



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” kelimesi, bir merminin silahtan (namludan) çıkarak hedefe ulaşması, atışın yapıldığı ortamdaki değişkenlere bağlı olarak değişen hareketlerini, hedefe çarptıktan sonraki enerjinin absorblanması ve oluşan bozulma/deformasyon davranışlarını inceleyen bilim dalıdır. Balistik bilimi, *iç balistik*, *dış balistik* ve *terminal balistiği* olmak üzere üç gruba ayrılır. *İç* ve *dış* balistikte merminin namlu ve havadaki hareketleri, *terminal balistiğinde* ise tanımda belirtildiği gibi hedefe çarpan mermi ve hedefte oluşan deformasyonlar incelenir. Bütün bu tanımlamalardan sonra zırh (koruyucu) tasarımı, karakteristiği ve deformasyon alanlarının araştırılması terminal balistiğin konusudur. Genel tanımı ile zırhlar; farklı ebatlardaki ve

*Corresponding author (Sorumlu Yazar)
Received (Geliş Tarihi) : 14.10.2016
Accepted (Kabul Tarihi): 15.11.2016

Citation (Atıf): Sozen, E., Gunduz, G., Imren, E. Balistik Panel ve Koruyucu Zırh Üretiminde Kullanılan Lif ve Kompozit Malzemeler, Journal of Bartın Faculty of Forestry, 2016, 18 (2): 194-204.

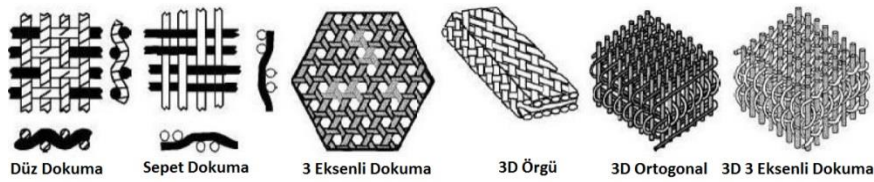
hızlardaki mermi ve şarapnel parçalarından mühimmat ve insanların korumaya yönelik üretilen donanımlardır. Zırhlar kullanım alanlarına göre kişisel zırhlar, hafif zırhlar ve ağır zırhlar olmak üzere üçe ayrılır (Candan, 2005)

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 kumaşlar, enerji absorblama, ısı iletkenliği, sert cisimlerde çatlak büyümesi (yayılması) gibi özellikleri ile balistik alanında da kullanılmaya başlamıştır (Cavallaro, 2011).

Balistik alanında kullanılan kumaşları oluşturan liflerin tek başına bu potansiyeli sağlaması düşünülemez. Ancak liflerin iplikleri, ipliklerin örgüleri, örgülerin de kumaşı oluşturmasıyla yüksek performanslar elde edilmektedir (Powell and Zohdi 2009). 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, balistik panel ve zırh tasarımında kullanılan metal ve türevleri değil, 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. Balistik alanında kullanılan kumaşları örgü ve dokuma kumaşlar olarak ikiye ayırmak mümkündür. Örgü kumaşların dokuma kumaşlara göre daha üstün özellikler göstermesine rağmen, karmaşık üretim yöntemleri ve maliyetleri nedeniyle askeri alanlarda genellikle dokuma kumaşlar tercih edilmektedir (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).

Balistik alanında kullanılan kumaların metal ve seramik gibi materyallerin yerini almasında en büyük etkenleri hafif olmaları, ağırlığına oranla performanslarının daha yüksek olması ve kullanıcıların hareket kabiliyetlerini sınırlamaması olarak sayabiliriz. En çok tercih edilen kumaş türleri ise, aramid ve para-aramid kumaşlar, yüksek molekül ağırlıklı polietilen (HMWPE), PBO ve PPID kumaşlardır (Yumak vd., 2013).

