



BALİSTİK PANEL VE KORUYUCU ZIRH ÜRETİMİNDE KULLANILAN LİF VE KOMPOZİT MALZEMELER

Eser SÖZEN*, Gökhan GÜNDÜZ, Erol İMREN

Bartın Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bartın

ÖZET

Her canlı varlık, dışarıdan gelebilecek saldırılara karşı içgüdüsel olarak korunma ihtiyacı hissetmektedir. İnsanoğlu da tarih boyunca çevresel faktörlere karşı önlem aldığı gibi, düşmanlardan gelebilecek saldırılara da önlemler almıştır. Bu önlemler metal ve metal türevlerinden başlayarak, hendekler, surlar ve kaleler olarak devam etmiştir. Günümüzde ise, teknolojinin gelişmesiyle ortaya çıkan yüksek direnç ve elastikiyet özelliklerine sahip hafif kumaşların polimerlerle kombinasyonları, balistik panel ve zırh üretiminin temelini oluşturmaktadır. Askeri alanlar başta olmak üzere balistik alanında yapılan yatırım, akademik ve askeri çalışmalar, bu konunun önemini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, balistik panel ve kişisel koruyucu zırh üretiminde kullanılan kompozit malzemelerin özellikleri, kompozit malzemeler ile elde edilen koruyucuların kombinasyonları ve bu koruyuculara uygulanan balistik testler incelenmiştir. Yapılan çalışmaların irdelenerek derlenmesiyle oluşan bu çalışma, balistik alanında yapılacak çalışmalara literatür desteği sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Balistik panel, zırh üretimi, kompozit malzeme, inorganik lifler

COMPOSITE MATERIALS AND FIBERS USED IN BALLISTIC PANEL AND PROTECTIVE ARMOR PRODUCTION

ABSTRACT

All living things need to protect themselves against attacks from outside world instinctively. And likewise, throughout history human beings not only have taken precautions against environmental factors but also against attacks from enemies. These precautions include precautions against leather, metal and metal derivatives, ditches, city walls and castles. And today, the combination of light fabrics having high resistance and elasticity with polymers forms the basis for ballistic panel and armour production. Investments in the area of ballistics, particularly military investments, as well as academic and military studies, indicate the significance of the issue. This study examines the characteristics of the composites used in ballistic panel and personal protective armour production; the combinations of the protectors made of composite materials and the ballistic tests applied to these protectors. This study which is a collection of the existing studies by examining them will provide literature support for studies on ballistic.

Keywords: Ballistic panel, armor production, composite material, inorganic fibers

1. GİRİŞ

Fransızca “balistique” sözcüğünden gelen balistik, bir merminin namludan çıkarak hedefe ulaşana kadar namlu özellikleri ve ortam şartlarıyla değişen hareketlerini ve hedefe çarptıktan sonraki enerji boşalması ve deformasyon davranışlarını inceleyen bilim dalı olarak tanımlanır. Balistik bilimi çalışma konularına göre *iç balistik*, *dış balistik* ve *terminal balistik* olarak üç grupta incelenir. *İç* ve *dış* balistikte merminin namlu içinde ve havadaki hareketleri incelenirken, *terminal balistikte* hedefe çarpan mermi ve hedefte oluşan deformasyonlar incelenir. Bu bakımdan hedef (zırh) tasarımı, karakteristiği ve deformasyon alanlarının araştırılması terminal balistiğin konusudur. Zırhlar çeşitli büyüklük ve hızdaki mermi ve şarapnel parçacıklarına karşı mühimmat ve kişilerin korunması için geliştirilen donanımlardır. Zırhlar kullanım alanlarına göre 3 gruba ayrılır.

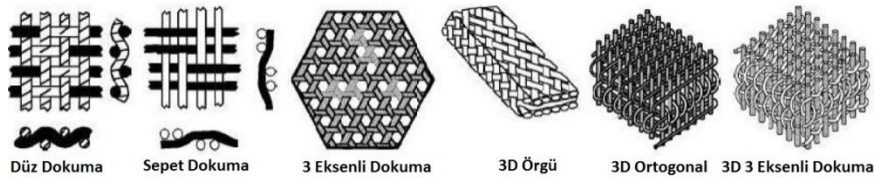
Bunlar:

- Kişisel Zırhlar (kurşungeçirmez yelekler, kasklar)
- Hafif Zırhlar (helikopter ve savaş uçaklarında kullanılan zırhlar)
- Ağır Zırhlardır (tanklarda kullanılan zırhlar) (Candan, 2005).

Askeri araçlar, taktiksel olarak yer değiştirme gereksinimi duydukları için, birçok balistik panel ağır oldukları için tercih edilmemektedir. Hafif ve etkili zırh üretim araştırmaları, seramik, yüksek mukavemetli kumaş, köpük ve metal gibi materyallerin çoklu tabakalar halinde kombinasyonlar halinde kullanımını ortaya çıkarmıştır (Kılıç, 2014). Yüksek mukavemetli kumaşların zırh üretiminde kullanılmasıyla üstün balistik performans, yüksek enerji sönümleme kabiliyeti, düşük ısı iletkenliği, düşük iç deformasyon gibi özellikler elde edilirken çatlak yayılmasına, korozyon ve kimyasallara karşı yüksek dayanım da sağlanmıştır. Aynı zamanda sağladıkları mekanik avantajların yanında konfor, ergonomi, maliyet faktörü, kullanım ömrü ve çevre koşullarına (ısı, ultraviyole ışınlar ve nem) karşı direnç ve kolay bakım gibi tasarımları hafifleterek kullanım alanlarını genişleten özellikleri de mevcuttur (Cavallaro, 2011). Balistik panel ve koruyucu zırhların enerji emilimini etkileyen en önemli faktörler malzeme cinsi, yapısı ve sıklığı (dokuma, örgü vb.) mermi geometrisi, mermi hızı, malzemeler arasındaki sürtünme katsayısı ve kullanılan katmanlarının sayısıdır. Bu materyallerin kişisel koruma için kullanılması ise bu materyallerin ve bileşenlerinin mekanik tepkilerinin anlaşılmasına yönelik daha ileri bilimsel yaklaşımları gerektirmektedir. Bunun için darbe etkisinin oluşturduğu deformasyon ve balistik dayanıma etki eden faktörler doğruluğu teyit edilmeli, balistik panel, zırhlı araç veya kişisel koruyucu zırh gibi farklı kullanım yerlerine uygun materyal seçimi yapılmalıdır.

