].

2.3.2.2.1 Dyneema

Hollanda'nın DSM firması tarafından üretilen Dyneema, günümüzde çekme dayanımı en yüksek olan lif malzeme olup, en yüksek dayanıma sahip çelikten 15 kat daha fazla çekme dayanımına sahiptir(Bulut, 2003). Günümüzde Dyneema SK60, SK65 ve SK 66 ticari adlarıyla üç tür Dyneema lifi bulunmaktadır. Dynnema SK 60 lifi daha çok denizcilikle ilgili alanlarda kullanılmaktadır. Dyneema SK 65, SK 60'a göre daha yüksek çekme dayanımı ve modülüne sahiptir. Dyneema SK 66 ise en yüksek enerji sönmeme kapasitesine sahip olup balistik koruma alanında kullanılan üründür. DSM firması balistik koruma alanında kullanım amacıyla Dyneema SK 76 adlı yeni lif türünü piyasaya sürmüştür.

Çizelge 2.23 Dyneema liflerinin mekanik özellikleri(Bulut, 2003)

	Çekme dayanımı(MPa)	Çekme Modülü(GPa)	Uzama miktarı(%)
Dyneema SK 60	2700	89	3.5
Dyneema SK 65	3000	95	3.6
Dyneema SK 66	3200	99	3.7

Dyneema liflerinin balistik kullanımı genelde Dyneema UD(unidirectional) adı verilen kompozit sistemleri şeklinde olmaktadır[15]. Burada tüm lifler birbirlerine paralel olacak şekilde yan yana dizilir ve bir reçine ile kompozit tabaka haline getirilirler. Daha sonra bu tabakalar birbirlerine 90° açı yapacak şekilde üst üste konup çok tabakalı kompozit haline getirilir ve bu şekildeki kompozit yapı, örgü kumaş yapılarına göre darbe enerjisini daha etkili biçimde sönmülemektedir.

2.3.2.2.2 Spectra

Honeywell(eski adı ile Allied Signal) firması tarafından üretilen Spectra lifi bir başka yüksek molekül ağırlıklı polietilen malzeme olup, Dyneema ile benzer özelliklere sahiptir. Günümüzde Spectra 900, Spectra 1000 ve Spectra 2000 adlarıyla üç tane değişik ticari ürün olarak piyasada mevcuttur [14].

Honeywell firması Spectra liflerinin zırh malzemesi amacıyla kullanılması için Spectra Shield adı verilen kompozit teknolojisini geliştirmiştir. Dyneema UD'ye benzer olarak, Shield kompozitlerinde birbirlerine paralel olarak yan yana dizilen Spectra lifleri, bağlayıcı bir reçine ile tek yönlü bantlar haline getirilir. Daha sonra bu bantlardan iki tanesi, birbirlerine dik açı yapacak şekilde(0°/90°) üst üste konup, alt ve üst yüzeylerde termoplastik filmlerle beraber basınç ve sıcaklık altında birleştirilip iki katmanlı kompozit bir yapı oluşturulur. Bu malzeme rulolar haline getirilip piyasaya verilir.

Çizelge 2.24 Spectra 1000 lifinin bazı özellikleri(Bulut, 2003)

Ağırlık/birim uzunluk	375	550	1100	1300
Çekme dayanımı(MPa)	3000	3250	3080	3000
Elastiklik Modülü(Gpa)	103	111	107	98
Kopma Uzaması(%)	3.1	3.1	3.3	3.4
Yoğunluk(g/cm ³)	0.97	0.97	0.97	0.97

Çizelge 2.25 Spectra 2000 lifinin bazı özellikleri(Bulut, 2003)

Ağırlık/birim uzunluk	100	130	180	195
Çekme dayanımı(MPa)	3340	3250	3250	3210

Elastiklik Modülü(Gpa)	124	113	116	113
Kopma Uzaması(%)	3.0	2.8	2.9	2.9
Yoğunluk(g/cm ³)	0.97	0.97	0.97	0.97

2.3.2.3 Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen Liflerinin Üretim Metotları

Yüksek molekül ağırlıklı polietilen liflerinin üretiminin büyük çoğunluğu jel döndürme adı verilen bir lif üretim metodu ile gerçekleştirilmektedir[13]. Bu yöntemin adı döndürülen liflerin jelimsi görüntüsünden gelmektedir. Yüksek molekül ağırlıklı polietilen uygun bir çözücüde çözülüp isotropik bir çözelti haline getirilmektedir. Daha sonra bir makara aracılığıyla döndürülüp soğuk su ile soğutulmaktadır. Bu aşamadan sonra da yüksek sıcaklıkta çekme işlemi yapılmaktadır. Bu işlemler sonucunda çok düzenli bir yapıya sahip lifler elde edilmektedir.

Polietilen liflerinin üretiminde kullanılan çözücülerin konsantrasyonlarını uzun süre koruyabilmeleri gereklidir(Kostikov, 1995). Bu yüzden uçucu olmamalıdır. Çözeltinin konsantrasyonu polietilenin molekül ağırlığına ve elde edilecek olan lifin özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.

3. PATLAYICI REAKTİF ZIRHLAR

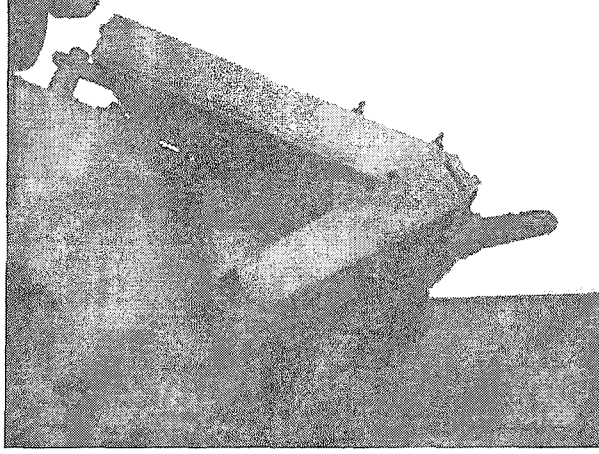
Çukur imla mühimmatın yaygınlaşmasıyla ve seramik zırhların pahalı olması sebebiyle, 1960'lı yıllarda tanklar ve zırhlı araçlar için 'enerjik' zırhlar geliştirilmeye çalışılmıştır[16]. Burada amaç enerjinin kontrollü bir şekilde yayılmasını sağlayıp çukur imla jetini etkisiz hale getirmektir.

1969 yılında, Rafael firması için çalışan Dr. Manfred Held adındaki bir Norveçli'nin geliştirdiği patlayıcı sandviç tasarımı bugünkü patlayıcı reaktif zırhların temelini atmıştır. Bu tasarımda patlayıcı bir tabaka, reaktif veya dinamik elementler olarak bilinen iki tane dikdörtgen şeklindeki metal plakaların arasına konur. Bu 'kutu', çukur imla mühimmatın gelmesinin beklendiği yere yüksek bir açıyla konur. Patlayıcı mühimmat kutuya nüfuz ettiği anda patlayıcı tabaka, metal plakaların hareket etmesini sağlar. Ön plaka x-y düzleminde yukarı doğru ve biraz öne doğru hareket ederken, arka plaka da bunun tersine x-y düzleminde aşağıya ve hafif arkaya doğru hareket eder. Ön plaka jetin olduğu yol üzerine çıkıp onu kararsız hale getirir. Bu noktadan sonra dalga hareketi yapan jet, tam ters yönde giden arka plakaya da çarpar. Bunun sonucunda zaten kararsız haldeki jet küçük parçalara ayrılır ve zırhın farklı yerlerine çarparlar. Böylece zırhı delme yetenekleri önemli ölçüde azalmış olur. Patlayıcı reaktif zırhlar, çukur imla mühimmatın zırhı delme yeteneğini %50-%90 oranında azaltır.

Doğal olarak, patlayıcı reaktif zırhların üretiminde metal plakalar arasındaki patlayıcının seçimi çok önemlidir (Ogorkiewicz, 1991). Patlayıcının tepkisi öyle bir ayarlanmalıdır ki, plakalara çukur imla mühimmatı isabet ettiği zaman patlamalı, fakat tüfek mermisi veya şarapnel parçası isabet ettiği zaman patlamamalıdır. Ayrıca yangın veya kaynak tamiri sırasında da patlamamalıdır. Mühimmat isabet ettiği anda patlamanın etkisi plakalarla sınırlı kalmalıdır, aksi takdirde zincirleme bir reaksiyonla zırhlı aracın üzerindeki tüm plakalar tek bir isabette patlamaktadır.

Patlayıcı reaktif zırh plakalarının etkili olması için çukur imla jetinin belli bir açıda vurması gerekir. Reaktif zırh plakaları 25 derecenin altındaki açılarda etkisizdir ve yerleştirme açıları

arttıkça daha etkili olurlar. Gerçekte zırhlı araçlar üzerine yaklaşık 60 derecelik açılarla monte edilirler. Bir tanka monte edilmiş haliyle reaktif zırh plakası şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1 Kontakt-5 patlayıcı reaktif zırh bir tankın kulesine monte edilmiş haliyle[16]

İyi bir tasarım yapılırsa patlayıcı reaktif zırhın çukur imla mühimmata karşı kütle etkinliği son derece yüksektir. Tipik olarak, 3-5 mm kalınlığında çelik plakalar arasına yerleştirilen yaklaşık aynı kalınlıktaki patlayıcı tabakayla beraber $50-80 \text{ kg/m}^2$ alansal yoğunluğa sahiptir. Piyade tarafından taşınabilen anti tank çukur imla roketlere karşı reaktif zırhın kendisinin kütle etkinliği 20-24 arasındadır. Tabii ki reaktif zırh tek başına kullanılamaz, mevcut zırha ilave olarak kullanılabilir. Yine de RHA ile yaptığı kombinasyonların toplam kütle etkinliği 2.5 ile 3.8 arasındadır.

Reaktif zırh ilk olarak 1982 yılında İsrail’in Lübnan’ı işgali sırasında M60 ve Centurion tanklarında ‘Blazer’ adıyla kullanılmıştır [16]. Çatışmalarda zırhın oldukça etkili olduğu görülmüştür. Bunu müteakip olarak Ruslar da kendi ‘Kontakt’ reaktif zırhlarını kullanıma sokmuşlardır. Ruslar tarafından geliştirilen reaktif zırh İsrail tasarımının bir kopyası değildir ve Rafael ile aynı tarihlerde geliştirilmiş, fakat güvenlik sebeplerinden dolayı hemen kullanılmamışlardır. İsrail tasarımı daha kaba olup büyük kutular şeklindedir. Rus tasarımı ise İsrail tasarımından daha gelişmiş olup, Kontakt sisteminin kutuları Blazer’a göre %40 büyüktüktedir. Bu yüzden Kontakt sisteminde kullanılan patlayıcılar daha yüksek teknoloji gerektirir ve kutular patladığı zaman zırhın daha az bir bölümü açıkta kalır. Ayrıca Kontakt sisteminde kullanılan metal plakalar asimetriktir yani plaka kalınlıkları aynı değildir. Bu sayede plakalar patladığı zaman dönme enerjisi de oluşacağından Kontakt sistemi daha etkilidir.

Yukarıda bahsedilen sistemler birinci nesil patlayıcı reaktif zırhlar olup, çukur imla mühimmata karşı yaklaşık 350-400 mm RHA eşdeğerinde ilave koruma sağlamıştır.

Teorik olarak patlayıcı reaktif zırhlar sabot türü zırh delici mermilere karşı da etkili olmalıdır. Fakat bu durumda alansal yoğunluğunun çok daha fazla olması gereklidir (Ogorkiewicz, 1991).

Ruslar tarafından 1985 yılında geliştirilen 'Kontakt-5' adlı sistem ikinci nesil reaktif zırhı temsil etmektedir [16]. Bu sistem, ilk nesil reaktif zırhlara göre çok daha ağır olup kullanılan metal plakalar ve patlayıcı tabakanın kalınlıkları çok daha fazladır. Sistemin etkinliği yapılan testler sonucu kendini göstermiş ve zırh delici sabot mermilere karşı da yaklaşık 300 mm RHA kalınlığında ilave koruma sağladığı görülmüştür.

Yine de tüm avantajlarına rağmen patlayıcı reaktif zırhların dezavantajları da mevcuttur [17]. Eğer mermi vurması istenen açının dışında plakalara isabet ederse sistemin etkinliği azalmaktadır. Ayrıca arka plaka büyük bir enerjiyle hareket ettiği için hafif zırha sahip araçlarda önemli hasarlar oluşturabilir. Zırhlı araçlar askeri hareketler sırasında çoğunlukla piyade desteği ile birlikte kullanıldığından patlama sonrasında plakalar dost birliklere zarar verebilir. Reaktif zırhların savaş dışı koşullarda bakımı ve tamiri de güvenlik açısından bazı sakıncalar içerebilir.

4. BALİSTİK ÇARPMA MEKANİĞİ

Yüksek hızlarda kinetik çarpma mekaniği, genellikle askeri uygulamalar için kullanılsa da zararlı maddelerin taşınma emniyeti ve uzay araçlarının korunması gibi askeri olmayan konularda da kullanılmaktadır (Özşahin, 2003).

Belli bir hız verilen bir mermi, zırhın içine nüfuz etmek veya onu delip geçebilmek için hareketinden kaynaklanan kinetik enerjiyi kullanır. Ayrıca mermi patlayıcı bir başlığa sahip olup, patlamadan kaynaklanan kimyasal enerji ile de zırha nüfuz etmeye çalışabilir. Fakat balistik çarpma mekaniği olarak bizim inceleyeceğimiz konu merminin kinetik enerji ile zırhta oluşturduğu etkidir. Konu ile ilgili bazı terimleri açıklayacak olursak; merminin zırhın içine nüfuz edip zırh içinde bir yerde kalmasına penetrasyon, merminin zırhı tamamen delip geçmesine ise perforasyon adı verilir.

Bir merminin bir zırhı delme kabiliyeti balistik limit kavramı ile tanımlanır. Tanım olarak balistik limit; belli bir mermi ve zırh ikilisi için çarpmaların %50'sinin perforasyon, %50'sinin de penetrasyon ile sonuçlandığı hızdır. Balistik limit V_{50} sembolü ile gösterilir.

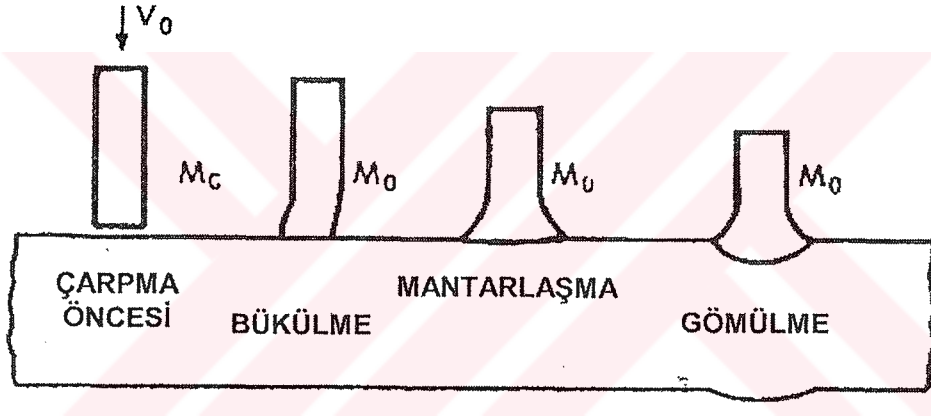
Balistik çarpma esnasında zırhta oluşan hasarı anlamak için hem zırh hem de mermi malzemesindeki tahribat koşullarının tanımlanması gereklidir.

Zırhın delinmesi sırasında mermi ve zırh malzemesinde birden fazla tahribat mekanizması gerçekleşebilir(Wilkins, 1978). Merminin çarpması sırasında birden fazla mekanizma etkili olduğu zaman mermi ve zırh malzemesinin performansları arasında bir bağlantı kurmak çok zordur. Penetrasyon işleminin tam olarak anlaşılabilmesi için her safha farklı olarak incelenmelidir.

Mermi zırha çarptığı andan itibaren hem mermide, hem de zırhta basma yönünde gerilim dalgaları oluşur. Bu dalgalar çarpma hızı ve malzeme özelliklerine bağlı olarak ses hızı veya daha yüksek hızlarda hareket ederler. Bunları daha yavaş hızlara sahip olan gevşeme dalgaları takip eder. Bu dalgalar dik çarpmalarda iki boyutlu ve açılı çarpmalarda da üç boyutludur (Özşahin, 2003). Zırhı sıkıştıran dalga, darbe yüzeyinin diğer tarafındaki zırhın serbest

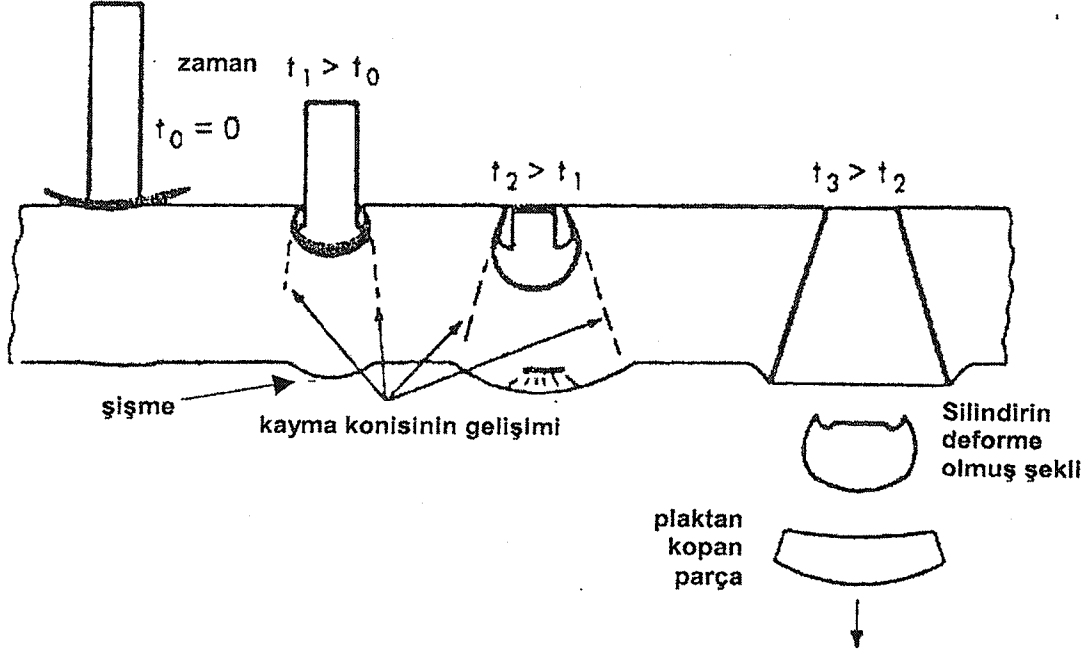
yüzeyine ulaştığı zaman ilave bir gevşeme dalgası meydana gelir (Wilkins, 1978). Bu iki gevşeme dalgasının birbirleriyle etkileşimi sonucu zırh malzemesinde çok yüksek çekme gerilmeleri oluşabilir. Eğer ilk sıkıştırma dalgası yeterince büyükse, iki gevşeme dalgasının etkileşimi sonucu oluşan çekme gerilmesi zırhın parçalanarak kırılmasına yol açabilir. Bu dalgaların etkisi çarpma hızıyla doğru orantılı olarak artar.

Balistik limitin altında yani perforasyonun oluşmadığı çarpmalarda, mermi zırh yüzeyine çarptığı an eğilir (Özşahin, 2003). Çarpma hızı arttıkça plastik deformasyon belli bir bölgede yoğunlaşır ve merminin uç kısmı zırhı delemeyen mantar şeklinde deformasyona uğrar. Çarpma hızına bağlı olarak plastik deformasyona ilaveten mermi zırh içine gömülebilir. Şekil 4.1’de bu olay görülmektedir.



Şekil 4.1 Balistik limitin altındaki hızlarda gerçekleşen çarpmalar (Özşahin, 2003)

Balistik limitin üzerindeki çarpmalarda, diğer bir deyişle perforasyonun gerçekleştiği çarpmalarda zırhın delinmesi çarpma ile eş zamanlı olarak başlar. Çarpmanın ilk anında yüzeyler arası basınç hem zırh hem de mermi malzemesinin mukavemetinin çok üzerinde olacağından, merminin ucundaki erozyonla birlikte penetrasyon oluşurken merminin geri kalan kısmı herhangi bir deformasyona uğramadan oluşan kraterde yol alır. Krater giderek derinleşirken dip kısmı merminin ucundaki deformasyon tarzına uygun olarak genişler ve temas yüzeyinde yüksek kayma gerilmeleri oluşur. Belli bir zaman sonra zırhın malzeme özellikleri, çarpma hızı ve zırh kalınlığına bağlı olarak zırhın arka yüzeyinde şişme veya yayılma şeklinde biçim değişiklikleri oluşur.