2.1 Aramid Lifler

"Aromatik poliamid"den türetilen "Aramid", kimyasal olarak "poli para fenilen terepitemid" olarak tanımlanır. Bu nedenle "para-aramid" olarak da adlandırılır. Üretim sürecine bağlı olarak meta aramid kumaşlar da mevcuttur. Bu kumaşlar ise genellikle ısı mukavemeti istenen, tutuşma istenmeyen durum ve malzemelerde kullanılmaktadır.

En yaygın kullanılan aramid türleri Nomex (Dupont), Conex (Teijin) ve Conex HT (Teijin)'dir. Aramid kumaşların balistik uygulamalarda kullanılan türleri ise para aramid fiberlerdir. (Cavallaro, 2011). Özellikle kevlar balistik alanında kişisel elbise, bot üretiminde gelişmiş kompozit üretiminde yoğun bir şekilde kullanılmakta ve yüksek mekanik özellikleri ile bilinmektedir (Mathur and Netravali 1996).



Şekil 2. Para aramid lif Kevlar K-Flex'e balistik test (a: ön yüz, b: arka yüz ve c) (Karahana, 2008)

Aramid lifler ilk etapta zayıf mekanik özelliklere sahip plastiklerin güçlendirilmesi için üretilmiştir. Yüksek mukavemet özellikleri bu kumaşlara uzay teknolojileri, otomotiv, savunma sanayi ve havacılık alanlarında da yer bulmasına katkı sağlamıştır (Karahana 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

Çevresel faktörler balistik kumaşların performanslarını da etkilemektedir. Merminin kumaşa teması ile iplikler arasında oluşan kaymalar veya ipliklerin bu darbeye karşı koyabilme kapasitesi balistik performansta önemli yer tutmaktadır. Yapılan bir çalışmada (Briscoe and Motamedi, 1992) üç farklı oranda yağladığı kumaşlar üzerinde yaptığı balistik testler sonucunda, yağ seviyesinde azalmaların balistik performansı arttırdığını bildirmiştir. Yine farklı bir çalışmada (Bazhenov, 1992), balistik kumaşların ıslandığı zaman iplikler arasındaki kayma miktarının arttırdığını ve buna bağlı olarak balistik özelliklerin düştüğünü bildirmiştir.

Aramid kumaşların kullanım alanları ve çalışma koşulları incelendiğinde çevresel faktörlerin önemi ortaya çıkmaktadır. Para-aramid kumaşların dayanımına etki eden en önemli çevresel faktör, ultraviyole ışınlardır. 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 ışınlarla 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).

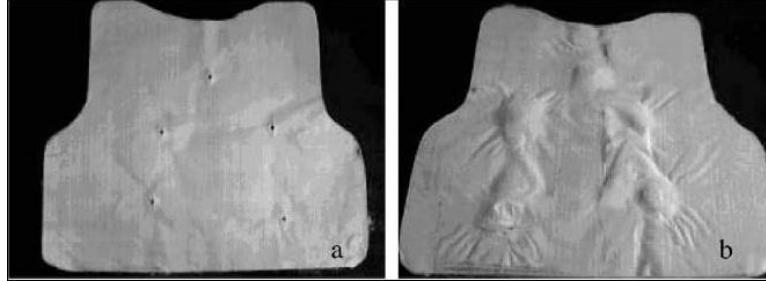
Karahana (2008), Twaron Ct710 tipi kumaş kullanarak hazırladığı zırhların balistik davranışlarını incelemiştir. Darbe derinliği ve darbe çapının yanında, kumaş tarafından absorbe edilen enerji ve arka yüzeye iletilen enerji parametreleri ile karar verilen değerlendirme sonucunda, kumaş kat sayısı ve 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 (Karahana, 2008)

2.2 Yüksek Performanslı Polietilenler (HPPE)

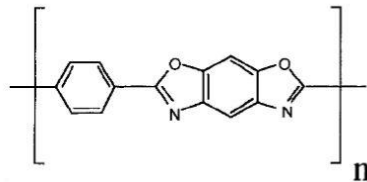
Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilenler (HMWPE) olarak da adlandırılan bu lifler, piyasada Spectra ve Dyneema isimleriyle bilinir. Yüksek moleküler ağırlıklı polietilenler 1 g/cm^3 den daha küçük (ortalama $0,97 \text{ g/cm}^3$) yoğunluklarıyla zırh sanayinde kullanılan en hafif malzemelerdir (Cavallaro, 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 matriks 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

