



Örgülü Kumaşların Balistik Darbe Enerji Sönümlenme Mekanizmalarının İncelenmesi

Halil IŞIK¹

Ercan DEĞİRMENCİ²

Celal EVÇİ³

Öz

Muharebe araçları ile savunma maksatlı kullanılan teknolojik sistemlerin manevra için hafif olması ve beka için etkin koruma sağlaması önem arz etmektedir. Bekaya yönelik olarak istenen balistik koruma seviyesi farklı malzemelerle geliştirilen zırh sistemleri ile sağlanabilmektedir. Zırh tasarımında önemli parametrelerin başında koruma/ağırlık optimizasyonu bulunmaktadır. Beka yeteneği için ihtiyaç duyulan koruma seviyesini; zorlu arazi şartlarındaki güç, hız ve manevra ihtiyacı ile aracın hareket menzili ihtiyacı sınırlandırmaktadır. En etkin koruma seviyesinin sağlanması için, yeni geliştirilen darbe dirençleri yüksek mukavemetli Zylon, Kevlar, Spectra gibi balistik örgülü kumaşlar kullanılmaktadır. Bu malzemeler yüksek mukavemete, kırılma tokluğuna, yorulma dayanımına ve balistik özelliklere sahiptir.

Bu çalışmada, çoklu-ölçek yaklaşımı ile bir ipliği oluşturan mikro-ölçekteki liflerin malzeme özelliklerine dayanarak balistik örgülü kumaşın makro-ölçekli kopma davranışının en az hata ile tahmini incelenmiştir. Merminin zırha nüfuz etmesi; lif ve ipliklerin malzeme özellikleri, dokuma yapısı, mermi geometrisi, kütlesi ve hızı, katmanların etkileşimi, sınır şartları, ipliklerin birbirleriyle ve mermi ile olan etkileşim parametrelerine bağlıdır. Çarpma hızı ve kütlesi bilinen bir mermiyi durduracak örgülü kumaşın malzeme özelliklerine göre minimum katman kalınlığının doğru tespit edilmesi tasarımın en önemli sürecidir.

Anahtar Kelimeler: Balistik, Örgülü Kumaş, Darbe, Kompozit Malzeme.

Analysis of Energy Dissipation Mechanisms of Woven Fabrics Subjected to Ballistic Impact

Abstract

It is important for combat vehicles and technological defense systems used in the battlefield to be lightweight for maneuverability while they still provide effective protection for survivability. Desired ballistic protection of defense systems may be attained by armor systems developed with different materials. The most important factor in the design of armor is the optimization of ballistic protection/weight ratio. The protection degree needed for sufficient survivability is limited by the factors such as maneuver elements, speed, weight, confidentiality and fuel demand of vehicles. In order to ensure the most effective protection level, newly developed ballistic braided fabrics such as Zylon, Kevlar, Spectra with high impact resistance and strength are used. These materials possess high strength, fracture toughness, fatigue resistance and excellent ballistic properties.

In this study, by using multi-scale approach the most accurate estimation of macro-scaled fracture behavior of ballistic woven fabric has been analyzed based on the micro-scaled material properties of the fibers. Penetration of a bullet into the armor depends on parameters such as material properties of fibers and yarns, woven structure, bullet geometry, mass and velocity, the interaction of the layers, boundary conditions, interaction of yarns between each other and bullet. Correct determination of the minimum layer thickness of woven fabric which is expected to stop a bullet with known impact velocity and mass is the most important design process.

Keywords: Ballistics, Woven Fabric, Impact, Composite Material.

¹ Yazışma Adresi: Yrd.Doç.Dr., Kara Harp Okulu, Makine Mühendisliği Bölümü, Bakanlıklar, Ankara, hisik@kho.edu.tr.

² Dr., Kara Harp Okulu, Makine Mühendisliği Bölümü, Bakanlıklar, Ankara.

³ Yrd.Doç.Dr., Kara Harp Okulu, Savunma Bilimleri Enstitüsü, Bakanlıklar, Ankara.

Giriş

Kullanıcı, tehdit unsurunun eşdeğer silahının etkisi altına girmeden hedefini emniyetli bir şekilde tesirsiz hale getirmek ister. Bunun için silahının mümkün olduğunca uzun menzilli olmasını veya tehdit unsuruna karşı yeterli korumanın sağlanmasını ister. Tehdit unsurları sürekli birbirlerine üstünlük kurma çabası içindedirler. Daha fazla tahrip ve daha fazla emniyet parametreleri bu tasarım kriterlerinin çeldiricileridir. Askeri personelin silahların etkilerine karşı korunması için Yunanlıların deriyi, Japonların katmanlı ipeği ve Avrupalıların orta çağda zincirden örülmüş metal zırh kullanımı göze çarpmaktadır. Bu koruma sistemleri ateşli silahların etkinliğinin artması nedeniyle koruma özelliğini kaybetmişti. Ancak 1960'lı yıllarda yüksek gerilme değerine ve yüksek kayma modülüne sahip liflerin geliştirilmesi ile koruma sistemlerinde kullanılmak üzere örgülü kumaş tekrar kullanılmaya başlanmıştır (<http://www.darpa.mil>).