2. BALİSTİK PANEL VE ZIRH TASARIMINDA KULLANILAN MALZEMELER

Teknolojik gelişmelere bağlı olarak balistik panel ve koruyucu zırh tasarımında metal ve türevleri, seramik gibi ağır materyallerin yanında yüksek mukavemetli lifler ve polimer kompozitlerin kullanımı da artmaktadır. Bu çalışmada, yüksek direnç özelliklerine sahip lifler ve polimerler irdelenmiştir. Bir polimer olan polipropilen (PP), yüksek yoğunluklu polipropilen (HDPP) ve yüksek performanslı polietilen (HPPE) kombinasyonları kullanılarak elde edilen balistik panel çalışmaları (Özgültekin, 2012; Jacobs and Van Dingenen, 2001) bulunmaktadır. Yüksek dayanımlı kumaşlar üretim yöntemlerine göre ikiye ayrılırlar. Bunlar dokuma ve örgü kumaşlardır. Örgü kumaşlar dokuma kumaşlara göre daha mukavemetli fakat karmaşık üretim yöntemleri sebebiyle daha yüksek maliyetli kumaşlardır. Bu sebeple askeri uygulamalarda maliyetinin düşük olması ve balistik direncinin yüksek olması sebebiyle çoğunlukla dokuma kumaşlar kullanılır (Wall, 2002). Dokuma tiplerinin en yaygın olarak kullanılanları düz ve sepet dokuma türleridir. Sepet dokuma, dokuma karakteristiği sebebiyle düz dokumadan %10 daha fazla enerji emilimi sağlamaktadır (Csukat, 2006). Farklı örgü ve dokuma tipleriyle üretilmiş kumaşlar Şekil-1 de görülmektedir.



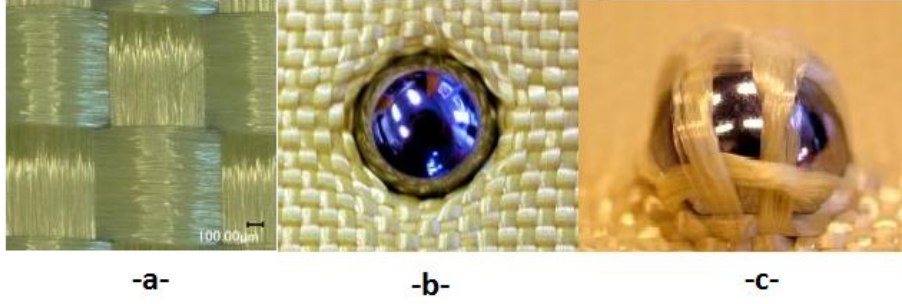
Şekil 1. Yüksek direnç özellikleri sergileyen kumaşlarda kullanılan dokuma türleri (Ko and Geshury, 2002).

Zırh tasarımında en çok tercih edilen kumaş türleri; para-aramid, yüksek molekül ağırlıklı polietilen (HMWPE), cam lifler ve son yıllarda zırh tasarımında kullanımları artan PBO ve PPID'dır. Bu kumaşlar ile üretilen balistik zırhlar metaller ve seramikler ile üretilen zırhlara kıyasla daha hafif olmaları nedeniyle birim ağırlık başına performansları ve hareket kabiliyetleri yüksektir (Yumak vd., 2013).

2.1 Aramid Lifler

Aramid kumaşlar yapı ve özelliklerine göre Meta aramid ve Para aramid olarak ikiye ayrılırlar. Meta aramidler ısıl dirençleri çok yüksek olan tutuşturulamayan ve yakılamayan aramidlerdir. Aramid liflerin ısıl koruyucu üretiminde kullanılan türleridir. En bilinen türleri ise Nomex (Dupont), Conex (Teijin) ve Conex HT (Teijin)'dir. Aramid kumaşların balistik uygulamalarda kullanılan türleri ise para aramid fiberlerdir. En bilinen türleri ise Kevlar (Dupont), Twaron (Akzo) ve Technora (Teijin) dir (Cavallaro, 2011). Özellikle keklar gelişmiş kompozit

üretiminde yoğun bir şekilde kullanılmakta ve yüksek mekanik özellikleri ile bilinmektedir. Polimerle kullanımında kevlar ve polimer matriksin etkileşimi direnç özelliklerini etkilemektedir (Mathur and Netravali 1996).



Şekil 2. Para aramid lif Kevlar KM2'ye ait dokuma tipi (a) ve balistik testler (b ve c) (Nilakantan, 2013)

Para-aramid kumaşlar ilk olarak plastik malzemelerin güçlendirilmesi amacıyla üretilmişlerdir. Fakat günümüzde savunma, otomotiv, havacılık ve uzay teknolojisi alanlarında kullanımları yaygınlaşmıştır (Karahan 2008). Para-aramid kumaşların genel özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Para-aramid Kevlar 29 kumaşın fiziksel özellikleri (Afshari, 2011)

Kevlar 29 kumaşın fiziksel özellikleri	Değer
Yoğunluk (g/cm ³)	1.45
Young modülü (GPa)	130
Çekme modülü (g/denye)	1100
Çekme dayanımı (GPa)	3.6
Elektriksel dayanıklılık (mohm-m)	1015
Isıl iletkenlik (W/mK)	0.04-0.08
Erime noktası (° C)	460 ° C'de ayrışır
Basınç dayanımı (MPa)	393

Aramid kumaşların kullanım alanları ve çalışma koşulları incelendiğinde çevresel faktörlerin önemi ortaya çıkmaktadır. Para-aramid kumaşların dayanımına etki eden en önemli çevresel faktör, ultraviyole ışınlarıdır. Ultraviyole (UV) ışınların aramid kumaşların dayanımına etkisini belirleyebilmek için yapılan bir çalışmada doğrudan güneş ışınları altında 5 hafta bekletilen aramid kumaşın dayanımının %49 oranında düştüğünü görülmüştür. Bu nedenle yoğun ultraviyole ışınlarına maruz kalacak tasarımlarda aramid kumaşların farklı yapıdaki lifler ile dokunması ve kaplama yapılarak aramid kumaş üzerine gelecek ultraviyole ışını engelleme yollarına gidilebilmesi tavsiye edilmektedir. (Bunsell, 1998).

