



**TEKSTİL VE MÜHENDİS**  
**(Journal of Textiles and Engineer)**



<http://www.tekstilvemuhendis.org.tr>

**Balistik Koruma Amaçlı Kullanılan Tekstil Materyalleri, Özellikleri ve Balistik Performans Testleri**

**Textiles Used for Ballistic Protection, Their Properties and Ballistic Performance Tests**

Faruk BOZDOĞAN, Sacide ÜNGÜN, Emrah TEMEL, Gamze SÜPÜREN MENGÜÇ

<sup>1</sup>Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Bornova, İzmir, Türkiye

<sup>2</sup>Ege Üniversitesi, Emel Akın Meslek Yüksekokulu, Bornova, İzmir, Türkiye

Online Erişime Açıldığı Tarih (Available online): 26 Haziran 2015 (26 June 2015)

**Bu makaleye atıf yapmak için (To cite this article):**

Faruk BOZDOĞAN, Sacide ÜNGÜN, Emrah TEMEL, Gamze SÜPÜREN MENGÜÇ (2015):  
Balistik Koruma Amaçlı Kullanılan Tekstil Materyalleri, Özellikleri ve Balistik Performans Testleri,  
Tekstil ve Mühendis, 22: 98, 84-103.

**For online version of the article:** <http://dx.doi.org/10.7216/130075992015229808>



# **BALİSTİK KORUMA AMAÇLI KULLANILAN TEKSTİL MATERYALLERİ, ÖZELLİKLERİ VE BALİSTİK PERFORMANS TESTLERİ**

**Faruk BOZDOĞAN<sup>1\*</sup>**  
**Sacide ÜNGÜN<sup>1</sup>**  
**Emrah TEMEL<sup>1</sup>**  
**Gamze SÜPÜREN MENGÜÇ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Bornova, İzmir, Türkiye  
<sup>2</sup>Ege Üniversitesi, Emel Akın Meslek Yüksekokulu, Bornova, İzmir, Türkiye

Gönderilme Tarihi / Received: 21.10.2014  
Kabul Tarihi / Accepted: 19.02.2015

**ÖZET:** İnsanlar tarih boyunca gerek günlük hayatta gerekse savaş anında korunma ihtiyacı hissetmişler ve bu ihtiyaçlarının sonucu olarak daha iyi korumayı sağlayacak malzemeleri bulabilmek için sürekli olarak yeni arayışlar içerisinde olmuşlardır. Balistik biliminin ortaya çıkması ile birlikte bu alandaki çalışmalar hız kazanmış ve tasarlanan ürünlerin istenilen ihtiyaçları karşılayıp karşılamadıklarının kontrolü daha fazla önem kazanmıştır. Balistik koruyuculuğun etkinliğinin test edilmesi için uluslararası alanda kullanılan çeşitli standartlar bulunmaktadır. Bu standartlar kapsamında balistik koruyucu ekipmanların ve giysilerin balistik performans testleri yapılmakta ve etkinlikleri belirlenmektedir. Bu çalışmada balistik koruma amaçlı tekstil materyalleri ve bunların balistik performanslarının tespitinde kullanılan test yöntemleri hakkında bilgi verilmeye çalışılmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Balistik koruma,  $V_{50}$ , balistik performans testleri, mermi.

## **TEXTILES USED FOR BALISTIC PROTECTION, THEIR PROPERTIES AND BALISTIC PERFORMANCE TESTS**

**ABSTRACT:** People have felt need for protection not only in daily life but also during war time and therefore investigations to find new materials for better protection have been studied by many researchers. With the improvements in “Ballistic Science”, the researches in this area began to increase and the performance tests became more and more important. There are various international standards to test the effectiveness of the ballistic protection. Ballistic protection efficiency of the protective equipments and products are conducted within the scope of these standards. Brief information for textile materials used for ballistic protection and their performance tests are given in this article.

**Key words:** Ballistic protection,  $V_{50}$ , ballistic performance tests, bullet.

\* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: faruk.bozdogan@ege.edu.tr  
DOI: 10.7216/130075992015229808, www.tekstilvemuhendis.org.tr

## 1. GİRİŞ

İnsanoğlu tarih boyunca bir yandan daha gelişmiş silah arayışı içindeyken bir yandan da geliştirilen silahlara karşı korunma konusunda araştırmalar yapmıştır. Bu kapsamda insanları ve donanımları her türlü patlayıcı, kesici tehlikelere karşı koruma amacı taşıyan "balistik zırh" adı altında çeşitli koruyucular geliştirilmiştir [1].

İlk koruyucu giysi ve zırhlar hayvan derilerinden yapılmıştır. Uygarlıklar geliştikçe tahta ve metal zırhlar kullanım alanı bulmaya başlamıştır. Metaller, ortaçağ şövalyeleri tarafından koruyucu giysi olarak kullanılmışlardır [1].

Kurşun geçirmez levha 1500'lerde bilinmesine rağmen ilk yumuşak balistik zırh 1860'larda Kore'de icat edilmiştir [2]. 19. yüzyılın sonlarına doğru Arizona ve Illinois'de yaşayan araştırmacılar kara barut (*black powder*) silahtan sıkılan mermiyi durdurmayı başaran ipekten yapılmış kurşun geçirmez yelek üretmişlerdir. İkinci Dünya Savaşı ise kişisel koruyucu zırhların daha da gelişmesini sağlamıştır [2].

Balistik koruyucu giysilerde naylon lifleri kullanıldığı için bu giysiler oldukça ağır, kullanışsız ve etkisiz kalmışlardır [1]. Önceleri naylon lifi, sahip olduğu yüksek kopma işi değerleri ve sertliği ile ideal bir balistik koruyucu malzeme olarak kabul edilirken, günümüzde balistik koruyuculuk için sertlik faktörünün tek başına yeterli olamadığı tespit edilmiştir [3]. 1960'ın sonlarına doğru yeni liflerin gelişimiyle birlikte gizlenebilir vücut zırhlarının üretimine başlanmıştır [1]. Bu zırhların üretiminde farklı malzemelerin kullanıldığı görülmektedir. Geçmişte geleneksel zırh materyali olarak alüminyum ve çelik gibi materyallerin kullanıldığı, günümüzde ise ipek ve derinin de bu amaçla kullanıldığı görülmektedir. Eski dönemlerde, insan vücudunu balistik etkilerden koruyabilecek en iyi malzemelerin, balistik penetrasyona karşı koyabilecek ve darbe yükünü dağıtabilecek rijit materyaller (çelik, titanyum, seramik plakalar vb) olduğu düşünülürken, sentetik lif teknolojisindeki gelişmelerle birlikte daha iyi balistik koruyuculuk sağlayan sistemler de geliştirilmiştir. Her ne kadar

darbe sırasında oluşan yükün geniş bir alana yayılması hala uygulanan bir yöntem olsa da, darbe enerjisinin koruyucu malzemenin kırılması ve deformasyonu ile birlikte dağıtılması daha iyi ve daha çok tercih edilen bir yöntemdir [3].

1970'lere gelindiğinde yüksek mukavemet özellikleri, ince yapıları ve enine hız yayılımı gösterebilen özellikleri ile kompleks bir balistik koruyuculuk özelliğe sahip olan aramid lifleri ön plana çıktılar. Bu alanda yapılan en büyük gelişme Kevlar®'dan üretilen balistik yelekler olmuştur. 1971-1976 yılları arasında Ulusal Adalet Enstitüsü (NIJ) tarafından, 4 aşamadan oluşan balistik zırh geliştirme projesi için 3 milyon dolarlık bir bütçe ayrılmıştır. Bu projenin birinci basamağında Kevlar lifi kullanılarak üretilen malzemelerin, mermileri durdurma kapasitesi araştırılmıştır. İkinci aşamasında ise farklı kalibre ve hızlardaki mermilerin penetrasyonunu durdurmak için kaç Kevlar katmanına ihtiyaç duyulduğu araştırılmıştır. 1973 yılında bu amaçla yedi katmanlı bir Kevlar zırh tasarlanmış ve polis memurları tarafından sokaklarda denenmiştir. Programın üçüncü basamağı medikal testleri, dördüncü aşaması ise balistik zırhın giyilebilirliğinin ve verimliliğinin bilgisayar ortamında görüntülenmesini içermektedir. Elde edilen sonuçlara göre, merminin girişi kevlar zırh tarafından durdurulabilirse bile merminin yarattığı darbe travmasının kullanıcının hayati organlarına ciddi derecede hasar verebileceği ortaya koyulmuş, Kevlar'ın, kurşun geçirmez balistik zırh malzemesi olarak uygunluğuna kanaat getirilmiş ve 1975 yılında hafifliği de ön planda tutularak 250.000 polis memurlarının tam zamanlı olarak bu zırhı giymelerine karar verilmiştir [4].

1990'lı yıllara gelindiğinde ultra-yüksek moleküler ağırlığa sahip polietilen (UHMWPE) lifleri balistik koruma amaçlı sistemlerde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. 2000'li yıllara yaklaşıırken doğal ve çevre dostu ürünlere olan ilginin artmasıyla beraber balistik koruma alanında da örümcek ipeği lifi kendine önemli bir yer edinmiştir. Balistik amaçlı kullanılan örümcek ipeği lifi, genellikle Güney Amerika'da bulunan "Kara Dul" örümceğinden elde edilen, Kevlar'dan daha mukavemetli ve %270'lik

kopma uzaması değeri ile sıra dışı fiziksel özelliklere sahip bir lifdir [3].

Günümüzde ise balistik koruyucu materyaller olarak hala yüksek performanslı lifler kullanılmaktadır. Geçen süre zarfında, bu amaçla kullanılan koruyucu tekstillerdeki gelişmeler; kullanılan liflerden çok, kumaş yapılarında gerçekleştirilen yapısal değişiklikler üzerine olmuştur. En yoğun çalışılan konu ise balistik darbe karşısında en fazla enerji absorbsiyonunu sağlayan, en verimli kumaş yapısının tasarımı olmuştur. Bu anlamda geleneksel olarak kullanılan iki boyutlu kumaşlar yerlerini üç boyutlu kumaşlara, kompozit malzemelere ve balistik panellere bırakmaya başlamıştır. Balistik amaçla kullanılan materyallerin üçüncü boyuttaki katman yerleşimleri ise önemli bir zırh mühendisliği konusu haline gelmiştir [5].

## 2. BALİSTİK KORUMADA KULLANILAN LİFLER, KUMAŞLAR VE BU KUMAŞLARIN ÇEŞİTLİ YAPISAL ÖZELLİKLERİ

Balistik; uygun bir sistem ile ateşlenen ya da fırlatılan nesnelerin atmosferik koşullarda yerçekiminin de etkisiyle yapmış olduğu hareketi inceleyen bilim dalı olarak tanımlanmaktadır [6]. Günümüzde balistik konusu iç balistik, dış balistik, terminal balistik, yaralanma balistiği ve adli balistik olarak beş alt başlık altında incelenmektedir [7].