Havacılık, uzay ve savunma alanlarında performansı ve dayanımı yüksek ancak daha hafif malzeme arayışları, araştırmaların yeni malzeme özellikleri ve imalat yöntemleri üzerinde yoğunlaşmasına neden olmuştur. Yeni geliştirilen Zylon, Kevlar, Spectra gibi balistik kumaşlar; yüksek mukavemete, kırılma tokluğuna, yorulma dayanımına ve balistik özelliklere sahiptir. Merminin zırha nüfuz etmesinde; malzeme özellikleri, dokuma yapısı, mermi geometrisi, kütlesi ve hızı, katmanların etkileşimi, sınır şartları ve sürtünme rol oynamaktadır (<http://www.firstdefense.com>).

Yüksek gerilim hızlarında ve sıcaklık etkisi altındaki malzeme (viskoplastik) davranışının belirlenmesi zırh tasarımında oldukça önemlidir. Kumaşların ana yapısını oluşturan lifler birim ağırlıktaki dayanıklılık ve farklı gerilim oranları nedeniyle farklı balistik karaktere ve yapısal özelliklere sahiptirler. Daha çok askeri amaçlı olarak kullanılanlara; Aramid (Kevlar ve Twaron gibi), poly (phenylene benzobizoxazole (PBO)) (Zylon), UHMWPE (Ultra High Molecular Weight PE) (Spectra gibi) ve PIPD (M5 gibi) örnek olarak verilebilir. Bununla birlikte, ticari maksatlar için ise Vectran (Hoechst Calanese), Technora ve Nextel örnek verilebilir (Powell ve Zohdi, 2009). Bu lifler tokluk ve gerilme-ağırlık oranlarına göre karakterize edilirler (Zohdi ve Steigmann, 2002). Balistik kumaş ipliği tek başına darbeye karşı yeterli koruma mukavemetine sahip değildir. Ancak ipliklerin dokunmasıyla oluşturulan balistik kumaşın mukavemeti, kumaşı oluşturan ipliklerin toplam mukavemetinden daha yüksek değerlere hatta mukavemet-ağırlık yönünden de çelikten daha yüksek değerlere ulaşır. Bu değerler kumaşın örgü şekline, modeline, yapısına, kıvrımına ve kumaşın enerji sönmeme mekanizmalarına bağlı olarak değişmektedir (Powell,

Zohdi ve Johnson, 2008; Powell ve Zohdi, 2009a, 2009b; Zohdi, 2009, 2011).

Malzemelerin mekanik özellikleri; mikro yapı, imalat teknikleri, sıcaklık ve malzemede meydana gelen gerinim hızına bağlı olarak değişmektedir. 1'inci ve 2'nci Dünya Savaşlarında mermileri durdurmak için kullanılan kum torbaları buna örnek olarak verilebilir. 7,62x51 NATO fişegi namluyu yaklaşık 850 m/s hızla terk ederek hedefine gitmektedir. Hedefin namludan olan mesafesine göre hedefe 400-600 m/s hızlarla çarpmaktadır. Kum, bu mermiyi durduracak kadar etkilidir. Diğer taraftan aynı özelliklerdeki kum torbası basit bir bıçakla delinebilir. Fişek bir tahtayı veya çeliği delebilenken, bıçak bu tahta veya çeliği delezmez (Gray, 2000). Bu ve benzeri olaylardan da anlaşılacağı gibi gerinim hızına göre malzemelerin verdiği tepkiler farklıdır. Malzemelerin statik, yarı statik (gerinim hızı= $d\varepsilon/dt < 10^2 \text{ s}^{-1}$) ve dinamik ($10^2 < d\varepsilon/dt < 10^4 \text{ s}^{-1}$) yükler altındaki davranışları arasında malzeme özelliklerine göre belirgin farklılıklar bulunmaktadır (Zohdi ve Powell, 2006; Zohdi, 2002, 2007, 2010a, 2010b).

