

NIJ Standardı Seviye-IV Korunmalı Zırh Bileşenlerinin İncelenmesi ve Balistik Koruma Standartları

Adem VERDİ¹, Meliha Oktav BULUT¹

1 Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

1 Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-1823-4003)

1 Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-0009-5981), oktabbulut@sdu.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 22.09.2021 ve Kabul Tarihi 07.01.2022)

(DOI: 10.35354/tbed.999089)

ATIF/REFERENCE: Verdi, A., Bulut, M.O. (2022). NIJ Standardı Seviye-Iv Korunmalı Zırh Bileşenlerinin İncelenmesi ve Balistik Koruma Standartları. *Teknik Bilimler Dergisi*, 12 (1), 69-81.

Öz

Savaş sistemlerinde hayatta kalmanın atış gücü, koruma ve hareket kabiliyeti gibi üç temel parametreye bağlı olduğu düşünülebilir. Savaş sistemlerinin en önemli kollarından biri olan saldırı sistemlerinde balistik biliminin gelişimi ile birlikte silah yapısı ve yüksek performanslı mermi uçları geliştirildi, atış hızı yüksek düzeyde artırıldı. Bunun sonucunda ise koruyucu zırhları delme kabiliyeti de artmış oldu. Savaş sistemlerindeki bu gelişime karşılık olarak savunma sistemleri de mecburen gelişim göstermektedir. Savunma sistemlerinin en önemli kollarından biri olan zırh sistemlerinin koruyuculuk düzeyi aynı şekilde balistik biliminin gelişimi ile birlikte artırıldı. İleri düzey yapılan çalışmalarla birlikte zırh malzemeleri çeşitli tehditlere karşı minimum ağırlık ile koruma sağlamak için geliştirildi. Personel veya araç hareket kabiliyetini arttırmak için zırh ağırlığını azaltmaya yönelik çalışmalar etkisini artırarak önem kazanmaktadır. Çeşitli kamu ve özel sektör firmaları koruma düzeyi/hafiflik faktörleri hedeflerine ulaşırken maliyeti düşük olan malzemeler geliştirmek için çalışmaktadır. Ultra hafif ve koruma düzeyi yüksek olan zırhlar tasarlamak üzere çeşitli araştırmacılar tarafından seramikler ve polimer kompozit malzemeler araştırılmaktadır. Araştırma konusu olan bu malzemelerden yüksek saflıkta alümina, silisyum karbür ve bor karbür gibi seramikler bazı kompozit laminatlarla kombinasyon halinde kullanılır. Aramid, cam ve ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) gibi gelişmiş fiberle güçlendirilmiş laminatlar hem eklenti hem de yapısal kompozit zırh uygulamalarında bağımsız olarak ve seramik zırhlara destek olarak kullanılır. Bu çalışmada, personel korunmasına yönelik olarak üretilen zırhların balistik koruma düzeyleri incelenmiş, NIJ Standardının üst seviyesi olan Seviye-IV koruma düzeyine sahip plakalar hakkında bilgi verilmesi amaçlanmıştır. Bunun için ağırlık/fiyat/performans açılarından avantajlı olan çeşitli seramik zırhlar ve bununla birlikte arka yüzey destek malzemesi olarak kullanılan ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen ve aramid gibi çeşitli kompozit malzemeler incelenmiştir. Ayrıca kompozit zırh üretimi yöntemi ve test standartları hakkında bilgi verilmeye çalışılmıştır. Yapılan araştırmalara göre en hafif Seviye-IV koruma düzeyine sahip zırh malzemeleri kombinasyonunun seramikler sınıfından bor karbür; destek plakası olarak da ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen kullanılarak elde edilebileceği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Seramik zırh, ESAPI, balistik koruma düzeyleri, bor karbür, UHMWPE

Examination Of Nij Standard Level-IV Protective Armor Components and Ballistic Protection Standards

Abstract

It can be thought that survival in combat systems depends on three basic parameters such as firing power, protection and mobility. With the development of the science of ballistics in attack systems, one of the most important branches of combat systems, weapon structure and high performance bullet tips were developed, and the rate of fire was increased at a high level. As a result, its ability to pierce protective armor has also increased. Defense systems are necessarily evolving in response to this development in combat systems. The

level of protection of armor systems, which is one of the most important branches of defense systems, has also been increased with the development of ballistics science. With advanced studies, armor materials have been developed to provide protection with minimum weight against various threats. In order to increase the mobility of personnel or vehicles, efforts to reduce armor weight gain importance by increasing their effectiveness. Various public and private sector firms are working to develop cost-effective materials while achieving their goals of protection level / lightness factors. Ceramics and polymer composite materials are being researched by various researchers to design ultra-light armor with a high level of protection. Among these research materials, ceramics such as high purity alumina, silicon carbide and boron carbide are used in combination with some composite laminates. Advanced fiber reinforced laminates such as aramid, glass and ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) are used independently and as a support for ceramic armors in both add-on and structural composite armor applications. In this study, the ballistic protection levels of armors produced for personnel protection were examined, and it was aimed to give information about the plates with Level-IV protection level, which is the upper level of the NIJ Standard. For this, various ceramic armors which are advantageous in terms of weight/price/performance, as well as various composite materials such as ultra high molecular weight polyethylene and aramid used as backface support material were examined. In addition, it was tried to give information about the composite armor production method and test standards. According to the researches, it appears that it can be obtained by using boron carbide in the ceramics class of the armor materials and ultra high molecular weight polyethylene as a support plate combination with the lightest Level-IV protection level.

Keywords: Ceramic armor, ESAPI, ballistic protection levels, boron carbide, UHMWPE

1. Giriş

Tarih boyunca insanlar çeşitli tehdit ve saldırılar karşısında korunma ihtiyacı hissetmişler ve bunun sonucu olarak daha iyi korumayı sağlayacak malzemeleri bulabilmek için yeni arayışlar içerisinde olmuşlardır. Balistik biliminin ortaya çıkması ile birlikte bu alandaki çalışmalar hız kazanmış ve gerek saldırı sistemleri gerekse savunma sistemleri karşılıklı olarak ciddi anlamda gelişim göstermiştir. Teknolojik gelişme ile birlikte silah sistemlerinde yaşanan yenilikler ve bunlara karşı koyabilecek balistik özellikleri yüksek zırh sistemleri çalışmaları yaygınlaştırmıştır. 1990'lı yıllarda ultra-yüksek moleküler ağırlığa sahip polietilen (UHMWPE) lifleri balistik koruma amaçlı üretilen sistemlerde en hafif ve etkin bir çözüm sağlayarak yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Bozdoğan vd., 2015).

Balistik koruyuculuk biliminin gelişmesiyle birlikte personel zırhlar, yumuşak (dokuma esaslı sistemler; yüksek performanslı elyafları kullanan) ve sert zırhlar (metalik veya seramik dolgular içeren) olarak ayrılabilir. Yumuşak zırh belirli düşük seviye tehditler için yeterli iken daha yüksek seviye tehditler için metal veya seramikler gerekmektedir [29].

Seramik kompozit zırh teknolojisi ile monolitik zırh yapılarına göre balistik kabiliyetleri yüksek zırhlar üretilmektedir. Kompozit malzemelerin özellikleri, takviye elemanı sayesinde daha da geliştirilerek, yüksek çekme mukavemeti, ergime sıcaklığı, ısı kararlılık, kolay üretilebilirlik gibi özelliklerinin artırılması söz konusudur. Alüminyum matrisli kompozitlerin üretilmesinde B₄C (bor karbür-boron karbid), SiC (silisyum karbür-silikon karbid), Al₂O₃ (alüminyum oksit-alümina), SiO₂ (silisyum dioksit-silika), MgO (magnezyum oksit), TiC (titanium karbür) ve TiB₂ (titanium diborür) gibi seramik esaslı farklı takviye elemanları kullanılmaktadır (Baydaroğlu, 2018).

Balistik koruyucu zırhlarda sağlanan üstün özelliklerin yanında bu koruyuculuğu test etmek için birçok standart geliştirilmiştir; en yaygın olarak kullanılan standart NIJ (The US National Institute of Justice - Ulusal Adalet Enstitüsü) tarafından kabul edilen standartlardır (Bozdoğan vd., 2015).