Şekil 4.2 Balistik limitin üzerindeki çarpmalar (Özşahin, 2003)

4.1 Metalik Malzemelerin Balistik Davranışı

Yaklaşık 1000 m/s hıza sahip sivri uçlu bir mermi, metal bir plakaya açısız olarak çarptığı zaman eğer metal sünek ise çentik oluşumu ile plakayı delmeye başlar (Johnson, 1972). Bu arada merminin etrafında bir taç oluşumu meydana gelir. Eğer metal gevrek ise merminin isabet ettiği bölgede, hidrostatik basıncın etkisiyle bir krater oluşur ve kırılan metal parçaları kraterin etrafından dışarı atılır. Sert metallerde perforasyon olmadığı zaman arka yüzeyden parça kopması oluşabilir. Arka yüzeyden parça kopması olayı metal levhadaki çatlaklara, katışıklara ve ısıl işlem durumuna bağlıdır.

Sivri uçlu mermi metal levha içinde ilerledikçe, deformasyon olayı çentik oluşumundan metalin enlemesine olarak dışarı doğru itilmesi şeklinde alır. Böylece metalik malzemenin büyük kısmında radyal sıkışmalar meydana gelir. Eğer levha yeterince ince ve metalik malzeme de yeterince sünek ise, mermi levhayı delip geçtiği zaman levhanın arkasında bir tür taç şeklinde deformasyon oluşur. Penetrasyon olayı sırasında oluşan yüksek basınç sonucu mermide plastik deformasyon gözlemlenebilir. Bu plastik deformasyon genellikle merminin ucunun şekil değiştirmesi olarak görülür.

Şayet sivri uçlu mermi yerine düz uçlu bir mermi kullanılırsa, yine levha kalınlığına bağlı olarak levhanın arka yüzeyinden bir tapa fırlaması görülebilir. Tapanın çapı ve ilk fırlama hızı, merminin çapı ve çıkış hızıyla hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. Tapanın ilk hızı ile merminin çıkış hızı aynı olarak alındığında(V_R) denklem 4.1 elde edilir:

$$\frac{1}{2}m_p V_0^2 - \left(\frac{1}{2}m_p V_R^2 + \frac{1}{2}m_s V_R^2 \right) = W + E_0 \quad (4.1)$$

Burada m_p : mermi kütlesini, m_s tapa kütlesini, V_0 : merminin ilk hızını, W : tapa oluşumu sırasında kayma kuvvetlerini yenmek için harcanan işi ve E_0 : dalga oluşumu, mermi ve tapadaki elastik gerilim enerjisi gibi diğer yöntemlerle kaybolan enerjii ifade eder.

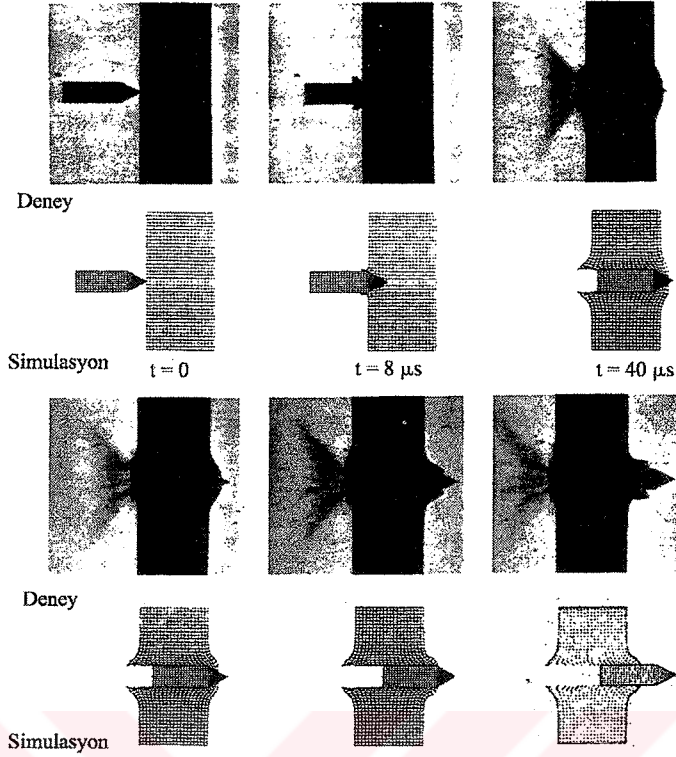
Metal levhaların balistik davranışı incelenirken “boşluklu zırh” olarak bilinen uygulamanın da göz ardı edilmemesi gerekir. Boşluklu zırh ile kastedilen olay, bir mermiyi durdurmak için tek parça levha kullanmak yerine, aynı toplam kalınlığa sahip fakat aralarında belli bir boşluk olan iki levha kullanmaktır. Örneğin 15 cm kalınlığında tek bir levha yerine, aralarında belli bir mesafe bulunan biri 10 ve diğeri de 5 cm kalınlığında olmak üzere iki levha kullanılabilir. Bu uygulamadaki düşünce şudur: Merminin hızına ve uzunluğuna bağlı olarak levhalar arası boşluk öyle bir ayarlansın ki, mermi ilk levhayı deldikten sonra arka levhaya çarpmadan belli bir zaman aralığı kalsın. Bu zaman aralığında da mermide oluşan çekme gerilmelerinin, mermi malzemesinin kritik çekme gerilmesi değerini geçip mermide bir deformasyon oluşturması amaçlanır. Böylece arka levhanın deforme olmuş mermiyi durdurması beklenir. Burada önemli olan husus levhalar arasındaki boşluk değerinin çok dikkatli seçilmesidir. Eğer boşluk değeri doğru seçilmez ise, mermi ilk levhayı deldikten sonra arka levhaya çarpana kadar geçen süre, mermide çekme gerilmelerinin kritik seviyeye ulaşması için yeterli olmayabilir. Bu durumda da boşluklu zırh kullanmakla tek parça levhaya göre daha düşük balistik dirence sahip bir zırh konfigürasyonu elde edilebilmektedir.

Metallerin balistik çarpma davranışlarının anlaşılması açısından Wilkins'in (1978) yaptığı öncü niteliğindeki çalışmaları incelemek oldukça yararlı olacaktır. Wilkins farklı geometrilere sahip çelik mermiler ile 25 mm kalınlığındaki 6061-T6 alüminyum zırh plakaların delinmesi üzerine deneyler yapıp, bu deneylerin bilgisayarda simülasyonlarını gerçekleştirmiş ve

alüminyum plakaların balistik davranışı hakkında oldukça yararlı bilgiler edinmiştir. Şekil 4.3'te görüldüğü gibi ilk olarak sivri uçlu çelik mermilerle alüminyum plakaların delinmesi incelenmiştir. Sivri uçlu çelik mermi, alüminyumun kayma direncini yenen büyük gerilmeler oluşturmuştur. Merminin alüminyumunu enlemesine hareket ettirmesiyle penetrasyon gerçekleşmiştir. Çeliğin dayanımı alüminyumdan çok daha fazla olduğu için mermi deformasyona uğramamış ve sivri ucunu kaybetmemiştir. Alüminyumun yerine yumuşak çelik malzeme konulup aynı deney tekrar edilmiş ve benzer sonuçların elde edildiği görülmüştür. Yumuşak çeliğin mukavemeti, merminin çeliğinden oldukça düşük olduğu için mermi yine deformasyona uğramamıştır. Böylelikle bu geometri için zırh malzemesinin kayma dayanımının mermiyi yavaşlatan ana özellik olduğu görülmüştür.

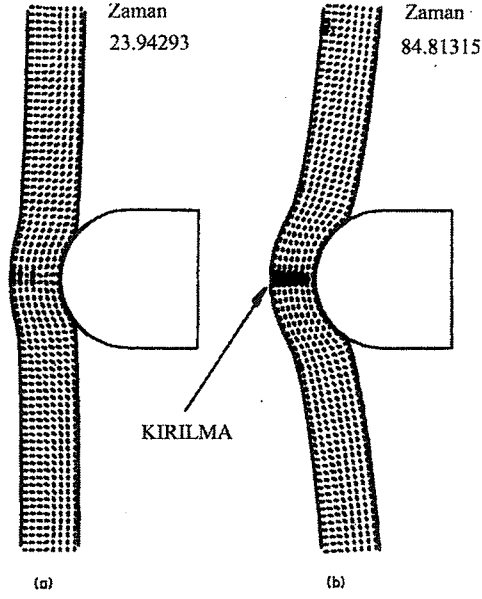
Wilkins'in yaptığı diğer deneyde küresel uçlu çelik merminin aynı alüminyum malzemedeki yapılmış plakayı delmesi incelenmiştir. Şekil 4.4'te bu deneyin şeması görülmektedir. Burada zırhın kalınlığının mermi çapından daha az olduğu göze alınmalıdır. Simetri ekseninden itibaren zırhın kalınlığı boyunca kırılma meydana gelmiş ve üçgen biçiminde taç oluşmuştur.

Üçüncü deneyde ise aynı alüminyum zırhın düz silindirik bir çelik mermiyle penetrasyonu incelenmiştir. Bu deneyin şeması şekil 4.5'te görülmektedir. Bu mermi geometrisi için, mermi plakanın içinde ilerledikçe merminin çevresinde büyük gerilmeler olduğu görülmektedir. Gerilmeler kritik bir değeri geçtiği zaman zırh malzemesinin o bölgede kırılmaya uğradığı kabul edilmiştir. Penetrasyon olayı ilerledikçe merminin hemen önündeki zırh bölgesi, zırhın kalınlığı tarafından yerinde tutulmaktadır. Mermi-zırh arayüzeyinin karşısındaki yüzeyde, mermi tarafından çekilen dairesel bölgede yüksek çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Bu yüzeyde kırılma oluşup merminin önünde plakadan tapa atması meydana gelmektedir. Eğer mermi geometrisi ve malzeme özelliklerine bağlı olarak; plastik deformasyon sırasında oluşan ısı, iletim ile sönmümlenen ısıdan daha fazla ise bu olay adyabatik kayma adımı almaktadır. Deformasyon bölgesinde yerel olarak ısının artması malzeme akış gerilimini azaltmakta ve daha çok deformasyon oluşumuna sebep olmaktadır. Bu işlem kırılma oluşana kadar hızlanır ve zırhın kalınlığı boyunca bir tapa oluşmasına sebep olmaktadır.

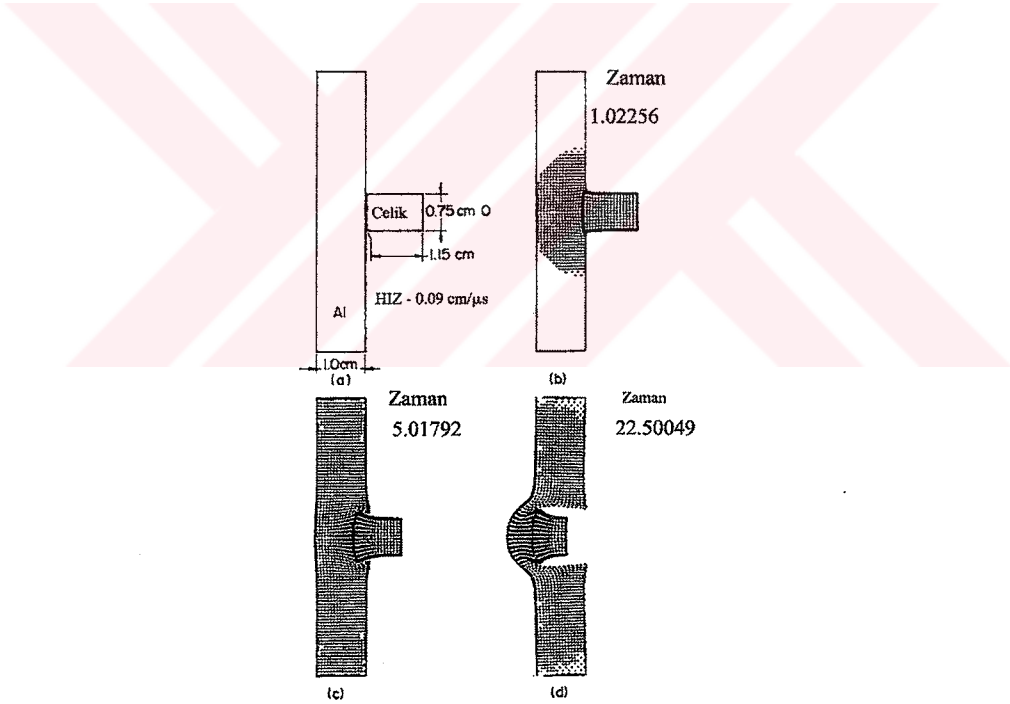


Şekil 4.3 Çelik bir merminin 2.54 cm kalınlığındaki 6061-T6 alüminyum hedefi delmesi, deney ve sayısal modelleme (Wilkins, 1978)

Tapa oluşumu genellikle kalın plakalarla ve taç oluşumu da genellikle ince plakalarla ilişkilendirilir. Burada doğal olarak zırh plakasının kalınlığı bağıl bir kavram olup açıklanması gerekir. Balistik çarpma olayında zırh plakasının kalınlığı ve merminin yarıçapı olmak üzere iki önemli boyut söz konusudur. Zırh plakasının kalınlığı merminin yarıçapından fazla olduğu zaman kalın plaka, tersi olduğu zaman ise ince plaka olarak düşünülür. Yukarıda bahsedilen küresel uçlu çelik mermi ile yapılan deneyde alüminyum plakanın kalınlığı mermi çapından az olduğu için ince kabul edilir. Bu deneyde plaka kalınlığı daha fazla olsaydı rijitlik ve eğilme dayanımı da artacağından, plakada merminin çevresinde büyük kayma gerilmeleri oluşmadan fazla eğilme meydana gelmesi mümkün olamazdı. Kalınlık belirli bir değere ulaştığı zaman zırh plakasında oluşan deformasyon üçüncü deneyde görüldüğü gibi merminin çevresinde kayma şeklinde oluşur. Plaka kalınlığı/mermiçapı oranı, merminin plakaya çarpma açısına bağlı olarak değişebilir.



Şekil 4.4 Küresel bir çelik merminin bir alüminyum hedefi delmesinin hesaplanması. Kısa çizgiler maksimum gerilimi gösterir (Wilkins, 1978)



Şekil 4.5 Düz çelik bir merminin alüminyum hedefi delmesi (Wilkins, 1978)

Zırh plakasının kalınlığı ile merminin çapı yaklaşık olarak aynı oldukları zaman ve mermi çarpma hızı perforasyon için gereken minimum hız olduğu zaman, metalik zırh plakası tapan oluşumu veya taç oluşumu şeklinde deformasyona uğrar. Deformasyonun şekli zırh malzemesi özelliklerine, zırhın desteklenme biçimine ve mermi geometrisine bağlıdır. Zırh malzemesinin dayanımı azaldıkça eğilme artacağından deformasyon taç oluşumu şeklinde olur. Aynı kalınlık/çap oranı için, zırh malzemesinin eğilmeye dayanımı arttıkça deformasyon

tapa oluşumu şeklini alır. Zırhın malzemesi düşük dayanıma ve kalınlığı da mermi çapından daha az olduğu halde, eğer zırh plakasının monte edildiği destekler simetri eksenine yakın ise, plakanın eğilme direnci artacağından deformasyon yine tapa oluşumu şeklinde olabilir.

Kalınlık/çap oranı yaklaşık bir olduğu zaman, merminin geometrik şekli de zırh plakasının deformasyon tarzını etkiler. Wilkins'in çalışmalarında görüldüğü gibi sivri uçlu bir mermi plakadan çıkarken simetri ekseninde kırılmaya yol açacağından taç oluşur. Düz uçlu mermi ise, mermi etrafında yüksek gerilim ve gerinimler oluşacağı için tapa oluşumuna yol açar.

Metalik bir zırh malzemesinin balistik çarpmaya karşı etki eden malzeme özellikleri şöyle özetlenebilir:

- Sertlik
- Yoğunluk
- Kalınlık
- Kayma ve esneme modülü

Sivri uçlu mermilere karşı, zırh malzemesinden ilk olarak sivri ucu mümkün olduğunca çabuk kırması beklenilir. Bu yüzden zırh malzemesinin deformasyon direncinin yüksek olması gerekir. Metalik zırhın yüksek deformasyon direncine sahip olmasını sağlayacak malzeme özelliği ise kayma ve esneme dayanımıdır. Kayma dayanımı hacimle ilgilidir ve bu özellikten yeterince yararlanılması için zırhın mermi çapına göre yeterince kalın olması gerekmektedir.

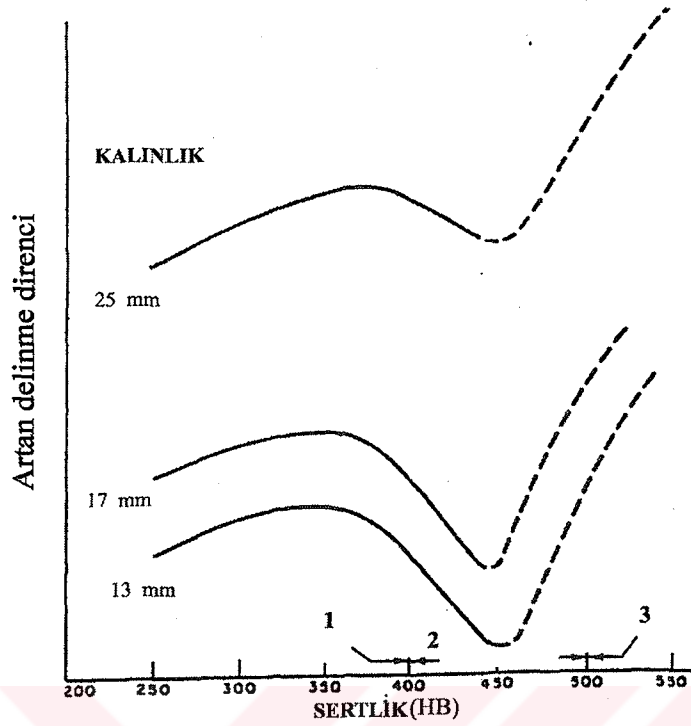
Metalik malzemelerin balistik limitini etkileyen en önemli faktörlerden birisi sertliktir (Öztürk, 1994). Literatürde mevcut olan, metallerin sertliğinin balistik dirence olan etkisi konusu daha çok ince levhalar için (Kalınlık/Çap $<$ 1) için incelenmiştir (Dikshit vd., 1995). Bu araştırmalar sonucu metalik levhaların sertliği arttıkça, balistik direncin de belli bir sertlik değerine kadar arttığı ortaya çıkmıştır. Belli bir değerden sonra ise sertlik arttıkça balistik dayanım azalmaktadır. Bunun sebebi adyabatik kayma bantları oluşumu sebebiyle tapa oluşumunun kolaylaşmasıdır. Metalik levhanın sertliği mermi sertliğine yaklaşacak kadar artırılırsa, merminin kırılması/deformasyonu sebebiyle balistik dayanım da yeniden artış gösterecektir.

Şekil 4.6'da sertliğin nüfuziyet derinliğine olan etkisi görülmektedir (Öztürk, 1994). 1.bölgeye dahil olan 400 HB sertliğin altında mermi olduğu gibi kalırken, 500 HB değerine ulaşıldığında 3.bölgede mermi parçalanmaktadır. 2. bölgeye dahil olan 400-500 HB arası geçiş bölgesidir ve bu bölgede malzemenin penetrasyon direnci düşmektedir. 500 HB değerinden sonra ise sertlik artışı gevrekliğe, yani çarpma sırasında levhanın kırılmasına yol açacağı için istenmeyen bir durumdur.

Dikshit vd., (1995) farklı sertlik değerlerine sahip çelik levhalar için sertliğin balistik dayanıma olan etkisini incelemiştir. Bu çalışmada benzer birçok çalışmanın aksine 20 mm çaplı mermiler kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucu çelik levhaların sertliğinin balistik dayanıma olan etkisinin, delinme sırasındaki gerilim durumuna bağlı olduğu görülmüştür. Düzlem gerilim koşullarında malzemenin sertliği arttıkça balistik dayanımın arttığı sonucu çıkarılmıştır. Bunun sebebi plastik bölgede sertliğin artmasıyla beraber enerji sönmemesinin daha fazla olmasıdır. Düzlem gerilim koşullarında ise orta sertlik değerlerinin en iyi balistik dayanımı verdiği görülmüştür. Düzlem gerilim koşullarında yüksek sertlik değerlerinde adyabatik kayma olayı sebebiyle balistik dayanım sınırlanır. Düşük sertliklerde ise plastik bölgedeki sönmelenen enerji miktarı çok azdır.

Adyabatik kayma olayı da metallerin balistik davranışına etki etmektedir. Çok büyük bir deformasyonun çok küçük bir bölgede aniden oluşmaya zorlanması, malzemenin o bölgede aşırı ısınmasına sebep olmaktadır. Artan mermi hızıyla orantılı olarak yükselen sıcaklık adyabatik kayma olayına sebep olup bölgesel sıcaklığı daha da artırmaktadır. Yükselen sıcaklık nedeniyle malzeme o bölgede sertliğini ve dayanımını kaybetmekte, hatta alüminyum gibi düşük ergime sıcaklığına sahip malzemelerde yerel ergimeler oluşabilmektedir. Adyabatik kayma oluşumu düz profilli mermilerde daha kolay olmaktadır.