Ateşli silahın tetiği çekildikten sonra mermi çekirdeğinin namlu ağzını terk edinceye kadar geçen sürede mermi kovani ve mermi çekirdeğinin durumunu "iç balistik" incelemektedir. Mermi çekirdeğinin namlu ağzından çıktıktan sonra hedefe çarpıncaya kadar geçen zaman içerisinde havanın direnci, mermi çekirdeğinin yer çekimi etkisinde kalması, yere düşüşü, sürüklenişi ve dengesi ile "dış balistik" incelenmektedir. Mermi çekirdeğinin hedefe çarptıktan sonra, duruncaya kadar delme gücü, enerjisini çarptığı cisme iletmesi gibi etkiler "terminal balistik" altında incelenmektedir. Terminal balistiğin bir parçası olup insan ve hayvanlarda meydana gelen yaralar "yaralanma balistiği" altında incelenmektedir. Ateşli silahlarda kullanılmış mermi çekirdekleri ve kovanelerin incelen-

mesi sonucunda merminin belli bir silahtan atıldığını tespit ederek, olaya karışmış diğer silahların ayırımı ise "adli balistik" altında incelenmektedir [7].

Balistik koruma, çeşitli büyüklükte, hızda ve şekilde son teknoloji silah, mermi ve şarapnelere karşı vücut ve başın korunmasını kapsamakta olup askeri tekstiller için gerekli fonksiyonel özelliklerden birisidir. Balistik koruyucu giysiler, mermilerin ve şarapnel parçalarının kinetik enerjilerini absorbe ederek vücudu korumaktadır [8-9].

Balistik yelekler, vücut zırhları ve kasklar, darbe anında insan vücudunu yüksek hızlı darbeler sonucunda oluşacak yaralanmalara karşı korumak amacıyla dizayn edilmiş ürünlerdir [10]. Bunun yanında balistik koruma amacıyla kullanılan yüksek mukavemetli kumaşlar, uçak ve taşıtların iç yapılarında balistik darbelere karşı koruma sağlamak için kullanılmaktadır [8].

Balistik koruma amaçlı kullanılan ilk lif poliamid lifleridir. Poliamid lifleri şarapnelere karşı koruma amacıyla çok katlı olarak kullanılmaktaydı. Bunlar sadece düşük hızlı mermi ve şarapnelere karşı koruma sağlayabilmekte idi. Gerekli koruma düzeyine ulaşabilmesi için çok sayıda katman kullanılması gerektiğinden dolayı çok ağır olmaktadır. Bunlara ek olarak; naylonun ıslanmaya karşı hassas olması ve bu nedenle mukavemetini kaybetmesi nedeniyle balistik özelliği azalmaktaydı [9]. Ancak gelişen teknoloji ile birlikte daha önceleri pek gerek duyulmayan koruyucu giysilere ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır. Koruyucu tekstiller içerisinde yer alan balistik koruyucu tekstillerin üretiminde düşük maliyet, hafiflik ve konforun ön plana çıkmaya başlamasıyla ve sentetik liflerin özel ihtiyaçlara cevap verememesi sebebiyle yeni lifler geliştirilmeye başlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda yüksek mukavemet, yüksek modül ve düşük elastikiyete sahip olan yüksek performanslı lifler geliştirilmiştir [11].

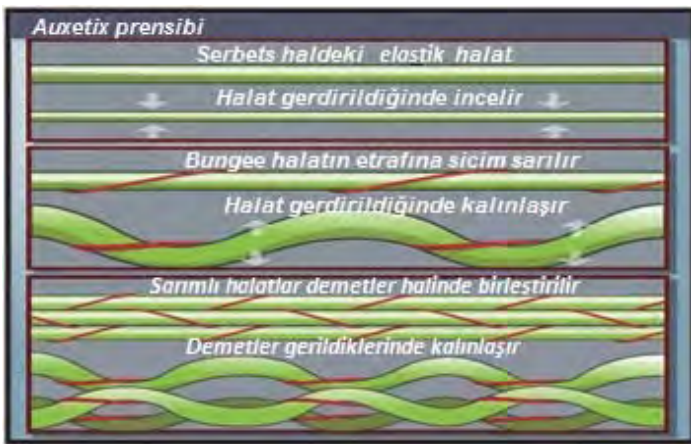
Balistik kumaşların üretiminde aramid (Kevlar, Twaron, Technora), yüksek-molekül-ağırlıklı polietilen (Spectra, Dyneema), Vectran, Polibenzimidazol (Zylon), PIPD (Polypyridobisimidazole) (M5 olarak da bilinmektedir) gibi yüksek mukavemetli lifler, bu



amaçla kullanılan yüksek performanslı liflere birer örnektir. Balistik koruma mümkün olduğu kadar kısa mesafe içinde mermileri tutmayı gerektirdiği için kullanılacak liflerin çok yüksek dayanıma ve düşük elastikiyete sahip olması gerekmektedir [8-12].

Balistik kumaş üretiminde kullanılacak iplikler tek başına darbeye karşı yeterli koruma mukavemetine sahip olmamaktadır. Ancak ipliklerin dokunmasıyla oluşturulan balistik kumaşın mukavemeti, kumaşı oluşturan ipliklerin toplam mukavemetinden daha yüksek değerlere, hatta mukavemet-ağırlık yönünden de çelikten daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu değerler kumaşın örgü şekline, modeline, yapısına, kıvrımına ve kumaşın enerji sönmleme mekanizmalarına bağlı olarak değişmektedir [13].

Piyasada bu amaçla üretilen ticari ürünler bulunmaktadır. Örneğin; Auxetix firması tarafından askeri çadırlar için geliştirilen Zetix darbe hafifletici kumaşların şarapnel parçalarının kumaş yüzeyinden içeri girmesini önleyerek ölüm ve ciddi yaralanmaları önemli ölçüde azalttığı ifade edilmektedir [14]. Firma, Zetix'in gerilime maruz kaldığında daha kalın bir hal alan ve üzerindeki gerilim kaldırıldığında ise eski halini alan "Auxetics" olarak adlandırılan kumaşların bir tipi olduğunu belirtmektedir. Şekil 1'de "Auxetics" in çalışma prensibi yer almaktadır [15].



Şekil 1. Zetix'in çalışma prensibi [15]

Literatürde yer alan bilgiler doğrultusunda, karbon nano tüpler ve örümcek ipeği liflerinin balistik koruma amaçlı olarak kullanıldığı görülmektedir. Her ne kadar, örümcek ipeğinin, balistik amaçlı kullanım sırasında sağladığı yüksek mukavemet bir avantaj

oluştursa da, bu liflerin sahip oldukları yüksek elastikiyetin, balistik amaçlı kullanımlarını sınırlandırdığı görülmektedir [16].

Balistik uygulamalarda seramik liflerinin de kullanıldığı görülmektedir. Yüksek lif sertliği ve mukavemetlerinin yanı sıra, hafif malzeme olmaları bu alanda kullanımlarına imkan vermektedir. Ancak tüm seramik malzemelerde olduğu gibi  $B_4C$  ve  $Si_3N_4$  matrisli kompozitlerin de kırılma sorunu balistik uygulamalarda yaygın kullanımlarını sınırlayan bir etmen olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple seramik-metal kompozit yapıların kullanılması gündeme gelmektedir [17].

Balistik zırhlarda katmanlı yapıların yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Yapılan çeşitli çalışmalarda katmanlı metal yapılar, seramik-kompozit, metal-kompozit veya seramik-metal kompozit yapılar, kumaş ve metal matrisli kompozitler ve sandviç yapıların kullanıldığı görülmüştür [18]. Kompozit malzemeler, sahip oldukları farklı avantajlarının yanı sıra, enerji absorbe edebilme kapasiteleriyle de ön plana çıkmaktadırlar. Polietilen esaslı lifler kullanılarak oluşturulan kompozit yapıların, oldukça üstün balistik performans özelliği gösterdiği görülmektedir [19].

Kompozit zırhlarda imalat teknolojisinde organik matrisli kompozit malzemelerin kullanıma başlanmasıyla birlikte para-aramid ve UHMW-PE (Yüksek yoğunluklu polietilen) malzemelerin sıkça kullanıldığı görülmektedir. Bunların kullanımı, zırhların hafiflik, üstün balistik performans, yüksek enerji sönmleme özelliği, düşük ısı iletkenliği, çok düşük iç deformasyon özelliği, çatlak yayılmasına, korozyon ve kimyasallara karşı yüksek dayanım özellikleri göstermelerini sağlamıştır [20].

Polimer esaslı malzemeler içeren üretilen kumaş veya benzeri materyallerden elde edilen kompozit yapıların balistik koruyucu özelliği kullanılan lifin elastiklik modülü, kopma uzaması gibi lif özellikleri ve liften elde edilen yapının kompozit içerisinde kullanım şekline ve kompozitin alansal yoğunluğuna göre değişiklik göstermektedir [20].

Bu tür yapıların kullanım amacı, ön katmanlarda sert metal ya da seramik gibi malzemeler kullanarak oluşabilecek mermi tehditlerine karşı balistik etkiyi azaltmaktır. Metal, kompozit ve/veya elastomer gibi malzemelerden oluşan destek katmanı ise ön katman tarafından kısmen durdurulan tehditin kalan enerjisini soğurmaktadır [18].

Ayrıca balistik koruma amaçlı kullanılan kompozit yapıların lif tipi, reçine tipi, doku konstrüksiyonu, kat sayısı ve iplik sıklığı gibi parametrelere bağlı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu yapıların ağırlık ve konfor açısından kullanıcının kendisini rahatsız hissetmesine neden olmayacak şekilde, kullanım alanına uygun olarak dizayn edilmesi gerekmektedir [21].

Balistik korumada lifler, dokuma kumaş veya doku-suz yüzey yapılar içerisinde kullanılmaktadır [22-23]. Dokuma kumaş yapılarının bu amaçla kullanımları durumunda ise, genelde bezayağı ve panama örgülerin tercih edildiği görülmektedir. Bu uygulamalarda, büyük önem taşıyan "örtme faktörü"nü 0,6 ile 0,95 arasında olması istenmektedir. Örtme faktörünün 0,95'den büyük olması durumunda, iplikler dokuma işlemi sırasında bozulmakta; 0,6'dan küçük olması durumunda ise kumaş çok gevşek bir yapıya sahip olmaktadır [22].

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, gevşek dokunmuş ve doku deseni dengesiz dağılım gösteren kumaşlarda mermi enerjisinin kumaşa geçtiği, ipliklerin birbiri üzerinden itildiği ve iplikler arasında meydana gelen boşlukların açılarak merminin bu bölgeye yerleştiği tespit edilmiştir. Bu nedenle de bu tür malzemelerin balistik performansı düşmektedir [23].

Kısa kesikli liflerden üretilen dokusuz yüzeylerde, liflerin kesişme noktaları daha az olduğundan, liflerin serbest hareket etme yetenekleri artmaktadır. Dokuma kumaşlarda ve tek yönlü tabakalarda, mermi enerjisinin büyük bir kısmı darbe alanında bulunan liflerin fazla gerilim nedeniyle kopması için kullanılmaktadır. Bunun nedeni dokuma kumaşlarda bulunan iplikler ve liflerin kesişme noktalarının fazla olmasıdır ve dolayısıyla balistik darbe altında kalan serbest olmayan

lifler maksimum seviyede uzamakta ve kopmaktadır [8].