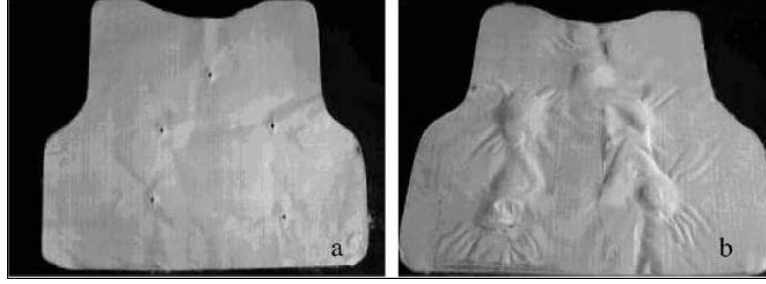
Karahan (2008), Twaron Ct710 tipi kumaş kullanarak hazırladığı zırhların balistik davranışlarını incelemiştir. Darbe derinliği ve darbe çapının yanında, kumaş tarafından absorbe edilen enerji ve arka yüzeye iletilen enerji parametreleri ile karar verilen değerlendirme sonucunda, kumaş kat sayısı ve dikiş modelinin balistik özellikler üzerinde etkili olduğunu bildirmiştir. Yapılan çalışmaya ait görsel Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Aramid Twaron Ct710 kumaşı üzerine yapılan balistik deney (Karahan, 2008)

2.2 Yüksek Performanslı Polietilenler (HPPE)

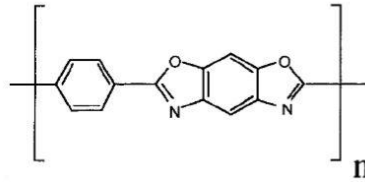
Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilenler (HMWPE) olarak da adlandırılan bu lifler, piyasada Spectra ve Dyneema isimleriyle bilinir. Yüksek moleküler ağırlıklı polietilenler 1 g/cm^3 den daha küçük (ortalama $0,97 \text{ g/cm}^3$) yoğunluklarıyla zırh sanayinde kullanılan en hafif malzemelerdir (Cavallaro, 2011). Her iki ürün de farklı üreticiler tarafından üretildiği için farklı üretim detayları da farklı olmakla birlikte her ikisi de yüksek performanslı polietilen (HPPE) liften elde edilmektedir. Molekül ağırlığına oranla çelikte 15 kat, kevlerden ise %40 daha güçlüdür. Aşınma dayanımı, yüksek karbonlu çelikten daha yüksektir. UV ışınlarına ve suya karşı dayanıklıdır (URL-1). Liu et al., (2010), HMWPE ve polimer matrisi olarak izopren latex kullandığı çalışmada kurşun geçirmez yelek üretmiş ve 7,62 mm'lik zırh delici meriler karşısında balistik testlerini gerçekleştirmiştir. Testler sonucunda mermilerin zırhın arka yüzeyine geçmediğini belirlemiştir. Yapılan çalışmaya ait görsel Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (HMWPE) lifler ile üretilen kurşun geçirmez yelek a) ön, b) arka (Liu et al., 2010)

2.3 PBO (Polybenzobisoxazole) Kumaşlar

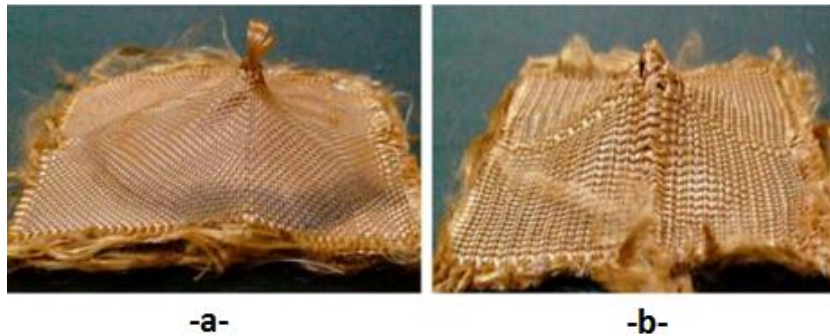
PBO (Polybenzobisoxazole), Şekil 5'te görüldüğü gibi, değişik halkalı aromatik yapılar içeren polybenzazoles türlerinden biridir. 1980'li yıllarda Amerika Hava Kuvvetlerinin aramid liflerden daha dayanıklı malzeme üretme çabalarının bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Piyasada Toyobo firmasının ticari ismi olan Zylon ismiyle bilinmektedir (Kitagawa et al., 1998).



Şekil 5. PBO'nun aromatik yapısı

PBO liflerinin genel özellikleri;

- Yüksek bozulma sıcaklığı
- Yüksek aşınma direnci
- Düşük nem direncidir (Seely et al., 2004).
- Yüksek sürünme direnci
- Düşük ultraviyole direnci



Şekil 6. PBO'nun genel görünüşü (a) 2D, (b) 3D ortogonal (Behera and Dash, 2013).