Hafif silahlara karşı personel korumada en üst düzey koruma olarak kabul edilen NIJ Standard-01.01.06 Seviye-IV dereceli zırhlar ise ön yüzde seramik plaka ve arka tarafta UHMWPE, cam, aramid, karbon kumaşı gibi takviye elemanları içerir.

Özellikle göğüs ve sırt bölgesinde personelin vücuduna tam oturması amacıyla bu zırhların şekli genelde çok kavisli/açılı (multicurved) olmaktadır.

2. Balistik Koruyucu Vücut Zırhı Özellikleri ve Üretimi

2.1. Genel Tanım ve Kullanım

Balistik Koruyucu Vücut Zırhları genel olarak şu temel bileşenlerden oluşur (URL-2, 2008):

a) Modüler Yelek veya Taktik Yelek:

Bu yelekler üzerinde personeli genel maksatlı olarak dış ekenlere karşı koruyan su itici, yüksek mukavemetli kordura kumaşı, personelin vücudunun konforlu olmasını ve nefes almasını sağlayan iç kısımda fileli-örgülü kumaş, dış yüzeyde mühimmat taşıyıcı kolonlar bulunmaktadır. Bunların dışında kordura kumaş altına yerleştirilen; NIJ Standard III-A seviyesinde tabanca mermisine karşı koruma sağlayan ve yumuşak zırh olarak adlandırılan aramid (Kevlar) kumaş katmanları yer almaktadır.



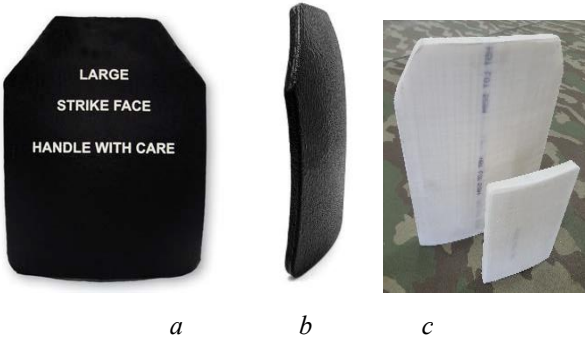
Şekil 1. a) Modüler yelek b) Taktik yelek

b) SAPI, ESAPI, vb. koruyucu sert zırh eklentileri:

Bu plakalar ana gövde zırhına takılabilen ve çıkarılabilen bileşenlerdir. Değişik tehdit seviyeleri için balistik koruma amacıyla kullanılmaktadırlar. Sert plakalar ile oluşturulduğu için sert zırh olarak anılırlar (TS 11164).

Personel için üretilen sert zırhlar genelde çoklu kavisli (multi-curve) yapıdadır (Şekil 2-b) (Bracamonte vd., 2016).

SAPI (Small Arms Protective Insert - Hafif Silahlara karşı Koruyucu Eklenti) olarak adlandırılan plakalar seramikten üretilmiş olup [9-10] NIJ Standardı Seviye-III; piyade tüfekleri mermisine karşı koruma sağlar. Hafif silahlar, 20 mm çapında ve bu çapa kadar olan mermileri ateşleyebilen namlulu silahlardır (TS 13349). Bu seviyede koruma sağlayan ve sadece UHMWPE kumaşından üretilen yelek içi plakaları da mevcuttur.



Şekil 2. a) SAPI ön plaka b) SAPI yandan görünüş - çoklu kavis yapısı c) UHMWPE ön-arka plaka ve yan plaka

ESAPI (Enhanced Small Arms Protective Insert) plakalar ise SAPI plakaların geliştirilmiş halidir (URL-1, 2005). Bu plakalar NIJ Standardı Seviye-IV; .30 kalibre (7,62 mm) AP (Armor Piercing) zırh delici mermilere karşı koruma sağlama maksatlı üretilen zırhlardır.



Şekil 3. 4 farklı beden ESAPI ön-arka plakaları

Tablo 1. SAPI ve ESAPI zırhların beden ölçüleri ve ağırlıklarının kıyaslanması

Beden	Koruma Alanı	Sert Zırh Plakası Ağırlığı (g)	
		SAPI	ESAPI
XS	18,4 x 29,2 cm ²	1270	1700
S	22,2 x 29,8 cm ²	1590	2080
M	24,1 x 31,8 cm ²	1820	2500
L	26,0 x 33,7 cm ²	2090	2850
XL	28,0 x 35,6 cm ²	2400	3250
Yan Plaka	15,0 x 15,0 cm ² 15,0 x 20,0 cm ²	550-750	1000-1200
Kalınlık		20 mm	30 mm
NIJ Koruma Düzeyi		Seviye III	Seviye IV

Tüm plakalar koruyucu yelek içine dikilen kılıflara yerleştirilir (Şekil 4, USA National Research Council of the National Academies, 2011). Özellikle sıvı ve su buharı gibi yumuşak zırh malzemesinin balistik performansını olumsuz etkileyen ve ömrünü azaltan olumsuz dış etkenlere karşı plakaları korumak için bu kılıfın sıvı geçirmez malzemeden üretilmesi gerekmektedir.



Şekil 4. Koruyucu yelek ve zırhların yerleşimi

c) Yelek üzerinde bulunan yardımcı elemanlar:

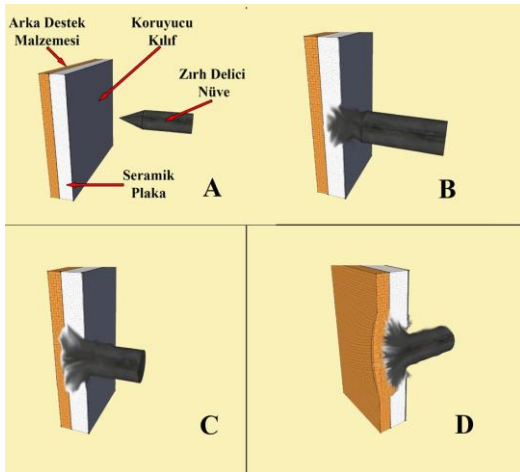
Personelin kullanmış olduğu şarjör gibi silah parçaları ve diğer muhteviyatı taşıyan yardımcı elemanlar ile omuz gibi belirli bölgelerde bulunan ilave koruyuculardır.



2.2. Seviye-IV Zırhın Çalışma Prensibi

Seviye-IV zırhlarda ana malzeme olarak kullanılan seramik plakaların kullanım dinamiği, mermi çekirdeği ve şarapnelin yapısını bozmak ve merminin kinetik enerjisini tüketerek delme kabiliyetini kaybetmesini sağlamaktır (Şekil 6 - A ve B).

Seramik zırh plakası tek başına kullanılmamakta, isabet sonrasında seramik plakada meydana gelen parçalanma neticesinde oluşan şarapneler ile mermi çekirdeği parçaları ve bomba kaynaklı şarapneli tutmak için daha yumuşak yapıda polietilen (UHMWPE), aramid (Kevlar) veya cam elyafı gibi kompozitlerden üretilmiş arka destek malzemesi kullanılmaktadır (Şekil 6 - C ve D).



Şekil 6. Seviye-IV seramik zırhın çalışması (Hedef Balistiği Bilimi, 2017).

Seramik zırh bileşeni, kurşunun kinetik enerjisini azaltmak ve onu parçalara ayırmak için yeterince dayanıklı olmalıdır. Burada ilk mekanik özellik olarak sertlik ön plana çıkmaktadır. Kurşun seramiğin yüksek sertliği nedeniyle deforme olabilir, kırılabilir veya parçalanabilir. Ayrıca seramiğin sahip olduğu yüksek sertlik, penetrasyon (nüfuz) sürecinin geri kalanında kurşun üzerinde daha fazla hasara yol açmaktadır (Rahbek & Johnsen, 2015). Sertlik kurşuna hasar verilmesi açısından büyük öneme sahipken seramik yapısal bütünlüğünün korunması istendiğinde, özellikle çok vuruşlu performans için yüksek dayanıma ihtiyaç duyulduğunda, kırılma tokluğu ve mukavemet ön plana çıkmaktadır (Karandikar vd., 2009).