Bogdan ve arkadaşları (2012) yaptıkları çalışmalarında balistik zırh kullanımını ergonomik açıdan incelemiştir. Vücudun önemli kısımlarını kaplayan yeleklerin gerilme koşulları termal ortam altında incelenmiştir. Bu amaçla üç özel gereksinim için üç farklı kullanıcının özel ihtiyaçlarına uygun 31,1 kg, 19,9 kg ve 23,1 kg ağırlıklarında üç farklı tip yelek test edilmiştir. Çevre sıcaklığı, gerçek sıcaklık değerlerine yakın olup kullanıcıların bu 3 farklı tip yelegi giymeleri istenmiştir. Farklı çevre sıcaklıklarında bu ağır balistik ürünleri kullanan kişiler arasındaki psikolojik ve fizyolojik testlerin sonuçlarına bakılarak, ergonomik açıdan beklentileri karşılayacak en uygun balistik ürünün tasarımının yapılmasına çalışılmıştır [24].

Özşahin ve arkadaşları (2010); alüminyum levhaların yüksek hızlı çarpma dayanımlarını zırhların yüzeylerini kaplayarak ve kompozit katmanı ilavesi yaparak incelemiştir. Levhaların ön yüzlerine ısı püskürtme yöntemi ile kaplama yapılmıştır. Bu yapılara, ultra yüksek moleküler ağırlıklı Polietilen (UHMWPE) lifli kompozitlerden üretilen arka destek katmanı ilave edilmiştir. Numuneler balistik testlere tabi tutulmuş ve her iki yöntemde de balistik performans artışının birbirine yakın düzeyde olduğu görülmüştür [18].

Çerkez ve Ulçay (2007); mikro parçacıklı koloidal silika dispersiyonunun farklı gramajlardaki polietilen dokusuz yüzey tela malzemesinin enerji absorpsiyonuna olan etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla; üç farklı gramajdaki (18, 28 ve 45 g/m<sup>2</sup>) tela malzemeleri beş farklı konsantrasyondaki (0, 20, 30, 40 ve 50 g/l) silika dispersiyonu ile emdirilerek gramaja ve konsantrasyona bağlı olarak telanın enerji absorpsiyonundaki değişimi ölçülmüştür. Konsantrasyona ve tela gramajına bağlı olarak telanın absorbladığı enerji miktarının arttığı görülmüştür. 28 ve 45 g/m<sup>2</sup>'lik numunelerde aplikasyon yapılmamış ham telaya göre 50g/l konsantrasyonda enerji absorpsiyonu hemen hemen iki katına çıkmıştır. Çalışma sonuçlarına göre silika konsantrasyonu ve tela gramajındaki artışa bağlı olarak, malzemenin enerji absorpsiyonunun da arttığı tespit edilmiştir [12].

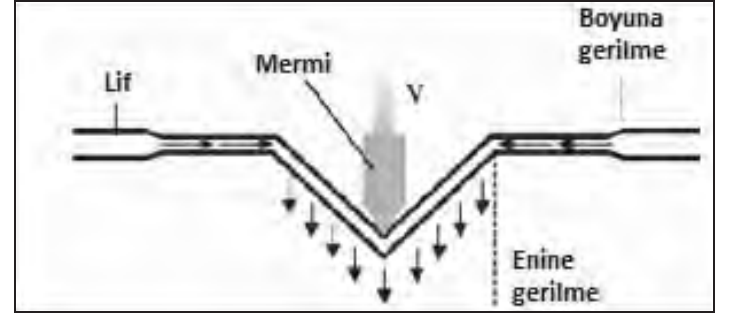
Özşahin ve Tolun (2009); yüksek molekül ağırlıklı polietilen levhalar kullanılarak desteklenmiş alüminyum alaşımlı levhaların balistik dayanımlarında üç farklı katman sıralamasının etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Hazırlanan üç tasarımın da toplam katman kalınlıkları eşit olduğu halde, destek katmanı olarak kullanılan polietilen levhaların, alüminyum levhaların arkalarına yerleştirildikleri seçeneğin, yapılan deneyler sırasında en yüksek balistik dayanıma sahip tasarım olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, levha kalınlıklarının, yüksek hızlı çarpma sonucunda oluşan hasar biçimlerini yakından etkilediği gözlenmiştir [19].

### 3. BALİSTİK KORUMA VE BALİSTİK KORUMA ETKİNLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Balistik koruyucu malzemeler, sert ve yumuşak yapılı koruyucu malzemeler olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar. Cam, seramik ve metalden yapılan sert koruyucular; zırh, koruyucu başlık, kalkan ve plaka olarak kullanılırken; yumuşak koruyucular, kumaş ve benzeri yapılardan oluşan polimer esaslı malzemelerden oluşmaktadır [23].

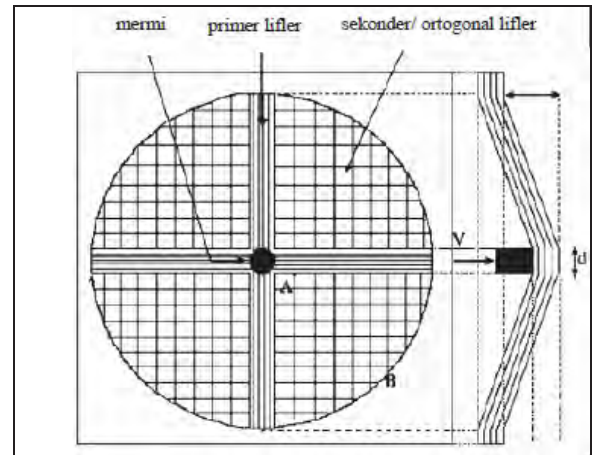
Balistik koruma ile yüksek hızdaki çarpma etkisinden oluşan darbenin en aza indirilmesi ve merminin vücuda temasının önlenmesi amaçlanmaktadır. Darbenin en aza indirilmesiyle birlikte vücutta gerçekleşecek çöküntü değerinin de minimumda tutulabilmesi ve vücut dokularının zarara uğramasının engellenmesi hedeflenmektedir. Çöküntü miktarının minimumda tutulabilmesi ise, darbe esnasında oluşacak enerjinin geniş bir alana yayılması ile sağlanmaktadır. Kumaşa meydana gelen darbenin analiz edilebilmesi amacıyla tek bir lifte gerçekleşen darbe olayı incelenmiştir. Merminin life çarpması ile birlikte Şekil 2’de görüldüğü gibi enine ve boyuna dalga olmak üzere iki tip dalganın darbe noktasından yayıldığı görülmüştür. Boyuna çekme dalgası malzemenin ses hızında lif eksenine boyunca hareket etmektedir. Çekme dalgası darbe noktasından yayıldıkça, çarpan merminin hareket doğrultusunda eğilen materyal darbe noktasına doğru akmaktadır. Malzeme hızından daha düşük bir

hızda yayılan bu enine yönde olan hareket ise enine dalga olarak adlandırılmaktadır [25].



Şekil 2. Merminin life teması

Merminin çarpma anında, darbenin olduğu noktadan başlayan ve merminin hızına bağlı olarak değişen ani şok dalgası meydana gelmektedir. Mermi enerjisinin büyük bir bölümü, şekil değiştirme ve kinetik enerji olarak doğrudan temas eden liflere aktarılmakta ve bu liflere primer lifler denilmektedir. Şok dalgasının etkisiyle balistik koruyucu dokumanın yapısında yüksek çekme gerilmesine, şekil değiştirmeye ve hasara uğrayan primer lifler önemli miktarda enerjiyi absorbe etmektedirler. Sekonder (ortogonal) lifler ise mermi ile doğrudan temas etmeyen liflerdir. Şekil 3’de primer ve sekonder lifler gösterilmektedir [26].



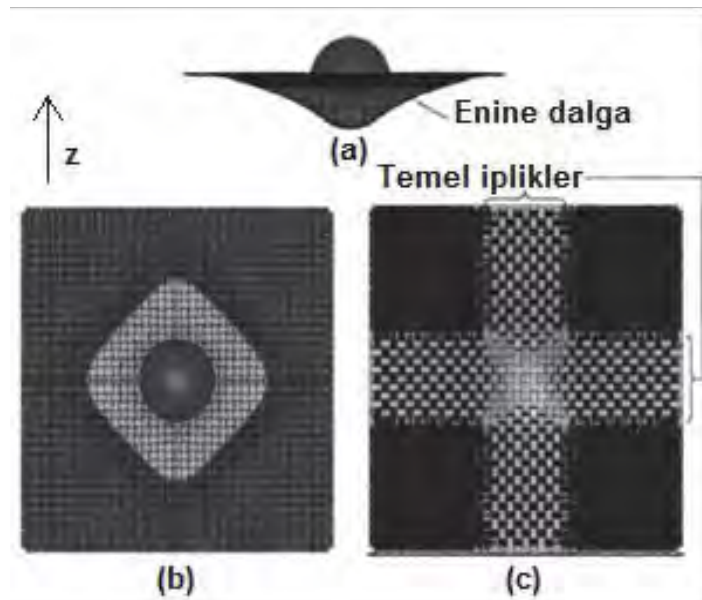
Şekil 3. Primer ve sekonder lifler [26]

Tek katmanlı bir kumaşın darbe etkisi altındaki deformasyonun incelenmesi, kumaşın balistik performansını etkileyen fiziksel mekanizmaların ortaya çıkarılmasına ve incelenmesine yardımcı olmaktadır. Tek katmanlı bir kumaşın enine yönde darbeye maruz kalmasıyla birlikte, tek lifteki darbe durumuna benzer



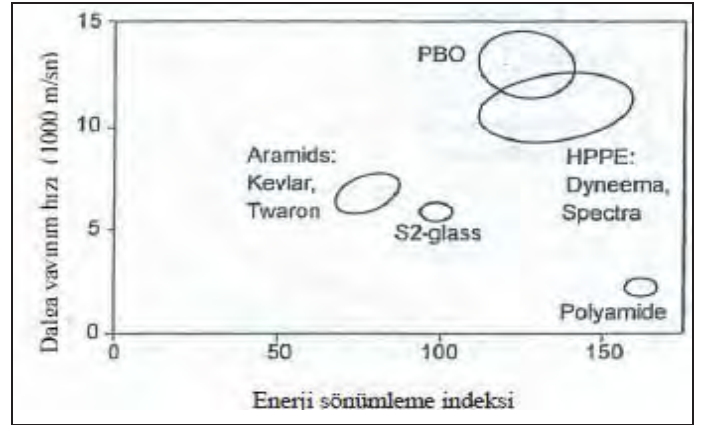
şekilde, mermi ile temas eden temel ipliklerde enine yönde bir eğilme meydana gelmekte ve temel ipliklerle kesişen ortogonal ipliklerin temel iplikler tarafından orijinal kumaş düzleminden dışarıya doğru çekilmesine neden olmaktadır. Ortogonal iplikler deformasyona uğramakta ve temel ipliklerde olduğu gibi gerinim dalgası geliştirmektedirler. Benzer şekilde bu ortogonal iplikler kendileriyle kesişen iplikleri zorlamaktadırlar. İpliklerin birbirleri arasında meydana gelen sürtünme sonucunda, darbe noktasında ortogonal ipliklerin düzensizliği şeklinde enine yönde bir eğilme meydana getirmektedir. Bu noktada eğilme, zorlanmanın en yüksek değere ulaştığı ana kadar devam etmektedir. Yapılan analizler neticesinde, merminin kinetik enerjisinin büyük bir bölümünün zorlanma ve kinetik enerji olarak temel ipliklere transfer edildiği ve ortogonal ipliklerin enerji absorpsiyonuna olan katkılarının ise oldukça az olduğu tespit edilmiştir [22].