Şekil 6'da genel görünüşü verilen PBO lifler, genel özelliklerinde belirtildiği gibi, ultraviyole ışınlarına karşı direnci zayıftır. UV ışınlarına maruz kalan PBO liflerin çekme direnci değerlerinde önemli düşüşler görülmektedir. Hu and Lesser (2004), PBO kumaşların ultraviyole ışınlar altındaki dayanımını araştırdıkları çalışmalarında, 6 ay gün ışığına tabi tutulan Zylon'da % 65 oranında direnç kaybı olduğunu belirlemişlerdir. Bu sebeple PBO liflerinin ultraviyole ışınlarına karşı dayanımını arttırmak ve kullanım alanlarını genişletmek için çeşitli nano-parçacık (ZnO, Silica ve CNT) takviyesi ve yüzey kaplama yöntemlerine gidilmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, Zhang et al., (2011), PBO liflerinin ultraviyole ışınlarına karşı dayanımını arttırmak için farklı (%0,5, %1 ve %2) oranlarda nano ZnO parçacıklarını epoksi ile muamele etmiş ve uyum sağlayıcı olarak HK560 kullandığı çalışmalarının sonucunda, 30 saat UV ışınlarına maruz bırakılan kaplama yapılmamış PBO liflerinde çekme direnci 2,3 GPa iken, bu değeri %2 oranında nano ZnO içeren PBO liflerinde 4,8 GPa olarak belirlemişlerdir.

2.4 Yüksek Performanslı Cam Lifler

Farklı türleri olan cam liflerinden balistik tasarımlarda yüksek dayanımları, kolay işlenebilir olmaları ve düşük yoğunlukları sebebiyle en çok kullanılan türleri E (Electrical)-cam ve S (Strength)-camdır. S-cam ve E-cam askeri birçok uygulamada kullanılan güçlendirilmiş liflerdir. S-camın maliyeti E-cam ile kıyaslandığında yüksek olsa da yüksek dayanımı ve düşük yoğunluğu sebebiyle balistik uygulamalarda sıklıkla kullanılır. S-cam yüksek oranda yorulma dayanımına ve neme karşı yüksek direnci sahiptir. Buna karşın sürünme oranı düşüktür. S-camın çekme mukavemeti E-camına oranla %33 daha yüksektir (Walling,1985)

Cam lifleri genel amaçlar için ve özel amaçlar için olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Endüstride kullanılan cam liflerinin %90'ından fazlası genel amaçlar için kullanılan düşük maliyetli cam lifleridir. Bu lifler American Society for Metals (ASM)'de E- glass olarak tanımlanmış ve karakteristik özellikleri belirtilmiştir (Wallenberger et al., 2001). Cam liflerinin ASM'de belirtilen genel özellikleri aşağıdaki gibidir.

- Düşük maliyetli olması
- Yüksek üretim oranları
- Yüksek sertlik
- Isıya karşı direnç
- Kimyasallara karşı direnç
- Yüksek direnç
- İyi elektrik izolasyonu

Termal özelliklerinin iyi olması nedeniyle yanmaz kablo üretiminde de kullanılmaktadır. Sözen et al., (2016), dokuma E- glass lifleri ile desteklediği kontrplakların mekanik ve yanma performanslarını incelediği çalışmalarında, dokuma cam lifinin makaslama direncini %45, yanma esnasında maksimum sıcaklığa ulaşma süresini ise ortalama %30 (3 dakika) geciktirdiğini bildirmişlerdir. 2,5 gr/cm³ gibi yüksek yoğunlukları nedeniyle balistik uygulamalarda kullanımı sınırlı kalmaktadır. Cam lifleri, dokuma, kırılmış ve toz halinde üretilebilmektedir. Şekil 7'de dokuma ve kırılmış haldeki cam lifleri gösterilmiştir.



Şekil 7. Dokuma (a) ve kırılmış (b) haldeki cam lifleri

2.5 PPID (Polypyridobisimidazole) Lifleri

Akzo Nobel tarafından geliştirilen ve M5 olarak bilinen PPID (Polypyridobisimidazole) lif grubu, yüksek balistik performansa sahiptir (Lane, 2005). PPID lifleri PBO lifleri gibi son zamanlarda yaygın olarak kullanılan

yüksek çekme gerilmesi, yüksek elastisite modülü ve yüksek elektriksel iletkenliğe sahip lif grubudur (Afshari et al., 2008). PPID liflerinin üretim teknolojileri ve kullanım alanlarının geliştirilmesi günümüzde araştırma konusu olarak yerini korumaktadır.

3. ZIRH TASARIMLARINDA DARBE DAYANIMINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Üretilen balistik panel ve koruyucu zırhların darbe dayanım testleri incelendiğinde, darbe dayanımına etki eden faktörler; malzeme özellikleri, kumaş yapısı, mermi geometrisi, darbe hızı, tabaka sayısı, sürtünme ve sınır koşulları olarak sınıflandırılabilir (Tabiei and Nilakantan, 2008).

3.1. Malzeme özellikleri

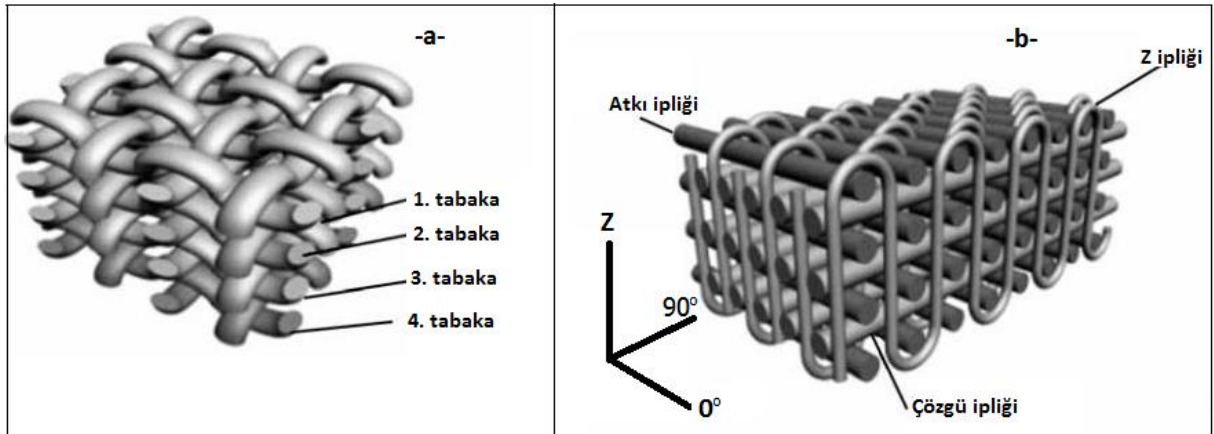
Zırh tasarımlarında balistik dirence etki eden malzeme özellikleri malzemenin çekme gerilmesi, elastisite modülü ve yoğunluğudur. Yüksek elastisite (E) ve düşük yoğunluğa (d) sahip olan malzemelerin darbe etkisini daha geniş bir alana yayarak darbenin noktasal etkisini azalttığı görülmüştür. Bu durum, matematiksel olarak merminin zırha çarptığı noktada oluşturduğu darbe dalgası ile açıklanabilir (Roylance, 1980). Darbe dalgasının aktarım hızı; (c)