Kurşunun seramik yüzeyiyle etkileşime girdiği ve nüfuz etmediği süre, "bekleme süresi" olarak ifade edilir. Seramiğin yüksek elastik modülü, bekleme süresi etkileşimini uzatarak balistik dayanım üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Ayrıca, yüksek elastik modül daha geniş çatlak aralıklarına imkân tanır ve daha yüksek atalet kuvvetlerine maruz kalan daha büyük parçalar sağlar. Daha büyük parçalar sert seramik bileşen için kurşuna daha fazla zarar verir (Krell & Strassburger, 2014). Bu nedenle, bu mekanik özelliklerin bir kombinasyonu (sertlik, mukavemet, elastik modül) zırh seramiğinin performansı açısından önem taşımaktadır.

2.3. Seviye-IV Zırhın Bileşenleri ve Üretimi

NIJ Seviye-IV standartlarında koruma sağlayan ESAPI koruyucu zırhlar temel olarak ana malzeme seramik plaka olmak üzere bunu arka yüzeyde destekleyen ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE), aramid, karbon veya bunların belli sırayla birlikte kullanıldığı hibrid plakalardan oluşur. Optimum ağırlık/koruma düzeyi sağlanması ve seramik yüzeye kuvvetli yapışma uygunluğu durumları bu malzemelerin seçim kriterlerini belirler.

TiB2 gibi bir seramik plaka ile birlikte UHMWPE gibi hafif bir destek malzemesi kullanılması maliyeti artırırken ağırlık ve kalınlık açısından fayda sağlar (Akella, 2020).

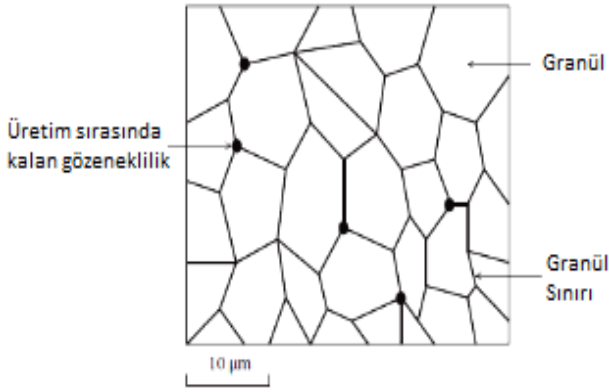
Bu plakalar arasında bağlantıyı sağlayan laminasyon malzemesi olarak cam elyaf takviyeli, epoksi reçine matrisli kompozit malzeme kullanılabilir. Ayrıca seramik plaka dış yüzeyinde yüzey koruma ve darbe sönümleyici olarak çeşitli köpükler kullanılabilir (Şekil 7).



Şekil 7. Seviye-IV ESAPI (Geliştirilmiş Hafif Silah Koruyucu Eklentisi) zırh bileşenleri

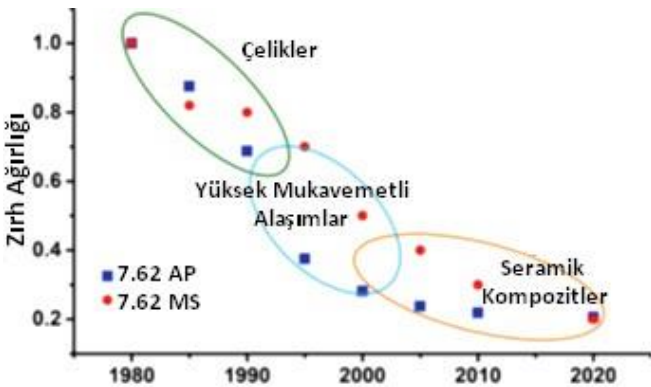
2.3.1. Balistik Korumada Kullanılan Seramikler

Kompozit zırh malzemesi olarak çoğunlukla polimer, metal ve seramik esaslı sistemler üzerinde çalışılmaktadır. Bunlar arasında seramik esaslı zırh sistemleri yüksek sertlik değerlerine sahip olduklarından zırh teknolojilerinde sıklıkla kullanılmaktadırlar. Zırh malzemelerinin seçimi ve tasarımında önemli noktalardan birisi de sadece koruma etkili değil aynı zamanda hafiflik de sağlayabilmektir. Zırh malzemesinin seçiminde; fiyat, balistik performans, kullanım alanı, dayanım/ağırlık oranı gibi parametreler etkindir (Baydaroğlu, 2018).



Şekil 8. Tipik bir polikristalin seramiğin mikro yapısının şeması.

Günümüzde aynı koruma seviyesine sahip çelik ve seramik zırh balistik koruma çözümleri karşılaştırıldığında seramik zırh ile yaklaşık %35 oranında platformda hafiflik sağlanmaktadır (Hedef Balistiği Bilimi, 2017). Şekil 9, malzeme biliminin ilerlemesinden dolayı 7,62 mm yumuşak çelik ve zırh delici (AP) tüfek mermilerine karşı kullanılan zırh ağırlığındaki yıllara göre azalmayı göstermektedir (Reddy, vd., 2019).



Şekil 9. 7,62 mm mermilere karşı kullanılan zırhların ağırlıklarının yıllara göre azalması.

Tablo 2. Farklı zırhların alansal yoğunlukları (Akella, 2020)

Zırh Tipi	Alansal Yoğunluk (kg/m ²)
Çelik	283
Alüminyum	267
Titanyum	220
Seramik Alüminyum	195
Seramik Kompozit	98

Seramik balistik koruyucu malzemelerin, çelik balistik koruyucu zırhlara karşı üstünlükleri (Hazell, 2016):

1. Belirli bir tehdide karşı çelik zırha göre çok daha ince bir seramik plaka ile koruma sağlamak mümkündür.
2. Belirli tehdide karşı daha hafiftir.
3. Mermi çekirdeğini kırarak parçalayacak kadar serttir.
4. Seramik plakalar çelik ile eşit hacimlerde daha ucuz nakliye maliyetine sahiptir.

Çelik balistik koruyucu zırhın seramik balistik koruyucu malzemeye göre üstünlükleri ise (Hazell, 2016):

1. Çelik zırhlar, çoklu isabet durumunda seramik plakalara oranla daha iyi performans sergiler.
2. Seramik zırhlar, aracın yük taşıma kapasitesini desteklemez; aksine araç gövdesinin taşıyıcı unsurlarına ek yük getirir.
3. Seramik plakalar, nakliye ve kullanım sırasında oluşacak darbelerle karşı hassastır. Ek önlemler alınarak darbe dayanıklılığının artırılması gerekmektedir.
4. Yüksek performanslı seramik plakaların üretilmesi göreceli olarak pahalıdır.

Tablo 3. Zırh yapımında kullanılan seramik malzemelerin özellikleri (Sert, 2005)

Seramik Tipi	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertlik (VHN)	Elastisite Modülü (GPa)	Erime Noktası (°C)	Fiyat Sırası
Alümina Al ₂ O ₃	3,9	2000	350	1800	1

Silisyum Karbür (SiC)	3,200	2600	390	2100	2
Bor Karbür (B4C)	2,500	3700	450	2450	3
Titanyum Diborür (TiB2)	4,500	2600	575	2980	4

Tablo 3'te görüldüğü üzere ağırlık/performans kriteri göz önünde bulundurulduğunda seramik zırh üretimindeki en avantajlı malzeme bor karbür; yine uygun olabilecek bir ağırlık söz konusu olup fiyat/performans kriteri göz önünde bulundurulduğunda ise en avantajlı malzeme silisyum karbürdür.

2.3.1.1. Alüminyum Oksit (Alümina) (Al₂O₃)

Alüminyum oksit (Al₂O₃), alümina olarak da isimlendirilen alüminyum ve oksijenin birleşimi ile oluşan kimyasal bir bileşiktir (Hedef Balistiği Bilimi, 2017). Tablo 3'te görüldüğü üzere nispeten düşük maliyeti ve üretiminin kolay olması nedeniyle bugüne kadar ilk ve yaygın olarak kullanılan oksit seramik malzemedir (Reddy, vd., 2019).

Alüminyum oksitin temel özellikleri:

- Yoğunluğu 3,69 – 3,80 g/cm³
- Sertlik değeri, Mohs cetveline göre 9'dur (1.440 kg/mm²).
- Mekanik aşınmaya karşı dirençlidir.
- Erime noktası 2.072 °C
- Buharlaşma noktası 2.977 °C
- Asidik ve alkali maddelere karşı yüksek dirence sahiptir.
- Kalıplanabilir ve şekil verilebilir niteliktedir.
- Zırh üretimi için %94 ile %99,8 arasında saflık oranında temin edilebilir.