Çoklu-Ölçek Modeli

Balistik kumaşın davranışlarının belirlenmesi için yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Mikro-ölçekteki liflerden oluşan ipliklerin belli şartlar altında örülmesiyle Şekil 1'de görülen makro-ölçekli balistik kumaş elde edilir. Balistik kumaşın dinamik davranışında liflerin çapları, dizilişleri, malzeme özellikleri ve lif özelliklerinin standart sapma değerleri rol oynamaktadır. Bununla beraber ipliklerin orta ölçekte dokuma şekilleri, sıklığı ve gerginliğinin de dikkate alınması gerekmektedir. Darbe testlerinde kumaşa çarpan merminin basınç dalgalarının yayılma şekillerinin de balistik kumaşın koruma amaçlı tasarımında önemli etkileri olmaktadır (Cheeseman ve Bogetti, 2003; Powell ve Zohdi, 2009). Bu durum, problemin çözümünde sınır şartlarında tanımlanmaktadır.

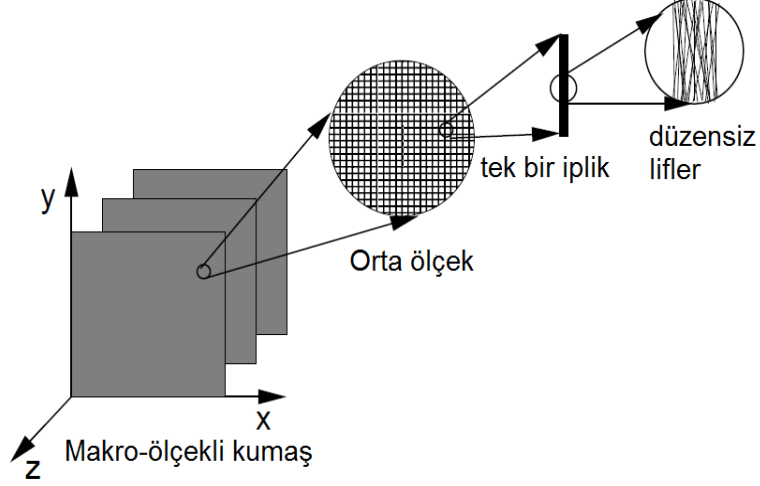
İpliğin Gerilmesi, Hasar Görmesi ve Katman Sayısının Belirlenmesi

İplik bağlantı noktalarına göre lineer ve simetrik bir hız profiline sahip ise bir ipliğin hız profili,

$$v(x) = v_p \frac{x}{L_0} \quad (1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, L_0 ipliğin boyu, v_p merminin hızıdır. Enerji eşitliğinden,

$$\frac{1}{2} m_p (v_p^{(i)})^2 - w(U^*) = \frac{1}{2} m_p (v_p^{(i+1)})^2 + \frac{\rho A_0 L_0}{6} (v_p^{(i+1)})^2 \quad (2)$$



Şekil 1. Balistik Kumaşın Çoklu-Ölçek Model Yaklaşımı
(Powell, Zohdi ve Johnson, 2008).

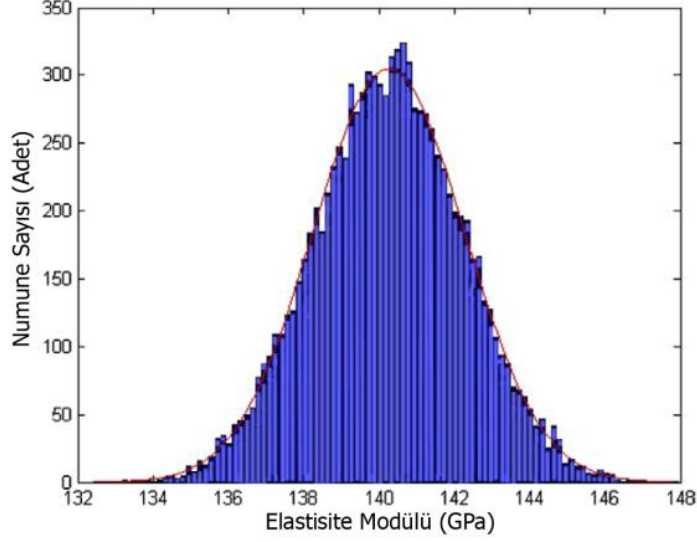
ifadesi yazılabilir. Bu eşitliğin sol tarafındaki birinci terim i 'nci katmandan sonraki kinetik enerji, ikinci terim depo edilen elastik enerji, eşitliğin sağ tarafındaki ilk terim $i+1$ 'nci katmandaki kinetik enerji ve son terim kumaşın kinetik enerjisidir. Depo edilen elastik enerji ($w(U^*) = u$) ipliği koparan hasar enerjisidir. Mermiyi durdurmak için gerekli balistik kumaş katman sayısı,

$$i^* = \frac{1}{\ln \alpha} \ln \left(\frac{-\beta/\alpha}{(\alpha-1)(v_p^{(0)})^2 - \beta} \right) \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{m_p}{m_p + \frac{\rho_0 A_0 L_0}{3}} \quad \beta = \frac{2w(U^*)}{m_p + \frac{\rho_0 A_0 L_0}{3}}$$

ifadesi ile hesaplanmaktadır. Katman (numune) sayısının malzemenin elastisite modülü ile değişimi Şekil 2'de görülmektedir.