$$c = \sqrt{\frac{E}{d}} \quad (1)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır. Balistik direnci etkileyen diğer bir faktör ise hacim-ağırlık oranıdır [52]. Farklı tiplerdeki lif ve kompozitler ile yapılan çalışmalarda, yüksek hacim-ağırlık oranına sahip kompozit malzemelerin daha yüksek balistik direnç gösterdiği sonucuna varılmıştır. Aynı şekilde elastisitesi yüksek malzemelerin enerji sönümleme kapasitesinin daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Lin and Bhatnagar 1992).

4.2 Kumaş Yapısı

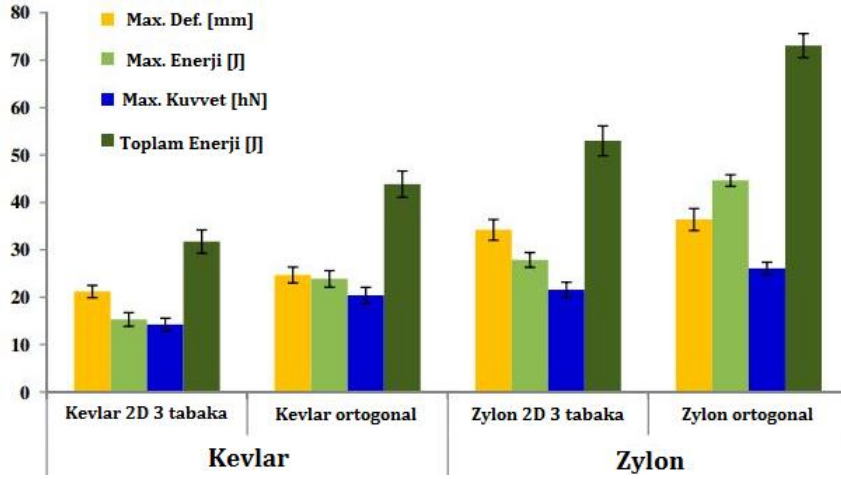
Kumaş yapısı, kumaşı oluşturan örgünün, örgüyü oluşturan ipliğin ve ipliği oluşturan lifin tüm özelliklerini silsile olarak taşımaktadır. Fakat tek başına kumaş yapısıyla ilgili bilgiler balistik performansın tahmin edilmesi için yeterli değildir. Kumaşların balistik direncin belirlenmesinde kumaş malzeme özellikleri ve kumaş dokuma özelliklerinin bir arada değerlendirilmesi gerekmektedir (Yumak vd., 2013). Şekil 8'de düzlemsel ve üç boyutlu kumaşlara ait yapı diyagramları verilmiştir.



Şekil 8. a) Düzlemsel (2D), b) Üç Boyutlu (3D) kumaşların yapı diyagramları (Zhang et al., 2014a)

Zırh tasarımında kullanılan yüksek mukavemetli kumaşlar üretim geometrilerine göre *tek yönlü plakalar*, *düzlemsel* (2D) ve *üç boyutlu* (3D) kumaşlar olmak üzere 3 farklı gruba ayrılır (Jovicic, 2003). Zırh tasarımında diğer kumaş türlerine göre daha yakın zamanlarda kullanılmaya başlanan 3D kumaşlar, 2D kumaşlara atkı ve çözgü ipliklerine ek olarak üçüncü bir Z ipliğinin dokuma sürecine eklenmesiyle üretilmişlerdir (Zhang et al., 2014b; Shi et al., 2011). Bu üç farklı kumaşın enerji sönümleme ve darbe yükleri karşısında hasar davranışları incelendiğinde tek yönlü plakaların, düzlemsel (2D) ve üç boyutlu (3D) kumaşlara kıyasla daha fazla enerji absorbe edebildiği fakat hasar alanlarının (2D) ve (3D) kumaşlara oranla daha büyük olduğu görülmüştür (Zhang et al., 2014a). Şekil 9'da 2D ve 3D Kevlar ve Zylon kumaşlara ait mekanik özellikler verilmiştir. Çalışma

sonuçlarına göre; Zylonun kevlarla, 3D'nin 2D'ye ve ortogonal yapının tabakalı yapıya karşı daha üstün performanslar sergilediği görülmüştür (Behera and Dash, 2013).



Şekil 9. Farklı dokuma geometrilerinin mekanik özelliklere etkileri (Behera and Dash, 2013).

3.3 Mermi Geometrisi

Merminin yüksek hızla gelerek zırha çarpması esnasında mermi baskıya ve kesme kuvvetine neden olur ve zırh penetrasyona uğrar. Mermi yavaşlayarak plakayı deforme etmeye başlar ve bu durum delaminasyona ve liflerin gerilmesine neden olur. Bu esnada merminin zırha temas yapacağı mermi ucu geometrisi basıncı arttırıp azaltacağı için deformasyon oluşumunda önemlidir (Jovicic, 2003). Mermi geometrisinin incelenmesinde etkili olan faktörler mermi ağırlığı, mermi yarıçapı ve mermi uç geometrisidir. Sabit kütledeki farklı yarıçaplarda aynı mermi geometrisine sahip mermiler ile yapılan deneyler sonucunda görülmüştür ki, artan mermi yarıçapıyla balistik limit hızı artmaktadır. Sabit yarıçap ve aynı mermi geometrisine sahip mermilerde kütle artışının merminin hızını düşürdüğü bildirilmiştir (Naik and Doshi, 2008). Farklı şekil, çap ve uzunluğa sahip mermilerin balistik testlerde hıza olan etkilerinin incelendiği diğer bir çalışmada, merminin geometrisi, çap ve uzunluğunun darbe dayanımını etkilediği bildirilmiştir (Nilakantan et al., 2013). Şekil 10'da farklı geometriye sahip darbe uçları gösterilmiştir.