Zırh üretiminde kullanılan en yaygın alüminyum oksitin saflığı %99,5'tir. Alüminyum oksit, özellikle 7,62 mm zırh delici tehdit seviyesine kadar zırlı araçların imalinde tercih edilmektedir. Balistik koruyucu yelek ve kalkanlarda yoğunluğunun fazla olmasından dolayı kullanılmamaktadır. Silisyum karbürden 9 kat ve bor karbürden 16 kat daha düşük maliyetli olan alümina, ağırlık ve hareketlilik açısından kısıtlama olmadığı takdirde belirlenen tehditlere göre maliyet etkinliği yüksek bir malzemedir (Hedef Balistiği Bilimi, 2017).

2.3.1.2. Silisyum Karbür (Silikon Karbid) (SiC)

Silisyum karbür (SiC), yüksek sıcaklıklı elektro-kimyasal işlemler sonucunda silika kumu (SiO₂) ve karbonun (C) bileşiminden elde edilmektedir. Bileşiğin nihai hali, sinterleme sürecini zorlaştıracak oranda güçlü bir kovalent bağa sahiptir. Bu durum yüksek yoğunluklu silika karbid üretiminde özel işlemlerin tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır.

Silisyum karbür düşük yoğunluğu, termal şoklara yüksek dayanıklılığı ve yüksek sertlik değerleriyle balistik koruyucu malzeme imalinde yaygın olarak kullanılan bir maddedir.

Silisyum karbür zırh seramiği üretiminde basınçsız sinterleme, sıcak baskı, reaksiyon bağlama olmak üzere üç yöntem izlenebilmektedir. Basınçsız sinterleme yönteminde 2.000 °C gibi yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulduğundan zor bir imalat yöntemidir. Sıcak baskı, zırh seramiği üretimi için başarılı bir yöntemdir ancak maliyeti yüksektir. Reaksiyon bağlama tekniği ile üretim göreceli olarak ucuz olmakla beraber, bu yöntem kullanılarak üretilen seramik zırhların balistik koruma performansı, diğer yöntemler ile üretilen silikon karbid plakalara oranla daha düşüktür. Ayrıca yüksek ısı ve voltaja dayanıklılığı, elektronik sanayisinde yarı iletken imalinde tercih edilmesine neden olmaktadır (Hedef Balistiği Bilimi, 2017).

Silisyum karbürün temel malzeme özellikleri:

- Yoğunluğu: 3,1 g/cm³
- Erime Noktası: 2.730 °C
- Buharlaşma Noktası: 2.700 °C
- Sertlik değeri, Mohs cetveline göre 9,2'dir (2.800 kg/mm²).
- Mekanik aşınmaya karşı dirençlidir.
- Termal şoklara karşı yüksek dayanımlıdır.

2.3.1.3. Bor Karbür (Boron Karbid) (B4C)

Bor karbür (B₄C), elmas ve kübik boron nitrattan sonraki en sert malzemedir. Bor ve karbon elementlerinin kimyasal yöntemler ile birleşiminden elde edilmektedir. Günümüzde bilinen formülü 1930 yılında geliştirilmiştir.

Bor karbür özellikle hareket kabiliyeti ve ağırlık konularında kısıtlamanın fazla olduğu kişisel ve hava araçları zırhlarının imalinde öncelikli olarak tercih edilmektedir. Ayrıca bor karbürün, yüksek kimyasal aşınma değerlerine ve yüksek ısıya dayanıklılığı ile nötron emme kabiliyetinin yüksekliğine sahip olması, çok geniş bir kullanım alanında değerlendirilmesini sağlamıştır (Hedef Balistiği Bilimi, 2017).

Bor karbürün balistik koruma amaçlı olarak en uygun imalat tekniği sıcak baskıdır. Ayrıca bazı bor karbür örnekleri zırh uygulamaları için reaksiyon bağlama yöntemi ile de üretilebilmektedir. Bor karbür zırhın en önemli özelliği, yüksek sertlik derecesinden dolayı, zırha isabet eden mermi çekirdeği ile zırhın kendisinin de parçalanmasıdır. Bu nedenle oluşan şok dalgaları ile ikincil kırıklar veya şarapnellere karşı, bor karbür plaka, mutlaka hem darbe yüzeyinden hem de arka yüzeyinden desteklenmelidir (Hedef Balistiği Bilimi, 2017).

Bor karbürün temel malzeme özellikleri:

- Yoğunluğu: 2,51 g/cm³
- Erime Noktası: 2.450 °C
- Buharlaşma Noktası: 3.500 °C
- Sertlik değeri, Mohs cetveline göre 9,5'tir.

Bor karbür düşük yoğunluk ve yüksek sertlik değerinden ötürü günümüzde balistik koruyucu malzeme yapımında tercih

edilen bir maddedir. Bu üstün özelliklerine rağmen bor karbür, çok yüksek dinamik basınçlar altında ~20 GPa (çok yüksek hızdaki zırh delici kurşunlar) amorfizasyona uğramakta, mukavemeti düşerek gevrek olarak kırılmaktadır (Chen, 2016; Kafkaslıoğlu Yıldız, 2019).

2.3.1.4. Titanyum diborür (TiB₂)

Titanyum diborür (TiB₂), doğada doğal olarak bulunmayan, titanyum ile borun elektro-kimyasal reaksiyonu ile üretilen bileşiminden elde edilen, mekanik aşınmaya karşı çok dayanıklı, yüksek sertlikte ve göreceli olarak yoğun bir seramiktir. Sinterleme işlemi ile üretim yapmak güç olduğundan sıcak pres yaygın olarak tercih edilmektedir. TiB₂, balistik korumada çok başarılı olmakla beraber, sıcak pres ile üretilen silisyum karbürü oranla yaklaşık dört kat daha maliyetlidir (Hedef Balistiği Bilimi, 2017).

Titanyum diborürün temel özellikleri:

- Yoğunluğu: 4,52 g/cm³
- Erime Noktası: 2.970 °C
- Buharlaştırma Noktası: 3.500 °C
- Sertlik değeri, Mohs cetveline göre 9,3'tür.

2.3.2. Destek Plakası ve Laminasyon Materyali

Seviye-IV koruyucu zırhlarda Bölüm 2'de bahsi geçen seramik plakaları UHMWPE, aramid, karbon veya bunlardan oluşan hibrid kumaşların desteklemesi gerekmektedir. Epoksi reçine emdirilmiş cam elyaf ise plakalar arasında laminasyon materyali görevi görebilmektedir.

Tablo 4 incelendiğinde destek plakası olarak aramid kullanılması aynı koruma düzeyinde UHMWPE'ye göre daha ağır zırh üretilmesine neden olabilir.

Tablo 4. Aramid ve UHMWPE kullanılan seramik zırhların balistik test sonuçlarının kıyaslanması

Zırh Malzemesi	Atış Hızı (m/s)	Delinme	Çöküntü (mm)	Ağırlık (g)
Seramik + 50 kat UHMWPE kumaşı	1- 872 2- 874 3- 876	Yok	38 32 37	2707
Seramik + 30 kat Aramid kumaşı	1- 888 2- 868 3- 877	Yok	36 32 35	2820

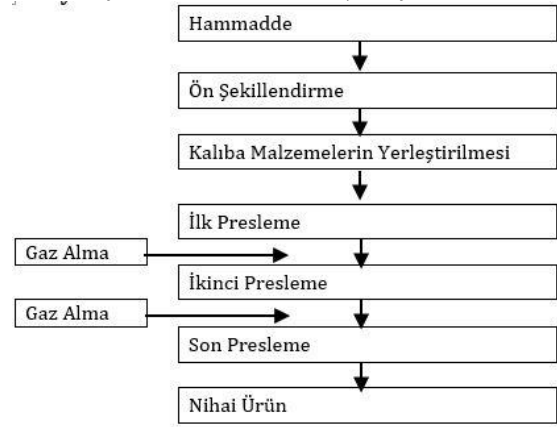
Destek malzemesinin Tablo 5'te belirtilen özellikleri koruyucu zırhın ağırlığını ve kalınlığını belirlemektedir.