Şekil 4'de görüldüğü gibi temel iplikler oldukça gerilmiş bir halde; ortogonal iplikler ise daha gevşek bir durumda konumlanmaktadır [22].



Şekil 4. Tek katmanlı bir kumaşta meydana gelen darbenin (a) yandan, (b) üstten ve (c) alttan görünüşü [22]

Balistik korumada lifin enerji sönmleme yeteneği oldukça önemlidir. Şekil 5'de balistik amaçla kullanılan farklı lif cinslerinin dalga hızı-enerji sönmleme indeksi grafiği verilmiştir [27].



Şekil 5. Çeşitli balistik liflerin dalga hızı - enerji sönmleme indeksi grafiği [27].

Mermiden hedefe aktarılan enerji miktarını etkileyen temel faktörler kompozit malzeme yönünden; takviye malzemesinin cinsi, yapısı, fiziksel özellikleri, matris cinsi, sürtünme, tabaka sayısı ve kalınlık, mermi yönünden ise; hız, uç geometrisi, malzeme cinsi, sertlik ve merminin kütlesidir [28].

Merminin zırhı delip geçtiği durumlarda sönmlenen enerji miktarı, merminin çarpma enerjisinden zırhı delip geçtiği an sahip olduğu enerji çıkartılarak bulunmaktadır. Balistik limitin altındaki çarpmalar için ise merminin çarpma enerjisi, doğrudan zırhın sönmlediği enerjiye eşit olmaktadır [29].

Balistik limitin üzerindeki hızlar için sönmlenen enerji;

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

Balistik limitin altındaki hızlar için sönmlenen enerji;

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

$E$ : Zırhın sönmlediği enerji,  $m$ : Merminin kütlesi,  $V_i$ : Merminin çarpma hızı,  $V_r$ : Merminin zırhı terk ettiği andaki hızı

Balistik korumada liflerin çarpma enerjisini yayma hızları ( $V$ ) ve Balistik Koruma Kapasitesi ( $BKK$ ) balistik performansı etkileyen önemli parametrelerdir. Düşük yoğunluğa ve yüksek mekanik özelliklere sahip lifler, her iki parametre açısından da en iyi balistik performansı sağlamaktadırlar [25].

Liflerin çarpma enerjisini yayma hızları  $V$  ( $m/s$ );



$$V (m/s) = (E/\rho)^{1/2} \quad (3)$$

$$V (m/s) = (F/\mu)^{1/2} \quad (4)$$

Balistik Koruma Kapasitesi (*BKK*) ;

$$BKK = (W*V_{son})^{1/2} \quad (5)$$

$$W = (\sigma*\varepsilon)/2 \quad (6)$$

$\mu$ : Boyca Yoğunluk (g/m),  $E$ : Modül,  $F$ : Darbe Kuvveti (N),  $\rho$ : Özgül ağırlık (*specific gravity*),  $\sigma$ : Kopma Mukavemeti (N),  $\varepsilon$ : Kopma Uzaması (%)

Bir merminin kinetik enerjisi, hedefte oluşturacağı delme etkisine, mermi kütlesine, merminin enerjisine, merminin hedefe vuruş açısı ile mermi ve zırh malzemesinin metalurjik yapısına bağlı olarak değişmektedir [7].

Atış sonucunda her bir yapıda tehlike tipine bağlı olarak katlarda meydana gelen bozunmalara göre sergilediği spesifik enerji absorblama (*SEA*) değerleri hesaplanmaktadır [30].

Bozunan katın yoğunluğu üzerinden,

$$\text{Spesifik enerji absorblama (SEA) = Tehlikenin kinetik enerjisi / Bozunan katın yoğunluğu (J.m}^2\text{/g)} \quad (7)$$

$$\text{Bozunan katın yoğunluğu} = (\text{Bozunan kat sayısı} \times \text{Kumaş yoğunluğu (g/m}^2\text{)}) \quad (8)$$

şeklinde hesaplanmıştır.

Her bir yapının belirtilen tehlike tiplerine maruz kalması halinde bütün yapı göz önünde bulundurularak sergilediği spesifik enerji absorblama (*SEA*) değerleri hesaplanmaktadır.

Yapının yoğunluğu üzerinden,

$$\text{Spesifik enerji absorblama (SEA) = Tehlikenin kinetik enerjisi / Yapının toplam yoğunluğu (J.m}^2\text{/g)} \quad (9)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanmaktadır [30].

Balistik malzemelere yapılan atışlar sonucunda yukarıda yer alan formüller doğrultusunda yapılan hesaplamalarla spesifik enerji absorblama ve malzemenin arka kısmında oluşan çöküntü değerleri göz önüne alınarak malzemenin balistik performansı hakkında

yorumlar yapılabilmektedir. Üreticilerin üretimlerini gerçekleştirirken, malzemenin ekonomik değeri ve istenilen ağırlığı göz önüne almaları gerekmektedir [23].

Zırh olarak kullanılan koruyucu sistemlerde önemli etmenlerden biri de basıncın iletilmesidir. Bu yapılarda, zırhın delinmemesi kadar çarpma sırasındaki darbe dalgalarının sönümlenmesi de büyük önem taşımaktadır.

Roberts ve ark. (2007) tarafından yapılan bir çalışmada, üzerine sensörler yerleştirdikleri insan gövdesi modeli, delinmeyen ince kumaş bir zırh ile kaplanmış ve yapılan atışlar boyunca insan gövdesi modeline aktarılan basınç değerleri kaydedilmiştir. Atışlar sonrasında zırhta delinme gerçekleşmemiş olmasına rağmen, zırhtan modele aktarılan basınç miktarı modelin kalbinin sıkışmasına, ritminin bozulmasına ve işlevini yerine getiremez duruma gelmesine neden olmuştur. Bu çalışmadan yola çıkılarak, seçilen malzemenin darbe sırasındaki basıncı sönümleyebilme özelliğinin oldukça büyük önem taşıdığı sonucuna ulaşılmaktadır (Roberts et al., 2007). Bu özelliğin yanı sıra, balistik koruyucu malzemelerin özelliklerini bilmek kadar, mermi ucunun sivri (delme etkisi) veya küt (çöküntü yapma etkisi) olması, ağırlığı, hızı ve mermi çekirdeğinin sertliği ve ateşlendiği namlunun uzunluğunun da bilinmesi gerekmektedir [23].

Mermi geometrisi, merminin kumaş perforasyonuna etki eden önemli bir parametredir. Tan ve ark. (2005) bezayağı örgülü Twaron kumaşı üzerinde düz, yarı-küre, oval ve konik uçlu mermi ile yaptıkları deneyler sonucunda konik ve oval uçlu mermilerde çok az sayıda iplik kopuşu meydana geldiğini ve merminin doku içerisinde kayarak ilerlediğini tespit etmişlerdir. Bu tür mermilerle yapılan çalışmalarda sırasıyla 58 ve 76 m/s gibi düşük  $V_{50}$  değeri bulunmuştur.  $V_{50}$ , parçacığın hedefe dik konumda çarpması sonucu hedefi %50 delinme veya delinmeme ihtimalini gösteren hız olarak tanımlanmaktadır. Düz uçlu mermilerde kumaş kalınlık boyunca kesmeye zorladığı için 100 m/s  $V_{50}$  değeri elde edilmiştir. Bununla birlikte en yüksek

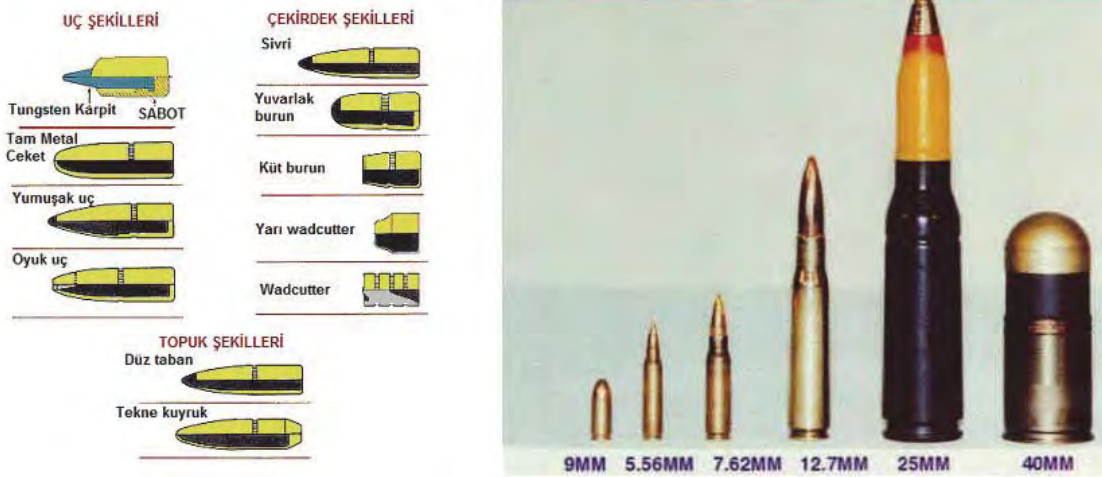
sayıda lif kopuşu, yuvarlatılmış uçlu mermi kullanılarak gerçekleştirilen ölçümlerde meydana geldiğinden, bu malzeme için 159 m/s gibi yüksek  $V_{50}$  değeri elde edilmiştir [23-25].

Merminin yavaşlatılması yüksek hızlarda sivri uçtan küt uca gittikçe daha kolay olmaktadır. Küt uçlu mermiler vurma esnasında daha fazla iplik ile temas etmekte ve böylece enerjini daha çabuk yaymaktadır. Sivri ve konik uçlu mermiler ise çarpma esnasında kumaşın içinden daha az iplikle temas ederek sıyrılacağından bu mermiler kullanıldığında absorbe edilen enerjinin miktarı da daha az olmaktadır [23].

## 4. BALİSTİK KORUMA TESTLERİ VE STANDARTLARI

### 4.1. 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 [32]. Bunun dışında NATO ve Türk Standartları Enstitüsü tarafından da çeşitli askeri standartlar geliştirilmiştir. Tablo 1’de balistik koruyucular için kullanılan standartlar verilmektedir [23].



Şekil 6. a) Mermi tipleri b) Değişik kalibreli mermiler [31].

Tablo 1. Balistik koruyucular için kullanılan standartlar

STANDART NO	STANDART ADI
TS 11164	Balistik koruyucu vücut zırhı
TS 13349	Askerî zırhlar - $V_{50}$ balistik hız deneyi
MIL-A-46103 C	Light Weight, Ceramic Faced Composite Armor Procedure Requirements
MIL-B-44053 A	Fragmentation Protective Body Armor, Vest Ground Troops
MIL-STD-662 F	Balistic Test For Armor
NIJ-STD-0101.04	Balistic Resistance Of Personnel Body Armor
NIJ-STD-0101.06	Balistic Resistance Of Personnel Body Armor
NIJ-STD-0108.04	Balistic Resistance Of Protective Materials
STANAG 2920	Balistic Test Method For Personnel Armor
UK/SC/4697	The Balistic Testing Of Fragment Protective Personnel Armors
PPAA STD-1989-05	Personel Protective Armor Assosiation Testing Standarts For Balistic Resistance Of Presonel Body Armors
UL 752	Balistic Resistance Equipment
MIL-B-44194 A	Body Armor Fragmentation Protective Undergarment C.V. Crevmens
MIL-P-46199	Aluminium Oxide Ceramic (For Use In Armor Composite)
Pr EN ISO 14876-2	Protective Clothing-Body Armor-Part-2: Bullet Resistance Requirements And Methods

Türk Standartları Enstitüsünde yer alan TS 11164 nolu ve TS 13349 nolu standartlar, ateşli silahlara karşı kişisel vücut zırhlarının balistik koruması için deney yöntemlerini kapsamaktadır [33-34].