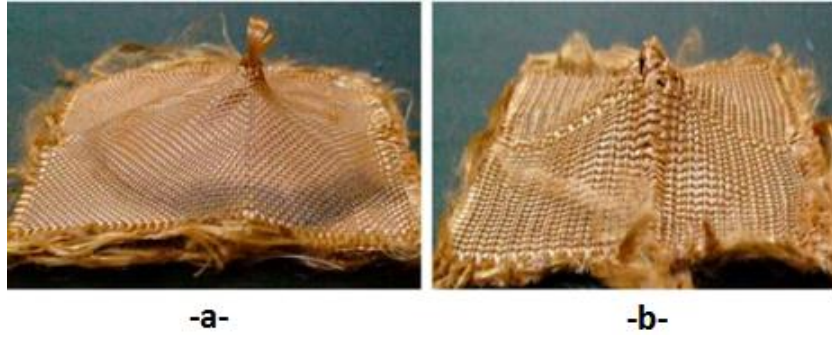
PBO (Polybenzobisoxazole), Şekil 5'te görüldüğü gibi, değişik halkalı aromatik yapılar içeren polybenzazoles türlerinden biridir. 1980'li yıllarda Amerika Hava Kuvvetlerinin aramid liflerden daha dayanıklı malzeme üretme çabalarının bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır Piyasada Toyobo firmasının ticari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

Cam lifi, ince yapısı, yüksek termal kararlılığa sahip oluşu, suya karşı dayanıklılığı ve yüksek direnç özellikleri sayesinde tekstil ve plastik sektörleri başta olmak üzere birçok sektörde farklı yöntemlerle değişik amaçlar için kullanılmaktadır. Dokuma cam kumaşların üretilmesinde, hammadde halinde bulunan cam lifine üç aşamalı sıcaklık uygulanır. 1370°C'den 1260 °C'ye kadar su vasıtasıyla soğutulan hammadde daha yoğun bir kıvamda gelir ve üretim yöntemine göre dokuma, toz, kırılmış veya iplik şeklinde elde edilir. Tablo 2'de E-glass ve S-glass'a ait yoğunluk, çekme direnci ve young modülü değerleri verilmiştir.

Materyal	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Direnci (MPa)	Young Modülü (GPa)
E – Glass	2,55	3400	76
S – Glass	2,49	4400	89

Farklı türleri olan cam lifleri; 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 lifleri üzerine son zamanlarda yapılan çalışma sayısında artışlar görülmektedir. Özellikle 2000'li yıllardan sonra yapılan çalışmaların sonucunda kumaş, kağıt ve yangın geciktirici özellikleri ile ilgili alınmış birçok patent çalışması (Ammam et al., 2010, mevcuttur).

3. KORUYUCU ZIRHLARDA DARBE DAYANIMINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Tabiei and Nilakantan, (2008) balistik alanında yapılan testler sonucunda darbe dayanımına etki eden faktörleri kullanılan malzeme özellikleri, kumaş yapısı (dokuma tipi), tabaka sayısı (katman), mermi geometrisi, darbe hızı, sürtünme ve sınır koşulları olarak sınıflandırmıştır.

3.1. Malzeme özellikleri

Balistik testlerde malzemedeki istenen özellikleri çekme gerilmesinin yüksek olması ve buna bağlı olarak yüksek elastikiyet modülü ve yüksek performans/yoğunluk oranıdır. Düşük yoğunluğa ve yüksek çekme gerilmesine sahip malzemelerde merminin yüksek darbe etkisi malzeme tarafından absorblanarak dağıtılmakta ve etkisi azaltılmaktadır (Roylance, 1980).