Etki süresi çok kısa olan balistik darbe ile malzeme içerisinde gelişen gerilme dalgaları, gerilme dalgalarının etkileşimi ve malzeme üzerindeki yansıması, mermi/kumaş etkileşiminin uygun tanımlanması modelin gerçeğe yakın olmasına yardımcı olacaktır (Powell ve Zohdi, 2009).



Şekil 2. Numune Sayısının Malzemenin Elestisite Modülü ile Değişimi (Powell ve Zohdi, 2009).

Lif Tanımı

Çok ince olan mikro-ölçekli bir lif sadece aksenal gerinimden dolayı çekme gerilmesi ile bir boyutlu olarak tanımlanmaktadır. İpliklerin aksenal gerinimlerinin yaklaşık % 2-10 arasında uzadıktan sonra kopması beklenmektedir. Örneğin, Kevlar veya Zylon lifleri yaklaşık % 3'lük gerinimlerde kopar. Ortalama gerinim hali için lifler Şekil 3'te görüldüğü gibi basit bir Kirchoff-Venant malzeme modeli olarak kullanılmaktadır (Powell ve Zohdi, 2009).

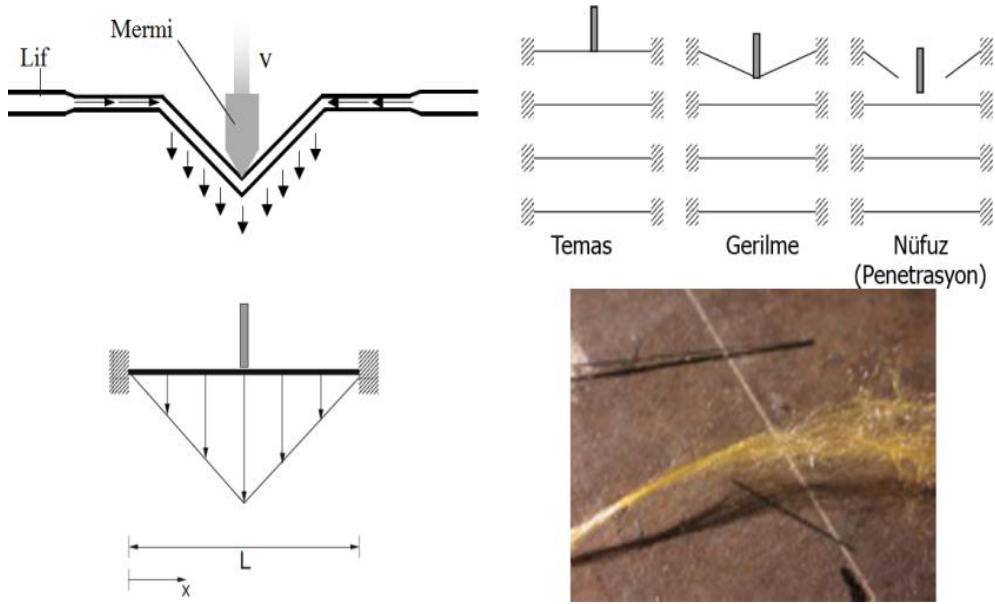
Her bir lif için soğurulan enerji (W),

$$W = \frac{1}{2} I E E^2 \quad (4)$$

$$E = \frac{1}{2} (C - 1) \quad (5)$$

$$C = F^2 \quad (6)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, IE Elastisite modülü, E Green-Langrange gerinimi, C Cauchy-Green gerinimi ve F deformasyon değişimidir.