Yaygın olarak kullanılan NIJ (*National Institute of Justice*) standardında belirtilen değerler, günümüz teknolojisinde hafif silahlara karşı koruyucu zırhlar için geliştirilen ürünlerin balistik performansının ölçümünde referans olarak alınmaktadır [35].

NIJ-STD-0101.04 ve NIJ-STD-0101.06 standartları günümüzde yaygın kullanılan standartlar olup, bu standartlarda, malzemenin hangi koruma seviyesi içe-

risinde test edileceği ve ne kadar koruma sağlayacağı gibi detaylara yer verilmektedir [6-36-37].

NIJ-STD-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 [23].

Balistik koruyucu malzemeler, NIJ-STD-0101.04 standardında, farklı özellik ve ağırlıkta, farklı hızlarda atılan mermilerin darbe etkisine dayanıklı yedi ayrı koruma seviyesi içerisinde sınıflandırılmaktadır. Bu koruma seviyeleri Tablo 2’de verilmektedir [36].

**Tablo 2.** NIJ-STD-0101.04 standardında belirtilen balistik koruyucular için koruma seviyeleri [35]

KORUMA SEVİYESİ	KALİBRE VE MERMİ TİPİ	MERMİ AĞIRLIĞI (g)	MERMİ HIZI (m/s)	TRAVMA DERİNLİĞİ (max)
I (5 m mesafeden)	22 LR uzun namlu kurşun burunlu mermiler (LR, LRN)	2,6	320	44 mm
	380 ACP Tam metal kaplama burunlu mermiler (FMJ RN)	6,2	312	
IIA (5 m mesafeden)	9 mm Tam metal kaplama yuvarlak uç mermi (FMJ RN)	8,0	332	44 mm
	40 S&W Tam metal kaplama burunlu mermi (FMJ)	11,7	312	
II (5 m mesafeden)	9 mm Tam metal kaplı yuvarlak uç mermi (FMJ RN)	8,0	358	44 mm
	357 Magnum, metal kaplı yumuşak uçlu mermi (JSP)	10,2	427	
IIIA (5 m mesafeden)	9 mm Tam metal kaplama yuvarlak uç mermi (FMJ RN)	8,0	427	44 mm
	44 Magnum Kaplama çukur (özel içine göçük uç) nokta mermi (JHP)	15,6	427	
III (15 m mesafeden)	7,62 mm Tam metal kaplama mermiler (FMJ)	9,6	838	44 mm
IV (15 m mesafeden)	30 mm zırh delici (AP) Mermi	10,8	869	44 mm

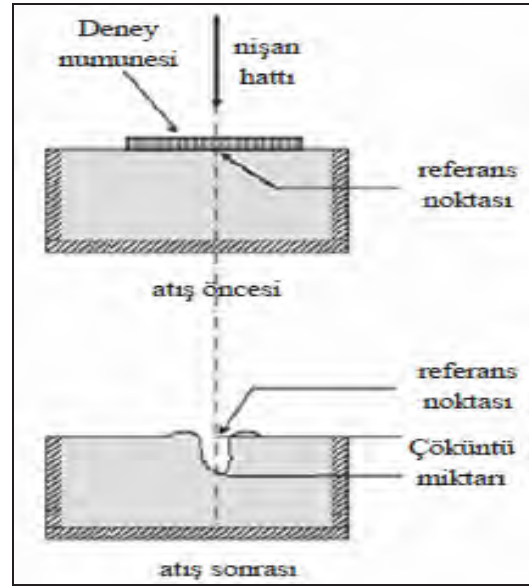
Farklı malzemelerden, Tablo 2’de yer alan farklı koruma seviyelerine sahip olmaları beklenmektedir. Örneğin, piyade tüfeklerinden koruma amaçlı üretilen zırhların mermiye karşı seviye III düzeyinde koruma etkinliğine sahip olması beklenmektedir [35].

Vücut zırhları için P-BFS (*the Perforation and Backface Signature Test*) ve balistik limit testleri kullanılmaktadır. Bu testler koruma seviyesi IIA, II, ve IIIA dikkate alınarak 2 mermi ile gerçekleştirilmektedir. Böylece hem yeni ve hem de uygun duruma getirilmiş numuneler test edilebilmektedir [5].

NIJ-0101.04 ve NIJ-0101.06 standartları kapsamında test edilecek numunelerin (örneğin kompozit zırh tabakaları ve insan beynini simüle etmek amacıyla kullanılan cam macun) testlerin öncesinde 24 saat süreyle  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ’de kondisyonlanması gerekmektedir. Deformasyon ölçümünün yapılabilmesi için vuruş yerinin arka tarafına gelecek şekilde kompozit zırh tabakalarının arka yüzeyine cam macunu tatbik edilmektedir. Deney düzeneğinde atış sonrasında merminin insan vücudunda yaptığı çöküntü miktarının ölçülebilmesi için kil, cam macunu veya benzeri bir destek malzemesi kullanılmaktadır. Kullanılan destek malzemesi  $29^{\circ}\text{C}$ ’nin üzerinde bir sıcaklıkta en az 3 saat süre ile bekletilmektedir.  $1043\pm 5$  gram ağırlığında,  $63,5\pm 0,05$  mm çapında çelik bilye 2 metre yükseklikten, kenarlardan  $6\pm 3$  mm içeriden ve merkezler arası  $203\pm 25$  mm olacak şekilde macunun üzerine serbest düşme etkisi ile bırakılmaktadır. Bu işlem sırasında 5 adet serbest düşme hareketi yapılmakta ve oluşan çukurların derinliklerinin aritmetik ortalaması alınmaktadır. Aritmetik ortalama  $20\pm 3$  mm olduğu zaman destek malzemesinin teste hazır olduğu anlaşılmaktadır [23-36].

Ürünlerin ön ve arka yüzleri arasındaki performans farklılığı ile sudan etkilenebilme durumları göz önünde bulundurularak ıslak-kuru ve ön-arka yüzeyler için testlerin ayrı ayrı yapılması gerekmektedir. Islak

testte yelekler  $10-20^{\circ}\text{C}$  ve  $100\pm 20$  mm/sa hızla akan su ile 3 dakika süreyle nüfuz edecek şekilde her iki yüzü için ayrı ayrı gerçekleştirilmektedir. Islatılan yelekler daha sonra 10-30 dakika arasında atış testine tabi tutulmaktadır [23].



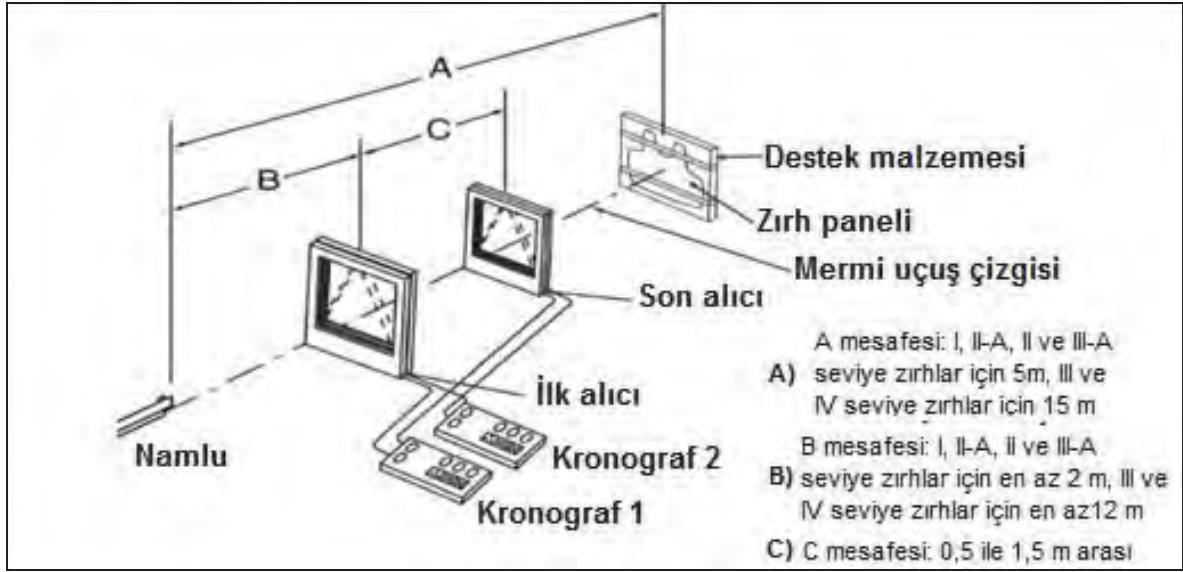
Şekil 7. Balistik test esnasında insan tenini simüle eden ve hedef zırh arkasına yerleştirilen şartlandırılmış dolgu maddesi [38].

Şekil 8’de yer alan deney düzeneğinde yelek ve destek malzemelerinin yerleşimi görülmektedir.

Numune hazırlık aşamasında destek malzemesinin yeleklere tam olarak temas etmesi ve arada boşluklar olmaması gerekmektedir. Atışlar gerçekleştirilirken istenilen koruma seviyesine göre hedef, ilk alıcı ve son alıcı arasındaki mesafeler değiştirilerek ayarlanmaktadır [36-37].

Koruma seviyesi I, II-A, II ve III-A olan zırhlar için namlu ile hedef arasındaki mesafe 5m, III ve IV seviye zırhlar için ise 15 m olarak belirlenmiştir. İstenilen koruma seviyesine ve kullanılacak yöntemine göre Şekil 9’da belirtilmiş olan işaretli noktalara atışlar yapılmaktadır [36-37].





Şekil 8. Balistik test düzeneği (A mesafesi: I, II-A, II ve III-A seviye zırhlar için 5m, III ve IV seviye zırhlar için 15 m, B mesafesi: Minimum 2 m, C mesafesi: 0,5 ile 1,5 m arası)



Şekil 9. Test atışlarının yapılacağı noktalar [39]

Hedef malzemede delinme gerçekleşip gerçekleşmediğine ve destek malzemesinde meydana gelen çöküntü miktarının ölçülmesiyle değerlendirmeler yapılmaktadır. Mermiye karşı korumada balistik dayanım kriterinin ölçütü NIJ-0101.04 standardında, zırhın arkasına yerleştirilen ve insanı simule eden macunun üzerinde meydana gelen çöküntü miktarının 44 mm'nin altında olması gerektiği yönündedir [36].

2000 yılında balistik yeleklerin dayanımı üzerine yayınlanmış olan NIJ-0101.04 standardının bazı bölümlerinde değişiklikler yapılmış ve Temmuz 2008'de

vücut zırhlarında balistik dayanım NIJ-0101.06 standardı olarak güncellenmiştir [40].