Tablo 5. Yüksek performanslı liflerin bazı teknik özellikleri (Reddy, vd., 2019)

Malzeme	E-glass	S-glass	Aramid (Kevlar KM2)	UHMWPE (Dyneema SK-99)
Yoğunluk (g/cm ³)	2,54	2,46	1,44	0,97
Çekme Mukavemeti (MPa)	3,1-3,5	3,4-4,6	3,6-4,2	3,8-4,1
Çekme Modülü (MPa)	72-78	88-91	84-90	150-155
Kopma Noktasındaki Birim Uzama (%)	3,9-4,2	3,5-5,7	4,3-4,8	3,0-4,0

2.3.3. Destek Plakası Üretimi

Ön şekillendirme yapılan malzeme, ısı ve basınç altında preslenmek suretiyle ürün haline gelmektedir. Bu esnada hammadde üzerinde bulunan reçineden dolayı açığa çıkan gazların alınma işlemi iki periyot halinde yapılmaktadır. Polietilen/Aramid veya bunlardan meydana gelen hibrit plakanın imalat proses şeması, hammadde aşamasından (kumaş halinden) sert plaka haline gelinceye kadar işlem sırasına göre Şekil 10'da sunulmuştur (Alarçin, 2014).



Şekil 10. Yüksek performanslı kumaş esaslı kompozit plaka imalat proses şeması

İkinci aşamada kumaş Şekil 10'da belirtilen proses yardımıyla Şekil 11'de gösterilen 600-1000 tonluk hidrolik preslerde basılarak plaka haline getirilir.



Şekil 11. Kompozit kumaşların üretiminde kullanılan hidrolik pres ve sert plaka haline gelen UHMWPE kumaş katmanları

Presleme prosesi balistik koruyucu plaka üretiminde büyük önem arz etmektedir. Preslenerek üretilen plakalar ile preslenmeden üretilen plakaların performanslarını karşılaştırmaya yönelik yapılan çalışma (Candan, 2007) sonucu elde edilen bulgular:

Preslenerek üretilen zırh plakalarında elde edilen ortalama mermi hızı değeri, preslenmeden üretilen zırh plakalarında elde edilen hız değerinden %22 daha büyüktür.

Preslenerek üretilen zırh plakalarında elde edilen ortalama çöküntü değeri, preslenmeden üretilen zırh plakalarında elde edilen ortalama çöküntü değerinden %65 daha küçüktür.

Preslenerek üretilen zırh plakalarının ağırlığı, preslenmeden üretilen zırh plakalarının ağırlığından daha hafiftir.

2.3.4. Plakaların Birleştirilmesi ve Seviye-IV Plaka Üretiminin Tamamlanması

Hidrolik preste polietilen plaka basım işleminden sonra seramik zırh ile koruyucu ve darbe sönümleyici malzemelerin dikkatli bir şekilde birleştirilmesi gerekmektedir. Şekil 7’de gösterilen sıraya dikkat edilerek ara yüzeylerde epoksi reçine ve cam elyafı kullanılıp laminasyon işlemi gerçekleştirilmiş olur.

Bu işlemler esnasındaki en büyük sorun; tüm plakaların preslenmesi esnasında seramik plakada kılcal çatlakların oluşmasıdır. Bunu önlemek için hidrolik pres basıncı optimum düzeyde tutulmalıdır. Diğer bir sorun ise uygun yapıştırıcı kullanılmamasından kaynaklanan plakalar ile yüzeyler arasındaki zamanla meydana gelen ayrışmadır. Ayrıca ürünün test aşamasında, plakalar arasındaki sertlik farklılığı ve bunların birbirine düzgün yapışmamasından kaynaklanan plakalar arası kaymadan dolayı test sonucunu olumsuz yönde etkileyen durumlar söz konusu olabilmektedir.

3. Balistik Koruma Standartları Ve Testleri

3.1. Balistik Koruma Standartları

Dünyada balistik koruyuculuğu test etmek için birçok standart bulunmaktadır. Yaygın olarak kabul edilen standartlar NIJ (The US National Institute of Justice) ve HOSDB (UK Home Office Scientific Development Branch) tarafından kabul edilen standartlardır. Bunun dışında NATO ve Türk Standartları

Enstitüsü tarafından da çeşitli askeri standartlar geliştirilmiştir (Bozdoğan vd., 2015).

Balistik koruyucular için kullanılan standartlar şunlardır:

NIJ-STD-0101.04: Ballistic Resistance Of Personnel Body Armor (Kişisel Vücut Zırhının Balistik Direnci)

NIJ-STD-0101.06: Ballistic Resistance Of Personnel Body Armor (Kişisel Vücut Zırhının Balistik Direnci)

NIJ-STD-0108.04: Ballistic Resistance Of Protective Materials (Koruyucu Malzemelerin Balistik Direnci)

STANAG 2920: Ballistic Test Method For Personnel Armor (Kişisel Zırh için Balistik Test Yöntemi)

HOSDB (2007): Body Armour Standards for UK Police (Birleşik Krallık Polisi için Vücut Zırhı Standartları)

GOST R 50744 95: Armour clothes. Classification and General Technical Requirements (Zırh kıyafetleri. Sınıflandırma ve Genel Teknik Gereksinimleri)

VPAM: Vereinigung der Prüfstellen für angriffshemmende Materialien und Konstruktionen (Saldırıya Dayanıklı Malzemeler ve Yapılar için Test Merkezleri Birliği)

TS 11164: Balistik Koruyucu Vücut Zırhı

TS 13349: Askerî Zırhlar - V50 Balistik Hız Deneyi

MIL-A-46103 C: Light Weight, Ceramic Faced Composite Armor Procedure Requirements (Hafif, Seramik Yüzlü Kompozit Zırh Prosedürü Gereksinimleri)

MIL-B-44053 A: Body Armor, Fragmentation Protective Vest, Ground Troops (Vücut Zırhı, Parçacıklara karşı Koruyucu Yelek, Kara Birlikleri)

MIL-STD-662 F: V50 Ballistic Test For Armor (Zırh İçin V50 Balistik Testi)

UK/SC/4697: The Ballistic Testing Of Fragment Protective Personnel Armors (Parçacık Koruyucu Personel Zırhlarının Balistik Testi)

PPAA STD-1989-05: Personal Protective Armor Association Testing Standards For Ballistic Resistance Of Personal Body Armors (Kişisel Vücut Zırhlarının Balistik Direnci için Kişisel Koruyucu Zırh Derneği Test Standartları)

MIL-P-46199: Aluminium Oxide Ceramic (For Use in Armor Composite) (Alüminyum Oksit Seramik -Zırhlı Kompozitlerde Kullanım için)

UL 752: Ballistic Resistance Equipment (Balistik Direnç Ekipmanı)

3.1.1. NIJ-STD-0101.04 ve NIJ-STD-0101.06 Standartları

NIJ-STD-0101.04 ve NIJ-STD-0101.06 standartları günümüzde yaygın kullanılan standartlar olup, bu standartlarda, malzemenin hangi koruma seviyesi içerisinde test edileceği ve ne kadar koruma sağlayacağı gibi detaylara yer verilmektedir (Bozdoğan vd., 2015).

NIJ 0101.04 standardının amacı, asgari performans şartlarını ve insan vücudunu silah ateşine karşı korumayı amaçlayan kişisel vücut zırhının balistik performansı için uygulanılacak test yöntemlerini açıklamaktır (Bozdoğan vd., 2015).

NIJ 0101.06 standardı [16], Amerikan Adalet Bakanlığı Ulusal Adalet Enstitüsü ve Ulusal Standart ve Teknoloji Enstitüsü (NIST) tarafından ateşli silahlara karşı koruma sağlayan balistik koruyucu yeleklerin minimum performans gerekliliklerini ve test metotlarını tanımlamak amacıyla 2005 Eylül ayında NIJ 0101.04 standardı yerine geliştirilmiştir.

NIJ 0101.06 standardı yerine ise NIJ 0101.07 standardının geliştirilmesi amaçlanmaktadır ancak bu yeni standart henüz taslak aşamasındadır (URL-3, 2019 & URL-4, 2017).

NIJ 0101.06 standardında koruma seviyeleri, tehdidi oluşturan mermi çekirdeğinin yapısal özellikleri, kütlesi, açısı ve isabet hızına göre beş sınıfa ayrılmıştır (Tablo 6). Bu standart, beş koruma seviyesine ek olarak kullanıcı birimin veya üretici firmanın tanımladığı özel tehditlere göre test yapılmasına da müsaade etmektedir.