Darbe dalgasının aktarım hızı; (c)

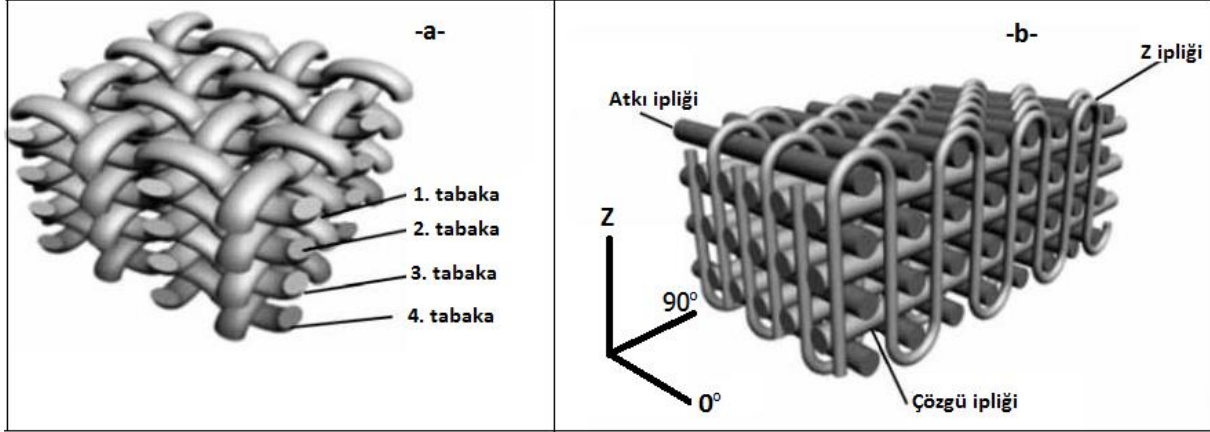
$$c = \sqrt{\frac{E}{d}} \quad (1)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır. Balistik direnci etkileyen diğer bir faktör ise hacim-ağırlık oranıdır (Lin and Bhatnagar, 1992). 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 sönmüleme kapasitesinin daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Lin and Bhatnagar 1992).

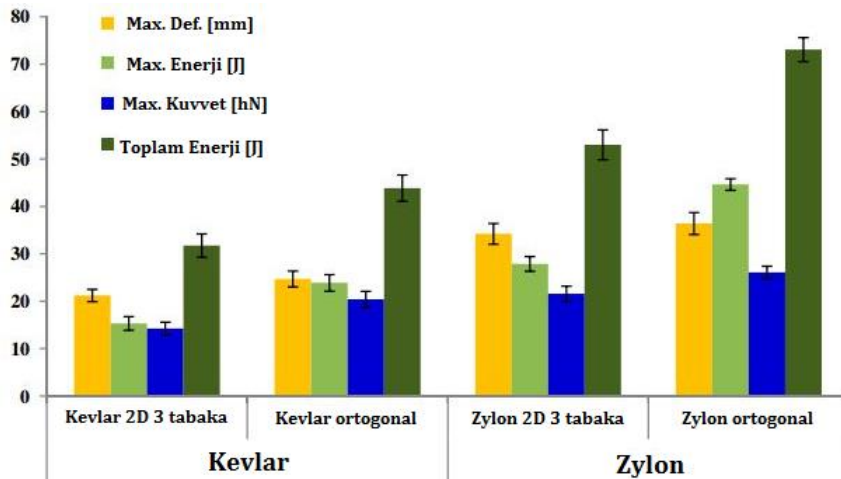
3.2 Kullanılan Kumaş Yapısı

Bir malzemenin genel özelliklerini belirlemek için o malzemeyi oluşturan birimlerin incelenmesi gerekir. Kumaşı oluşturan en küçük yapı olan lifin özellikleri ipliğe, iplikten örgüye örgüden kuşaşa aktararak bir dizi zincir halinde devam eder. Bu birimlerin bireysel özellikleri teşekkül ettikleri malzemede farklı (düşük veya yüksek) performans gösterebilir. Bu yüzden bütün bu elemanların birlikte değerlendirilmesi daha gerçekçi olacaktır (Yumak vd., 2013). Şekil 8'de iki boyutlu ve üç boyutlu kumaşlara ait yapı diyagramları verilmiştir.