Eski standart (NIJ-0101.04) kumaşların belirli bir süre kullanılması sonrasında meydana gelen deformasyon koşullarını kapsamamaktaydı. Yapılan değişikliklerle numuneler ısıya, neme, mekanik aşınmaya ve yıpranmaya maruz bırakıldıktan sonra test edilebilmektedir [40].

NIJ-STD-0101.06 standardı kapsamında kişisel zırh malzemeleri balistik performans seviyelerine göre beş sınıfa ayrılmaktadır. Bu koruma seviyelerine ilişkin bilgiler Tablo 3'te verilmektedir [37].

**Tablo 3.** NIJ-STD-0101.06 standardında belirtilen balistik koruyucular için koruma seviyeleri [37].

Koruma Seviyesi	Kalibre ve Mermi Tipi	Mermi Ağırlığı (g)	Mermi Hızı (m/s)	Travma Derinliği (max)
IIA (5 m mesafeden)	9 mm Tam metal kaplama yuvarlak uç mermi (FMJ RN)	8,0	373±9,1	44 mm
	40 S&W Tam metal kaplama yuvarlak uç mermi (FMJ)	11,7	352±9,1	
II (5 m mesafeden)	9 mm Tam metal kaplı yuvarlak uç mermi (FMJ RN)	8,0	398±9,1	44 mm
	357 Magnum, metal kaplı yumuşak uçlu mermi (JSP)	10,2	436±9,1	
IIIA (5 m mesafeden)	357 SIG Tam metal kaplama yuvarlak uç mermi (FMJ FN)	8,0	448±9,1	44 mm
	44 Magnum (semi jacketed hollow point) (SJHP)	15,6	436±9,1	
III (15 m mesafeden)	7,62 mm Tam metal kaplama mermi (FMJ)	9,6	847±9,1	44 mm
IV (15 m mesafeden)	30 mm zırh delici mermi (AP)	10,8	878±9,1	44 mm

Bahsedilen standart türleri ve koruma seviyelerinden başka özel ihtiyaçlar için de özel tip koruma seviyesi bulunmaktadır. Özel ihtiyacın olması durumunda, tam test atış(lar)ı ve kullanılabilir asgari referans etki hızları gibi parametrelerin de belirtilmesi gerekmektedir [36-37].

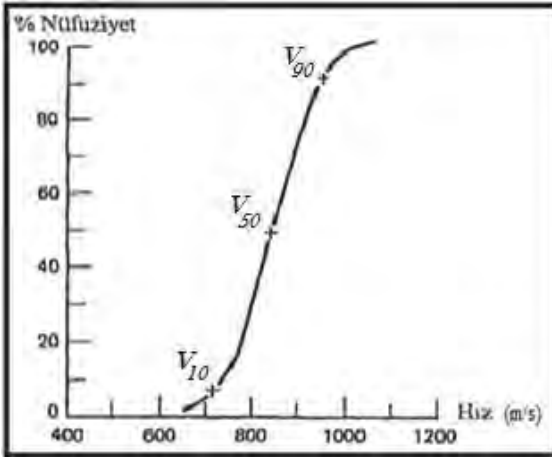
## 4.2. Balistik Koruma Testleri

### 4.2.1. Balistik Limit $V_{50}$ testi

Çarpma olayının incelenmesinde karşılaşılan problemlerden birisi de bir cismin hasara uğramadan dayanabileceği mermi hızının tespitidir. Bu hıza "balistik çarpma hızı" veya "balistik limit" adı verilmektedir [6]. Kritik hız değeri  $V_{50}$ , parçacığın hedefe dik konumda çarpması sonucu hedefin %50 delinme veya delinmeme ihtimalini gösteren hız olarak tanımlanmaktadır [6-41]. Bu durumda parçacık  $V_{50}$  hızında ise zırh plakasının delinme ihtimali %50'dir.  $V_{50}$  değerinden düşük hızlar malzemede kısmi delinme meydana getirirken, bu değerden yüksek hızlar malzemede tam delinme meydana getirmektedirler [41].

Tam delinme (tam penetrasyon); kullanılan plakanın mermi veya plakadan kopan parçacıklar tarafından tamamen delinmesi olarak ifade edilmektedir. Kısmi delinme (kısmi penetrasyon) ise kullanılan plaka boyunca delinmenin gerçekleşmemiş olması halinde geçerli olmaktadır [42].

$V_{50}$  hızını tespit etmek için plakaya minimum dört atışın yapılması gerekmekte ve değerlendirmeye alınan en az dört atıştan, ikisinin plakayı delerken, diğer ikisinin de delmeyen hız değerlerinde olması gerekmektedir. Ayrıca, bu dört hız dağılımında, plakayı en yüksek hızda delen merminin çarpma hızı ile plakayı delmeyen en düşük hızdaki merminin çarpma hız farkının 18,29 m/s hız değerini geçmeme şartı aranmaktadır. Test sonunda, bu sonucu veren dört atıştaki mermi çarpma hızlarının aritmetik ortalaması alınmakta ve bulunan değer, zırh plakasının  $V_{50}$  balistik hız sınırı değerini vermektedir [41]. Şekil 10'da  $V_{50}$  hız gösterimi yer almaktadır.



Şekil 10.  $V_{50}$  hız gösterimi [44]

$V_{50}$  değeri, kullanılan malzemenin sertliği ile lineer ilişki göstermektedir. Karagöz ve ark. (2010) tarafından yapılan bir çalışmada çeliğin standart zırh çeliklerine benzer mikro yapıya ve mekanik özelliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. MIL-A-12560 standardı kapsamında yapılan testlerde kullandıkları deneysel zırh çeliğinin eşdeğer sertliklerine karşılık gelen  $V_{50}$  balistik limit değerleri incelenmiş ve bu malzemenin balistik test standardından daha yüksek bir balistik limit sergilediği belirlenmiştir [44].

#### 4.2.2. Stanag 2920 testi

Stanag 2920 standardında, NATO Standartlaştırma Anlaşması çerçevesinde geliştirilmiş personel zırhları için balistik test metotları 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 [23].

Test edilecek numunenin test öncesinde,  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  ve  $\%65 \pm 5$  bağıl nem içeren ortamda kondisyonlanması

gerekmektedir. Test sırasında, balistik koruyucu malzemeye en az 6 mermi atılmakta ve bunların hızları ölçülmektedir [23].

Balistik koruyucu malzemenin normalinden  $5^\circ$ '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 [23].

Bu standartta, aşağı ve yukarı hız metodu (*up and down method*) kullanılarak mermi atış hızları ayarlanmaktadır. İlk mermiye zırhın  $V_{50}$  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.  $V_{50}$  balistik sınır hızı elde etmek için standartta yer alan prosedüre göre ateş etmeye devam edilmektedir [23].

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 düşük hız değerleri arasındaki farkın ise en fazla 40 m/s olması gerekmektedir. Alınan düzgün çarpımlardan ortalama değer bulunarak  $V_{50}$  balistik sınır hızı hesaplanmaktadır [23].



Şekil 11. US-MIL-P-46593'te tanımlanan parçalanma taklit edici parçacıklar (*Fragment Simulating Projectiles*) [45].

## 5. BALİSTİK PERFORMANS VE VERİMLİLİK ÜZERİNE YAPILAN MODELLEME ÇALIŞMALARI

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde balistik performans testlerinin fiziksel ortamda gerçekleştirilmesinin yanı sıra matematiksel modellerle de kumaş özelliklerinin, zırh katman yapılarının, katman sayılarının ve bağlantı şekillerinin, mermi geometrisinin, mermi çıkış hızının, lif ve de iplik özelliklerinin balistik koruyucu zırh sistemleri üzerindeki performans etkileri araştırılmıştır.

Balistik performans üzerine yapılan modelleme çalışmalarından birinde, Roylance ve ark. (1995) balistik koruyucu özelliğe sahip dokuma kumaşların karmaşık davranışlarını modellemek amacıyla FEA tabanlı nümerik kodlar hazırlamışlardır. Bu kodlar sayesinde çoklu katmanlardan oluşan kumaş panellerinin, farklı geometrilere sahip mermilerin ve kumaş üzerindeki düzgünsüzlüklerin etkisini gözlemlemeye yarayan bir model ortaya koymuşlardır. Yapılan bu sayısal modeller, reçine emdirilmiş ve emdirilmemiş tek katmanlı ve çok katmanlı kumaşların incelenmesi amacıyla kullanılmıştır. Fiziksel denemelerde 1500 denye iplik numarasına sahip 1, 3, 5 ve 10 katlı Kevlar ipliklerden üretilen kumaşlar ve 1,1 gram ağırlığa sahip mermiler kullanılmıştır. Yapılan denemelerde katman sayısı arttırıldıkça balistik performansın iyileştiği gözlenmiştir. Katman sayısı 3'ten 5'e çıkartıldığında  $V_{50}$  hızının %24 oranında artış gösterdiği, katman sayısı 3'ten 10'a çıkartıldığında ise  $V_{50}$  hız değerinin %50 oranında artış gösterdiği ifade edilmiş-

tir. 3 katmanlı kumaşlarda  $V_{50}$  hızı 160 m/s, 5 katmanlı kumaşlarda 220 m/s, 10 katmanlı kumaşlarda ise 320 m/s olarak kaydedilmiştir. Roylance ve ark. yaptıkları fiziksel denemeler ve simülasyon çalışmaları sonucunda balistik performansın büyük ölçüde katman sayısı ile doğru orantılı olduğunu ve kumaş gramajından da olumlu yönde etkilendiğini açıklamışlardır [48].

Barauskas ve Abreitiene (2007) yaptıkları bir araştırmada FEA LS-DYNA™ yazılım programını kullanarak katlı balistik yapı modelleri üzerinde matematiksel ve deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla,  $1440 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğa sahip çok katmanlı Paraaramid Twaron® kumaş paketleri ve kurşun malzemeden yapılmış 6 mm uzunluğa sahip mermileri kullanılmış ve mermilerin kumaş yüzeyinde meydana getirdikleri deformasyon geometrisi ile iplik-iplik ve iplik-mermi kayma sürtünme katsayısı gibi kumaş elemanları arasındaki etkileşimler araştırılmıştır. Fiziksel denemeler ve matematiksel modeller aracılığıyla mermi uç yapısında meydana gelen plastik deformasyonlar ve kumaş içerisindeki iplik kopuşları incelenmiştir. Bu çalışma ile ipliği oluşturan filament sayısı, iplik numarası, iplik kopma mukavemeti, kopma uzaması, doku konstrüksiyonu, kumaş gramajı, kumaş mukavemet özellikleri, kumaş katman sayıları ve katmanların bağlanma şekilleri gibi parametreleri göz önünde bulundurarak zırh sistemlerinin balistik performansını gerçeğe yakın oranda simüle edebilecek yazılımsal modellerin geliştirilebilmesi amaçlanmıştır [46]. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, 10-12 tabakadan oluşan para-aramid çok katmanlı



kumaş yapılarının, 300 m/s hızla hareket eden kurşun mermilere karşı balistik limite yakın bir performans gösterdiği tespit edilmiştir. Balistik koruyuculuğun etkisi, tabakalar arasındaki sürtünme katsayısının azalması ile düşmektedir (örneğin ortam neminin artması durumunda). Ayrıca deney sonuçları, materyallerin yalnızca statik olarak belirlenebilen özellikleri ile çok katmanlı tekstil yapısının mukavemetinin gerçekte olduğundan daha düşük olduğunu göstermektedir.