NIJ 0101.06 standardında esnek balistik koruyucu vücut zırhı olarak isimlendirilen balistik koruyucu yelekler için Tip IIA Tip II ve Tip IIIA olmak üzere üç koruma seviyesi tanımlanmıştır. Uzun namlulu silahlara karşı olarak NIJ 0101.04 standardında da olduğu gibi Tip III ve Tip IV olmak üzere iki koruma seviyesi yer almaktadır.

NIJ 0101.06 standardının önceki tüm NIJ balistik koruyucu yelek ve plaka standartlarından en önemli farkı, kullanıma bağlı olarak balistik koruyucu malzemede yaşanan yıpranmaların koruma özelliğine olan etkilerinin incelendiği “Şartlandırma” sonrası testlerin tanımlanmasıdır.

NIJ 0101.06 standardında “Tan Delinme (Perforation)” tanımı aşağıda yer alan üç durumdan birinin meydana gelmesi halinde gerçekleşmektedir:

- Mermi çekirdeği veya parçalarının ya da zırha ait malzemelerin çöküntü ölçme kilinin içerisine girmesi,
- Balistik koruyucu plaka ve yelek ile çöküntü ölçme kutusu boyunca delik oluşması,
- Mermi çekirdeğinin bir parçasının balistik koruyucu yeleğin çöküntü ölçme kiline bakan yüzeyinden görünmesi.

Tablo 6. NIJ 0101.06 standardında belirtilen balistik koruyucular için koruma seviyeleri.

Koruma Seviyesi	Tehdit Tanımı	Mermi Çekirdeği Özelliği		Test Mesafesi (m)	Travma Derinliği (maksimum) (mm)	
		Yapısal Özellikler	Kütlesi (g)			
II-A	 9x19 mm	Tam Metal Gömlekli, Yuvarlak uçlu, Kurşun nüveli (FMJ RN)	8,0	373±9,1	5	44
	 .40 S&W	Tam Metal Gömlekli, Küt uçlu, Kurşun nüveli (FMJ)	11,7	352±9,1		
II	 9x19 mm	Tam Metal Gömlekli, Yuvarlak uçlu, Kurşun nüveli (FMJ RN)	8,0	398±9,1	5	44
	 .357 Magnum	Gömlekli, Yumuşak Küt uçlu, Kurşun nüveli (JSP)	10,2	436±9,1		
III-A	 .357 Sig	Tam Metal Gömlekli, Düz uçlu, Kurşun nüveli (FMJ FN)	8,0	448±9,1	5	44
	 .44 Magnum	Yarı Gömlekli, Oyuk uçlu, Kurşun nüveli (SJHP)	15,6	436±9,1		
III	 7,62x51 mm	Tam Metal Gömlekli, Kurşun nüveli (NATO FMJ)	9,6	847±9,1	15	44
IV	 .30 AP (M2)	Tam Metal Gömlekli, Sivri uçlu, Zırh Delici (AP)	10,8	878±9,1	15	44

NIJ 0101.06 standardında balistik testlerin şartlandırma altında yapılması esas olduğundan NIJ sertifikasyon testleri sırasında gereken numune sayısı önceki standartlardan daha fazladır. Tip IIA, II, IIA için 28 adet, Tip III ve Tip IV için ise 14 adet Yumuşak/Elastik balistik koruyucu yelekler numunesine ihtiyaç duyulmaktadır. Tip III koruma seviyesi için 9 adet ve Tip IV koruma seviyesi için 7’den 37 adede kadar Sert Plaka numunesine ihtiyaç duyulmaktadır. NIJ 0101.06 Standardına göre test atışlarının 21 ± 2,9 °C ortam sıcaklığında ve %50 ± %20 bağıl nemde yapılması gerekmektedir. Her bir 6 veya 12 atışlık seriler sonrasında çevre koşulları ölçülmelidir.

3.1.2. HOSDB BAS 2007 Standardı

HOSDB (Home Office Scientific Development Branch) İngiliz İçişleri Bakanlığı Bilimsel Gelişim Birimi tarafından hazırlanan Balistik Koruyucu Yelek Standardı [12], Birleşik Krallık polis teşkilatları için geliştirilmiştir.

Amerikan standartlarından farklı tehdit ve koruma seviyeleri ile çöküntü değerleri belirlenmiştir. Tehdit seviyeleri genel olarak NIJ ve VPAM standartlarından daha hafiftir. Balistik koruyucu yelekler “Alımlara Esas Testler”, “Ürün Sertifika Testleri” ve “Fiili Kullanım Testleri” olmak üzere üç farklı tip test tanımlanmıştır.

HOSBD BAS 2007 Standardına göre koruyucu yelekler renk kodları ile tanımlanmaktadır. Kırmızı üçgen şekilli etiket sadece bıçaklara karşı koruma sağlayan yeleklerde, mavi daire şekilli etiket sadece balistik koruyucu sağlayan yeleklerde ve yeşil kare şekilli etiket hem bıçaklara hem de balistik koruma sağlayan

yeleklerin tanımlanmasında kullanılmaktadır. Yeleğin, şiş ve benzeri sivri nesnelere karşı da koruma sağlaması durumunda etikette ayrıca belirtilmektedir.

Bir balistik yeleğin hayati 5 organı tam olarak koruması ve taşıyıcı kılıf içerisinde en fazla 15 mm hareket payı ile yerleşmesi gerekmektedir. Test edilecek balistik koruyucu yeleklerin balistik paketleri, testlerde 220g/m²'den daha yoğun olmayan tek kat taşıyıcı içerisine yerleştirilecektir.

Söz konusu standartta isabet sonrası oluşan çöküntü değerinin ölçülmesinde Roma Plastina No.1 yağlı kil kullanılmaktadır. Kil, 420 mm × 350 mm × 100 mm ebatlarındaki metal veya ahşap kutuya içerisinde hava kabarcığı kalmayacak şekilde yerleştirilmektedir. Kil, testten en az 3 saat önce 30 °C sıcaklıkta şartlandırılması ve akabinde kalibrasyon prosedürünün uygulanması gerekmektedir. Kil testler sonrasında deforme olmasa dahi mutlaka 6 aylık dönemler halinde yenilenmelidir.

3.1.3. VPAM BSW 2006 Standardı

VPAM BSW 2006 standardı (Hedef Balistiği Bilimi, 2017) kapsamında tanımlanan Balistik koruyucu yelekler, hem kısa ve uzun namlulu ateşli silah mermi çekirdeklerinin vücuda girmesini engelleyebilmeli, hem de darbeye bağlı travma (çöküntü) hayati yaralanmaya neden olacak seviyede olmamalıdır.

Standartta göre balistik koruma sağlayan tekstil malzemesi, darbeye karşı dayanıklı diğer malzemeler ile birlikte kullanılarak da koruma sağlayabilir veya koruma seviyesi artırılabilir. Ayrıca bu standart kapsamında delici aletlere karşı koruma sağlayan koruyucu malzemelerin, balistik koruyucu malzemeler ile birlikte kullanılması mümkündür.

VPAM BSW 2006 standardı 12 Koruma Seviyesine kadar koruma sağlamaktadır.

3.1.4. GOST-R 50744-95 Balistik Koruyucu Giysi Standardı

GOST-R 50744-95 Balistik Koruyucu Giysi Standardı [9], Rusya Federasyonu ve eski Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği üyesi devletler tarafından balistik koruyucu yeleklerin ateşli ve kesici/ delici aletlere karşı koruma özelliklerini tespit etmek amacıyla 1995 yılında hazırlanmıştır.

GOST-R 50744-95 Standardında ateşli silahlara karşı dokuz seviye, kesici/delici silahlara karşı ise tek seviye tanımlanmıştır. Testlerde kullanılacak mermi çekirdekleri, standartta Rus Ordu Standardı Numarası ile tanımlanmıştır.

Kısa namlulu silah mühimmatlarına karşı 5 metre mesafeden, uzun namlulu silah mühimmatlarına karşı 10 metreden atışlar yapılmaktadır. Ancak teknik şartnamede istenmesi halinde uzun namlulu silah mühimmatları ile de 5 metre mesafeden atış yapılması mümkündür. Ateşli silah testleri sonrasında isabet noktalarının arkasında izin verilen çöküntü değeri 16 mm'dir. Kısa namlulu silah mühimmatları ile 5 isabete kadar test yapılırken uzun namlulu silah mühimmatları ile 3 isabete kadar test yapılmaktadır.