Şekil 3. Balistik Kumaş İpliğini Oluşturan Lifin Modellenmesi (Powell vd., 2008)

İkinci Piola-Kirchhoff gerilimi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$S = IEE \quad (7)$$

$$U = \frac{L}{L_0} \quad (8)$$

$$E = \frac{1}{2(U^2 - 1)} \quad (9)$$

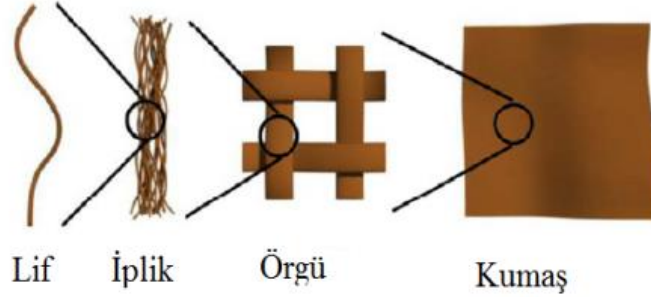
Gevşemiş bir boyutlu model için Cauchy gerilimi, ikinci Piola-Kirchhoff gerilimi ile ilişkili olup,

$$\sigma = \frac{1}{j} F^2 S \quad (10)$$

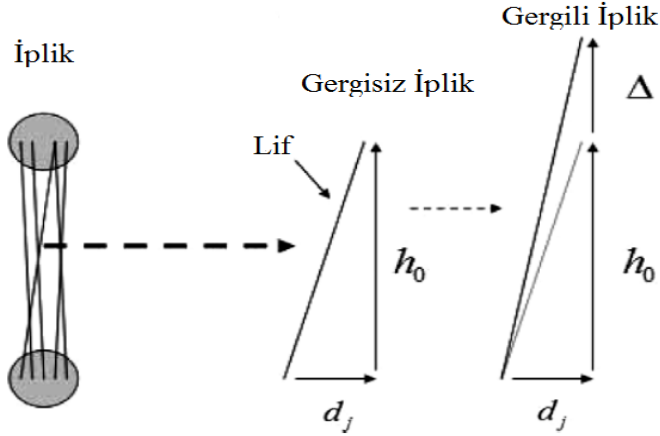
şeklindedir (Powell ve Zohdi, 2009a, 2009b; Zohdi, 2002, 2006, 2007, 2009, 2010a, 2010b).

Mikro-Ölçekli Model

Örgülü kumaşın tamamının davranışı, her bir mikro-ölçekteki lifin davranışlarının ayrı ayrı toplamına eşittir. Örneğin, Zylon malzemesinin bir ipliği 350 liften oluşmuştur. Mikro-ölçek bazında örgü işleminden kaynaklanan düz olmayan bir yapısı vardır. Ancak, bu yapıdaki kayma gerilmeleri kopmaya karşı direnç oluşturmaları nedeniyle arzu edilen özelliktir. Pratikte bütün liflerin bir bütün olarak dizilmesi neredeyse imkânsız olduğundan, kritik bir gerinime ulaşıldığında ani bir kopma gözlenmez. Böylece, birçok lifin kopması gecikirken iplik aniden değil yavaş yavaş kopacaktır (Şekil-4) (Powell ve Zohdi, 2009; <http://www.firstdefense.com>).

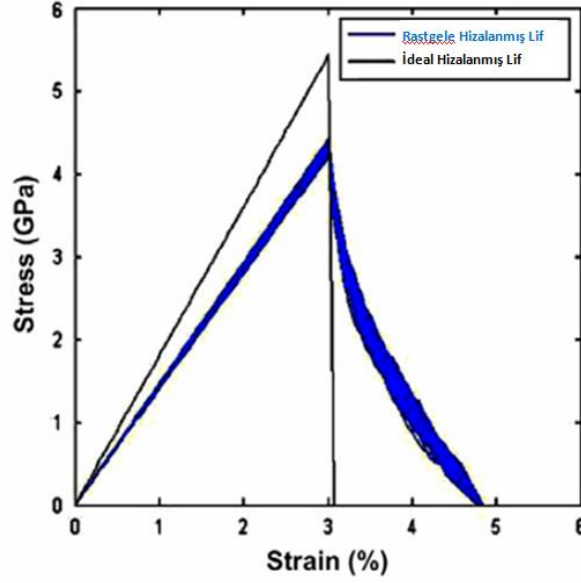


a)



b)

Şekil 4. a) Çok Ölçekli Kumaş Yapısı, b) Bir Tane Lifin Gerilmesi (Powell vd., 2008)



Şekil 5. Rastgele Hizalanmış 100 Adet Lif İle İdeal Olarak Hizalanmış Lifin Mikro-Ölçekli Gerilme-Gerinim Eğrisi (Powell ve Zohdi, 2009).

Rastgele hizalanmış ve ideal hizalanmış lif demetlerinin Şekil 5'te görülen gerilme-gerinim eğrisi incelendiğinde rastgele hizalanmış lif demetinin daha düşük gerilme değerinde koptuğu ve ani kopma olmadığı ancak eğri altında kalan alanın daha fazla olduğu görülmektedir.