Şekil 8. a) iki boyutlu b) üç Boyutlu kumaşların yapısı (Zhang et al., 2014a)

Jovicic (2003), yüksek performanslı kumaşları üretim geometrilerine göre *tek yönlü plakalar*, *iki boyutlu* ve *üç boyutlu* olmak üzere 3 sınıfa ayırmıştır. Üç boyutlu kumaşların iki boyutludan farkı, atkı ipliğini x yönü, çözgü ipliğini y yönü olarak kabul ettiğimizde z yönünde üçüncü bir ipliğin kullanılmasıdır (Zhang et al., 2014b; Shi et al., 2011). 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. Dokuma farklılığının mekanik özelliklere etkisi (Behera and Dash, 2013).

3.3 Mermi Geometrisi

Balistik testlerde kullanılan mermiler yüksek hızla (ort. min 320 m/sn) koruyucu zırha çarpar ve zırh üzerinde makaslama/kesme kuvvetine neden olur. Bunun sonucunda malzemede de bir penetrasyon oluşur. Merminin

ucunun plakayı temas ettiği alanda mermi ucu geometrisine bağlı oluşacak basınç penetrasyonu ve delaminasyonu etkilemektedir. Farklı uçlar uluslararası standartlarla belirlenerek kabul edilmiştir. Örneğin FMJ RN (Full Metal Jacket Round Nose) tam (full) metal gömlekli yuvarlak uçlu mermiyi ifade eder (Jovicic, 2003).

Naik ve Doshi, (2008), merminin yarıçapı ve geometrisi sabit tutularak kütesindeki artışın merminin hızını düşürdüğü bildirmişlerdir. 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 bazı mermi tipleri gösterilmiştir.



Şekil 10. Mermi tipleri (Bozdoğan vd., 2015)

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 3'te gösterildiği gibidir. Burada çarpma hızı V_i (impact velocity), darbe sonrası artık hız V_r (residual velocity) olarak verilmiştir.

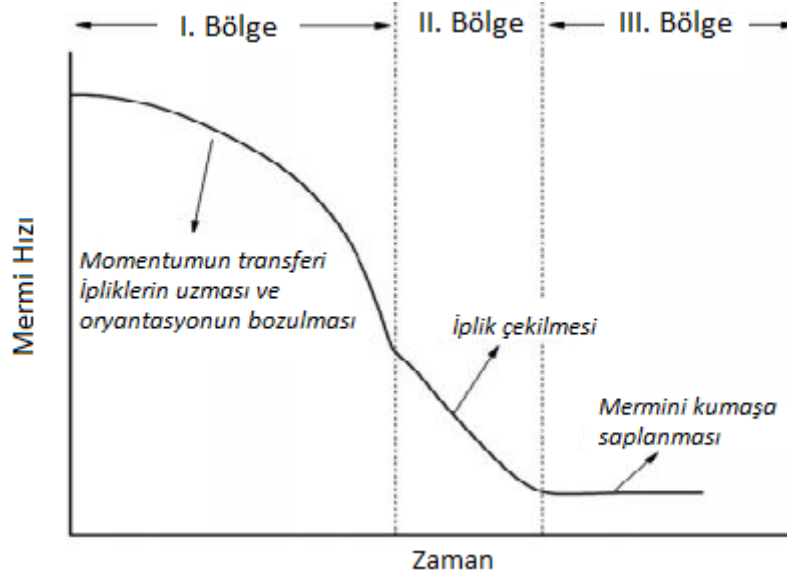
Tablo 3. Farklı ağırlık ve geometrilerdeki mermiler ile yapılan darbe test sonuçları (Nilakantan et al., 2013)

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 testleri başarılı bir şekilde tamamlayan (kurşun geçirmeyen veya standartları karşılayan) bir zırhta merminin davranışları üç aşamada incelenebilir. Birinci aşamada oluşan momentumun transferi ve kumaşı oluşturan ipliklerde uzamaların meydana gelmesidir. İkinci aşamada ipliklerde kesme kuvvetinin oluşması ve kaymalar oluşur. Son aşamada merminin kinetik enerjisi tamamen kumaş tarafından absorblanarak emilir.