Şekil 10. Darbe testlerinde kullanılan farklı geometriye sahip darbe uçları a) Düz, b) Yarı küresel, c) Ogival, d) Konik (Lim et al., 2002; Tan et al., 2003)

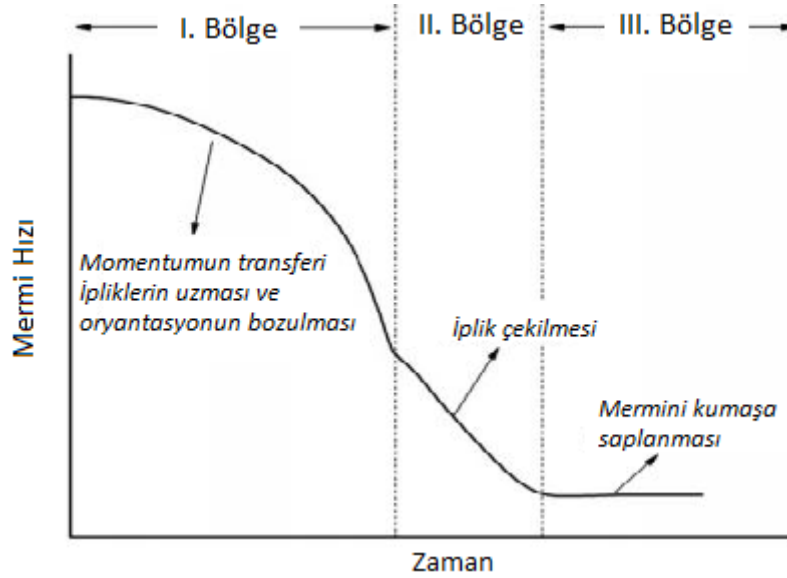
Merminin uç geometrisi kadar balistik direnci etkileyen diğer bir faktör merminin ağırlık ve boyutlarıdır. Farklı (küre, koni ve silindir) geometrilere sahip 3 mermi ve bu 3 merminin ağırlıkları eşit mermi ebatları farklı 6 mermiyle balistik test yapılmış ve sonuçlar Tablo 2'de gösterildiği gibidir. Burada çarpma hızı V_i (impact velocity), darbe sonrası artık hız V_r (residual velocity) olarak verilmiştir.

Tablo 2. Farklı ağırlık ve geometrilerdeki mermiler ile yapılan darbe test sonuçları (Nilakantan et al., 2013)

Mermi	Darbe Noktası	V_i (m/s)	V_r (m/s)
Küre(d=5.556 mm)	Boşluk-İplik	50	13.2 - 8,5
Küre(d=2.778 mm)	Boşluk-İplik	50	32.1 - 28,5
Büyük Koni (d=5.556 mm)	Boşluk	50	16.8
Küçük Koni (d=2.778 mm)	Boşluk	50	43.9
Büyük Silindir (d=5.556 mm L=5.556 mm)	Boşluk-İplik	50	-
Büyük Silindir (d=5.556 mm L=5.556 mm)	Boşluk-İplik	85	40.8 - 40,5

3.4 Mermi Hızı

Balistik testler sırasında hız limitinin altında bir hızla gelen merminin kumaşa temas ettiği ilk andan kumaşa nüfuz ettiği ana kadar geçen süreyi 3 aşamada incelenebilir. İlk aşamada merminin hızından dolayı sahip olduğu kinetik enerji ve momentum ipliklere aktarılır. İpliklerde uzama ve kumaş yapısında bozulmalar oluşur. İkinci aşamada ise aktarılan enerjinin bir sonucu olarak merminin temas ettiği ipliklerde çekilme meydana gelir. Üçüncü ve son aşamada ise merminin kumaşa saplanmasıyla birlikte merminin kinetik enerjisinin tamamı sönmülmüş olur ((Nilakantan and Gillespie, 2012). Şekil 11’de Balistik limitin altında bir hızla gelen merminin zamana bağlı hız grafiği verilmiştir.



Şekil 11. Balistik limitin altında bir hızla gelen merminin hız grafiği (Nilakantan and Gillespie, 2012)

3.5 Çoklu Tabakalar

Literatürde kumaşların balistik uygulamalarda çok tabakalı olarak uygulanmasına dair birçok çalışma bulunmaktadır (Özgültekin, 2012; Jacobs and Van Dingenen, 2001; Zhang et al., 2014a; Zhang et al., 2014b; Jovicic, 2003). Bu çalışmaların büyük bir çoğunluğu artık hız (V_r) ve çarpma hızı (V_s) üzerine yapılmıştır.

Çok katlı balistik uygulamalar ile ilgili araştırma yapan birçok araştırmacı hasar mekanizmaları öncelikle mermi geometrisi, hız, matris-lif yapılaşma durumlarına bağlı olduğunu görmüştür. Balistik uygulamalarda düşük matris-lif arası yapılaşma durumu çok katlı balistik uygulamalar için dayanımı arttırmaktadır (Özgültekin, 2012).

3.6 Sürtünme

Mermi-iplik ve iplik-iplik arasındaki sürtünme katsayısı ve aralarda kullanılan polimer matrisler enerji emilimini dolayısıyla balistik dayanımı arttırmaktadır. Sürtünme merminin hızını azaltarak artık hızın azaltılmasını sağlamaktadır. İplik-iplik arasındaki sürtünme balistik dayanımı mermi-iplik arasındaki sürtünmeden nispeten daha fazla etkilemektedir (Ha-Minh et al., 2012). Lifler ve lif-mermi arasındaki sürtünme

oranı liflerin darbe karşında bir arada tutularak hareket etmelerini engellemektedir (Nilakantan and Gillespie, 2012). Sürtünme, hasar oluşumunu yavaşlatarak daha fazla enerjinin emilebilmesini sağlamaktadır. Sürtünme farklı sınır koşullarında farklı özellikler gösterebilmektedir. 4 kenarı sabit 0,5 sürtünme katsayısına sahip plakada enerji emilimi %11 artarken, 2 kenarı sabit plakada aynı sürtünme değerinde %24 oranında enerji emilimi artmaktadır (Duan et al., 2005).