Her bir j 'nci iplik için gerinme, $U_j = \frac{L_j}{L_{j0}}$ denklemi ile gösterilirken

L_j lifin deforme olmuş uzunluğu, L_{j0} lifin ilk uzunluğunu ifade edecek şekilde aksel gerilme aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$U_j = \frac{L_j}{L_{j0}} = \frac{\sqrt{((h_0 + \Delta)^2 + d_j^2)}}{\sqrt{(h_0^2 + d_j^2)}} \quad (11)$$

Burada, h_0 ipliğin ilk uzunluğu (bağlantı noktaları arasındaki nominal mesafe), d_j j 'nci lifin sapma mesafesi ve Δ ipliğin uç noktaları arasındaki yer değiştirmedir. N_I lif içeren I 'nci iplik için aksel Piola-Kirchhoff tepkisi (her iplik için), lif deformasyonu ve lifin malzeme özellikleri bakımından aşağıdaki gibi yazılabilir (Zohdi ve Powell, 2006).

$$S_I = IE_I \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{(h_0 + \Delta)^2}{h_0^2} - 1 \right) = \frac{1}{N_I} \sum_{j=1}^N IE_f \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{(h_0 + \Delta)^2 + d_j^2}{h_0^2 + d_j^2} - 1 \right) \frac{h_0}{\sqrt{(h_0^2 + d_j^2)}} \xi_j \quad (12)$$

Makro-Ölçekli Dokuma Tabaka Modeli

Mikro-ölçekten makro-ölçeğe geçiş sonlu elemanlar/farklar modelinin bir parçası olarak kullanılabilir. Doğrusal olmayan adi diferansiyel denklemlerin çözümünde açık ya da kapalı yöntemler kullanılır. Doğrusal olmayan denklemler sabit nokta iterasyonu ile çözülür (Cheeseman ve Bogetti, 2003; Duan, Kefe, Bogetti ve Cheeseman, 2005a, 2005b, 2006; Zohdi, 2011).

İplik-Lif Homojenliği

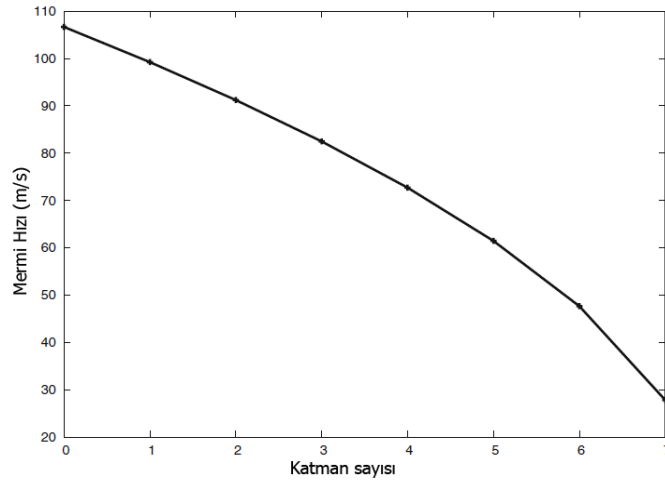
İpliğin tepkisini modellemek için, malzemenin zayıflamasının IE ile gösterildiği basit bir Kirchhoff-Venant malzeme modeli kullanılmaktadır. Bu model, $IE(U, t) = \alpha(U, t)IE_0$ şeklindedir. IE_0 her bir iplik için belirlenmiş elastisite modülü sabitidir. Lif sapmalarından dolayı bu sabit her bir iplik için ayrı ayrı hesaplanır ve bütün dokuma boyunca değişmektedir. $\alpha(U, t)$ liflerdeki kopmalara bağlı olarak iplikteki hasar değişiminin ölçütü olup liflerin kopması arttıkça IE'nin zayıflamasına sebep olur. α değişkeni her bir ipliğin hasarı olup lifler koştukça 0 (tamamen kopan iplik için) ile 1 (hasarsız iplik için) arasında değişen bir fonksiyondur. Bir iplik hasar aldıktan sonra gerinimi azaltarak lifleri tekrardan düzeltmeyecektir. Bu yüzden,

$$\alpha(U, t) = \min \left(\hat{\alpha}(U), \alpha(U, t - \Delta t) \right) \quad (13)$$