Adyabatik kaymanın bir diğer etkisi de metalurjik yapıyı değiştirmesidir. Zırh çelikleri üzerinde yapılan araştırmalardan çıkan sonuca göre, adyabatik kaymanın olduğu bölgelerde önemli mikroyapı değişimleri görülmüştür. Bu dönüşümlere örnek olarak yeni karbür oluşumu, çökelmeler, mevcut çökelmelerin büyümesi, tane büyümesi ve yeni faz oluşumu verilebilir. Bu tür değişimlerin oluşması için ise çok yüksek sıcaklıkların oluşması gerekmektedir.



Şekil 4.6 Monolitik çelik plakalarda sertliğin balistik dirence olan etkisi (Öztürk, 1994)

Adayabatik kayma bantlarının özellikle düşük dayanımlı metalik malzemelerde etkili olduğu görülmüştür. Yüksek sıcaklığın etkisiyle alüminyum gibi malzemelerde mikroyapı dönüşümlerinden çok bölgesel ergimeye sebep olmaktadır. Bu ergime sayesinde çatlak büyümesi kolaylaşmakta ve balistik dayanım azalmaktadır. Alüminyum gibi metalik malzemelere SiC gibi ısıya dayanıklı parçacıkların ilavesiyle adyabatik kayma olayı büyük oranda azalmaktadır. Fakat bunun sonucunda da balistik dayanım açısından diğer önemli bir özellik olan dinamik kırılma tokluğu azalması meydana gelmektedir.

Bir çelik levhanın yavaş delinmesi için gereken enerji, hızlı delinmesi için gereken enerjiden çok daha fazladır. Adyabatik kayma oluşumu bu olayı açıklamaktadır. Bu olay aynı zamanda metalik malzemelerin dayanımlarının gerinim hızına bağlı olduğunu göstermektedir.

Metalik malzemelerin mikroyapıları ve ısıl işlem durumları da balistik dayanıma etki etmektedir. Çelikler için karbon oranı arttıkça ve menevişleme sıcaklığı düştükçe, martensitin balistik direncinin yükseldiği görülmüştür. Bazı çeliklerde bey nitik yapının menevişlenmiş martenzitik yapıya göre daha iyi balistik performans gösterdiği belirlenmiştir. Mermiyi ilk karşılayan yüzey katmanları için menevişleme sıcaklığının önemli olduğu görülmüştür.

Metalik malzemeler ince taneli yapıya sahip oldukları zaman, tokluğun ve dayanımın artmasından dolayı balistik performansın bir miktar arttığı görülmüştür. Zırh tasarımında önemli bir parametre olan arka tapa fırlamasını önlemek için mümkün olduğunca temiz, katışıksız ve homojen bir içyapı istenmektedir.

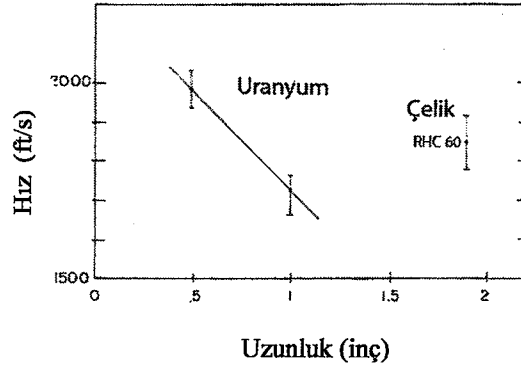
Bir zırhın balistik performansı ona çarpan merminin özellikleriyle doğrudan ilgilidir. Merminin balistik performansını etkileyen faktörler şöyle özetlenebilir:

- Sertlik
- Geometri
- Yoğunluk

İki farklı zırh çeliği üzerinde çeşitli sertlikteki mermilerle yapılan bir çalışma sonucu balistik limit hızın, mermi sertliğinin zırhın sertliğinden fazla olmadığı durumlarda, mermi sertliğine bağlı olmadığı görülmüştür (Anderson vd., 1999). Merminin sertliği zırhın sertliğinden daha fazla olduğu zaman ise zırhın perforasyonu için gereken hızın azaldığı görülmüştür. Ayrıca sertliğin artmasıyla beraber çarpmadan sonra merminin kalan uzunluğunun daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Mermi-zırh ara yüzeyindeki merminin deformasyon mekaniğini, merminin balistik performansını etkilemektedir.

Merminin birim alanı başına düşen kütlesi arttıkça perforasyon için gerekli olan hız da azalmaktadır (Wilkins, 1978). Şekil 4.7’de 6.35 mm kalınlığındaki soğuk haddelenmiş çelik zırhın perforasyonu için gereken balistik limit hızların, çelik ve uranyum mermi için değişimleri görülmektedir.

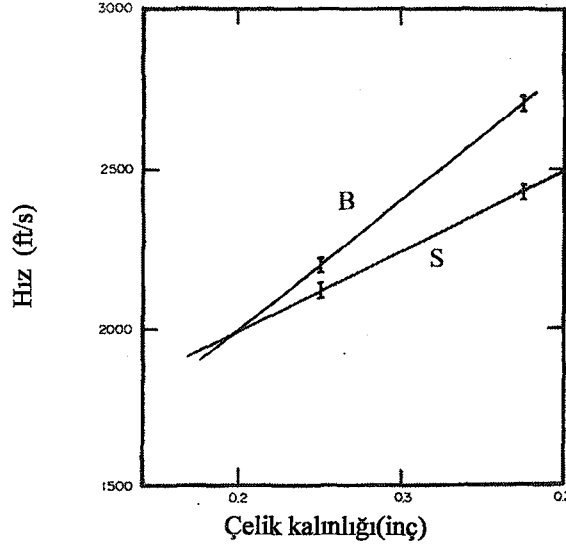
Kalın metalik malzemelerin perforasyonu için gereken hız, sivri mermilerde küt mermilere göre daha azdır. Zırhın kalınlığının mermi çapına oranı azaldıkça durum küt mermilerin lehine değişmektedir. İnce zırhlarda perforasyonun son aşaması mermi geometrisine bağlı olmaktadır. Mermi geometrisi sebebiyle zırhta büyük deformasyonlar olduğu takdirde işleme sertleşmesi etkisi oluşur. Ayrıca mermi hızı sifıra yaklaştığında perforasyon işleminde sürtünmenin de etkisi görülür. Düz bir silindirin tapa oluşturması için gereken enerji, sivri bir merminin zırh malzemesini sünek yırtılma ile kenara doğru itmesi ve sürtünme kuvvetlerini yenmesi için gereken enerjiden daha azdır.



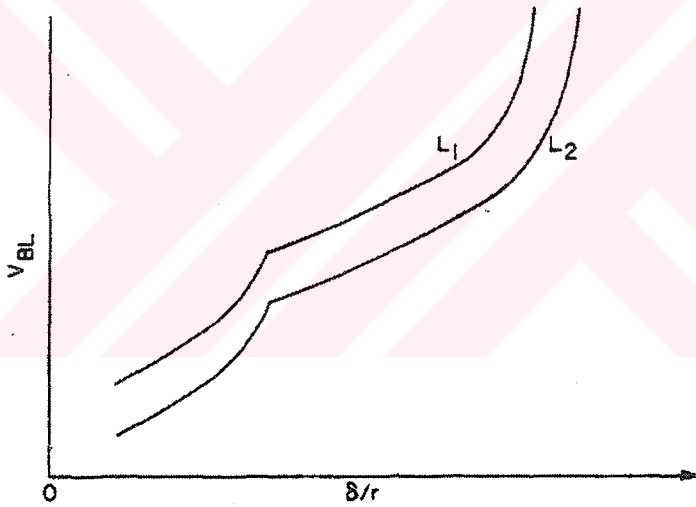
Şekil 4.7 Uranyum ve çelik mermiler için 6.35 mm kalınlıktaki haddelenmiş çeliğin balistik limiti, mermi çapı 2.54 mm (Wilkins, 1978)

Şekil 4.8'de sivri ve düz uçlu çelik mermilerin, yine çelik hedefleri delmesi için gereken minimum hızların karşılaştırılması verilmiştir. Sivri mermiler 55° açığa sahip konik uçlara sahiptir. Zırh malzemesi AISI/SAE 4340 olup 55 RHC sertliğe sahiptir. Burada sivri uçlu mermilerin sertliği, zırhın penetrasyonu sırasında sivri koninin bozulmamasını sağlayacak kadar yüksektir.

Şekil 4.9'da aynı mermiler ve zırh malzemesi için mermi uzunluğunun balistik limit hızı olan etkisi görülmektedir. Diğer parametrelerin aynı kalması durumunda daha uzun olan mermi için gereken balistik limit hız azalmaktadır. Zırh kalınlığının mermi çapına oranı (δ/r) arttıkça, belli bir değerden sonra belli bir L değerine sahip olan mermi, ne kadar hızlı olursa olsun zırhı delip geçmesi mümkün değildir. Perforasyon için daha uzun mermiler gerekmektedir. Bunun sebebi merminin kohezyon kuvvetinin, yüksek hızda oluşan çarpmadan meydana gelen mermi içindeki büyük iç enerji tarafından yenilmesidir.



Şekil 4.8 Sivri ve küt uçlu mermiler için 4340 çeliğinin değişik kalınlıklar için balistik limiti.
S: Sivri mermi, B: küt mermi, kütle 8.32g (Wilkins, 1978)



Şekil 4.9 Balistik limit hız ve hedef kalınlığı/mermi çapı arasındaki bağıntı. L: mermi uzunluğu $L_2 > L_1$, V_{BL} : Balistik limit hız, δ/r : Hedef kalınlığı/mermi çapı (Wilkins, 1978)

Aluminyum zırhlar üzerinde yapılan bir çalışmada aynı kalınlık değeri için, tabaka şeklindeki yapının monoblok yapıya göre daha iyi balistik performans gösterdiği belirlenmiştir (Gogolewski vd., 1996). Bu çalışmada küt uçlu çelik mermiler ile aluminyum 6061-T6 alaşımından imal edilmiş, aynı kalınlıkta monoblok levha ile üç tabakadan oluşan bloklar üzerine atış denemeleri yapılmış ve tabakalı yapının perforasyonu için gereken mermi hızının daha fazla olduğu görülmüştür. Çalışmayı gerçekleştirenler, balistik performanstaki bu artışın sebebini levhalar arasındaki sürtünmenin daha fazla olmasına, dolayısıyla daha fazla kinetik enerjinin soğurulmasına bağlamışlardır. Bu hipotezi test etmek için bu kez katmanlar arasında

teflon tabakaları yerleştirip, alüminyum levhalar arasındaki sürtünmeyi kaldırmışlar ve tekrar aynı mermilerle atış testleri yapmışlardır. Gerçekten de teflonlu katmanların perforasyonu için gereken hızın, teflonsuz katmanların perforasyonu için gereken hızdan daha az olduğu gözlemlenmiştir. Aynı çalışmada tabakalar arası boşluk etkisi de incelenmiştir. Alüminyum levhaların arasında farklı değerlerde hava boşlukları bırakılmış ve boşluk etkisiyle doğru orantılı olarak balistik performansın azaldığı ortaya çıkarılmıştır. Bunun sebebi olarak merminin, birbirlerine destek etkisi sağlamayan ince levhaları daha kolay delmesi gösterilmiştir.

Buna karşılık yapılan bazı deneylerde, alüminyum için tek bir levha yerine toplam kalınlığı aynı olan birden fazla levha kullanmanın balistik direnç üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı görülmüştür. Woodward ve Cimpoeru (1998) tarafından yapılan deneylerde, alüminyum 2024-T351 alaşımından yapılan levhaların tek parça halinde ve tabakalı durumda iken balistik dayanımları incelenmiştir. Tabakalaşma etkisinin balistik limiti çok az arttırdığı görülmüştür. Bu çalışmada alüminyum tabakalar arası herhangi bir bağlayıcı kullanılmayıp sadece levhalar kenarlarından yapıştırıcı teyp ile birbirlerine tutturulmuştur.

4.2 Seramik Yüzeyli Kompozit Malzemelerin Balistik Davranışı

Metalik malzemelerin balistik davranışının İkinci Dünya Savaşı'ndan beri detaylı olarak incelenmesine karşın, gevrek seramik malzemelerin balistik davranışı hakkında son yirmi yıla kadar pek fazla çalışma yapılmamıştır (Vural, 1998).

Tüm seramik zırh sistemleri; sert ve gevrek olan seramik bir malzemeden yapılan bir ön plaka ile, polimer esaslı veya alüminyum gibi yumuşak ve deforme olabilen malzemeden yapılan bir arka destek levhasından oluşur (Matchen, 1995). Bu tür bir kompozit zırhın avantajı, aynı balistik koruma seviyesi için çelik zırhlara göre çok daha hafif olmalarıdır.

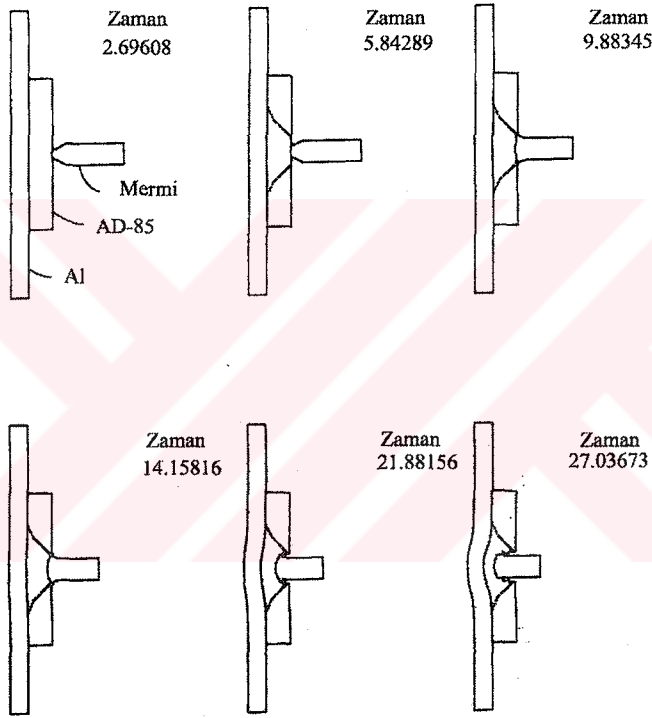
Yüksek hıza sahip bir mermi seramik yüzeyli kompozit zırha çarptığında, seramik malzemenin yüksek basma dayanımı sebebiyle metalik mermi deformasyona uğrar ve eğer sivri uçlu ise kütleşir (Vural, 1998). Darbenin gerçekleştiği noktada oluşan gerilimler basma gerilmeleridir, bu yüzden seramik başlangıçta elastik tarzda deforme olur. Seramiğin ön yüzeyinde radyal çekme gerilmeleri oluşur ve bu sebepten dolayı arka destek plakasına doğru

kırılma konisi oluşur. Bu koniye Hertz konisi denir. Eğer mermi yeterince sert ve yeterli enerjiye sahip ise, mermi seramiğin basma dayanımını yenebilir ve merminin önünde ezilip toz haline gelmiş bir malzeme kütlesi oluşabilir. İlk çarpma sonucu oluşan elastik dalgalar, seramiğin arka ve yan yüzeylerinden çekme dalgaları olarak yansıyor daha fazla kırılmaya sebep olabilir. Bu kırılmanın derecesi arka destek levhasının akustik empedansına bağlıdır. Seramiğin ve arka destek levhasının eğilmesi sonucu, çarpma noktasından itibaren seramik levhanın kenarlarına uzanan radyal çatlaklar oluşur. Merminin kinetik enerjisi destek levhasındaki deformasyon ve hasar mekanizmalarıyla emilir. Burada seramiğin asıl amacı, yüksek sertliğiyle mermiyi parçalamak ve Hertz konisi vasıtasıyla kinetik enerjiyi destek levhasının yüzeyine mümkün olduğu kadar geniş bir biçimde yaymaktır.

Wilkins'in (1978) alüminyum oksit yüzeyli ve alüminyum destek plakasına sahip kompozit zırhların balistik davranışı üzerine yaptığı deneysel ve nümerik çalışmalar bu konuda öncü niteliğindedir. Wilkins, 6061-T6 alüminyum alaşımı levha ile desteklenen AD-85 seramik levhalar üzerine çelik mermiler ile atışlar yapmış ve yaptığı deneyleri sonlu elemanlar metodu ile simüle etmiştir. Şekil 4.10'da Wilkins'in, seramiğin kırılması ve Hertz konisinin oluşumunun simülasyonu görülmektedir. Koninin etkisiyle darbe yükünü destek levhasına ileten seramik malzeme miktarı sınırlanır. Destek levhasındaki en büyük gerilme darbe ekseninde oluşur ve bu nokta, destek levhasına en büyük basmanın uygulandığı yerdir. Alüminyum levhadaki basma etkisi sebebiyle seramiğe sağladığı destek kaybolur ve seramikteki gerilim çekme yönüne döner. İlk oluşan aksenal çatlak mermiye doğru geri döner. Koninin içindeki çatlakların birleşimi sonucu seramikte genel bir kırılma olmaktadır. Seramikteki kırılma oranı destek levhasının özelliklerine bağlıdır. Seramik kırıldıkça, alüminyum destek levhasına darbe yükü gittikçe daha küçük alanlar üzerinden iletilir. En sonunda öyle bir noktaya gelinir ki, destek levhasına gelen darbe yükü mermi çapına yaklaşık olarak eşdeğer bir alan üzerinden iletilir.

Koni içinde oluşan çatlakların granüler bir yığın oluşturup, merminin çarpmasıyla oluşan yükü destekleme etkisi yaptığı görülmüştür (Horsfall ve Buckley, 1995). Bu yığının, etrafındaki malzeme tarafından desteklenmesi sonucu penetrasyona karşı etkili bir engel teşkil ettiği görülmüş ve malzemenin, taneler arası kayma ile oluşan akışa direncini zırhın performansını etkilediği ortaya çıkarılmıştır.

Seramiklerin kırılma davranışı da balistik performans açısından önemlidir çünkü merminin kinetik enerjisinin önemli bir kısmı, seramikten ayrılan parçaların kinetik enerjisi olarak dağılmaktadır (Gooch vd., 1992). Sternberg'e (1989) göre seramik bir malzemenin tokluğunun artırılması sonucu balistik dayanım artabilmektedir. Seramiklerin tokluğu ile kırılma olayı doğrudan ilgili olup tokluk attıkça parçalanma miktarının azaldığı görülmüştür. Fakat bazı araştırmacılara göre tokluğun kendisinin balistik performansın göstergesi olduğu söylenemez (Gooch vd., 1992, 1993). Gevrek malzemeler ile ilgili yapılan sayısal modellemelerde, merminin sahip olduğu ilk kinetik enerjinin çok küçük bir bölümünün kırılma enerjisine dönüştüğü görülmüştür (Yadav ve Ravichandran, 2002).



Şekil 4.10 AD85 alumina ve 6061-T6 alüminyum destek plakasının çelik bir mermiye karşı gösterdiği balistik davranışın simülasyonu (Wilkins, 1978)

Kinetik enerjinin büyük bölümünün kopan seramik parçalarına ve merminin deformasyonuna harcandığı ortaya çıkmıştır. Merminin önündeki ezilmiş tanelerin etrafında kırılmanın küçük parçalar şeklinde, çarpmadan daha uzakta gerilim dalgalarının etkileşimi sonucu ise daha büyük parçaların kırıldığı görülmüştür (Gooch vd., 1992). Louro ile Meyers (1989), alumina levhalar üzerine yapılan çalışmalar sonucu parçalanmanın, seramiğin çekme gerilimine maruz kalma zamanı ile doğrudan ilgili olduğunu ortaya çıkarmıştır. Alüminanın tokluğunu artırmak amacıyla AD-85 levhalara kısmen kararlı zirkonya ilavesi yapmanın kırılma davranışı üzerinde bir etkisi olmayıp, zirkonya katkılı alumina ile katkısız alüminanın hemen hemen aynı oranda parçalandığını görmüşlerdir. Seramiklerin parçalanmaları üzerindeki en büyük

yapısal faktör tane boyutudur. Aynı araştırmacılar farklı tane boyutlarına sahip alüminaller üzerinde deneyler yapmışlar ve tane boyutunu 4 µm'den 24 µm'ye çıkarılması sonucu parçalanmanın ciddi oranda azaldığını gözlemlemişlerdir. Miyahara ve ekibinin (1994) %99 saflıkta alüminyum oksit parçalar ile yaptıkları çalışmalar da bu sonucu doğrular niteliktedir. Miyahara da kırılma tokluğunun tane büyüklüğü ile doğru orantılı olarak arttığını görmüştür. Buna karşılık alüminanın eğilme dayanımının ise tane büyüklüğü ile ters orantılı olduğunu bulmuşlardır. Bunun sebebi olarak da eğilme dayanımının tane büyüklüğüne bağlı olan malzeme hatalarıyla ilgili olduğu sonucuna varmışlardır.