Yine 2007 yılında yapılan başka bir çalışmada Novotny ve ark. (2007) FEA tabanlı analitik TEXIM™ programı kullanarak Kevlar® 129 kumaşlardan meydana gelen tek katmanlı ve çok katmanlı balistik zırh sistemlerinin erken darbe davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan modellemeler ile dokuma kumaşlarda zırh panelini oluşturan katman sayıları ve kumaşı oluşturan iplik numaraları değiştirilerek darbenin gerçekleştiği ilk anlarda balistik performanstaki değişim gözlenmiştir. Deneysel çalışmalarda koruyucu zırh olarak 840 denyelik 1, 2, 3, 4, 8 ve 16 katlı paneller ve de 1500 denyelik tek katlı Kevlar® 129 panel kullanılmıştır. Atışlar sırasında ise 42 mm uzunluğunda ve yaklaşık 3 gram ağırlığa sahip küt burunlu mermiler kullanılmıştır [47].

TEXIM programı üzerinde kumaş tanımlanırken, 3 parametreye bağlı aşağıdaki denklem üzerinden tanımlanma gerçekleştirilmiştir:

$$2 \times \text{İplik Numarası} \times \text{Uzunluk} \times \text{Sıklık} = \text{Metrekare ağırlığı} \times (1 + \text{iplik kısalma yüzdesi})$$

Denklemden yer alan 2 çarpanı mevcut ipliklere 90°'lik açıyla yatırılmış diğer atkı ya da çözgü ipliklerini ifade etmektedir.

Deneylerde kullanılan Kevlar® 129'un kumaş ve iplik özellikleri aşağıdaki tablolarda verildiği şekildedir:

**Tablo 4.** Kevlar® 129 ipliğin fiziksel özellikleri [47]

Kevlar® 129 iplik özellikleri	
Esneklik modülü N/tex (GPa)	66,8 (96)
Kopma mukavemeti N/tex (MPa)	2,35 (3378)
Kopma uzaması (%)	3,3
Lif yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	1,44

**Tablo 5.** 840 denye ve 1500 denye Kevlar® 129 panellerin fiziksel özellikleri [47]

840 denye ve 1500 denye Kevlar® 129 panellerin özellikleri		
	Kevlar® 840 denye	Kevlar® 1500 denye
Doku tipi	1x1 bezayağı	1x1 bezayağı
Sıklık (tel/cm)	11	9
Metrekare ağırlığı (g/m <sup>2</sup> )	192,2	294,7
İpliğin kumaş içinde kısalma yüzdesi (%)	0	0
İplik numarası dtex (denye)	930 (840)	1670 (1500)

Bu çalışmada, modelleme kullanılarak deformasyon bölgesi incelenmeden zırh sistemini oluşturan kumaşların ne kadar enerji absorbe edebileceği tahminlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda en fazla katman sayısına sahip kumaşların spesifik enerji emilim miktarında (balistik etkinliğinde) tek katmanlı sistemlere göre düşüş olduğu görülmüştür. Bir başka deyişle zırh sistemlerine eklenen her bir kumaş katmanının balistik verimlilikte belirgin bir düşüşe neden olduğu ifade edilmiştir. Zırh panellerine daha fazla kumaş katı eklendiğinde zırh sisteminin daha fazla enerji absorbe edebildiği fakat enerji absorpsiyon oranının, eklenen kat sayısı ile doğru orantılı olarak ilerlemediği gözlenmiştir. Örneğin iki katlı kumaşların enerji absorpsiyon miktarının tek katlı kumaşların enerji absorpsiyon miktarının iki katından daha az olduğu ya da dört katmanlı kumaşların enerji absorpsiyon miktarının tek katmanlı kumaşların enerji absorpsiyon miktarının dört katından daha düşük olduğu görülmüştür. Bu duruma sebep olan faktörün ise zırh katmanları arasında kalan boşluklardan ileri geldiği ifade edilmiştir. Zırh katmanları arasında belirli bir miktar boşluk bırakıldığı zaman her bir katmanın bireysel davranış sergilediği ve zırh sisteminin tam bir sistem özelliği taşıyamadığı açıklanmıştır. Deneyler sırasında katmanlar arası boşluk 0,5 mm olarak alınmış ve bu mesafe aralığında zırh katmanlarının bireysel davranış özelliği sergilediği gözlenmiştir. Aynı testler katmanlar arasında boşluk bırakılmadan gerçekleştirildiğinde ise, tüm zırh katmanlarının tek

bir sistem davranışı sergilediği ve boşluklu yapıya göre çok daha fazla enerji absorblayabildiği görülmüştür [47].

Deneysel çalışmalar ve sayısal modellemeler ışığında Novotny ve ark. tarafından, 10 kata kadar olan kumaş paketlerinde balistik verimliliğin katmanlar arasındaki mesafe ile kuvvetli şekilde ilişkili olduğu ifade edilmiştir. 20 katmanlı ve hatta 50 katmanlı sistemlerin varlığı göz önüne alındığında ise zırh kalınlığı arttıkça katmanlar arası mesafenin öneminin de daha fazla ön plana çıktığı, bu sebeple balistik koruyuculuk açısından en yüksek spesifik enerji absorpsiyonunu elde etmek için en az katmanlar arası mesafe yerleşimini sağlayabilmenin hayati derecede önem taşıdığı belirtilmiştir [47].

Grujicic ve ark. (2009) tarafından yapılan bir başka çalışmada, mermi ile hedef arasındaki etkileşimler doğrusal olmayan dinamik modelleme yazılımı ANSYS/Autodyn kullanılarak analiz edilmiştir. Bu çalışmada Ultra Yüksek Moleküler Ağırlığa sahip Polietilen liflerden (UHMWPE) elde edilen kompozit yapıları, 0°'lik ve 90°'lik çapraz katman yatırımları ile balistik zırh sistemlerine dönüştürülmüştür. Farklı yoğunluklardaki zırh panelleri ve mermilere ait farklı başlangıç hızları ile gerçekleştirilen modelleme çalışmalarında mermi penetrasyonu; filamentin makaslandığı/kesildiği başlangıç aşaması, filament/matris bağ yapısının bozulduğu ikinci aşama ve filamentlerin aşırı miktarda uzadığı ve zırh panelinin arka yüzünde çıkıntı meydana getirdiği final aşaması olmak üzere 3 farklı aşamada incelenmiştir. Modellemelere ait fiziksel denemelerde, 5 farklı kalınlıkta zırh malzemesi, 4 farklı mermi başlangıç hızı ve 2 farklı mermi tipi olmak üzere toplamda 40 farklı parametre çalışmaya dahil edilmiştir. Deneyler sırasında kullanılan balistik koruyucu malzeme 0°/90° çapraz oryantasyonlu tek yönlü Ultra Yüksek Moleküler Ağırlığa Sahip Polietilen filament bazlı kompozit yapılar olup zırh panelleri 4,2, 11, 15, 22 ve 32 mm kalınlığa sahiptir. Atışlar sırasında kullanılan mermiler 5,56 mm kalibreli tam metal ceket tipi mermi olup, birinci mermi (M855) sertleştirilmiş çelik uç mermi çekir-

değine bağlanmıştır ve dışında 0,5 mm kalınlığında bakır gömlek bulunmaktadır. Bu mermi üzerindeki sertleştirilmiş çelik uç sebebiyle yaklaşık 4 gram ağırlığındadır ve zırh delici mermi davranışı göstermektedir. İkinci mermi tipi ise (M193) herhangi bir sertleştirilmiş çelik uç içermemektedir. Fakat geometrik olarak M885 tipi mermiyle oldukça benzerlik göstermektedir. Zırh delici özelliği olmayan M193 mermisinin ağırlığı ise yaklaşık olarak 3,5 gramdır. Deneyler sırasında mermi başlangıç hızları ise 600, 700, 800 ve 900 m/s olarak alınmıştır [27].

Gerçekleştirilen fiziksel deneylerde balistik zırh malzemesinin başarısına ait sonuçlar Tablo 6'da gösterilmektedir. Bu tabloda merminin zırh üzerindeki etkisi 3 balistik terim ile ifade edilmiştir: "Engelleme" (*kompozit zırh malzemesi mermiyi durdurmayı başarmıştır*), "Penetrasyon" (*mermi zırh panelini tamamen delmiş fakat zırh mermiye ait kinetik enerjisi de önemli miktarda absorbe etmeyi başarmıştır*) ve "Aşırı penetrasyon" (*mermi zırh panelini delerek ortasında bir delik açmıştır ve merminin kinetik enerjisinde kayda değer bir düşüş yaşanmamıştır*) [27].

**Tablo 6.** Balistik performans testlerine ait sonuçlar [27].

Test panel kalınlığı (mm)	Metrekare ağırlığı (kg/m <sup>2</sup> )	Mermi hızı (m/s)			
		600	700	800	900
4,2	4	...	...	...	A/A
11	10,5	A/A	A/A	A/A	A/A
15	13,7	...	P/P	P/P	A/A
22	21	E/E	E/E	E/E	E/E
32	31	E/E	E/E	E/E	E/E

E: Engelleme P: Penetrasyon A: Aşırı penetrasyon; deneysel/modelleme

Grujicic ve ark. tarafından yapılan bu çalışmada, farklı mermi atış hızlarında, farklı kalınlıklarda ve farklı ağırlıklarda zırh materyalleri ile, farklı tiplerde mermiler kullanarak mermilerin zırhlara olan penetrasyon derecelerini, kinetik enerji kayıplarını ve de mermilerde meydana gelen plastik deformasyonlar incelenmiştir ve bu sonuçlara dair modellemeler düzen-

lemiştirlerdir. Modellemeler için kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemlerinden faydalanan ANSYS/Autodyn nonlinear dinamik modelleme ve simülasyon programı kullanılmıştır [27].

## 6. SONUÇ

Balistik bilimi, hızla gelişen silah teknolojisi ile birlikte daha da önem kazanmaktadır. Bu nedenle, balistik yelekler, vücut zırhları ve kasklar, balistik koruma amacıyla kullanılan yüksek mukavemetli kumaşlar, uçak ve taşıtların iç yapılarında balistik darbelerle karşı koruma sağlayan ürünler gibi malzemelerden istenilen performans özellikleri de arttığından, ihtiyaçları karşılayabilecek nitelikte yeni malzemelerin araştırmalarına yoğun bir şekilde devam edilmektedir. Bu malzemelerin üretimlerinde çok farklı özellikte materyaller kullanılmaktadır. Daha yüksek performansa sahip, farklı özellikteki bu materyallerin yanı sıra balistik koruyuculuk sağlayan yeni sistemler üzerinde de önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Literatürde, özellikle tekstil takviyeli kompozitler kullanılarak geliştirilen ürünlerin yaygın kullanım alanlarının bulunduğu görülmektedir. Bu malzemelerde, lif tipinin olduğu kadar, reçine tipi, doku tipi, kat sayısı ve sıklık gibi birçok yapısal parametrenin performans üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır.