(Nilakantan and Gillespie, 2012). Şekil 11'de Balistik limitin altında bir hızda gelen merminin zamana bağlı hız grafiği verilmiştir.



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

3.5 Çoklu Kompozit Tabakalar

Literatürde alüminyum, çelik, CTP (cam takviyeli plastik) seramik ve kumaşların balistik uygulamalarda tabakalı olarak kullanıldığına dair çeşitli çalışmalar mevcuttur. (Özgültekin, 2012; Jacobs and Van Dingenen, 2001; Zhang et al., 2014a; Zhang et al., 2014b; Jovicic, 2003). Erdem ve Türker (2010) 7039 alüminyum alaşımının kaynak öncesi ve kaynak sonrası balistik özelliklerini, Binay (2016) CTP destekli AA-6082 T6 levhalarda terminal balistiği incelemiştir. Özgültekin, (2012) bal peteği, kontrplak, kevlar ve epoksi kullanarak farklı varyasyonlar ve farklı kalınlıklarda ürettiği panellerin balistik özelliklerinin incelemiştir.

3.6 Sürtünme

Mermi-iplik ve iplik-iplik arasındaki sürtünme katsayısı ve aralarda kullanılan polimer matriksler 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

Sınır şartlarını balistik malzeme üzerinde ve ortam koşulları altında ayrı ayrı incelemek daha doğru olacaktır. Koruyucu zırh ile yapılan testlerde zırhın test öncesi sabitlenmesinde dört köşeden sabitlenen malzeme ile sadece iki tarafı sabitlenen malzeme arasında farklılıklar oluşmuş, dört köşeden sabitlenen malzeme mermiyi daha hızlı yavaşlatmıştır. Kumaş ve benzeri zırhlarda malzemenin sabitlenmesi etkili olurken sert panellerde (levhalarda) bu durumun etkisi ihmal edilecek boyutlardadır (Duan et al., 2005).

Diğer bir sınır şartı olan ortam koşulları, mermi hızına hedef sapmasına ve yön değiştirmesine neden olabileceği için rüzgârsız ortamlarda, oda sıcaklığının ± 5 °C değiştiği ortamlarda yapılması kullanılan yöntemlerin ve sonuçların doğruluğu için önemli etkenlerdir.

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 sayısı 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 sergileyemeyeceği 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.
- Amma, A. and Mulcahy, K.A., El Du Pont De Nemours, 2010. Pulp comprising polypyridobisimidazole and other polymers and methods of making same. U.S. Patent 7,727,358.
- 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.
- Bazhenov S. Dissipation of energy by bulletproof aramid fabric. J Mater Sci 1997;32(15):4167-73
- Bozdoğan, F., Üngün, S., Temel, E. and Mengüç, G.S., 2015. Balistik Koruma Amaçlı Kullanılan Tekstil Materyalleri, Özellikleri ve Balistik Performans Testleri. 2015 (Cilt: 22), 98.
- Briscoe BJ, Motamedi F. The ballistic impact characteristics of aramid fabrics: the influence of interface friction. Wear1992;158:229-47.
- 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.
- Dunn, C.S., Stanhope, M.T., Laton, M.A. and Truesdale III, R.J., Dunn Charles S, Stanhope Michael T, Laton Michael A and Truesdale Iii Rembert J, 2006. Flame resistant fabric having antimicrobials and methods for making them. U.S. Patent Application 11/637,648.
- 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.
- 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. 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.
- Powell, D.A. and Zohdi, T.I., 2009. Attachment mode performance of network-modeled ballistic fabric shielding. *Composites Part B: Engineering*, 40(6), pp.451-460.
- Roylance, D. 1980. Stress Wave Propagation in Fibers-Effects of Cross Overs, *Fibre Science Technoloji*, 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.