3.7 Sınır Şartları

Balistik uygulamalarda malzeme cinsi, kumaş yapısı, mermi hızı ve geometrisi gibi faktörlerin yanında balistik limiti belirleyen diğer bir faktörde sınır şartlarıdır. Dört tarafı sabit bağlantı şekli iki tarafı sabit bağlantı şekline göre mermiyi daha hızlı yavaşlatabilmektedir Fakat iki tarafı sabit bağlantı şekli mermi hızını daha fazla düşürebilmektedir bu sebeple de mermi hızını daha uzun sürede yavaşlatmaktadır (Duan et al., 2005). İki tarafı sabit mekanizmada, hedef zırh diğer iki taraftan gerilme kabiliyetini korumaktadır. Bu durum mermi hızında yavaşlamaya neden olmaktadır.

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Balistik bilimi üzerine yapılan birçok çalışma, devletler tarafından gizli tutulmasına rağmen, özellikle son yıllarda balistik panel ve kişisel koruyucu zırh üretimi ile ilgili birçok akademik çalışma da mevcuttur. Metal koruyucular ağırlıkları nedeniyle taşıma ve hareket kabiliyetlerini sınırlandırmaktadır. Bu yüzden zırh üretiminde ağır olan metal ve türevlerinin yerini yüksek fiziksel ve mekanik özelliklere sahip liflerden oluşan kumaşlar (Aramid, UHMWE, PBO, Cam Lifler ve PPID) almaya başlamıştır. Dış hava şartlarına ve UV ışınlarına karşı direnci düşük malzemelerin özellikleri değişik madde ve yöntemlerle artırılabilir. Bunların başında kaplama ve nano/makro boyutta partikül ilavesi gelmektedir. Özellikle TiO_2 ve SiO_2 partiküllerinin UV ışınlarına karşı etkili oldukları yapılan çalışmalarla desteklenmiştir Tatsumi et al., 1994; Deka and Maji, 2011).

Son yıllarda polimer biliminin ve teknolojisinin gelişmesiyle, polipropilen (PP), yüksek yoğunluklu polipropilen (HDPP) ve düşük yoğunluklu polietilen (LDPP) gibi polimerlerin dolgu maddesi olarak kullanıldığı balistik panel çalışmalarının sayıları da artmaktadır. Polimer ve yüksek mukavemetli lif kombinasyonlarında uyum sağlayıcı maddeler, epoksi ve poliüretan gibi tutkalların kullanılan materyale uygun olarak seçilmelidir. Balistik testleri etkileyen birçok (malzeme, mermi, sınır koşulları vb.) etken bulunmaktadır. Bu etkenlerin bireysel olarak belirlenmesi, yapılacak olan testlerin doğruluğu ve güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesi için yeterli değildir. Farklı etmenlerin etkileşimi beklenen davranışı sergilemeyebileceği için, hazırlanan panel veya zırhın testlerinde bütün etmenler kontrol altında tutulmalıdır.

KAYNAKLAR

- Afshari, M., Kotek, R. and Chen, P. 2011. High Performance Fibers. High Performance Polymers and Engineering Plastics, 269-340.
- Afshari, M., Sikkema, D. J., Lee, K. and Bogle, M. 2008. High Performance Fibers Based On Rigid and Flexible Polymers. Polymer Reviews, 48(2), 230-274.
- Behera, B. K. and Dash, B. P. 2013. An Experimental Investigation into Structure and Properties of 3D-Woven Aramid and PBO Fabrics. The Journal of The Textile Institute, 104(12), 1337-1344.
- Bunsell, A. R. 1988. Fibre Reinforcements for Composite Materials, Elsevier Science Publishers.
- Candan, C. 2005. Zırh Teknolojilerindeki Gelişmeler. Zırh Teknolojileri Semineri, Ankara, Milli Savunma Bakanlığı Arge ve Teknoloji Daire Başkanlığı.
- Cavallaro, P.V. 2011. Soft Body Armor: An Overview of Materials, Manufacturing, Testing, and Ballistic Impact Dynamics, Naval Undersea Warfare Center Division Newport.
- Csukat, G.F. 2006. A Study on The Ballistic Performance of Composites, Macromol Symposia, 239: p. 217-226.
- Deka, B. K. and Maji, T. K. 2011. Effect of TiO_2 and nanoclay on the properties of wood polymer nanocomposite. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 42(12), 2117-2125.