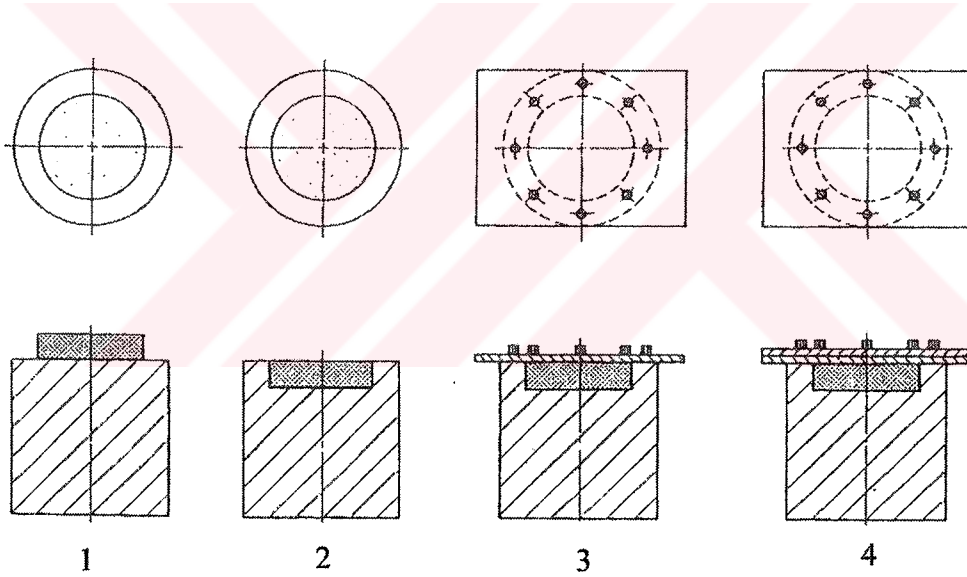
Gooch vd. (1993), tungsten alaşımlı mermiler kullanarak farklı seramik malzemelerin kırılma davranışlarını incelemişler ve seramiğin sertliğinin mermiyi deforme etmeye yeterli olmadığı durumlarda, düz memilerin sivri uçlu memilere göre daha fazla parçalanmaya yol açtığını incelemişlerdir. Seramiğin sertliğinin mermiyi kıracak seviyede olduğu zaman ise mermi geometrisinin seramiğin parçalanma davranışına bir etkisi olmadığı görülmüştür. Ayrıca aynı çalışmada, seramiğin önüne alüminyum levha ile sıkıştırma yapılmış ve bunun sonucunda daha fazla parçalanma olduğu ortaya çıkmıştır.

Rosenberg ve Yeshurun (Yadav ve Ravichandran, 2002), seramik malzemelerin statik ve dinamik basma dayanımlarının ortalama değerinin balistik direnç için bir parametre olabileceğini belirtmişlerdir. Woodward ise seramik malzemenin Vickers sertliğinin belli bir sayıya bölünmesi ile balistik dayanımı gösteren bir parametre bulunabileceğini iddia etmiştir.

Horsfall ve Buckley (1995), alumina levhalardaki kalınlık boyunca oluşan çatlak etkisinin balistik performansa olan etkisini incelemişlerdir. Seramikte çatlağın olduğu bölgenin üstüne çelik çekirdekli mermilerle atış yapılmış ve balistik limit hızda ihmal edilebilecek kadar az bir düşüş olduğunu saptamışlardır. Burada çatlak, merminin önündeki ezilmiş malzeme yığınının mermiyeye karşı oluşturduğu direnci azaltır. Fakat seramik arka destek levhasına sıkı bir şekilde bağlandığında ve bir parçalanma kılıfı ile muhafaza edildiğinde bu etki çok düşük seviyededir. Bu sonuç zırh kullanıcıları açısından önemlidir çünkü çalışma şartları sebebiyle, örneğin zırhlı araçlardaki ilave seramik plakalar gibi, seramik zırhta bu tür hasarlar oluşması kaçınılmaz olabilir.

4.2.1 Seramik Zırhlarda Sıkıştırma Etkisinin Balistik Davranışa Etkisi

Sıkıştırma etkisinin seramik zırhların balistik performansını nasıl etkilediği konusunda çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Anderson ve Timmons (1997), %99.5 saflıktaki alüminyum oksit levhaların ön yüzeyden ve enine olan sıkıştırma etkisini incelemiştir. Bu amaçla önce yarısonsuz bir çelik levhaya tungsten alaşımlı mermiler ile penetrasyon derinliğinin ölçülmesi için atışlar yapmışlar, daha sonra seramik levhaları çelik bloğun üzerine veya içine yerleştirilerek tekrar atış yapılmıştır. Seramik levhaların bazılarının önüne ayrıca çelik plaka da konmuştur. Deneydeki hedef konfigürasyonu Şekil 4.11’de görülmektedir. Çelik bloktaki merminin nüfuziyet derinliği ölçülmüş ve toplam kütle etkinliği hesaplanmıştır. Deney sonucunda seramik levhaların balistik performanslarının sıkıştırma etkisiyle beraber arttığı görülmüştür. Sıkıştırma etkisinin çarpma hızıyla doğrudan bağlantılı olduğu, sıkıştırma veriminin belli bir limit hızdan itibaren fazla değişmediği görülmüştür.

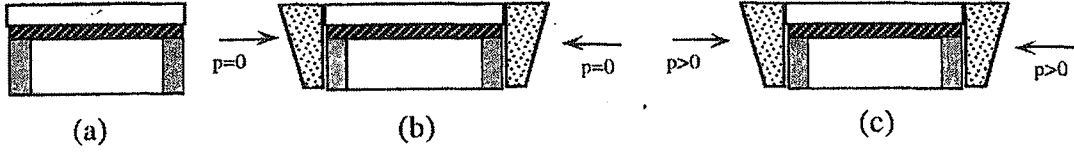


Şekil 4.11 Anderson-Timmons'un deney konfigürasyonu (Anderson ve Timmons, 1997)

1: sıkıştırılmamış levha 2:radyal olarak sıkıştırılmış levha 3:radyal + önden tek plakayla sıkıştırılmış levha 4:radyal + önden çift plakayla sıkıştırılmış levha

Sherman ve Ben-Shushan (1996), alüminyum ve çelik bloklarla destekli alüminyum oksit levhaların enine muhafaza etkisi altında iken oluşan hasar durumlarını incelemiştir. Yanal sıkıştırma etkisinin yanısıra çift eksenli basma gerilmesinin etkisini de incelemiştir. Şekil 4.12’de deneyin düzeneği görülmektedir. Şekilde (a)yanal muhafazasız seramik, (b)yanal muhafazalı fakat sıkıştırma kuvveti uygulanmayan seramik, (c)yanal muhafazalı ve sıkıştırma kuvveti uygulanan seramiği göstermektedir. Bu çalışmada da yanal muhafaza etkisinin

seramikte oluşan hasarı azalttığı görülmüştür. Ayrıca uygulanan 200 MPa değerindeki çift eksenli basma gerilmesinin oluşan hasarı daha da azalttığı görülmüştür. Uygulanan bu basma gerilimi, seramiğin tahribatı için gereken çekme geriliminin değerini artırmakta ve radyal çatlakların oluşmasını önlemektedir.



Şekil 4.12 Sherman ve Ben Shushan'ın sıkıştırma etkisi deneyinin şeması (Sherman ve Ben-Shushan, 1996)

Sherman'ın (2000) yaptığı bir başka çalışmada, değişik destek levhalarına sahip alüminyum oksit levhaların yine sıkıştırma etkisi üzerinde deneyler yapılmıştır. Sherman ve Ben-Shushan'ın yaptığı çalışmaya benzer şekilde, ayrıca 130 MPa değerinde çift eksenli yanal basma gerilmeleri uygulanmıştır. Yanal mufaza etkisinin belli bir kalınlıktan sonra etkili olduğu görülmüştür. İnce çelik levhayla desteklenen ince seramik levhalar için, 130 MPa'lık yanal gerilimin oluştuğunda fazla bir değişikliğe yol açmadığı görülmüştür. Kalınlık azaldıkça destek levhasının eğilme rijitliği hasar mekanizmasını belirlemektedir. Aynı deneyde Spectra kompoziti ile desteklenmiş seramik levhalarda tüm sınır koşulları için aynı hasar görülmüştür.

4.2.2 Seramik Kompozit Zırhlarda Tabakalaşma Etkisi

Seramik kompozit zırhlardaki yapısal tabakalaşma etkisi birçok araştırmacı tarafından ele alınmıştır (Roeder ve Sun, 2001). Radin ve Goldsmith'in alüminyum ve polikarbonat katmanları ile yaptığı atış deneylerinde tabaka sayısı arttıkça balistik direncin azaldığı ortaya çıkmıştır. Wilkins'in (1978) yaptığı çalışmada da, aynı kalınlık için tek seramik yüzeye sahip alumina/alüminyum kompozitinin iki ince tabakaya göre daha iyi balistik dirence sahip olduğu görülmüştür. Hetherington analitik bir çalışma ile iki katmanlı alumina/alüminyum kompozit zırhın optimizasyonunu yapmaya çalışmıştır.

Alumina/alüminyum kompozit zırhlardaki katman etkisini anlamak için Roeder ve Sun (2001) tarafından gerçekleştirilen çalışmayı incelemek yararlı olacaktır. Bu çalışmada ikisi de aynı kalınlıkta olmak üzere biri üç katmanlı, diğeri ise dokuz katmanlı olan iki alumina/alüminyum

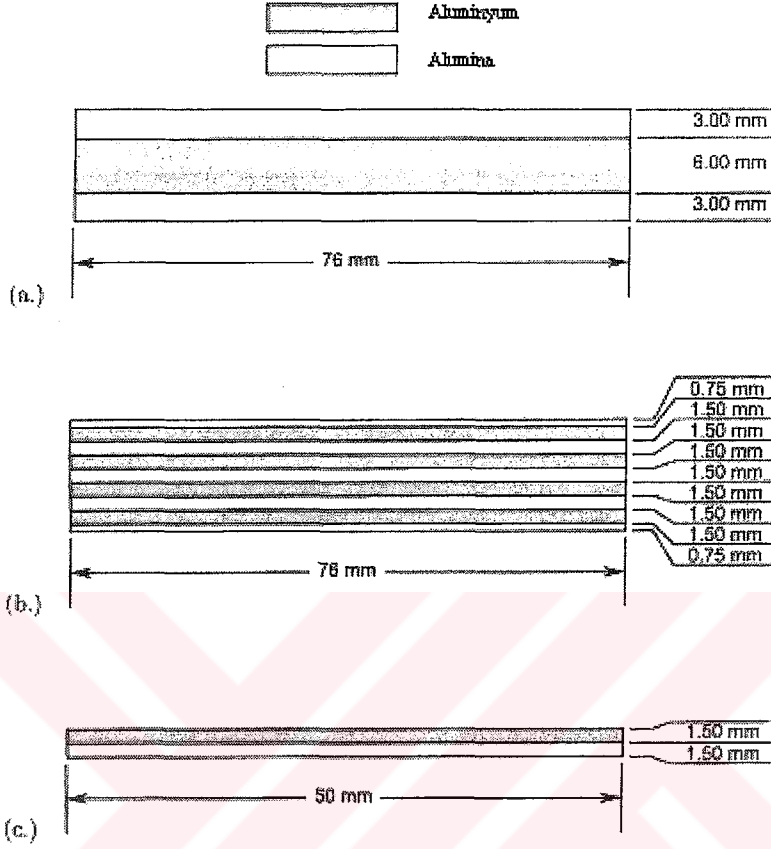
kompozit zırh sisteminin balistik performansı, deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Kompozit zırhların konfigürasyonları Şekil 4.13'te görülmektedir(Alumina AD99.8, alüminyum 6061-T651).

Her iki zırh sistemine de küresel uçlu çelik mermiler ile farklı hızlarda atışlar yapılmış, üç katmanlı zırhta tüm hızlar için daha az penetrasyon olduğu görülmüştür. Üç katmanlı zırha çarpan mermilerin ucunda bir miktar deformasyon görülmüş, buna karşın dokuz katmanlı zırha çarpan mermilerde belirgin bir deformasyon görülmemiştir. Üç katmanlı zırhın dokuz katmanlı zırha göre daha üstün performans sergilemesine ana neden olarak en öndeki seramik tabakanın daha kalın olması gösterilmiştir. Kalın seramik katmanın tahribatı için daha fazla darbe yükü gerekmiş, dolayısıyla yükün arka kısma transferini geciktirerek daha az penetrasyona yol açmıştır. Üç katmanlı zırhtaki temas gerilmeleri mermiyi deforme edecek kadar yüksek olmuştur. Yapılan sonlu elemanlar modellemesinde de bu olay görülmüş, iki kompozitin performanslarındaki tüm farkın ilk 10 μ s içinde gerçekleştiği görülmüştür. Deneiden elde edilen sonuçlar Şekil 4.14'te gösterilmiştir.

Aynı çalışmada seramik kompozit zırhlardaki artık ısıl gerilmelerin balistik performans üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Aynı şekildeki üç katmanlı ve dokuz katmanlı kompozit zırhlara artık ısıl gerilim uygulanmış ve aynı mermilerle atışlar yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucu artık ısıl gerilmenin balistik dayanıma önemli bir katkı sağlamadığı görülmüştür. Yapılan nümerik modellemelerde ısıl gerilimin balistik dayanımı önemli oranda arttırması için pratikte uygulanamayacak kadar yüksek boyutlarda olması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Buna karşın Yadav ve Ravichandran'ın (2002) seramiklerdeki laminasyon üzerine yaptıkları çalışmada çıkan sonuçlar değişiktir. Bu çalışmada 6061-T6 alüminyum blok ile desteklenmiş alüminyum nitritür(AIN) seramik levhalardaki katman etkisinin balistik dirence olan etkisi incelenmiştir. Aynı kalınlık için üç farklı katman sayısına sahip levhalar kullanılmıştır. Birincinde 38.1 mm monoblok seramik, ikincisinde 12.7 mm kalınlığında üç katmanlı seramik, üçüncüsünde ise 6.35 mm kalınlığında altı katmanlı seramik levhalar üzerine tungsten alaşımlı levhalar ile atış yapılmıştır. Çok katmanlı seramik tabakaları arasında ince bir poliüretan film bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Üç katmanlı seramik levhanın penetrasyon

direncinin monoblok levhaya göre daha yüksek olduğu, buna karşın altı katmanlı levhanın penetrasyon direnci daha az olduğu görülmüştür.

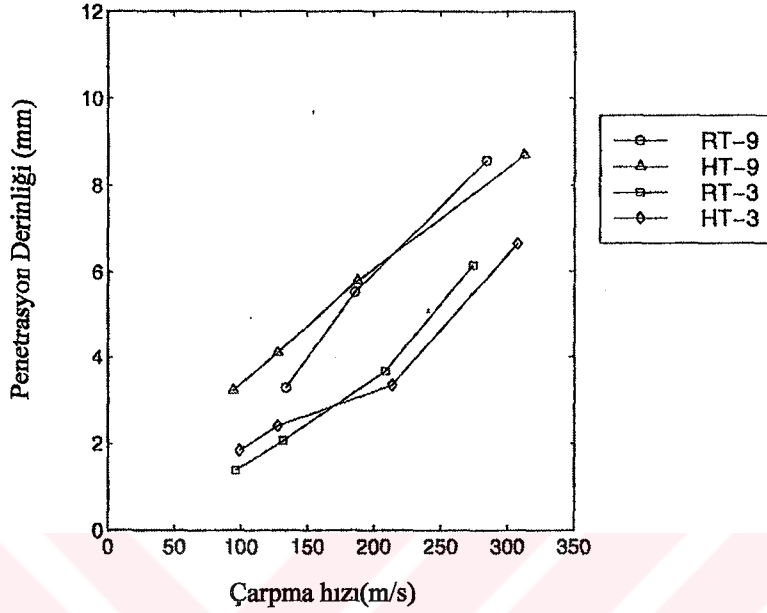


Şekil 4.13 Roeder ve Sun tarafından yapılan çalışmadaki (a) üç katmanlı kompozit ve (b) dokuz katmanlı kompozitin yapıları. (c) İki katmanlı kompozit ise ısıl gerilimin ölçülmesi için hazırlanmıştır (Roeder ve Sun, 2001)

Katmanlı seramik/polimer yapının daha fazla balistik dayanıma sahip olmasının nedenlerinden biri, katmanlı seramik yapıda monoblok levhaya göre gerilim dalgalarının yayılma hızının daha düşük olmasıdır. Düşük yoğunlukları ve yüksek katlıkları sebebiyle enine ses dalgalarının seramikteki hızı yaklaşık 10 km/s civarındadır. Fakat polimer tabakalar ile birbirlerine bağlı seramik yapılar dalgaları dağıtıcı bir özelliğe sahiptir. Bu sebepten dolayı ses dalgalarının seramik/polimer kompozit yapılarıdaki yayılma hızı, tek parça seramiklere göre çok daha azdır.

Böylece katmanlı seramik yapıda oluşan hasar daha düşük bir hızda yayılıp, katmanlı yapının direncini artıracaktır. Zhang (Yadav ve Ravichandran, 2002), ince polikarbonat tabakalarıyla lamine edilen paslanmaz çelik, alüminyum ve cam yapılarıdaki şok dalgası oluşumlarını incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre katmanlı bir kompozit yapıdaki şok dalgalarının

hızı, yapıyı oluşturan malzemelerdeki hızın arasında veya onların altındadır. Ayrıca arayüzdeki empedans uyumsuzluğu da şok dalgaların dağılıp sönümlenmesinde etkilidir. Empedans uyumsuzluğu arttıkça dağılma daha fazla olacaktır.



Şekil 4.14 Roeder ve Sun tarafından yapılan çalışma sonucu farklı katman sayısına sahip seramik/metal kompozit zırhların balistik performansları. HT: Yüksek sıcaklıkta birleştirilmiş, RT: Oda sıcaklığında birleştirilmiş (Roeder ve Sun, 2001)

Kompozit yapı içindeki polimer tabakalarının çatlak oluşumunu durdurucu etkisi de, çalışmayı gerçekleştirenler tarafından katmanlı seramik/polimer kompozit yapının direncinin yüksek olmasının bir başka sebebi olarak gösterilmiştir.

Altı katmanlı ince seramik levhali yapının daha az direnç göstermesinin sebebi olarak ise, levhaların kalınlığının az olmasından dolayı daha fazla eğilme hasarının oluşması gösterilmiştir. Sonuçta darbe yüküne maruz kalan, gevrek malzemelerden yapılan levhalarda oluşan hasar mekanizmaları levha kalınlığı ile yakından ilgilidir.

4.2.3 Seramik Kompozit Zırhlarda Destek Levhasının Balistik Davranışa Etkisi

Seramik kompozit zırhlarda seramik levhanın görevi mermiyi kırıp erozyona uğratmak ve bir kırılma konisi oluşturup destek plakasıyla olan temas yüzeyini artırmaktır (Sherman, 2000). Böylece destek levhasında oluşan bölgesel basınç azalmaktadır. Destek levhasının görevi, seramik/destek arayüzeyinde oluşan çekme geriliminden meydana gelen tahribatı geciktirmek,

böylece seramiğin mermiyi daha fazla erozyona uğratmasını sağlamaktır (Lee ve Yoo, 2001). Destek levhasının bir başka rolü de seramik parçalarının kinetik enerjisini söntümlemektir.

Seramik kompozit zırhlarda kullanılan destek levhaları metalik veya polimer esaslı kompozit malzemeden imal edilir (Sherman, 2000). Metalik malzeme olarak alüminyum, düşük yoğunluğu ve düşük maliyeti sebebiyle sıkça kullanılır. Seramik kompozit zırhların ana hedefi zırhın ağırlığını azaltmak olduğu için çelik tercih edilmemektedir. Lif takviyeli plastik kompozitler düşük yoğunlukları ve yüksek dayanımları sebebiyle yoğun olarak kullanılmaktadırlar. Buna karşılık bu malzemelerin darbe yönündeki modülleri düşüktür, bu yüzden seramikte oluşan deformasyonu azaltma kabiliyetleri diğer malzemelere göre daha azdır.

Rosenberg ve Yeshurun (Gooch vd., 1992), seramik kompozit zırhlarda kullanılan destek levhalarının balistik etkinliğinin tanımlanması amacıyla denklem 4.2'yi ortaya atmışlardır:

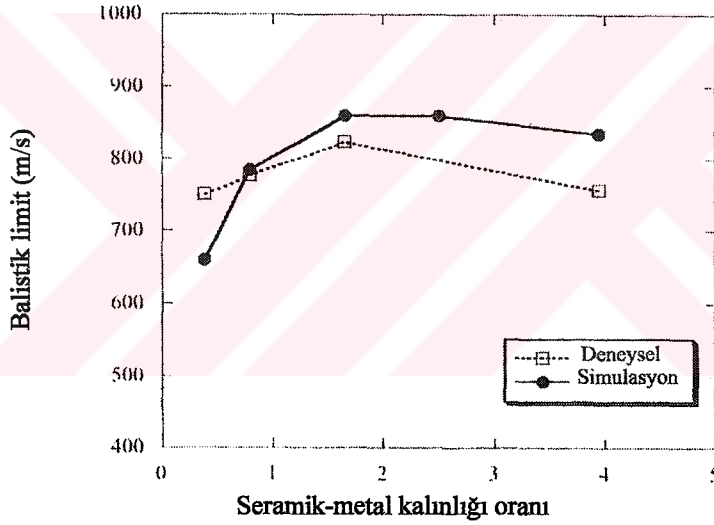
$$\eta = \frac{\rho_B \Delta h_B}{\rho_C h_C} \quad (4.2)$$

Burada ρ_B : destek levhasının yoğunluğunu, ρ_C : seramik malzemenin yoğunluğunu, h_C seramik levha kalınlığını, Δh_B : seramik levha konulması sonucu destek levhasında oluşan penetrasyon derinliğindeki azalmayı belirtmektedir.