Standart kapsamında balistik koruyucu malzemelerin -40 °C ile +40 °C sıcaklıkta ve %100 nem altında şartlandırıldıktan sonra atışlı testlere tabi tutulmaktadır. Ayrıca süresi teknik şartnamede belirlenmek kaydıyla suya daldırma testide çevresel şartlandırma kapsamında yapılabilmektedir.

Kesici/delici aletlere karşı yapılacak testlerde, kesici/delici aletin zırha isabet anındaki kinetik enerjisi 45 – 50 J arasında olacaktır ve test aleti ucunun balistik koruyucu malzemenin arka yüzeyinden 5mm'den daha fazla çıkmaması gerekmektedir.

3.2. Balistik Koruma Testleri

3.2.1. Balistik Limit V50 testi

V50 testi (Hedef Balistiği Bilimi, 2017) balistik koruyucu malzemenin %50 oranında tam delindiği ve kısmi delindiği isabet hızının tespit edilmesi amacıyla yapılan testtir. V50 testinde en az 6 atış olmak üzere çift sayılarda atış yapılır. Kısmi delinmelerde mermi çekirdeğinin hedefi bir yüzeyden diğer yüzeye kadar delmemesi ve isabet sonrasında oluşan çöküntü değerinin de 44mm'den fazla olmaması gerekmektedir. Testler sırasında kısmi delinmenin meydana geldiği en yüksek hız değeri ile tam delinmenin meydana geldiği en düşük hız değerleri kayıt edilir.

Tam delinme meydana getiren en düşük hız ile kısmi delinmenin meydana geldiği en yüksek hız değeri arasındaki fark 40 m/s'den daha fazla olmamalıdır. Bunun manası toplam altı atışın 40 m/s'lik bir dağılım içerisinde kalması gerektiğidir.

Bunun sağlanamaması durumunda; kısmi delinmenin meydana geldiği en yüksek beş hız değeri ile tam delinmenin meydana geldiği en düşük beş hız değeri tespit edilir ve toplam 10 adet atışa ait hızları arasındaki farkın 50 m/s'den daha fazla olmaması gerekmektedir.

Kısmi ve tam delinmenin meydana geldiği isabetler arasındaki hız farkının 50 m/s'den fazla olması halinde; kısmi delinmenin meydana geldiği en yüksek yedi hız değeri ile tam delinmenin meydana geldiği en düşük yedi hız değeri tespit edilir ve toplam 14 adet atışa ait hızları arasındaki farkın 60 m/s'den daha fazla olmaması gerekmektedir.

3.2.2. Stanag 2920 Kişisel Zırh için Balistik Test Yöntemi

Stanag 2920 test standardında (Bozdoğan vd., 2015), NATO Standartlaştırma Anlaşması çerçevesinde geliştirilmiş personel zırhları için balistik test metodları açıklanmaktadır. Test sırasında tek çeşit mermi kullanılıyor olması sebebiyle, koruyucuların birbirleriyle karşılaştırılması da mümkün olabilmektedir. US-MIL-P-46593'te tanımlanan parçalanma taklit edici parçacıklar (Fragment Simulating Projectiles) serisinden biri kullanılmaktadır. Genellikle 5,385 kalibrelik, 1,102 gramlık mermiler tercih edilmektedir.

Test edilecek numunenin test öncesinde, 20±2 oC ve %65±5 bağıl nem içeren ortamda kondisyonlanması gerekmektedir. Test sırasında, balistik koruyucu malzemeye en az 6 mermi atılmakta ve bunların hızları ölçülmektedir.

Balistik koruyucu malzemenin normalinden 5°'den daha fazla sapan mermiler balistik hız sınırının hesaplanmasında kullanılmamaktadır. Her bir atış, atış yapılmış noktalar veya deformasyonun olduğu noktalardan en az 30 mm uzaklıkta olmalıdır. Hedeften tamamıyla geçen veya hedefin arkasında yırtılmaya neden olan mermiler balistik koruyucu yapıyı tamamıyla delmiş sayılmaktadırlar.

Bu standartta, aşağı ve yukarı hız metodu (up and down method) kullanılarak mermi atış hızları ayarlanmaktadır. İlk

mermiye zırhın V50 balistik hız sınırı değerinde hız kazandırılmaktadır. İlk mermi zırh yüzeyinde tamamen delme oluşturursa, ikinci mermi ilk mermiye göre 30 m/s daha az hızlı olacak şekilde atılmaktadır. İlk mermi zırh yüzeyinde kısmi delme oluşturursa, ikinci mermi ilk mermiye göre 30 m/s daha fazla hızlı olacak şekilde atılmaktadır. Balistik zırhı delen ilk atışlar tamamlandıktan sonra, atışlar mermi hızları 15 m/s aşağı ya da yukarı büyüklükte olacak şekilde gerçekleştirilmektedir. V50 balistik sınır hızı elde etmek için standartta yer alan prosedüre göre ateş etmeye devam edilmektedir.

Belirli bir sayıdaki atıştan sonra, sonuçların 3 tanesi kısmi delinmenin gerçekleştiği en yüksek hızlardan, diğer 3 tanesi ise tamamıyla delinmenin gerçekleştiği en düşük hızlardan olmak üzere toplam altı hız değeri hesaplamaya alınmaktadır. Kısmi delinmenin ve tam delinmenin gerçekleştiği gruplarda tespit edilen en yüksek ve en düşük hız değerleri arasındaki farkın ise en fazla 40 m/s olması gerekmektedir. Alınan düzgün çarpmalardan ortalama değer bulunarak V50 balistik sınır hızı hesaplanmaktadır.

3.3. Özel Standartlar ve Test Yöntemleri

Ülkelerin özel birimlerinin ihtiyaçlarına yönelik olarak düzenlenen ve belirli ürünleri kapsayan Özel Standartlar ve Test Yöntemleri mevcuttur. Özel ihtiyacın olması durumunda, tam test atışları ve kullanılabilir asgari referans etki hızları gibi parametrelerin de belirtilmesi gerekmektedir.

Özel standartlara örnek olarak Meksika Milli Savunma Sekreterliğine ait olan Nivel Especial FAVE01-01 standardının [1] detayları Tablo7’de görüldüğü gibidir.

Tablo 7. Meksika Milli Savunma Sekreterliği Balistik Plaka Seti FAVE01-01 Özel Standardı

Genel Şartlar			
Parametre	Özellikler	Tolerans	Test Metodu
Seramik Yapısı	Monolitik	Yok	MPIFAVE -LB-04 "Seramik yapısı"
Seramik Materyali	Silisyum karbür / bor karbür (Alümina veya çelik kabul edilemez)	Balistik koruyucu özelliğe sahip seramik malzemeye eşit veya daha üstün özellikler	Akredite olmuş herhangi bir laboratuvarın seramik zırh malzemesi komponent tayin yöntemi uygundur.
Ön/Arka Plaka Formu	Tek kavisli SAPI (Hafif Silah)	Kenardan kesilmiş kısımlara ait ölçüler: 2,55-4,45 cm	D-JPB1012-SA-2021 "Balistik

	Koruyucu Eklentisi)	x 4,55-6,45 cm	Plaka Form ve Ölçüleri)
Yan Plaka Formu	Tek kavisli tam ölçü	Yok	
Ölçüler (Seramik Plaka ve Destek Malzemesi; Aramid/UHM WPE ayrı ayrı olmak üzere)	Ön/Arka Plaka: 25,40 cm x 30,48 cm	0,5 cm	MPIFAVE -LB-02-A "Balistik Koruma Alanı ve Ölçülerinin Belirlenmesi"
	Yan Plaka: 18 cm x 18 cm		
Koruma Alanı (Seramik Plaka ve Destek Malzemesi; Aramid/UHM WPE ayrı ayrı olmak üzere)	Ön/Arka Plaka: 717 cm ²	Minimu m	
	Yan Plaka: 319 cm ²		
Plaka kalınlığı	2,5 cm	+0,5 cm -1,0 cm	
Ağırlık	Ön/Arka Plaka: 3,02 kg	Yan Plaka: 1,26 kg	X:Koruma alanı değeri hesaba katılarak aşağıdaki formüle göre maksimum plaka ağırlığı hesaplanır: P=X.0,00421 199 kg/cm ²
Kullanım Ömrü	7 yıl	Minimu m	Balistik plakalar için ortalama yaşam ömrü