- Duan, Y., Keefe, M., Bogetti, T. A. and Cheeseman, B. A. 2005. Modeling The Role of Friction During Ballistic Impact of a High-Strength Plain-Weave Fabric. *Composite Structures*, 68, 331–337.
- Ha-Minh, C., Boussu, F., Kanit, T., Crépin, D. and Imad, A. 2012. Effect of Frictions on The Ballistic Performance of a 3D Warp Interlock Fabric: Numerical Analysis. *Applied Composite Materials*, 19(3-4), 333-347.
- Iannucci, L. and Pope, D. 2011. High Velocity Impact and Armour Design, *Express Polymer Letters*, 5, 262–272.
- Jacobs, M. J. N. and Van Dingenen, J. L. J. 2001. Ballistic Protection Mechanisms in Personal Armour. *Journal of Materials Science*, 36(13), 3137-3142.
- Jordan, J. B. and Naito, C. J. 2014. An Experimental Investigation of The Effect of Nose Shape on Fragments Penetrating GFRP. *International Journal Of Impact Engineering*, 63, 63-71.
- Jovicic, J. M. 2003. Numerical Modeling and Analysis of Static and Ballistic Behavior of Multi-Layered/Multiphase Composite Materials Using Detailed Microstructural Discretization (Doctoral Dissertation, Drexel University).
- Karahan, G. 2008. Balistik Yapılarda Balistik Performansı Etkileyen Parametrelerin İncelenmesi, *Tekstil Teknolojileri Dergisi*, 3, 51-58.
- Kılıç, N. 2014. Development of Multi-Layer Ballistic Armor Panel with Simulation and Ballistic Tests. Marmara University, Department of Mechanical Engineering. Ph. D. Thesis.
- Kitagawa, T., Murase, H. and Yabuki, K. 1998. Morphological Study on Poly- p-phenylenebenzobisoxazole (PBO) Fiber. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 36(1), 39-48.
- Ko, F. and Geshury, A. 2002. Textile Preforms for Composite Materials Processing, *Advanced Materials and Processes Information Analysis Center, AMPT-19*.
- Lane, R. A. 2005. High Performance Fibers for Personnel And Vehicle Armor Systems, *Amptiac Quarterly*, 5, 1-10.
- Lim, C. T., Tan, V. B. C. and Cheong, C. H. 2002. Perforation of High-Strength Double-Ply Fabric System by Varying Shaped Projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 27(6), 577-591.
- Lin, L. and Bhatnagar, A. 1992. Ballistic Energy Absorption of Composite-III, 24th International SAMPE Technical Conference. p. 291-306.
- Liu, S., Wang, J., Wang, Y. and Wang, Y. 2010. Improving The Ballistic Performance of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Fiber Reinforced Composites Using Conch Particles. *Materials & Design*, 31(4), 1711-1715.
- Mathur, A. and Netravali, A. N. 1996. Modification of Mechanical Properties of Kevlar Fibre by Polymer Infiltration. *Journal of Materials Science*, 31(5), 1265-1274.
- Naik, N. K. and Doshi, A. V. 2008. Ballistic Impact Behaviour of Thick Composites: Parametric Studies. *Composite Structures*, 82(3), 447-464.
- Nilakantan, G. 2013. Filament-Level Modeling of Kevlar KM2 Yarns for Ballistic Impact Studies. *Composite Structures*, 104, 1-13.
- Nilakantan, G. and Gillespie, J. W. 2012. Ballistic Impact Modeling of Woven Fabrics Considering Yarn Strength, Friction, Projectile Impact Location, and Fabric Boundary Condition Effects. *Composite Structures*, 94(12), 3624-3634.
- Nilakantan, G., Wetzel, E. D., Bogetti, T. A. and Gillespie, J. W. 2013. A Deterministic Finite Element Analysis of the Effects of Projectile Characteristics on The Impact Response of Fully Clamped Flexible Woven Fabrics. *Composite Structures*, 95, 191-201.
- Özgültekin, S. E. 2012. Balistik Zırhlarda Kullanılan Kompozit Malzeme Kombinasyonlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Roylance, D. 1980. Stress Wave Propagation in Fibers-Effects of Cross Overs, *Fibre Science Technology*, 13(5), 385–395.
- Seely, L., Zimmerman, M. and McLaughlin, J. 2004. The Use of Zylon Fibers in Uldb Tendons, *Advances in Space Research*, 33(10), 1736-1740.
- Shi, W., Hu, H., B. Sun., B. and Gu, B. 2011. Energy Absorption of 3D Orthogonal Woven Fabric Under Ballistic Penetration of Hemispherical- Cylindrical Projectile. *The Journal of The Textile Institute* 102(10), 875–889.
- Tabiei, A. and Nilakantan, G. 2008. Ballistic Impact of Dry Woven Fabric Composites: A Review, *Applied Mechanics Reviews*, 61, 010801-12.
- Tan, V. B. C., Lim, C. T. and Cheong, C. H. 2003. Perforation of High-Strength Fabric by Projectiles of Different Geometry. *International Journal of Impact Engineering*, 28, 207–222
- Tatsumi, T., Fukuda, S. and Kadomura, S. 1994. Radiation damage of SiO₂ surface induced by vacuum ultraviolet photons of high-density plasma. *Japanese journal of applied physics*, 33(4S), 2175.
- URL-1. <http://www.coastalwindsports.com/WhoseLine.html> (Alıntının yapıldığı tarih:10.10.2016)

- Wall, J.W., 2002, An Investigation of The Ballistic Impact Resistance of Modified 2x1, Four-Step, Three-Dimensionally Braided Composites with Axial Reinforcement, Master of Science, Graduate Faculty of North Carolina State University, Carolina.
- Wallenberger, F. T., Watson, J. C., and Li, H. 2001. Glass Fibers. Materials Park, OH: ASM International, 27-34.
- Walling, S. J. 1985. S-2 Glass Fiber: Its Role in Military Applications, International Conference on Composite Materials, Metallurgical Society of AIME, August 1985, p. 443-456
- Yang, D. 2011. Design, Performance and Fit of Fabrics for Female Body Armour, The Degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Engineering and Physical Sciences.
- Yang, H. H. 1993. Kevlar Aramid Fiber. John Wiley & Sons.
- Yumak, N., Pekbey, Y. and Aslantaş, K. 2013. Zırh Tasarımında Kullanılan Kompozit Malzemelerin Deformasyon Karakteristiğinin Araştırılması. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 10(4), 1-21.
- Zhang, A.D., Sun, Y.A., Chen L., Zhang, S. and Pan, N., 2014b, Influence of Fabric Structure and Thickness on The Ballistic Impact Behavior of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Composite Laminate. Materials and Design, 54, 315–322.
- Zhang, C. H., Huang, Y. D., Yuan, W. J. and Zhang, J. N. 2011. UV Aging Resistance Properties of PBO Fiber Coated with Nano-ZnO Hybrid Sizing. Journal of Applied Polymer Science, 120(4), 2468-2476.
- Zhang, Q., Fang, X., Sun, X., Sun, B. and Qiu, Y. 2014a. Comparison of The Mechanical Properties Between 2D and 3D Orthogonal Woven Ramie Fiber Reinforced Polypropylene Composites. Polymers & Polymer Composites, 22(2), 187.