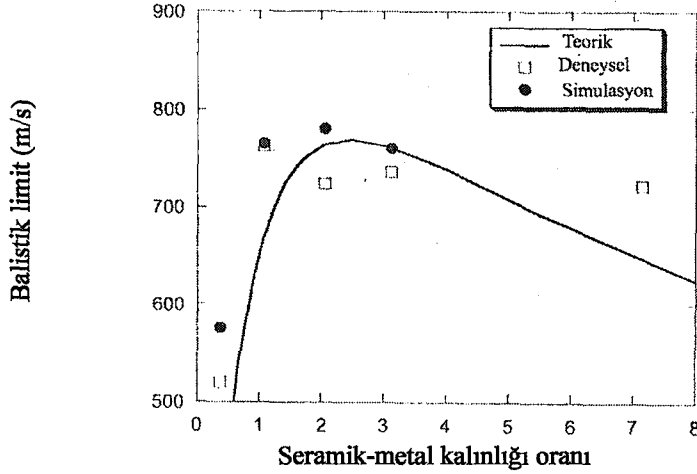
Sherman (2000), destek levhasının seramik yüzü kompozit zırhın balistik davranışına olan etkisini incelemek amacıyla alumina seramikleriyle deneyler yapmıştır. Alumina levhalarına destek olarak 4340 alaşımı çelik, 7075-T6 alaşımı alüminyum ve Spectra kompoziti olmak üzere üç farklı malzemeden oluşan levhalar kullanmıştır. Çelik levha kullanıldığı zaman seramikte oluşan hasarın az, alüminyum levha için orta seviyede, Spectra kompoziti için ise seramikte yoğun hasarın olduğu gözlemlenmiştir. Arka destek levhası malzemesi için, seramik yüzeyde oluşan hasarı belirleyen en önemli parametrelerin eğilme rijitliği ve akustik empedans uyumsuzluğu olduğu sonucuna varılmıştır. Akustik empedans uyumsuzluğu çelik/seramik için az, alüminyum/seramik için orta ve Spectra/seramik için fazladır. Empedans uyumsuzluğu, merminin zırha çarpmasıyla oluşan gerilim dalgalarının seramik/destek levhası arayüzeyinden ne kadar yansıtacağını belirler. Uyuşmazlık ne kadar

fazla ise gerilim dalgalarının arayüzeyden yansımaları da o kadar fazla olacak, dolayısıyla seramikte oluşan hasar da doğru orantılı olarak artacaktır.

Seramik yüzeyli kompozit zırhlarda, seramik yüzey/destek levhası kalınlığı oranının da zırhın balistik performansını etkilediği görülmüştür. Lee ve Yoo (2001), seramik/destek levhalarının kalınlığının balistik dirence olan etkisini incelemek için deneysel ve nümerik çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada, farklı kalınlık oranlarına sahip fakat toplam kalınlıkları aynı olan alumina/5083 alüminyum kompozitleri üzerine 7.62 mm zırh delici mermiler ile atışlar yapılmıştır. Sonuçta alumina/alüminyum levha kalınlığı oranının yaklaşık 2.5 olması durumunda optimum performansın elde edildiğini görmüşlerdir. Bu konuda benzer bir çalışma yapan Hetherington da yaklaşık olarak aynı sonuçlara ulaşmıştır. Şekil 4.16'da bu çalışmadan çıkan sonuçlar görülmektedir.



Şekil 4.15 Lee ve Yoo'nun çalışması sonucu aynı alansal yoğunluğa sahip olan farklı seramik/metal zırh konfigürasyonlarında, kalınlık oranının balistik performansa etkisi (Lee ve Yoo, 2001)



Şekil 4.16 Hetherington'un yaptığı deneyler sonucu, aynı alansal yoğunluk için farklı alumina/aluminyum kalınlık değerlerine sahip zırh konfigürasyonları için 7.62 mm zırh delici mermiye karşı görülen balistik limit (Lee ve Yoo, 2001)

4.3 Polimerik Esaslı Malzemelerin Balistik Davranışı

Yüksek dayanım-ağırlık oranlarından ve esnekliklerinden dolayı, balistik koruma alanında kumaş zırhın kullanımı rijit metal zırhlara göre giderek yaygınlaşmaktadır. Bu tür zırh sistemlerinin tasarımı ve geliştirilmesi genellikle deneysel yaklaşımlarla gerçekleştirilmektedir (Shim vd., 2001). Çoğunlukla atış testleri uygulanarak farklı malzemelerin balistik performansları arasında karşılaştırma yapılmaktadır. Optimum balistik koruma seviyesinin sağlanması için, balistik koruma amacıyla kullanılan aramid ve polietilen esaslı malzemelerin dinamik koşullardaki mekanik davranışlarının anlaşılması gerekmektedir. Genel olarak, polimerik malzemelerin özelliklerinin gerinim hızına olan duyarlılığı metallere göre çok daha fazladır.

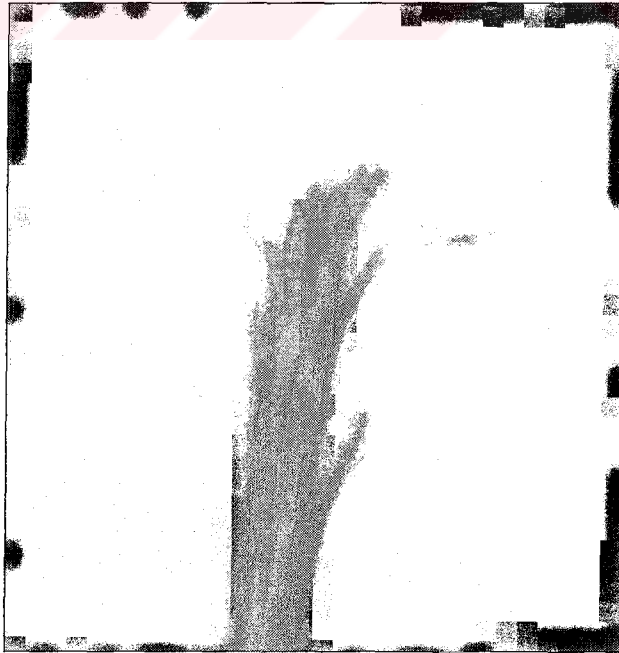
Lif takviyeli ve polimerik matrise sahip kompozit malzemelerin çarpma mekaniği daha çok düşük hızlar için incelenmiştir (Navarro, 1998). Shivakumar ve arkadaşları, mermiyi durdurmak için gereken kuvveti hesaplayan basitleştirilmiş modeller geliştirmişlerdir. Greszczuk'a göre bir kompozit panelin darbe dayanımı matrisin dayanımıyla doğru, matrisin ve lifin elastiklik modülü ile ters orantılıdır. Düşük hızlarda görülen ana hasar mekanizmasının matris çatlaması ve katman ayrılması olduğu görülmüştür.

Kompozit bir laminenin üzerine yüksek hızlarda çarpan mermilerin balistik limitini(V_{50}) belirlemek için bazı deneysel formüller de çıkartılmıştır. Gorp ve arkadaşları polietilen lif/polietilen matris lamineleri için denklem 4.3'ü ortaya atmışlardır:

$$V_{50} = 232 \rho_a^{0.5} m_p^{-1/6} \quad (4.3)$$

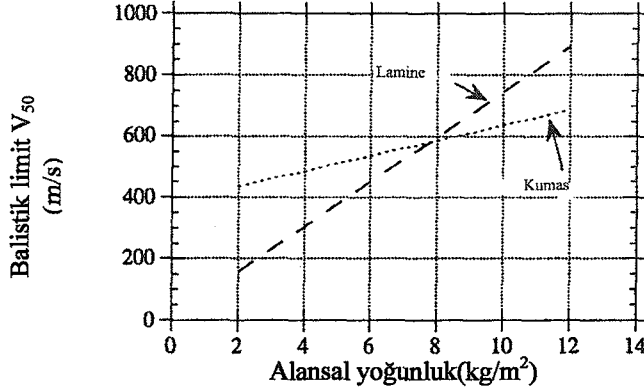
Bu denklemde V_{50} : balistik limiti, ρ_a : laminenin alansal yoğunluğunu(kg/m^2), m_p : mermi ağırlığını(g) ifade etmektedir.

Kompozit bir laminenin yüksek hızlı çarpmalara karşı gösterdiği direnç birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörlere örnek olarak elastiklik modülü, vizkoelastik ve kırılma uzaması gibi lif özellikleri, tek yönlü lifler, örülmüş kumaş gibi lifin kompozit içindeki kullanım şekli, matris reçinesi özellikleri ve kompozitin alansal yoğunluğu verilebilir. Kompozitlerin statik özellikleri iyi bilinmesine rağmen, yüksek gerinim hızları altındaki davranışları günümüzde hala araştırma konusudur. Bu amaçla Charpy sarkaç deneyi ve çekiç düşürme deneyleri kullanılmış ise de, bu testlerde elde edilen sonuçların malzemelerin yüksek gerinim hızları altındaki dinamik davranışlarını tam olarak yansıtmadığı görülmüştür.



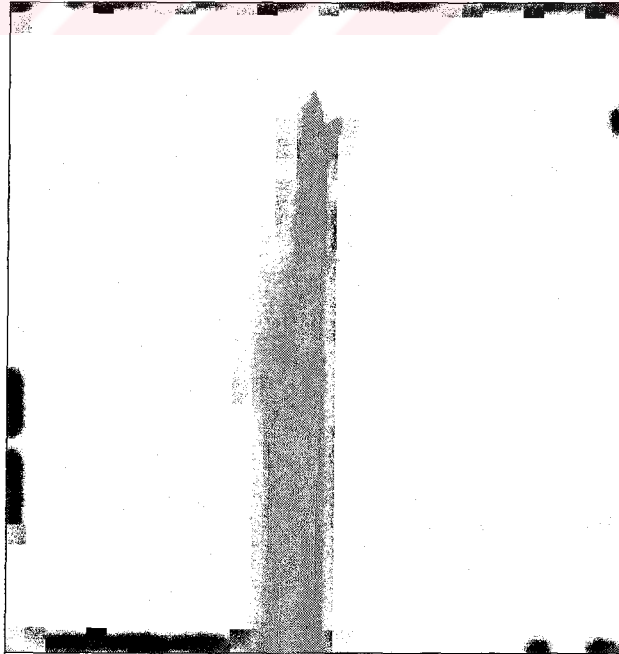
Şekil 4.17 Statik yükleme sonucu tahrip olmuş bir lifin görüntüsü (Shim vd., 2001)

Kumaş yığınları ile aynı kumaş miktarına sahip laminelerin balistik etkinlikleri karşılaştırılmış ve yumuşak çekirdekli mermiler için düşük hızlarda kumaş yığınlarının daha etkili olduğu görülmüştür. Buna karşın zırh delici sert çekirdeğe sahip mermiler için arada fazla bir fark görülmemiştir. Alansal yoğunluğa bağlı olarak kumaş ve kompozit zırhın balistik limitlerinin karşılaştırılması şekil 4.18’de görülmektedir.



Şekil 4.18 Alansal yoğunluğa bağlı olarak kompozit lamineler ile kumaş yığınlarının balistik limitlerinin karşılaştırılması (Navarro, 1998)

Şekil 4.18’de görüldüğü gibi kumaş yığınları laminelere göre düşük hızlarda daha iyi performans göstermesine karşın, yüksek hızlar için bu olay tam tersidir. Bunun sebebi laminelerdeki enerji dağılım mekanizmasının düşük ve yüksek hızlarda farklılık göstermesidir.



Şekil 4.19 Dinamik yükleme sonucu tahrip olmuş bir lifin görüntüsü (Shim vd., 2001)

Aramid lifleri için uygulanan dinamik test teknikleri ve prosedürleri hakkında literatürde çok fazla bilgi bulunmamaktadır (Shim vd. 2001). Kinari ve arkadaşları, Kevlar 29 ipliklerini yüksek gerinim hızlarında dinamik gerilmelere tabi tutmuşlardır. Bu testler sonucunda, gerinim hızıyla beraber kırılma yükünün ve lif modülünün arttığını, buna karşılık kopma uzamasının gerinim hızıyla ters orantılı olduğu görülmüştür.

Shim ve arkadaşları, bir Hopkinson basınç çubuğu kullanarak Twaron liflerinden yapılmış kumaşların dinamik davranışını incelemiştir. Twaron lifleri de Kevlar lifleri gibi aramid sınıfından olup benzer özelliklere sahiptir. Twaron liflerinin yapısı anizotropik ve heterojendir. Polimer zincirlerini oluşturan atomlar birbirlerine kovalent bağlarla bağlıdır. Bunun dışında Van der Waals bağları ve hidrojen bağları da mevcuttur. Van der Waals kuvvetleri, birbirlerine paralel olan polimer zincirlerindeki moleküller arası mesafeye bağlıdır. Bu kuvvetler tek başlarına önemsiz olmakla birlikte, komple makromoleküler yapı üzerindeki toplam etkileri oldukça fazladır. Hidrojen bağları ise bir polimer zincirindeki monomer birim, bir başka zincirdeki monomer birim ile bağ oluşturduğu zaman oluşan bağlardır. Genellikle kovalent bağlar “ana bağlar”, hidrojen ve Van der Waals bağları ise “ikincil bağlar” olarak adlandırılır.

Kinetik kırılma teorisine göre, bir bağ aktivasyon enerjisinin üzerinde uyarıldığı zaman kırılır. Belli bir deformasyon mekanizması için gereken aktivasyon enerjisine ulaşıldığı zaman mekanizma tetiklenir. Buna göre bir malzeme, hangi deformasyon türü için gereken enerji veya gerilim en az ise o kırılma şekline uğrayacaktır. Bazı durumlarda birden fazla deformasyon şekli görülebilir. Kopma uzaması da bu deformasyon şekline bağlıdır. Polimer esaslı malzemelerde, camsı geçiş sıcaklığına bağlı olarak farklı sıcaklık aralıklarında farklı deformasyon türleri gözlenir. Polimerik malzemelerin çoğu için; camsı geçiş sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda gevrek kırılma için gereken aktivasyon enerjisi, makaslama deformasyonu ve moleküller arası kayma için gereken enerjiden daha azdır. Bu yüzden polimerik malzemelerin büyük çoğunluğu camsı geçiş sıcaklıklarının altındaki sıcaklıklarda sadece gevrek kırılmaya uğrar. Camsı geçiş sıcaklığının üzerindeki değerlerde ise bu olay tersine döner. Birçok polimerik malzeme olduğu gibi aramid liflerinin camsı geçiş sıcaklığı oda sıcaklığının altındadır. Bu yüzden polimerik malzemelerin oda sıcaklığında makaslama türü deformasyona uğramaları beklenir. Fakat yüksek gerinim hızlarında bu beklentinin doğru olmadığı ortaya çıkmıştır.

Termonia ve Smith, aramid liflerinin dayanımının ve kopma uzamasının gerinim hızına bağlı olduklarını göstermişlerdir. Yaptıkları çalışmada görülmüştür ki, çok düşük gerinim hızlarında ($\epsilon \approx 0.01 \text{ s}^{-1}$) plastik deformasyon ikincil bağların kırılması şeklinde oluşur. Daha yüksek gerinim hızlarında ise ($\epsilon \approx 1 \text{ s}^{-1}$) hem ikincil hem de ana bağların kırıldığı görülmüştür. Schaeffgen adlı bir başka araştırmacının, Kevlar lifleri üzerinde yaptığı çalışmalar sonucu elde ettiği bulgular da bu sonucu doğrular niteliktedir.

Yüksek gerinim hızlarında, bir bağın belli bir gerilim seviyesinde kalma süresi düşük gerinim hızlarına göre daha azdır. Oda sıcaklığında makaslama deformasyonu için gereken enerji gevrek kırılma için gereken enerjiden daha az olmasına rağmen, plastik deformasyon ve moleküller arası kayma için daha az zaman mevcuttur. Bu yüzden yüksek gerinim hızlarında gevrek kırılma olayı görülme ihtimali daha fazladır.

Balistik koruma amacıyla kullanılan lif malzemeleri için enerji sönmleme yeteneği çok önemlidir. Zırhın sönmlediği enerji, merminin zırhı delmek için harcadığı enerjiye eşittir (Tan vd., 2003). Merminin zırhı delip geçtiği durumlarda sönmlenen enerji miktarı, merminin çarpma enerjisinden zırhı delip geçtiği an sahip olduğu enerjiyi çıkartılarak bulunur. Balistik limitin altındaki çarpmalar için ise merminin çarpma enerjisi doğrudan zırhın sönmlediği enerjiye eşittir. Balistik limitin üzerindeki hızlar için sönmlenen enerji 4.4 bağıntısı ile ifade edilir:

$$E = \frac{1}{2} m (V_i^2 - V_r^2) \quad (4.4)$$

Balistik limitin altındaki hızlar için ise 4.5 eşitliği kullanılır

$$E = \frac{1}{2} m V_i^2 \quad (4.5)$$

Bu ifadelerde E : zırh tarafından sönmlenen enerji, m : merminin kütlesi, V_i : merminin çarpma hızı ve V_r : merminin zırhı terk ettiği andaki hızıdır.

Kumaş zırhlar için emilen enerji iki şekilde dönüşür: ipliklerin uzaması şeklinde görülen gerinim enerjisi ile kumaşın enine hareketi ve ipliklerin merminin çarptığı noktaya doğru olan iç hareketi olmak üzere kinetik enerjidir. Ayrıca enerjinin bir bölümü de sürtünmeden dolayı oluşan kayıplara gider.

Vinson ve Zukas, merminin kumaş zırha çarpması sonucu çarpma noktasındaki ipliklerden dışarı yöne doğru gerilim dalgalarının oluştuğunu açıklamışlardır. Bu gerilim dalgalarının hızı 4.6 denklemi şeklinde verilmektedir:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4.6)$$

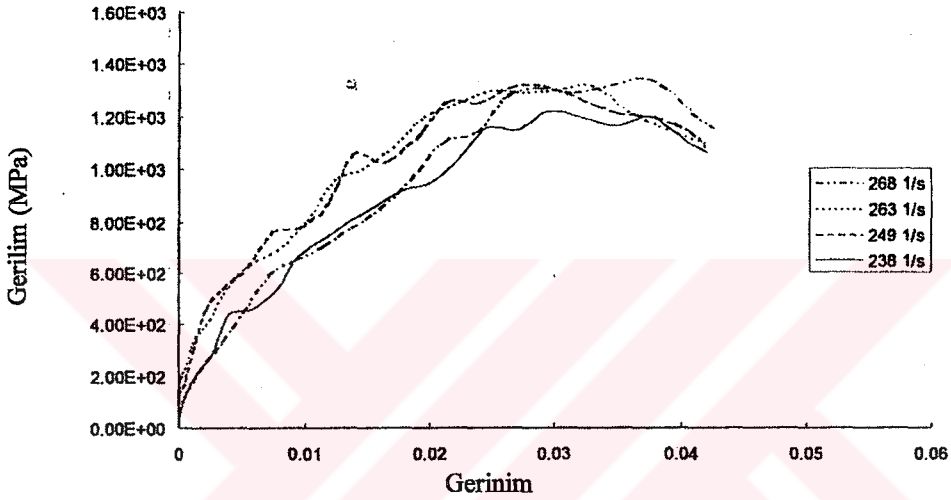
Bu ifadeye c : boyuna gerilim dalga hızını, E : dinamik elastiklik modülünü ve ρ : iplik yoğunluğunu belirtmektedir.

Gerilim dalgaları bir iplik boyunca ilerlerken, o ipliği dik olarak kesen diğer ipliklerde ilave gerilim dalgaları oluşturur. Çarpma sırasında oluşan gerinim enerjisi karmaşıktır. Aramid lifleri gibi gerinim hızına bağlı olarak değişen mekanik özelliklere sahip olan malzemelerde bu olay daha da karmaşık hale gelir.

Kumaş zırhın kinetik enerjisi olarak sönmölen enerji iki parametreye bağlıdır: çarpma sırasında eğilen kumaş miktarı ve bu eğilmenin hızı. Çarpma noktasından dışa doğru gidildikçe, çekme kuvvetleri kumaşı çarpma noktasına doğru çektiğinden kumaş eğilir.

Kumaş zırh için bir başka enerji sönmöleme biçimi de sürtünme kuvvetlerini yenmek için harcanan enerjidir. Kumaşın dışa doğru eğilmesi esnasında birbirlerine dik olan ipliklerin bağıl hareketleri sonucu, ipliklerin birbirleri üzerinden geçtiği bölgelerde sürtünme oluşur. Mermi kumaşı delip geçerken kumaşın yaptığı sıkıştırma etkisi sebebiyle de bir miktar sürtünme sonucu enerji kaybı olur.