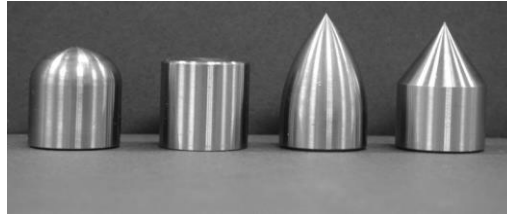
şeklinde ifade edilmektedir. Burada, $\alpha(U, t - \Delta t)$ bir önceki zaman diliminde iplikte meydana gelen hasardır. Hasar davranışı üssel azalmaya benzer olup aşağıdaki gibi ifade edilir (Şekil 6) (Zohdi, 2002, 2006, 2007, 2009, 2010).

$$\hat{\alpha}(U) = A \left(\exp \left(-\lambda (U - U_{\downarrow}) \right) \right) - B \quad (14)$$

burada A, B ve λ diferansiyel denklemin sabit katsayıları olup sınır ve başlangıç şartlarından elde edilir.



a)



b)

Şekil 6. a) Kumaş Katmanlarının Ortalama Enerji Sönümlenme Değerleri, b) Farklı Mermi Geometrileri (Zohdi, 2002)

Merminin Kumaşa Teması

Kumaş deformasyonları malzeme özelliğine bağlı olarak belirli miktarda rastgelelik içerdiğinden dolayı simülasyonlarda bütün kumaş bağlantı noktaları (düğüm) mermi ile temas edebilir. Düğümlerin mermi ile temas edip etmeyeceği merminin şekline bağlıdır. Eğer mermi daha karmaşık bir şekilde ise (örneğin düz, yarı küre, köşeli silindir şeklinde) temasın belirlenmesi çok daha fazla karmaşık hale gelir. Merminin kumaşa teması Lagrange metodu kullanılarak modellenir. Doğrusal olmayan denklemler sabit nokta ile çözülebilir. Mermi geometrisinin malzeme üzerindeki hasar davranışının belirlenmesinde önemli olduğu da dikkate alınması gereken hususlar arasında yer almaktadır (Evcı ve Gülgeç, 2012).

Mermi Hareketi

Mermi kumaşa temas ettiğinde, bağlantı noktalarını değiştiren kuvvet hesaplanmalıdır. Mermi üç boyutlu olduğundan dolayı kumaş ile mermi arasındaki ilişkiden kaynaklanan momentler de dikkate alınmalıdır.

i 'nci bağlantı noktasından dolayı oluşan etki kuvveti f_{-pi} , merminin yüzeyindeki temas noktası r_{-i} 'ye uygulanır. Bu kuvvetten kaynaklanan merminin merkezi etrafındaki moment $M_{-pi} = r_{-i} \times f_{-j}$ şeklinde ifade edilir.

Mermi katı cisim olduğundan şekil değiştirmedeği ve sadece yer değiştirmesi ve dönme yaptığı varsayılır. Merminin kütle merkezi boyunca hareketi için mermi üzerindeki net kuvvet aşağıda verildiği gibidir.

$$m_p \ddot{u}_{-p} = \sum_{-pi} f_{-pi} \quad (15)$$

Burada, m_p merminin kütlesi, u_{-p} merminin konumu ve f_{-pi} mermi üzerinde i 'nci noddan kaynaklanan kuvvettir. Mermiye etki eden momentlerin toplamı açılal momentumdaki değişime eşittir.