Balistik malzemenin performansı, balistik dalgayı sönmüleyebilme (enerjiyi absorblayabilme) özelliği ile ifade edilmektedir. Geliştirilen malzemeler ve ürünler, belirli standartlar kapsamında balistik performans testlerine tabi tutulmakta ve en güvenli korumayı sağlayacak yapılar tercih edilmektedir. Farklı malzemelerden farklı performans seviyelerine sahip olmaları beklenmektedir. Balistik malzemelere yapılan atışlarla balistik davranış simüle edilerek, yapılan hesaplamalar yardımıyla malzemenin balistik performansı değerlendirilmektedir.

Balistik performans testlerinin yanı sıra, son yıllarda balistik performansın modellenmesi üzerine de çalışmaların arttığı görülmektedir. Böylelikle, matematiksel modellemelerle de kumaş özellikleri, zırh katman

yapıları ve mermi geometrisi gibi parametrelerin, balistik koruyucu zırh sistemleri üzerindeki performans etkileri araştırılabilmektedir.

Bu makalede, balistik koruma amaçlı kullanılan tekstil materyalleri ve bu materyallerin balistik performanslarının tespitinde kullanılan test yöntemleri ve balistik performansın modellenmesi hakkında özet bilgi verilmeye çalışılmıştır.

## KAYNAKLAR

1. *History of Body Armor*, [http://www.leonuniform.com/BodyArmor\\_History.htm](http://www.leonuniform.com/BodyArmor_History.htm), Erişim tarihi: 06.03.2014
2. Henderson, J., (2008), *Ballistic Body Armor Protecting The Protectors*, Strategic Standardization, 0-18p.
3. Bajaj, Pushpa, Sriram, (1997), *Ballistic Protective Clothing: An Overview*, Indian Journal of Fibre & Textile Research, Vol. 22, Decembre, pp 274-291
4. Sgt. Stanley Muszynski, (2004), *Body Armor*, Eastern Michigan University, School of Staff and Command.
5. Chen, X., Sun, D., Wang, Y., Zhou, Y., (2012), *2D/3D Woven Fabrics for Ballistic Protection*, School of Materials, University of Manchester.
6. Cerit, A.A., (2004), *Partikül ve Fiber Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitin Balistik Performansının İncelenmesi*, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.
7. Akman, Y., (2012), *Eskitmeye Tabi Tutulan Kompozit Başlıkların Balistik Testlerinin Yapılması ve Analizi*, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir.
8. Çay, A., Süpüren, G., Kanat, Z.E., Gülümser, T. ve Tarakçıoğlu, I., (2007), *Balistik Lifler (Bölüm 1)*, Tekstil Ve Konfeksiyon, Sayı:4, 232- 236p.
9. *Balistik Çalışmalarda Kullanılan Hammadde Ve Kompozitler*, [http://www.acarerugur.com/FileUpload/op\\_325540/File/balistik\\_calismalarda\\_kullanilan\\_hammadde\\_ve\\_kompозitler.pdf](http://www.acarerugur.com/FileUpload/op_325540/File/balistik_calismalarda_kullanilan_hammadde_ve_kompозitler.pdf), Erişim Tarihi: 13.05.2014.
10. Turan, M., (2007), *Tabakalı Kompozit Malzemelerde Yüksek Hızlı Darbe Hasarı*, Mühendis ve Makina, Cilt: 48, Sayı: 575, 3- 8s.
11. Karakan, G., (2009), *Teknik Tekstillerin Koruyucu Yapılarda Kullanımı*, Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt:3 No:1, 65-70s.



12. Çerkez, İ. ve Ulcay, Y., (2007), *Kolloidal Silika Dispersiyonunun Polietilen Dokusuz Yüzeyin Enerji Absorpsiyonuna Olan Etkisi*, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 12, Sayı 2, 71-84s.
13. Işık, H., Değirmenci, E. ve Eveci, C., (2013), *Örgülü Kumaşların Balistik Darbe Enerji Sönümleme Mekanizmalarının İncelenmesi*, Savunma Bilimleri Dergisi, Cilt: 12, Sayı: 2, 145-162s.
14. <http://www.auxetix.com/defence.htm>, Erişim tarihi: 06.04.2014.
15. *Zetix Blast Resistant Fabric Has Other Uses*, <http://www.technovelgy.com/ct/Science-Fiction-News.asp?NewsNum=1340>, Erişim tarihi: 06.04.2014.
16. Karakan, G., (2008), *Yüksek Performanslı Liflerin Balistik Amaçlı Kullanımı*, Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt: 2, Sayı: 2, 67-73s.
17. Ataman, A., (2013), *İşlenmiş Ti-Bazlı Alaşımlarda Gözlenen Hatalar ve Bu Hataların Azaltılması için İşlem Parametrelerinin Geliştirilmesi*, Proje Fuarı 2013, Eskişehir, <http://mf.anadolu.edu.tr/sites/mf.anadolu.edu.tr/files/files/mlz.pdf>.
18. Özşahin, E. ve Tolun, S., (2010), *Yüzey Kaplaması ve Destek Katman İlavesinin Alüminyum Levhaların Balistik Performansına Etkileri*, Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Dergisi, Cilt:4, Sayı:4, 41-50s.
19. Özşahin, E. ve Tolun, S., (2009), *Polietilen Destekli AA 7075 T651 Levhalarda Katman Sıralamasının Balistik Dayanuma Etkisi*, İTÜ DERGİSİ/d, Cilt: 8, Sayı: 2, 72-80s.
20. Akman, Y., Candan, C., Akdaş, D., Demircioğlu, T.K. ve Pekdur, Ö., (2012), *Para-aramid Malzeme Kullanılarak Üretilmiş Kompozit Zırh Tabakasının Üzerinden Kademeli Olarak Talaş Kaldırmanın Terminal Balistik Performansta Meydana Getirdiği Değişimin İncelenmesi*, 14<sup>th</sup> International Materials Symposium (IMSP'2012), 944-952s, 10-12 October 2012, Pamukkale University, Denizli,
21. Bilişik, A., (1997), *Property-Structure Relations at Ballistic Fabrics*, Tekstil ve Konfeksiyon, Cilt:14, 220-222p.
22. Cheeseman, B.A., Bogetti, T.A., (2003), *Balistic Impact into Fabric and Compliant Composite Laminates*, Composite Structure, 61, 161-173p.
23. Temiz, S., (2005), *Balistik Kumaş ve Test Yöntemleri Üzerine Bir Araştırma*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
24. Bogdan, A., Marszałek, A., Majchrzycka, K., Brochocka, A., Luczak, A., (2012), *Aspects of Applying Ergonomic Tests in The Evaluation of Ballistic Body Armours Using the Example of Ballistic Vests*, *Textile Science & Engineering*, Volume 2, Issue 7, 2-7p.
25. Çerkez, İ., (2007b), *Kolloidal Silika Dispersiyonunun Polietilen Kumaşların Balistik Performansına Etkisi*, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Bursa.
26. Naik, N.K., Shrirao, P., Reddy, B.C.K., (2006), *Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Formulation*, International Journal of Impact Engineering 32,1521–1552p.
27. Grujicic, M., Glomski, P.S., He T., Arakere, G., Bell, W.C. and Cheeseman, B.A., (2009), *Material Modeling and Ballistic-Resistance Analysis of Armor-Grade Composites Reinforced with High-Performance Fibers*, Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 18(9), 1169-1182p.
28. Hazell, P.J. and Appleby, G., (2009), *A Study on the Energy Dissipation of Several Different CFRP-Based Targets Completely Penetrated by a High Velocity Projectile*, Composite Structures, 91, 103-109p.
29. Özer, S., (2004), *Balistik Koruma Amacıyla Kullanılan Malzemeler ve bu Malzemelerin Balistik Deformasyonuna Etki Eden Faktörler*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
30. Korkmaz, M., (2009), *Aramid Kumaş Özelliklerine Bağlı İplik Çekme (Yarn Pull-Out) Testi İle Çok Katlı Dikişli Yapıların Balistik Performansının Deneysel Belirlenmesi*, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri.
31. *Military*, <http://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/bullets.htm>, Erişim tarihi: 15.04.2014.
32. *Performance Standards for Ballistic Resistance of Body Armor*, <http://www.nitracoeprotech.org/pdf/June2013BulletTesting.pdf>, Erişim tarihi: 06.04.2014.
33. TS 11164 - *Balistik koruyucu vücut zırhı*.
34. TS 13349 - *Askerî zırhlar - V<sub>50</sub> balistik hız deneyi*
35. Candan, C., 2007, *Hafif Silahlara Karşı Preslenerek ve Preslenmeden Üretilen Yüksek Yoğunluklu Polietilen (UHMW-PE) Zırh Plakalarının Terminal Balistik Özelliklerinin İncelenmesi*, 8. Uluslar Arası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı, 7 – 9 Kasım 2007, İstanbul.
36. NIJ-STD-0101.04 - *Ballistic Resistance of Personal Body Armor*.
37. NIJ Standard-01.01.06 - *Ballistic Resistance of Personal Body Armor*.
38. Yılmaz, H., (2012), *Üç Fazlı Elyaf Tabakalı Karma Kompozit Yapının Balistik Özelliklerinin İncelenmesi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Isparta.
39. Rice, K., (2011), *Ballistic-Resistant Body Armor Selected Research Initiatives Body Armor Workshop*, November 29, National Institute of Standards and Technology (NIST) Gaithersburg, Maryland



40. *The NEW Body Armor Standard from NIJ: The FOP Perspective*, <http://www.fop.net/legislative/BodyArmorStandard.pdf>, Erişim tarihi: 19.05.2014.
41. Erdem, M., Türker, M., (2011), *7039 Alüminyum Alaşımının Kaynak Öncesi ve Sonrası Mekanik ve Balistik Özelliklerinin Araştırılması*, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 26, No 1, 17-26s.
42. Aly, S.Y. and Li, Q.M., (2008), *Critical Impact Energy for the Perforation of Metallic Plates*, Nuclear Engineering and Design, Volume 238, Issue 10, October 2008, 2521–2528p.
43. Zukas, A.J., (1992), *Impact Dynamics*, Krieger Publishing Comp., Florida, 155-214p.
44. Karagöz, Ş., Atapek, Ş.H. ve Yılmaz, A., (2010), *Su Verilmiş ve Temperlenmiş Beynitik Bir Zırh Çeliğinin Balistik Davranışı: Hasar Üzerine Modelleme ve İncelemeler*, Savunma teknolojileri dergisi, Sayı: 053, 62-66s.
45. *International Standards for Personal Armor*, [http://www.bodyarmornews.com/wp-content/uploads/2013/10/DSM\\_Ballistic\\_Standard.pdf](http://www.bodyarmornews.com/wp-content/uploads/2013/10/DSM_Ballistic_Standard.pdf), Erişim Tarihi:15.05.2014.
46. Barauskas, R. and Abreitiene, A., (2007), *Computational Analysis of Impact of a Bullet Against the Multilayer Fabrics in LS-DYNA*, International Journal of Impact Engineering, 34, 1286–1305p.
47. Novotny, W.R., Cepuš, E., Shahkarami, A., Vaziri, R., Poursartip, A., (2007), *Numerical Investigation of the Ballistic Efficiency of Multi-Ply Fabric Armours During the Early Stages of Impact*, International Journal Impact Engineering, 34, 71-78p.
48. Roylance, D., Chammas, P., Ting, J., Chi, H. and Scott, B., (1995), *Numerical Modeling of Fabric Impact*, Proceedings of the National Meeting of the American Society of Mechanical Engineers (ASME), San Francisco.