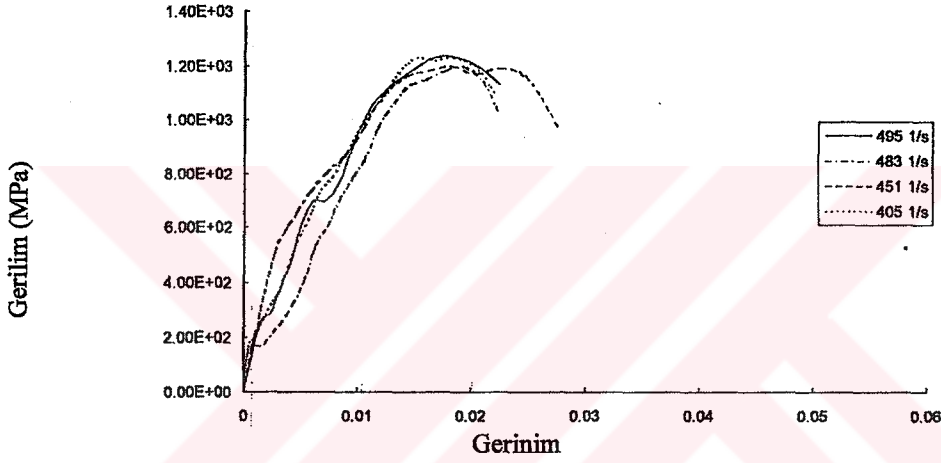
Zırhın sönmülediği enerji, gerilim-gerinim eğrisinin altında kalan toplam alan ile belirlenir (Shim vd., 2001). Shim ve arkadaşlarının, Twaron kumaşlarının Hopkinson çubuğu ile dinamik davranışlarının incelenmesi sonucu elde ettikleri gerinim-gerilim grafikleri Şekil 4.20 ve 4.21'de görülmektedir. Bu grafiklerde görüldüğü gibi yüksek gerinim hızlarında ($\epsilon > 400 \text{ s}^{-1}$) gerilim-gerinim eğrisi altında kalan alan, düşük hızlı gerilim-gerinim ($\epsilon < 400 \text{ s}^{-1}$) eğrisi altında kalan alana göre oldukça azdır. Düşük gerinim hızlarında, polimer zincirleri arasındaki moleküller arası kayma fazladır. Bu olayda plastik akış ve plastik deformasyon söz konusu olduğundan tahribat için gereken enerji daha fazladır.



Şekil 4.20 Twaron kumaşları için “düşük” gerinim hızlarında gerilim-gerinim eğrileri ($\epsilon < 410 \text{ s}^{-1}$) (Shim vd., 2001)

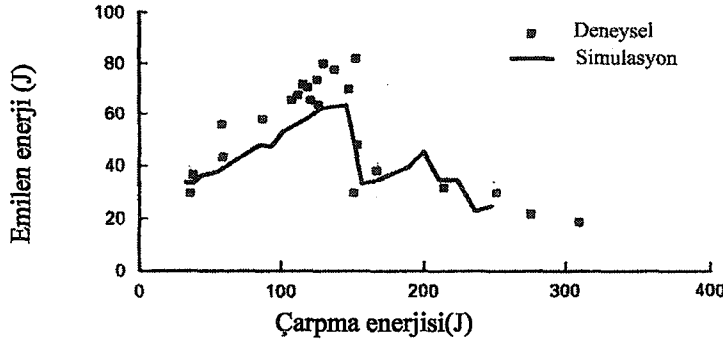
Bahsedilen olay, aynı yazarın Twaron kumaşları üzerinde yaptığı bir başka çalışmadan çıkan sonuçların incelenmesiyle daha iyi anlaşılabilir. Shim ve arkadaşları Twaron kumaşları üzerinde nümerik ve deneysel olarak atış testleri yapmışlardır. Yaptıkları deneylerden sonra kumaş zırh tarafından emilen enerjinin, belli bir aralık için (30-150 J) merminin çarpma enerjisi ile doğru orantılı olarak arttığı ortaya çıkmıştır. Bu deney sonucu elde edilen grafik Şekil 4.22'de görülmektedir. Bu grafikten de anlaşılacağı gibi, belli bir çarpma hızının üzerine çıkıldığı zaman zırhın sönmülediği enerji tekrar yaklaşık 30 J seviyesine gelmektedir. Bu kritik mermi hızının ötesinde, malzemede oluşan tahribatın ağırlıklı olarak gevrek kırılma şeklinde olduğu ve plastik deformasyon oluşumunun fazla olmadığı görülmüştür. Bu kritik değerden sonra çarpma enerjisi artsa da, malzemenin tahribatında baskın olan gevrek kırılma değişmeyeceğinden sönmülenen enerji miktarında bir artış olmamaktadır.

Kumaş türü malzemelerin balistik performanslarını belirlemeye çalışırken sadece iplik özelliklerine bakıp da tahminde bulunmak yanıltıcı olabilir. Örneğin kumaş-mermi etkileşimini belirleyen tek faktör çekme dayanımı değildir. Cam lifleri ve grafit lifleri de aramid lifleri kadar yüksek dayanıma sahip olabilir fakat kopma uzamaları yani enerji sönmüleme kabiliyetleri daha düşük olduklarından, balistik açıdan aramid liflerine göre daha zayıftır. Benzer şekilde S-camı lifleri daha toktur. Fakat çekme modülü çok az olduğu için balistik açıdan aramidler kadar etkili değildir. S-camının kimyasal bileşimi Çizelge 4.1’de görülmektedir. Daha önce bahsedilen Vinson ve Zukas’ın bulunduğu denklem 4.6 göz önünde bulundurulduğunda, düşük çekme modülü aynı zamanda gerilim dalgalarının yayılma hızının da düşük olması anlamına gelmektedir.



Şekil 4.21 Twaron kumaşları için “yüksek” gerinim hızlarında gerilim-gerinim eğrileri ($\epsilon > 410 \text{ s}^{-1}$) (Shim vd., 2001)

Lifin çekme modülü arttıkça çarpma sonucu oluşan hasar kumaş içinde daha hızlı yayılacaktır. Bunun sonucunda belli bir zaman aralığında daha fazla alan etkilenecektir.



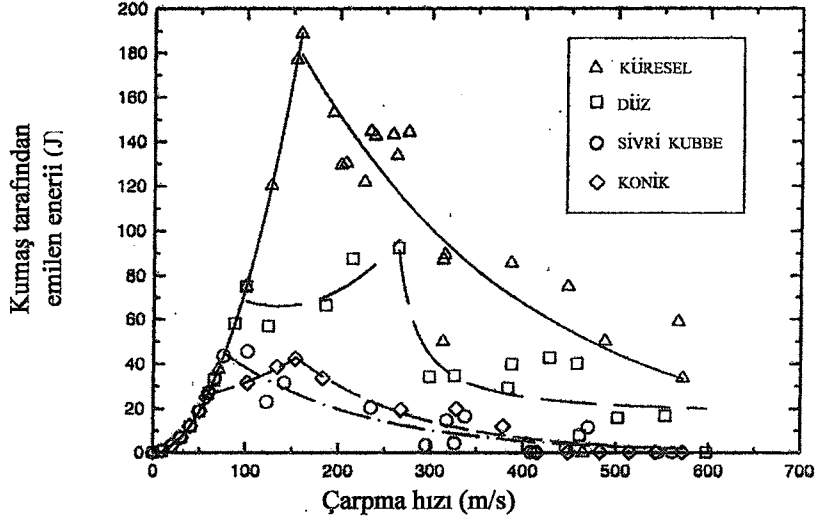
Şekil 4.22 Twaron kumaşları üzerinde yapılan deneyler sonucu çarpma enerjisine göre zırhın emdiği enerji miktarı (Shim vd., 2001)

Kumaş zırhın bir mermiyi durdurma kabliyeti, oluşan enerjiyi yayma yeteneği ile ilgilidir. Bir mermi kumaş zırha isabet ettiği zaman, lifler uzar ve gerilim dalgaları vasıtasıyla uzunlukları boyunca enerjiyi iletirler. Darbe enerjisi diğer liflere aynı zamanda ipliklerin birbirleri üzerinden geçtiği bölgeler vasıtasıyla da iletilir. Bu bölgeler olmaksızın sadece mermiyle direk temas halinde olan iplikler gerilime uğrayıp enerji tüm kumaş boyunca yayılmaz. Görüldüğü gibi örülen kumaş zırhın balistik performansı sadece liflerin dinamik mekanik özellikleriyle ilgili değildir. Örgü şekli, iplik başına düşen lif sayısı, örgü yoğunluğu gibi kumaşın yapılış şekliyle ilgili faktörler de balistik performansı etkiler.

Çizelge 4.1 S-camının kimyasal bileşimi [18]

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	B ₂ O ₃ (%)
60-65	20-25	10	0-1,2

Kumaş zırhların balistik performansı, diğer tüm zırh malzemelerinde olduğu gibi, kullanılan merminin geometrisi ile doğrudan ilgilidir (Tan vd., 2003). Tan ve arkadaşları, tek katmanlı Twaron kumaşları üzerinde farklı geometrilere sahip mermiler ile atış testleri yapmışlar ve farklı mermiler için balistik limit hızları karşılaştırmışlardır. Kullandıkları mermiler küresel uçlu, düz uçlu, sivri kubbe uçlu ve 60° koni açısına sahip konik uçlu olmak üzere dört farklı geometriye sahiptir. Deneyler sonucu mermiler için elde edilen balistik limit hızlar, büyükten küçüğe sıraya konduğu takdirde şu sonuç ortaya çıkmıştır: küresel(159 m/s), düz(100 m/s), sivri kubbe(76 m/s) ve konik uç(58 m/s). Buna göre Twaron kumaş zırhın delinmesi için gereken en düşük hız konik uçlu merminin olup, küresel uçlu mermi en kötü performansı göstermiştir. Şekil 4.23'te bu çalışmada farklı geometriye sahip mermiler için kumaş zırhın enerji sönmüleme grafiği verilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi tüm mermiler için balistik limitin üzerine çıkıldıktan sonra da kumaş zırhın sönmülediği enerji artmış, belli bir limit hızdan sonra ise azalmıştır.



Şekil 4.23 Tan'ın farklı geometriye sahip mermilerle Twaron kumaşı üzerine yaptığı deneyler sonucu ortaya çıkan enerji sönmüleme grafiği (Tan vd., 2003)

Bu çalışmada ilginç olan sonuç düz uçlu merminin kumaş zırhı küresel uçlu mermiye göre daha kolay delmiş olmasıdır. Halbuki sivri uçlu bir merminin kumaş zırhı düz uçluya göre daha kolay deldiği düşüncesi yaygındır.

Sivri kubbe ile konik uca sahip olan mermiler, uç geometrileri sayesinde kumaşın içinden sıyrılıp kumaşı oluşturan ipliklerde daha az kırılmaya sebep olurlar. Bu yüzden de kumaş zırhın sönmülediği enerji, bu geometriye sahip olan mermiler için daha azdır. Düz uçlu merminin kenarları açılı olmasından dolayı iplikler üzerinde kesme etkisi yaptığı görülmüştür. Bu yüzden küresel uçlu mermiye göre daha iyi performansa sahiptirler. Bu tür bir kesme etkisi için harcanan enerji, ipliklerin uzayıp kırılması için gereken enerjiden çok daha azdır. Küresel uçlu mermilerin uç geometrisi kumaşın içinden kolayca sıyrılmasına izin vermez, ayrıca kenarları da kesme etkisi yapacak bir açığa sahip değildir.

Aynı yazar aynı kumaş malzeme(Twaron) ile aynı geometriye sahip mermilerin bu kez çift katlı kumaş üzerindeki performansını araştırmıştır (Tan vd., 2002). Çift katlı kumaşın enerji sönmüleme davranışı ve perforasyon mekanizmalarının tek katlı kumaşa benzer olduğu görülmüştür. Bununla birlikte çift katlı kumaş için, zırhın balistik performansının mermi geometrisine gösterdiği hassasiyetin azaldığı sonucu ortaya çıkmıştır.

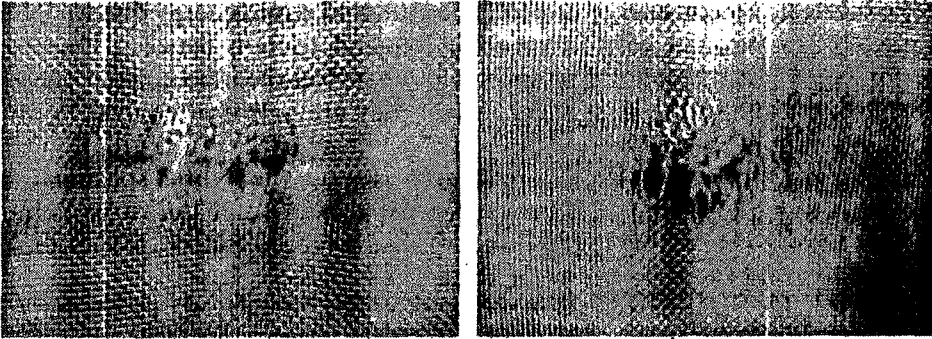
Kumaş zırhın perforasyonu sırasında başlıca dört mekanizmanın etkili olduğu görülmüştür (Tan vd., 2003). Bu mekanizmalar şunlardır:

- İplik yırtılması
- Lifçik oluşumu
- Sürtünme
- Bükülme

İplik yırtılması, kumaşı oluşturan ipliklerin merminin çarpması sonucu gerinime uğrayıp kopmasıdır. Sivri uçlu mermiler için iplik kırılması daha azdır.

Lifçik oluşumu liflerin uzunlukları boyunca kıymıklanma etkisine uğramasıdır. Makromolekülleri birbirlerine bağlayan hidrojen bağlarının kırılması sonucu oluşmaktadır. Sivri uçlu mermiler için bu olay daha yoğun olarak görülmektedir. Özellikle konik uçlu mermilerde koniyi mermi gövdesine bağlayan açılı kenar liflere sürtünmekte ve bunun sonucunda lifçik oluşumu daha belirgin hale gelmektedir. Şekil 4.25'te lifçik oluşumuna bir örnek görülebilir.

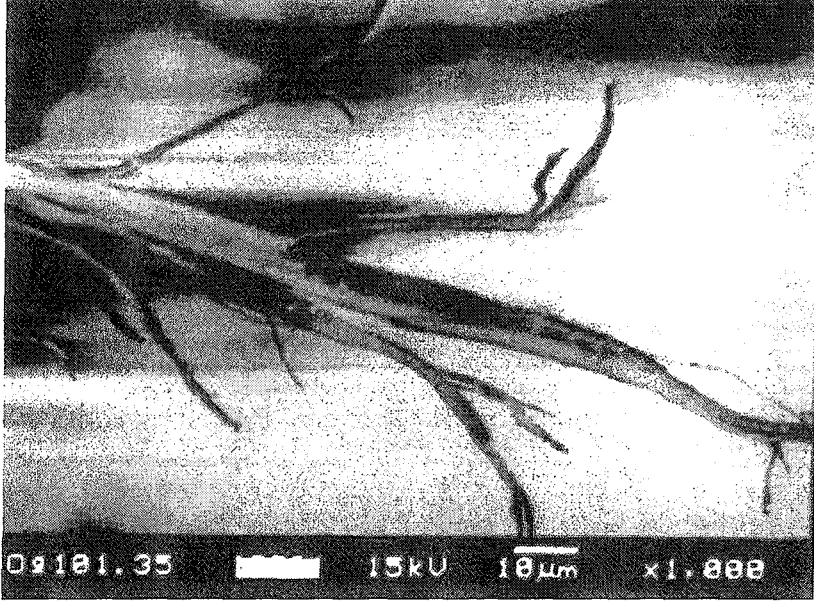
Merminin kumaş zırha çarpması sonucunda iplikler birbirleriyle sürtünmektedir. Sürtünme etkisinin yüksek mermi hızlarında daha az olduğu görülmüştür.



Küresel mermi çarpması için

Düz mermi çarpması için

Şekil 4.24 200 m/s hızla çarpan mermiler için ipliklerin bükülme şekli (Tan vd., 2003)



Şekil 4.25 Bir merminin çarpması sonucu lifçik oluşumuna uğramış bir lifin elektron mikroskobu altındaki görüntüsü (Tan vd., 2003)

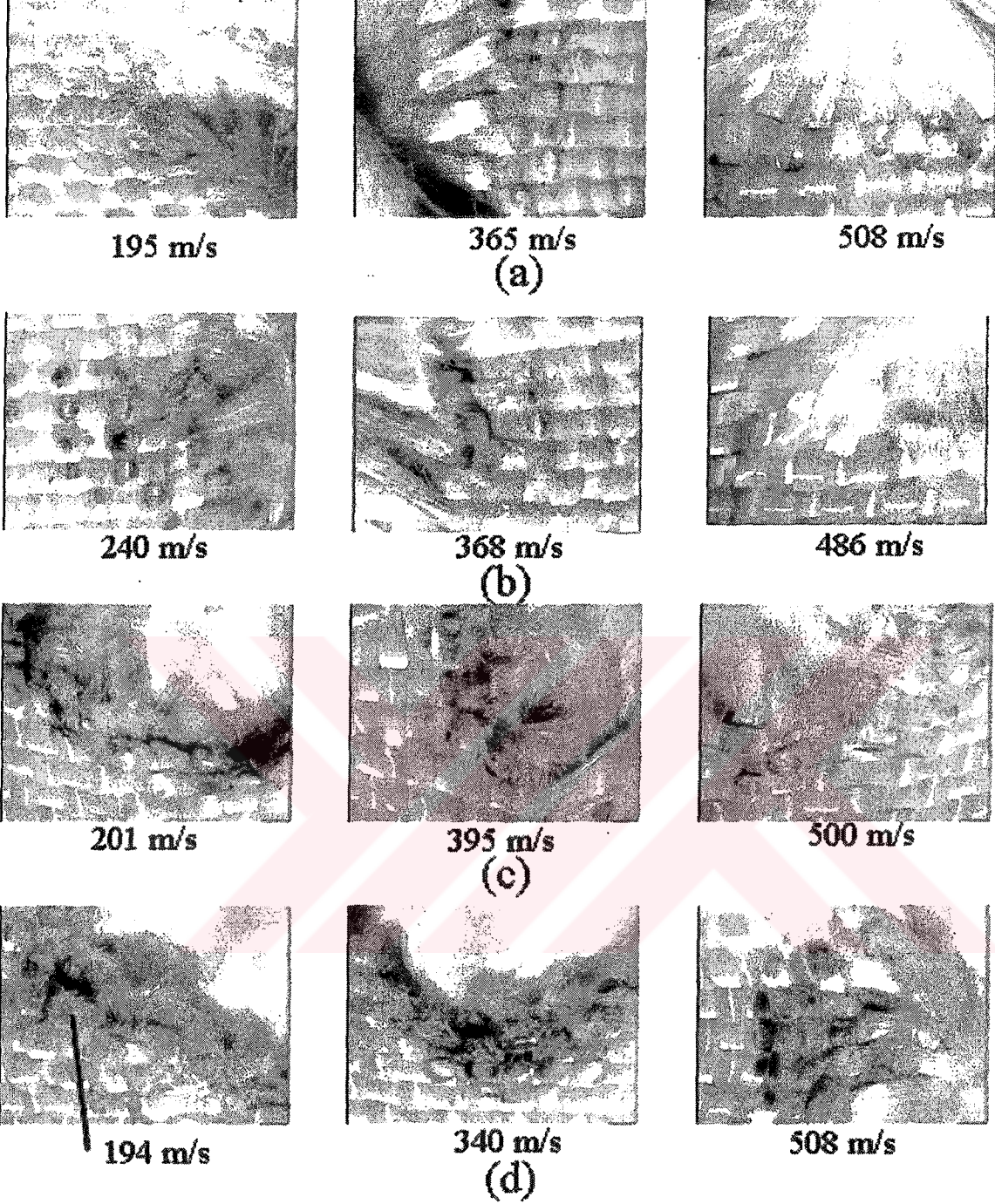
Bükülme ile kastedilen olay, çözgü yönündeki ipliklerin atkı yönündeki ipliklere olan dik konumlarını kaybetmeleridir. Bükülme olayının iki sebebi vardır. Birincisi mermi geçişi sırasında ipliklerin yana doğru itilmesidir. İkincisi ise merminin çarpmasıyla oluşan gerilim dalgalarının etkisiyle gerinmiş olan ipliklerin, birbirleri üzerinden geçtiği bölgelerde yerlerinden kaymasıdır. Bükülme olayı düz uçlu mermilerde yok denecek kadar azdır. Bunun sebebi zırhın delinmesinin daha çok kesme etkisiyle gerçekleşmesidir. Küresel uçlu mermilerde ise bükülme daha fazladır çünkü ipliklerde oluşan gerilme daha fazladır. Sivri uçlu mermiler küresel uçlu mermiler kadar yüksek gerilimlere sebep olmamaktadırlar. Sivri kubbe uçlu mermiler de konik uçlu mermilere göre daha fazla bükülmeye sebep olmaktadır.