Delinme ve Travma Testleri			
Parametre	Göçük Sınırı	Tolerans	Test Metodu
a. Her biri 9,65 g ± 0,13 g nominal ağırlığında olan 7,62 mm FMJ B.N F.N	40 mm	Maksimu m	PR.E.BA L. "D.G.F.A.V.E kapsamında Plakaların Değerlendiril

mermisi ile 6 atış 847 m/s ± 9,1 m/s			mesi Prosedürü"
b. 9,52 g ± 0,13 g nominal ağırlığında olan 7,62 mm FMJ B.P (Zırh Delici) F.N mermisi ile 1 atış 878 m/s ± 9,1 m/s	40 mm	Maksimu m	Nemli balistik plakalar.
c. 9,52 g ± 0,13 g nominal ağırlığında olan 7,62 mm FMJ B.P (Zırh Delici) F.N mermisi ile 1 atış 878 m/s ± 9,1 m/s	40 mm	Maksimu m	PR.E.BA L. Şartlandırılmalı ve Nemli balistik plakalar.
V50 Balistik Limit Testleri			
Parametre	Özellik ler	Tolerans	Test Metodu
d. 3 adet plakaya 9,52 g ± 0,13 g ağırlığında olan 7,62 mm FMJ B.P (Zırh Delici) F.N mermisi ile 3 atış	V50 900 m/s	Minimu m	PR.E.BA L. Kuru balistik plakalar.

4. Sonuç

Hızla gelişen silah teknolojisi ile birlikte balistik bilimi her geçen gün daha da önem kazanmaktadır. Bu nedenle balistik yelekler, vücut zırhları, başlıklar, balistik koruma amacıyla kullanılan yüksek mukavemetli kumaşlar ve seramik zırhlar gibi malzemelerden istenilen performans özellikleri de artmaktadır. Konuyla ilgili olarak ihtiyaçları karşılayabilecek nitelikte yeni malzemelerin araştırmalarına yoğun bir şekilde devam edilmektedir. Daha yüksek performansla sahip farklı özellikteki bu materyallerin yanı sıra balistik koruyuculuk sağlayan yeni sistemler üzerinde de önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Özellikle tekstil takviyeli kompozitler kullanılarak geliştirilen ürünlerin kullanım alanı yaygındır. Ancak zırh delici mermilere karşı en etkin korumanın seramik zırhlarla birlikte tekstil takviyeli kompozitler kullanılarak sağlandığı görülmektedir.

Geliştirilen malzemeler ve ürünler, belirli standartlar kapsamında balistik performans testlerine tabi tutulmakta ve en güvenli korumayı sağlayacak yapılar tercih edilmektedir. NIJ

Std. Seviye-IV balistik koruyucu plakalar en üst düzeyde koruma sağlayan kişisel koruyucu zırhlardır fakat personelin üzerinde önemli bir ek kütle oluştururlar. Bu nedenle istenilen koruma seviyesi sağlanırken özellikle personelin hareket kabiliyetini arttırmak amacıyla koruyucu malzemenin ağırlığını azaltma çalışmaları en önemli AR-GE çalışmalarını oluşturmaktadır. Özellikle metal ağırlıklı diğer kompozit materyallere kıyasla, seramik kompozit türleri ve polimer-tekstil takviyeli kompozit malzemeler koruma seviyesi/ağırlık performans kriterini günümüz teknolojisi ile en mükemmel şekilde dengelemektedir.

Kaynakça

- [1] Adquisicion de Placas Balisticas Stand Alone Nivel Especial Fave01-01 (Acquisition of Ballistic Plates Stand Alone Special Level Fave01-01), Nov. 2020, Mexico Secretariat of National Defense.
- [2] Akella, K. 2020. Multilayered Ceramic-Composites for Armour Applications. Mahajan Y., Roy J. (eds) Handbook of Advanced Ceramics and Composites. Springer, Cham.
- [3] Alarçın, S. 2014. Savunma Sanayiinde Kullanılan Kompozit Malzemelerin Balistik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- [4] Baydaroğlu, V. 2018. Balistik Malzeme Üretimine Yönelik B4C+SiC Takviyeli Al 7075 Kompozitlerde Optimum Katkı Oranının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.
- [5] Bozdoğan, F., Üngün, S., Temel, E. & Süpüren Mengüç, G. 2015. Balistik koruma amaçlı kullanılan tekstil materyalleri, özellikleri ve balistik performans testleri. Tekstil ve Mühendis, 22: 98, 84-103.
- [6] Bracamonte, L., Loutfy, R., Yılmazcoban L.K. & Rajan. S.D. 2016. Design, Manufacture and Analysis of Ceramic-composite Armor. Ashok Bhatnagar, In Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Lightweight Ballistic Composites (Second Edition), Woodhead Publishing, s. 349-367.
- [7] Candan, C. 2007. Hafif Silahlara Karşı Preslenerek ve Preslenmeden Üretilen Yüksek Yoğunluklu Polietilen (UHMW-PE) Zırh Plakalarının Terminal Balistik Özelliklerinin İncelenmesi, K.K.Tek.ve Prj. Ynt. Daire Başkanlığı, Ankara, 8. Uluslararası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı.
- [8] Chen, X. 2016. Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection, Woodhead Publishing.
- [9] GOST-R-50744-95: Armour clothes. Classification and General Technical Requirements
- [10] Hazell, P. J. 2016. Armour Materials, Theory, And Design, CRC Press, Boca Raton, Fl
- [11] Hedef Balistiği Bilimi, 2017. Adli Bilimlerde Silah ve Balistik, s. 367-462.
- [12] HOSDB: Slash Resistance Standard for UK Police, 2007.
- [13] Kafkaslıoğlu Yıldız, B. 2019. Zırh Uygulamaları için Alümina Seramiklerin Sert Seramik Katkıları ve Metal Faz ile Takviyelendirilerek Üretilmesi ve Karakterizasyonu. Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- [14] Karandikar P., Evans G., Wong S., Aghajanian M. K., Sennett M., 2009. A Review of Ceramics for Armor Applications. In: T., Ohji, A., Wereszcsak, Editors, Advances in Ceramic Armor IV, Wiley & Sons, Inc.

- [15] Krell A. & Strassburger E., 2014. Order of influences on the ballistic resistance of armor ceramics and single crystals. *Materials Science and Engineering, A*, 597, 422-430.
- [16] NIJ Standard-01.01.06 - Ballistic Resistance of Personal Body Armor.
- [17] Rahbek D. B. & Johnsen B. B., 2015. Dynamic Behaviour of Ceramic Armor Systems, Technical Report No: 2015/01485, Norwegian Defence Research Establishment (FFI).
- [18] Reddy P.R.S., Savio S.G. & Madhu V. 2019. Ceramic Composite Armour for Ballistic Protection, Mahajan Y., Roy J. (eds) *Handbook of Advanced Ceramics and Composites*. Springer, Cham.
- [19] Sert, M. 2005. Seramik bazlı kompozit zırh çözümleri, Zırh Teknolojileri Semineri, MSB Arge ve Tekno. D.Bşk.lığı, Ankara, 243.
- [20] TS 11164: Balistik Koruyucu Vücut Zırhı
- [21] TS 13349: Askerî zırhlar - V50 Balistik Hız Deneyi
- [22] USA National Research Council of the National Academies 2011. *Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications*, ISBN: 978-0-309-21285-4.
- [23] URL-1, 2005, <https://www.defenseindustrydaily.com/up-to-160m-for-enhanced-interceptor-vest-protection-updated-0986/>, Erişim tarihi: 22 Nisan 2021.
- [24] URL-2, 2008, <https://www.globalsecurity.org/military/systems/ground/interceptor.htm>, Erişim tarihi: 22 Nisan 2021.
- [25] URL-3, 2019, <https://nij.ojp.gov/media/document/16126>, Erişim tarihi: 24 Nisan 2021.
- [26] URL-4, 2017, <https://www.bodyarmornews.com/nij-standard-010107/>, Erişim tarihi: 24 Nisan 2021.