Şekil 4.26'da (a) küresel uçlu mermi, (b) düz uçlu mermi, (c) sivri kubbe şeklindeki mermi, (d) konik uçlu mermi için verilen değerlerdir.

4.3.1 Polimerik Matrisin Balistik Davranışa Etkisi

Hsieh ve arkadaşları, polimerik esaslı zırhlarda bağlayıcı reçinenin balistik davranışa olan etkisini incelemek amacıyla, Kevlar ve Spectra kuru kumaşlarıyla kumaş takviyeli kompozit laminelerinin karşılaştırmasını yapmışlardır (Walsh vd., 1998). Her iki malzeme için de kompozitlerin reçinesiz kumaşlara göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Walsh ve

arkadaşları da Spectra liflerini kullanarak matris etkisinin balistik davranışa olan etkisini araştırmışlardır. Spectra 900 liflerinden yapılmış tek katlı reçinesiz kumaş ile tek katlı kumaş takviyeli kompozit laminenin balistik mukayesesi yapılmış ve kompozitin kumaşa göre daha fazla enerji sönmülediği görülmüştür. Reçinesiz kumaşta mermi, bazı ipliklerin arasından sıyrılıp geçmiş ve bu iplikler kırılmaya uğramamıştır. Kompozitte ise, matrisin sıkıştırma etkisinden dolayı gerilim daha uniform bir hal almış ve liflerin tahribatı için daha fazla darbe yükü gerekmiştir. Merminin çarpması ile mermi bölgesindeki örgü sıklığı azalmaktadır. Bunun sonucu olarak iplikler daha hareketli hale gelmekte ve mermi aralarından sıyrılmaktadır. Bu olayın kompozitlerde görülmesi, bağlayıcı matrisin iplikleri sıkıştırmasından dolayı daha zordur. Bu yüzden kompozitte daha fazla iplik kırılması, dolayısıyla daha fazla enerji sönmülemesi görülmüştür. Bu sonuç Şekil 4.18'de gösterilen kumaş-kompozit karşılaştırması ile çelişkili gözükmemektedir. Burada unutulmaması gereken husus, reçinesiz kumaş zırhın örgü sıklığına göre sonucun değişebileceğidir. Daha sıkı örgüye sahip kumaşlar için örgülerin gevşek hale gelip ipliklerin kırılması daha zordur.



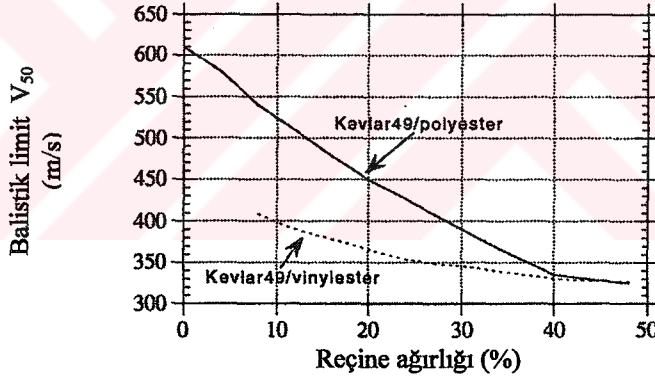
Şekil 4.26 Değişik hız ve mermi geometrileri için sürtünme sonucu oluşan lif kırılmaları (Tan vd., 2003)

Aynı çalışmada farklı matrisler için balistik dayanımın nasıl değiştiği de araştırılmıştır. Spectra 900 kumaşıyla takviye edilen farklı reçine malzemelerine sahip kompozitlerin balistik performansı karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak vinil ester reçineli kompozitlerin poliüretan reçineli kompozitlere göre daha iyi performans gösterdiği ortaya çıkmıştır. Bunun sebebi

olarak da vinil ester reçinenin poliüretana göre daha katı olması gösterilmiştir. Bu sonuç bir önceki paragrafta bahsedilen olayı doğrular niteliktedir.

Xian (1998) da Spectra kompozitlerinde reçine etkisinin enerji sönmülemeye olan etkisini araştırmış ve polietilen reçinenin epoksiye göre daha iyi sonuç verdiğini görmüştür. Buna sebep olarak reçine ve liflerin kimyasal benzerlikleri sebebiyle daha iyi arayüzey bağı oluşturması gösterilmiştir.

Termoset matrisli kompozitler için, laminelerin balistik dayanımlarının matris miktarı azaldıkça arttığı bulunmuştur (Navarro, 1998). Diğer bir deyişle laminenin esnekliği arttıkça balistik etkinliği de artacaktır. Şekil 4.27'de Kevlar/poliester ve Kevlar/vinil ester kompozitleri için reçine oranının balistik dirence olan etkisi görülmektedir. Bu olay, çarpma sonrasında matrisin kırılması sonucu matrisin liflerle beraber enine hareketi ve gerilimi taşımak için bir katkıda bulunmaması şeklinde açıklanmıştır.



Şekil 4.27 Kompozit zırhlar için reçine ağırlığı oranının balistik limit hıza etkisi (Navarro, 1998)

5. BALİSTİK KORUMA MALZEMELERİYLE İLGİLİ BAZI ÖNEMLİ STANDARTLAR

Balistik koruma malzemeleri hakkında birçok ülkenin kendi standartları olmasına rağmen, ABD esaslı askeri standartlar bu konuda en yaygın olarak kullanılan standartlardır. Balistik koruma malzemeleri ile ilgili birçok standart mevcuttur. Bunlardan bir kısmı aşağıda verilmiştir [19].

Mil-a-11356: Zırhlı araçlar için homojen döküm çelik zırh

Mil-a-12560: Zırhlı araçlar ve mühimmat testi için homojen çelik zırh levhası

Mil-a-46099: Haddeme ile birleştirilmiş çift sertlikli çelik zırh levhası

Mil-a-46100: Yüksek sertlikli çelik zırh levhası

Mil-std-1185: Yüksek sertlikli zırhın kaynağı

Mil-dtl-46077: Kaynak edilebilir titanyum alaşımı zırh levhası

Mil-dtl-46027: 5083 ve 5456 alaşımı kaynak edilebilir alüminyum zırh

Mil-dtl-45225: Dövülmüş alüminyum alaşımı zırh

Mil-dtl-46118: 2219 alaşımı haddelenmiş levha alüminyum zırh

Mil-std-1946: Alüminyum alaşımı zırhın kaynağı

Mil-p-64151: Kompozit zırhlarda kullanılan silisyum karbür seramikler

Mil-p-64152: Kompozit zırhlarda kullanılan titanyum diborür seramikler

Mil-std-376: Seramik levhaların yüksek yoğunluğa sahip mermilere karşı balistik performanslarının derecelendirilmesi

Mil-p-64153: Kompozit zırhlarda kullanılan bor karbür seramikler

Mil-p-46198: Kompozit zırhlarda kullanılan alüminyum oksit seramikler

Mil-dtl-62474: Aramid kumaş takviyeli plastik lamine

Mil-b-29605: Hafif silahlara karşı yumuşak vücut zırhı

Mil-prf-46103: Hafif kompozit zırh

Mil-std-662: Balistik zırh için V_{50} testi

Mil-c-44050: Balistik aramid giysi

TS 5047: Balistik zırh çeliklerine uygulanan kaynak usulleri

TS 12596: Homojen döküm zırh elięi

TS 12632: Yüksek sertlikli zırh çeliği plakası

TS 11164: Balistik koruyucu yelek



6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışmamızda balistik malzemeler sınıfında yer alan aramid lifli plakaların dayanımına ilişkin deneyler yapılmıştır. Mil-std-662'ye göre, balistik koruma amacıyla kullanılan malzemelerin, şarapnel parçalarına karşı balistik dayanımın belirlenebilmesi amacıyla kullanılan V_{50} testi, parça tesiri etkisi yaratan 1.1 gramlık metal çekirdeklerle yapılmalıdır (Candan ve Akdemir, 2003). Bu çekirdekler ile belli bir hızla, balistik dayanımı ölçülmek istenen hedefe atış yapılır. Hedefin arkasına cam macunu ile dolu bir kap konur. Yapılan atışlar sonucu hedefin arkasındaki cam macununda oluşan çöküntü miktarları ölçülür ve ortalama değerler alınır. Bu çöküntü değerleri, hedef için önceden belirlenen değerler ile karşılaştırılır ve hedefin istenen balistik dayanıma sahip olup olmadığı bulunur. Gerçekleştirilmesi oldukça zor olan bu deneyler için laboratuvar ortamı gereklidir. Bu deneyin gerçekleştirilmesinin amacı düşük ağırlık ve yüksek hıza sahip bir parçacık yerine, daha ağır bir kütle kullanılarak düşük hızlı çarpma ile NIJ(National Institute of Justice) 0101.04 standartlarına uygun sonuçların ortaya çıkıp çıkmayacağıdır.

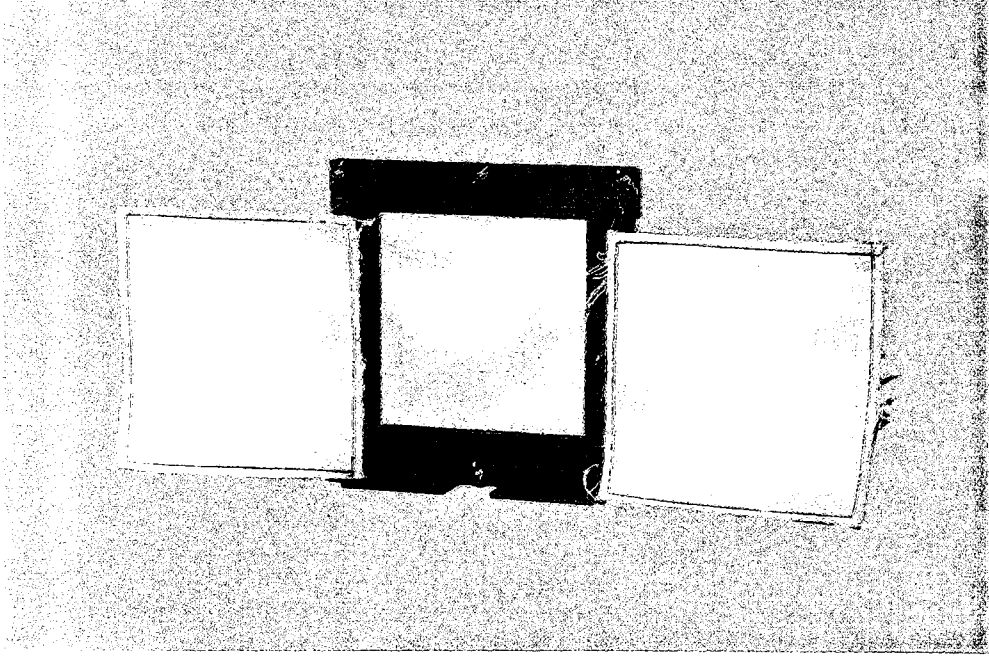
Dünyada en çok kullanılan balistik performans standardı olan NIJ 0101.04'de balistik yelekler için yapılan testler sonucu maksimum 44 mm çöküntü değeri öngörülür [20]. Belli bir tehdit için bu değer altında çöküntü miktarına sahip sistemler, o tehdit seviyesi için yeterli kabul edilir.

6.1 Deney Malzemeleri

Deney malzemesi olarak 250X250 mm.lik 8, 10 ve 12 katmanlı aramid lifli plakalar kullanılmıştır. Kullanılan aramid malzeme Du-Pont firmasının ticari bir ürünü olan Kevlar 310 F olup malzemenin teknik özellikleri çizelge 6.1'de sunulmuştur.

Çizelge 6.1 Deneysel çalışmada kullanılan plakalarının teknik özellikleri

Malzeme	Aramid
Ticari adı	Kevlar 310 F
Ağırlık (g/m^2)	120 ± 5
Çekme dayanımı (MPa)	3600
Çekme modülü (MPa)	130 ± 5
Kopma uzaması (%)	2.8
Çözgü sayısı (E/10 cm)	138 ± 2
Atkı sayısı (E/10 cm)	140 ± 2
İplik sayısı (dtex)	440



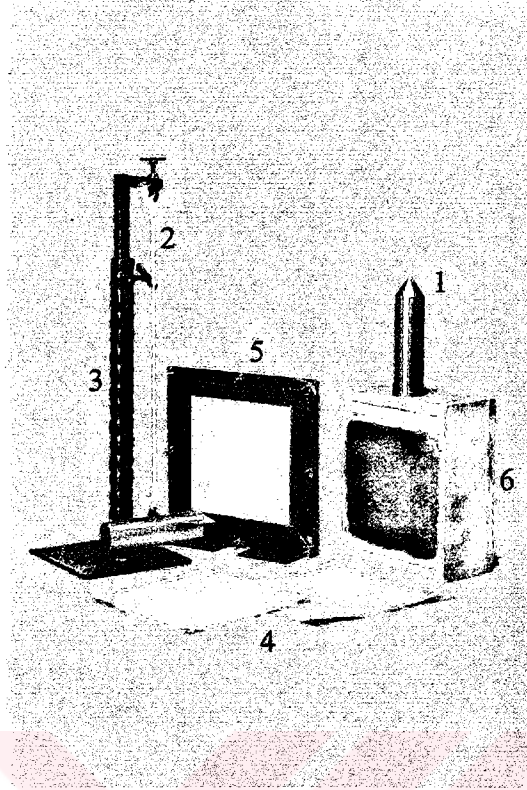
Şekil 6.1 Deneyde kullanılan plakalar

6.2 Deney Teçhizatı

Deneysel çalışmada kullanılan teçhizatlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- 1 Biri sivri uçlu, diğeri de küt uçlu iki adet sarkaç
- 2 Sarkaçları bağlamak amacıyla kullanılan bir ip
- 3 Sarkaçların iple bağlandığı demir bir askı
- 4 Farklı katman sayılarına sahip üç adet hedef plakası
- 5 Hedef plakalarının yerleştirildiği demir bir çerçeve
- 6 Çerçevenin arkasına konulan içi cam macunu dolu tahta bir kutu.

Deney teçhizatı Şekil 6.2’de toplu olarak gösterilmiştir. Sarkacın bağlı olduğu ipin uzunluğu, diğeri bir deyişle sarkacın deney plakalarına çarpma yüksekliği istenildiği gibi ayarlanabilmektedir. Demir askı, 200×200×8 mm boyutlarındaki bir altlığa kaynak edilmiştir. Altlığın kaynaklandığı parça 500 mm, diğeri parça da 600 mm yüksekliğe sahiptir.



Şekil 6.2 Deneyde kullanılan teçhizatın toplu görüntüsü

Çerçeve de iki parçadan oluşan bir sistemdir. 300×300 mm dış çevreye ve 200×200 mm iç çevreye sahip, ortası boş 5 mm kalınlığındaki iki adet demir parçaya sekiz adet vida deliği açılmıştır. Parçalardan birine bu vidalar kaynatılmak suretiyle sabitlenmiştir. Bu parçaya aynı zamanda çerçeveyi dengelemek amacıyla iki adet simetrik altlık kaynatılmıştır. Hedef plaka, vidaların ve altlıkların bulunduğu çerçeveye yerleştirildikten sonra diğer çerçeve de vidalara geçirilmiş, böylece hedef plaka iki çerçeve arasına konmuştur. Her bir vidaya yerleştirilen kelebeklerle çerçevelerin sıkıştırılması sağlanmıştır.

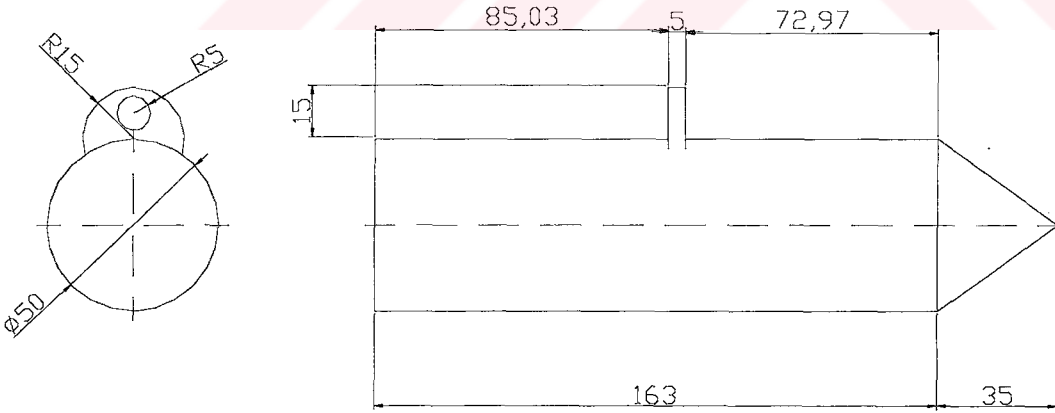
Deneye başlamadan önce yapılan prototip deney cihazını test etmek amacıyla, çerçeveler içine deney plakalarından biri sıkıştırılmış, düz uçlu sarkaç ile 90° açılımlı salınımlar yapılmış ve birkaç vuruştan sonra hedef plakasının çerçeveden çıktığı gözlemlenmiştir. Deney plakaları çok ince olduğu için salt kelebek-vida sistemiyle yeterli sıkıştırmanın yapılamadığı anlaşılmıştır. Bu sorunu çözmek amacıyla deney plakası ile çerçevelerin arasına, ilave sıkıştırma sağlaması için ince demir çubuklar kullanılmıştır. Bu amaçla 4 adet $180 \times 40 \times 2$ mm ve 4 adet $260 \times 40 \times 2$ mm boyutlarında toplam sekiz adet demir çubuk yaptırılmıştır. Çubukların dört tanesi deney plakası ile ön çerçeve, kalan dört tane de deney plakası ile arka

çerçeve arasına yerleştirilmiştir. Yapılan test vuruşları sonucunda yeterli sıkıştırmanın sağlandığı görülmüştür.

Macunu barındıran kutunun dış çevresi 290×240 mm, iç çevresi ise 250×200 mm boyutlarındadır. Ortasında cam macununu barındıran 100 mm derinliğinde bir boşluk mevcuttur. Cam macunu bu boşluğun 200×200 mm'lik kısmını dolduracak şekilde konulmuş, alt ve üstte kalan boşluklar strofor ile kapatılmıştır. Çerçevelerin ve sıkıştırma amacıyla kullanılan çubukların oluşturduğu kalınlık göz önüne alınarak cam macunu kutunun üst yüzeyinden biraz taşacak şekilde doldurulmuştur.

6.2.1 Sarkaçlar

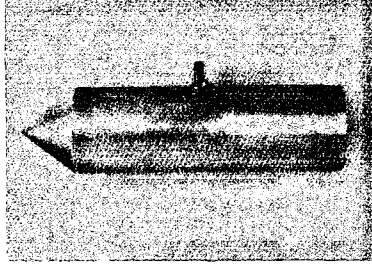
Deney için St 50 malzemedan yapılan düz uçlu ve sivri uçlu olmak üzere iki farklı sarkaç kullanılmıştır. Sarkaçlar tornalanmış, herhangi bir ısıl işlem veya bitirme işlemi görmemişlerdir. Sivri uçlu sarkaç 2716 gram, küt uçlu sarkaç ise 2692 gram ağırlığındadır. Sarkaçların asıldığı tutma yerleri kaynakla tutturulmuştur. Sarkacın asıldığı zaman dengede durabilmesi için tutma yerleri tam ağırlık merkezinin üstünde olacak şekilde yerleştirilmiştir.



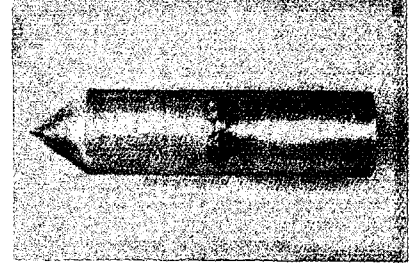
Şekil 6.3 Sivri uçlu sarkacın teknik resmi



(a)

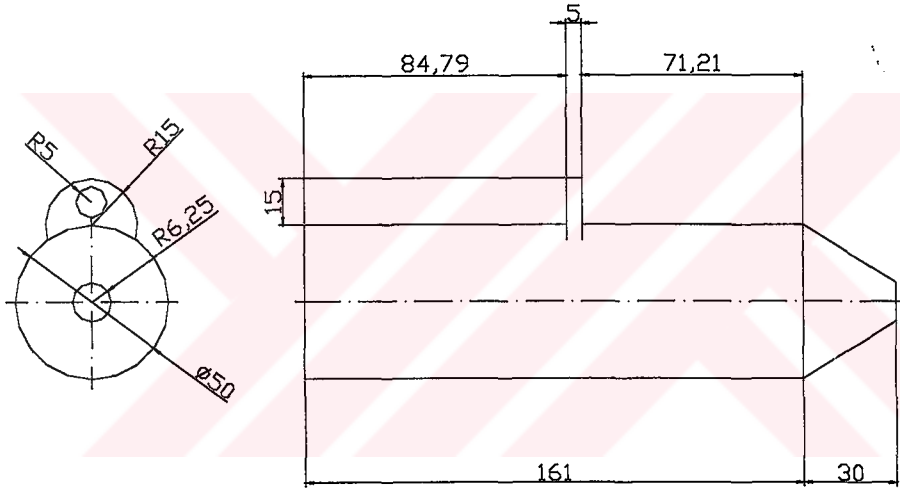


(b)

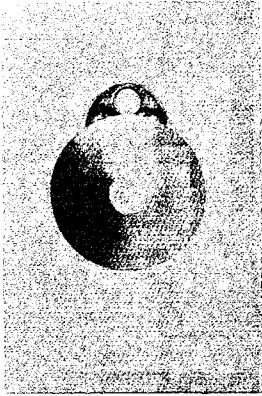


(c)

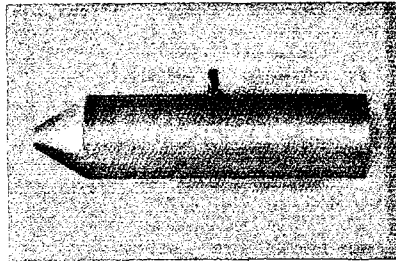
Şekil 6.4 Sivri uçlu sarkacın (a) önden, (b) yandan, (c) üstten görünüşleri



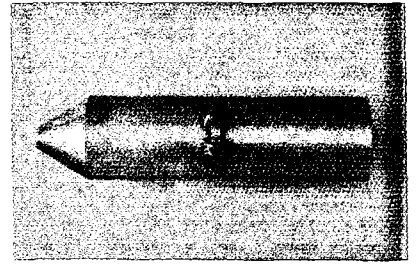
Şekil 6.5 Düz uçlu sarkacın teknik resmi



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.6 Düz uçlu sarkacın (a) önden, (b) yandan, (c) üstten görünüşleri

6.3 Deneyin Yapılışı

Bu deneyde sarkaç şeklinde bir kütlenin deney plakalarına belli bir yükseklikten salınım yaptırılması esas alınmıştır. Deney için 1.1 gramlık metal bir parçacığın 155 m/s hıza sahip iken taşıdığı kinetik enerji temel alınmıştır. Durağan kütlenin sahip olduğu potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüşümü denklem 6.1’de görülen bağıntı ile ifade edilir:

$$\frac{1}{2}m_P V^2 = m_K gh \quad (6.1)$$

Bu denklemde m_P : parçacık kütlesini, V : parçacık hızını, m_K : sarkaç kütlesini, g : yerçekimi ivmesini, h : sarkacın salınım yüksekliğini ifade eder. Salınım yüksekliğini 0.5 metre olarak alıp denklem 6.1’de değerleri yerine koyarsak denklem 6.2 elde edilir:

$$\frac{1}{2} \times 1.1 \times (155^2) = m_K \times 9.81 \times 0.5 \quad (6.2)$$

Hesaplama sonucunda bu bağıntıdan sarkacın kütlesinin yaklaşık olarak 2700 gram olması sonucu çıkmaktadır. Sarkacın kütlesi ve salınım yüksekliği iyi ayarlanabildiği takdirde, V_{50} testinde kullanılan 1.1 gramlık parçacığın 155 m/s’lik hıza sahip iken barındırdığı kinetik enerjiyle, sarkacın hedefe vuruş sırasında sahip olduğu kinetik enerji yaklaşık olarak aynı olacaktır.

Bu deneydekine benzer çalışmalar daha önceden metalik malzemeler için yapılmıştır. Şimşir vd., (2002) çelik plakalar üzerine çekiç düşürme yöntemi kullanarak, Ck 67 çeliğinden imal edilen plakalarda oluşan deformasyonu incelemişler ve gerçek balistik deformasyona yakın sonuçlar elde etmişlerdir. Fakat polimerik esaslı zırh malzemeleri için buna benzer bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Gerek metalik malzemeler, gerekse polimerik malzemeler için mekanik özelliklerin gerinim hızına bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. Fakat polimerik malzemeler için mekanik özelliklerin gerinim hızına bağlı olarak değişimi, metalik malzemelere göre çok daha fazladır.

6.4 Deneyin Sonuçları

Her bir deney plakası çerçeveler arasına yerleştirilmiş ve içi cam macunu dolu tahta kutuya dayanmıştır. 8, 10 ve 12 katmanlı üç ayrı deney plakası için, sivri ve düz uçlu sarkaçlarla deney plakalarına ayrı ayrı beşer vuruş yapılmıştır. Cam macununda oluşan çöküntü miktarları 0.05 mm hassasiyetinde bir kumpas ile ölçülmüş ve her plaka için beşer vuruş üzerinden ortalama değerler alınmıştır. Sonuçlar çizelge 6.2’de görülmektedir.

Çizelge 6.2 Ölçülen çöküntü miktarları

	Çöküntü miktarı (mm)	
	Sivri uçlu sarkaç	Düz uçlu sarkaç
8 katmanlı plaka	Üst sol: 20.50mm Üst sağ: 22.60mm Alt sol: 22.85mm Alt sağ: 22.25mm Orta: 25.50mm	Üst sol: 14.30 mm Alt sağ: 17.30 mm Üst sağ: 15.55 mm Alt sol: 18.75 mm Orta: 19.50 mm
10 katmanlı plaka	Üst sol: 20.15mm Üst sağ: 18.05mm Alt sol: 18.70mm Alt sağ: 18.90mm Orta: 22.75mm	Üst sol: 15.60mm Alt sağ: 14.40 mm Üst sağ: 16.70mm Alt sol: 15.45 mm Orta: 18.00 mm
12 katmanlı plaka	Üst sol: 18.90mm Üst sağ: 17.65mm Alt sol: 20.10mm Alt sağ: 17.35mm Orta: 22.95mm	Üst sol: 11.25mm Alt sağ: 13.35 mm Üst sağ: 12.30mm Alt sol: 13.95 mm Orta: 15.70 mm

6.5 Deney Sonuçlarının İrdelenmesi

Çizelge 6.3 Ortalama çöküntü değerleri

	Ortalama çöküntü miktarı (mm)	
	Sivri uçlu sarkaç	Düz uçlu sarkaç
8 katmanlı plaka	22.74	17.08
10 katmanlı plaka	19.71	16.03
12 katmanlı plaka	19.39	13.31

Aramid liflerinden imal edilmiş 8, 10 ve 12 katmanlı plakalara, St 50 çeliğinden imal edilmiş düz uçlu ve sivri uçlu sarkaçlarla vuruşlar yaptırılmış ve cam macununda oluşan çöküntü miktarları ölçülmüştür. Her bir plakaya yapılan sivri uçlu ve düz uçlu vuruşlar için ortalama çöküntü miktarları hesaplanmıştır. Her bir plaka için elde edilen ortalama değerler Çizelge 6.3’te görülmektedir. Deneyden çıkan sonuçlara baktığımız zaman;

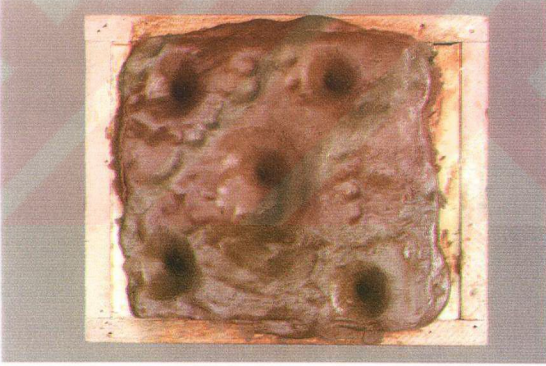
1. Sivri uçlu sarkaç kullanılarak;

- a.8 katmanlı aramid plakada ortalama 22.74 mm çöküntü derinliği,
- b.10 katmanlı aramid plakada ortalama 19.71 mm çöküntü derinliği,
- c.12 katmanlı aramid plakada ortalama 19.39 mm çöküntü derinliği, bulunmuştur.

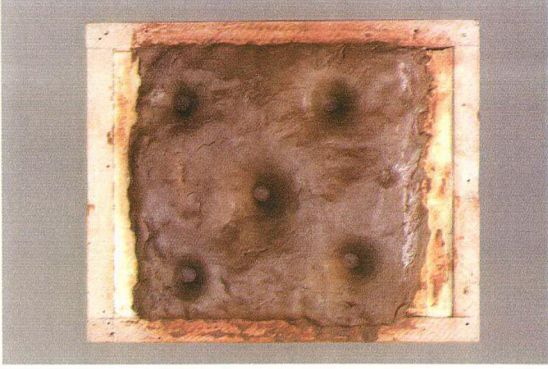
2. Düz uçlu sarkaç kullanılarak;

- a.8 katmanlı aramid plakada ortalama 17.08 mm çöküntü derinliği,
- b.10 katmanlı aramid plakada ortalama 16.03 mm çöküntü derinliği,
- c. 12 katmanlı aramid plakada ortalama 13.31 mm çöküntü derinliği, bulunmuştur.

3. Bulunan ortalama çöküntü değerleri, NIJ 0101.04 standardında aynı tehditler için maksimum değer olarak kabul edilen 44 mm.lik çöküntü değerinin altındadır.



Şekil 6.7 Sivri uçlu sarkaç ile yapılan vuruşlar sonucu cam macununda oluşan çöküntüler



Şekil 6.8 Düz uçlu sarkaç ile yapılan vuruşlar sonucu cam macununda oluşan çöküntüler

7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

8, 10 ve 12 katmanlı aramid lifi plakalara, balistik dayanımın belirlenmesi amacıyla düz ve sivri uçlu olmak üzere iki farklı şekle sahip sarkaçla vuruşlar yapılmış ve cam macununda oluşan çöküntü miktarları ölçülüp ortalama değerler alınmıştır. Deneysel çalışmada ilk göze çarpan olay, plakalardaki katman sayısı arttıkça ortalama çöküntü miktarlarının azaldığı görülmüştür. Sivri uçlu sarkaçla yapılan vuruşlar için 10 ve 12 katmanlı plakaların ortalama çöküntü değerleri, düz uçlu sarkaçla yapılan vuruşlar için de 8 ve 10 katmanlı plakaların ortalama çöküntü değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu ortaya çıkmaktadır. Deneyin yapıldığı koşulların hassas bir şekilde kontrol edilememesinden dolayı böyle bir sonucun ortaya çıktığı düşünülebilir. Katman sayısındaki artışın darbe dayanımını artırdığı saptanmıştır.

Deneyden elde edilen sonuçlar şöyle özetlenebilir;

Sivri uçlu sarkaçla yapılan vuruşlar için gözlemlenen çöküntü miktarları, düz uçlu sarkaçla yapılan vuruşlara göre belirgin bir şekilde daha fazladır. Bu sonuç da, literatürde bahsedilen polimerik zırhlarda sivri uçlu mermiler için balistik hızın düz uçlu mermilere göre daha az olması durumuyla örtüşmektedir. Sarkacın şeklinin çöküntü miktarında etkili bir faktör olduğu anlaşılmaktadır.

Bazı vuruşlarda sarkacın hedef plakalarını tam dik açıyla vuramadıkları gözlemlenmiştir. Bu durum, serbest salınım sırasında sarkacın ucunun yatay salınım ekseninden sapması sebebiyle meydana gelmektedir. Salınımın daha kontrollü yapılması sağlandığı takdirde gerçeğe daha yakın sonuçların elde edilebileceği düşünülmektedir. Sarkaç tasarımının iyileştirilmesi ile bu sorunun çözülebileceği varsayılmaktadır. Örneğin sarkacın her iki yanına kanatçık ilavesiyle salınım sırasında dengelemeyi sağlamak mümkün olabilir.

Deney sırasında hedef plakaları için yeterli sıkışmanın sağlanmasının önemli olduğu görülmüştür. Aksi takdirde plakalar yerlerinden çıkmakta ve sağlıklı sonuçların elde edilmesi mümkün olmamaktadır. Hedef plakalarının yerleştirildiği çerçevenin daha iyi tasarlanmasıyla sıkıştırma için ilave çubuk kullanımına gerek kalmayacağı düşünülmektedir. Bir başka olası

özüm de, plakaların çerçeve kullanılmadan doğrudan macunun bulunduğu kaba monte edilmesidir.

Macunda oluşan çöküntü miktarları hedef plakasında kullanılan lif cinsi ve iplik sıklığıyla doğrudan bağlantılıdır. Hedef plakalarındaki iplik yoğunluğunun artmasıyla çöküntüler bir miktar azalacaktır.

Çalışmamızdan çıkan sonuçlar göstermiştir ki; bir zırh sisteminin balistik limitinin belirlenmesi amacıyla laboratuvar ortamında yapılan ve göreceli olarak daha pahalı olan parçacık testi yerine, düşük çarpma hızları için sarkaç düşürme testi yapılmış olup bu test, şarapnel parçalarının zırh sistemlerindeki etkisini incelemek amacıyla 1.1 gramlık parçacıklarla gerçekleştirilen V_{50} parçacık testine alternatif olma potansiyelindedir. Uyguladığımız sarkaç düşürme testi ile gerçek değerlere yakın sonuçların elde edildiği yetkili makamlar tarafından da doğrulanmıştır. Bu çalışmada kullanılan teçhizatın geliştirilmesiyle gerçeğe daha yakın sonuçlar elde etmek mümkündür.

KAYNAKLAR

- Anderson Charles E., Timmons Suzanne A., (1997), "Ballistic Performance of Confined %99.5-Al₂O₃ Ceramic Tiles", *International Journal of Impact Engineering* 19:703-713.
- Anderson Charles E., Hohler Valker, Walker James D., Stilp Alois J., (1999), "The Influence of Projectile Hardness on Ballistic Performance", *International Journal of Impact Engineering*, 22: 619-632.
- Bulut Halil, (2003), "Balistik Koruyucu Teçhizatın Kullanımında Kompozit Malzeme Kullanımı", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bunsell A.R., (1988), "Fiber Reinforcement for Composite Materials", Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Candan C., Akdemir A., (2003), "The Properties of the Para Aramid Composite Armour Material Manufacture Against Light Weapons", 6th International Fracture Conference, 10-12 September 2003, Konya, 525-530.
- Dikshit S.N., Kutumbarao V.V., Sundararajan G., (1995), "The Influence of Plate Hardness on The Ballistic Performance of Thick Steel Plates", *International Journal of Impact Engineering*, 16:293-320.
- Elaldı Faruk, (1997), "Zırh Malzemelerindeki Gelişmeler", Savunma Sanayindeki Teknolojik Gelişmeler Sempozyumu, 5-6 Haziran 1997, Ankara, 773-794.
- Geçkinli Emel A., (1991), "İleri Teknoloji Malzemeleri", İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul.
- Gogolewski R.P., Cunningham B. J., Riddle R.A., Lesuer D.R., Syn C.K., (1996), "On The Importance of Target Materials Interfaces During Low Speed Impact", 16th International Symposium on Ballistics, 23-28 September 1996, San Francisco, 751-760.
- Gooch W.A., Perciballi W.J., O'Donnel R.G., Woodward R.L., Baxter B.J., (1992), "Effects of Ceramic Type on Fragmentation Behaviour During Ballistic Impact", 13th International Symposium on Ballistics, 1-3 July 1992, Stockholm, 93-100.
- Gooch W.A., Perciballi W.J., O'Donnel R.G., Woodward R.L., Baxter B.J., Pattie S.D., (1993), "A Study of Fragmentation in The Ballistic Impact of Ceramics", *International Journal of Impact Engineering*, 15:605-618.
- Horsfall I., Buckley D, (1995), "The Effect of Through Thickness Cracks on The Ballistic Performance of Ceramic Armour Systems", *International Journal of Impact Engineering*, 18:309-318.
- Johnson William, (1972), "Impact Strenght of Materials", Edward Arnold, London.
- Kostikov V. I., (1995), "Fibre Science and Technology", Chapman & Hall, London.
- Laible R.C., (1980), "Ballistic Materials and Penetration Mechanics", Elsevier Scientific Publishing Company, New York.
- Lee M., Yoo Y.H., (2001), "Analysis of Ceramic Metal Armour Systems", *International Journal of Impact Engineering*, 25:819-829.
- Louro Luis H.L., Meyers Mark A., (1989), "Effect of Stress State and Microstructural Parametres on Impact Damage of Alumina Based Ceramics", *Journal of Materials Science*, 24:2516-2532.

Matchen B., (1996), "Applications of Ceramics in Armor Products", Key Engineering Materials 122-124:333-342.

Miyahara Nobuyuki, Yamaishi Kohei, Mutoh Yoshiharu, Uematsu Keizo, Inoue Makoto, (1994), "Effect of Grain Size on Strength and Fracture Toughness in Alumina", JSME International Journal Series A, 37(3):231-237.

Montgomery J.S., Wells, G.H., Roopchand B, Ogilvy J.W., (1997), "Low Cost Titanium Armors for Combat Vehicles", Journal of Materials, 45:45-47

Mostaghachi Hamid, (1996), "Advanced Ceramics and Composites", Trans Tech Publications, Switzerland.

Navarro C., (1998), "Simplified Modelling of The Ballistic Behaviour of Fabrics and Fibre-Reinforced Polymeric Matrix Composites", Key Engineering Materials, 141-143:383-400.

Ogorkiewicz Richard M., (1991), "Technology of Tanks", Jane's Information Group, Coulsdon.

Özşahin Evren, (2003), "Entegre Bir Zırhın Yüksek Hızlı Çarpma Yükleri Altındaki Davranışı", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak-Uzay Bilimleri Fakültesi.

Öztürk Tayfur, (1994), "Metal Esaslı Kompozit Üretimi ve Zırh Malzemesi Olarak Kullanılabilirliği", Tübitak araştırma raporu, TÜBİTAK.

Peters T., (1998), "Handbook of Composites", Chapman&Hall, London.

Roeder B.A., Sun C.T., (2001), "Dynamic Penetration of Alumina/Aluminium Laminates: Experiments and Modeling", International Journal of Impact Engineering, 25:169-185.

Shim V.P.W., Lim C.T., Foo K.J., (2001), "Dynamic Mechanical Properties of Fabric Armour", International Journal of Impact Engineering, 25:1-15.

Sherman Dov, Ben-Shushan T., (1996), "The Ballistic Failure Mechanisms and Sequence in Confined Ceramic Tiles", 16th International Symposium on Ballistics, 23-28 September 1996, San Francisco, 533-541.

Sherman Dov, (2000), "Impact Failure Mechanisms in Alumina Tiles on Finite Thickness Support and The Effect of Confinement", International Journal of Impact Engineering, 24:313-328.

Smith William F., Çeviri: Kınıkoğlu Nihat G., (2001), "Malzeme Bilimi ve Mühendisliği", Literatür, İstanbul.

Sternberg J., (1989), "Material Properties Determining The Resistance of Ceramics to High Velocity Penetration", Journal of Applied Physics, 65:3417-3424.

Şimşir Caner, Yıldırım Orhan, Ögel Bilgehan, (2002), "Çelik Zırh Plakaların Çekiç Düşürme Deneyi ile Düşük Hızlarda Balistik Karakterizasyonu", Savunma Teknolojileri Kongresi, 24-25 Ekim 2002, Ankara, 35-43.

Tan V.B.C., Lim C.T., Cheong C.H., (2002), "Perforation of High-Strength Double-Ply Fabric by Varying Shaped Projectiles", International Journal of Impact Engineering, 27:577-591.

Tan V.B.C., Lim C.T., Cheong C.H., (2003), "Perforation of High-Strength Fabric by Projectiles of Different Geometry", International Journal of Impact Engineering, 28:207-222.

Vural Murat, (1998) "Ballistic Performance and Impact Behaviour of Alumina Armor Ceramics", Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak-Uzay Bilimleri Fakültesi.

Walsh T.F., Lee B.L., Song J.W., (1998), "Penetration Failure of Spectra Polyethylene Fiber-

Reinforced Ballistic Grade Composites”, Key Engineering Materials, 141-143:367-382.

Wilkins Mark L., (1978), “Mechanics of Penetration and Perforation”, International Journal of Engineering Science, 16:793-807.

Woodward R. L. , Cimpoeru S. J., (1998), “A Study of The Perforation of Aluminum Laminate Targets”, International Journal of Impact Engineering, 21:117-131.

Xian X.J., (1998), “Impact Response and Failure Mechanisms of Ultrahigh Modulus Polyethylene Fiber Composites and Polyethylene Fiber-Carbon Fiber Hybrid Composites”, Key Engineering Materials, 141-143:187-208.

INTERNET KAYNAKLARI

[1]www.nurolmakina.com

[2]www.oxelosund.ssab

[3]www.key-to-metals.com

[4]www.matweb.com

[5]www.azom.com

[6]www.cercominc.com

[7]www.ceradyne.com

[8]www.dynacer.com

[9]www.advancedcomposites.com

[10]www.iastate.edu

[11]www.et.byu.edu

[12]www.monmouth.com

[13]www.fibersource.com

[14]www.spectrafiber.com

[15]www.dsm.com

[16]armor.kiev.ua

[17]thor.prohosting.com

[18]www.technica.net

[19]www.nssn.org

[20]www.ojp.usdoj.gov

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	03.07.1979	
Doğum yeri	Ankara	
Lise	1990-1997	İSTEK Özel Acıbadem Lisesi
Lisans	1997-2001	Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak. Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2002-	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