$$\frac{d}{dt}(I_p \cdot \omega_p) = \sum_{-pi} M_{-pi} \quad (16)$$

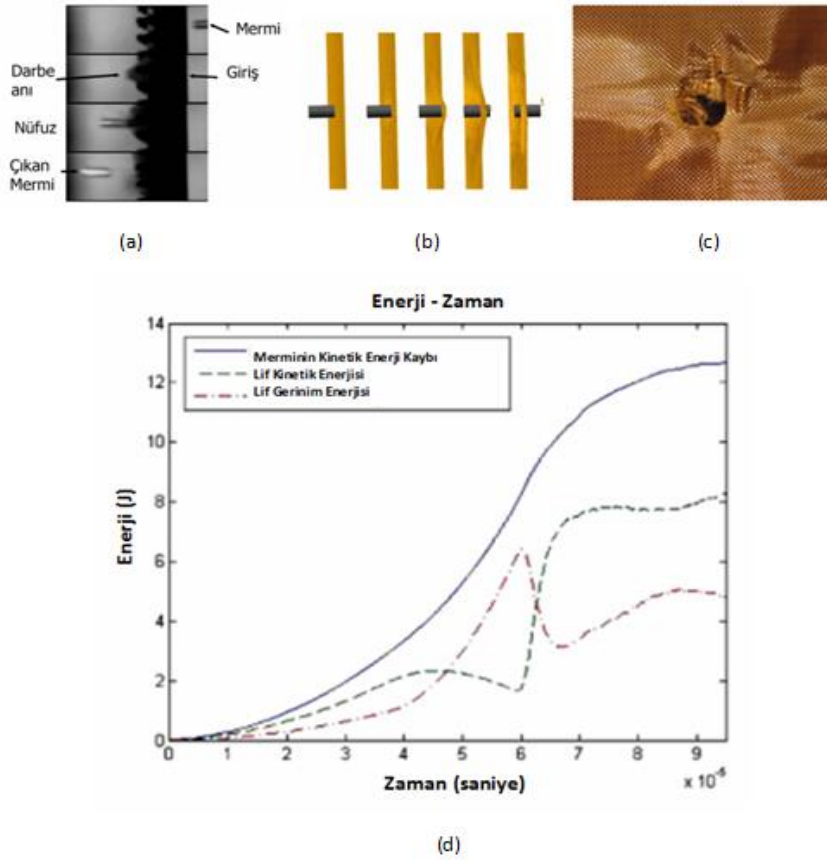
Bu ifadede, I_p merminin atalet momenti, ω_{-p} merminin açılal hızı ve M_{-pi} mermi ile i 'nci nod arasındaki ilişkiden kaynaklanan momenttir. Hareket boyunca hem merminin açılal hızı hem de atalet momenti değişmektedir (Zohdi, 2002; Zohdi ve Steigmann, 2002; Powell ve Zohdi, 2009a, 2009b).

$$I_{-p} \cdot \dot{\omega}_{-p} + I_{-p} \cdot \dot{\omega}_{-p} = \sum_{-pi} M_{-pi} \quad (17)$$

Enerji Kaybına Sınır Şartlarının ve Malzeme Özelliklerinin Etkisi

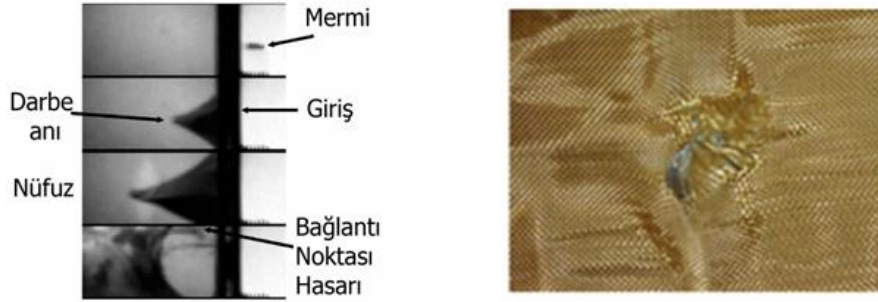
Balistik koruma için kumaşın birincil rolü mermiden enerji soğurmaktır. Şekil 7d'de merminin ilk hızının bir fonksiyonu olarak kumaş tabakalarının soğurduğu ortalama enerji gösterilmektedir. Köşelerinden perçinlenen kumaş daha yüksek miktarda enerji, iki tarafından tutturulan kumaş ise daha düşük enerji soğurma davranışı sergilemektedir (Zohdi, 2002; Zohdi ve Steigmann, 2002; Powell ve Zohdi, 2009a, 2009b).

Balistik kumaşın sayısal modellerinin birçoğunda ipliklerin ortalama malzeme özelliği kullanılır. İplik modelinde düşük ilk enerjili çarpmalar sadece bir ya da iki sınır bağlantısının kopmasına sebep olur. Daha sonra mermi dokuma kumaşının diğer sınır bağlantılarını koparmadan kumaşı yolundan iter (Cheeseman ve Bogetti, 2003; Duan, Kefe, Bogetti ve Cheeseman, 2005a, 2005b, 2006; Zohdi, 2011).



Şekil 7. a) Hızlı Kamera Görüntüsü, b) Merminin Kumaşa Çarpma Simülasyonu, c) Testlerde Kullanılan Kumaş, d) Zamana Göre Enerji Sönümlenme Miktarı (Zohdi ve Powell, 2006).

Homojen iplik modelinde bütün iplikler birbirinin aynısı olduğundan kopma simetri düzleminde olur. İplik modelinde ise kopma dokumanın bağlantı bölgelerine yakın zayıf noktalarda başlar. Şekil 7a'da yüksek hızlı kameradan alınmış dört fotoğraf görülmektedir. Görüntü profilden çekilmiş ve dört fotoğraf da bağlanılan dokumayı göstermektedir. Merminin dokumaya sağ taraftan girdiği ve sola doğru hareket ettiği görülebilir. Ayrıca, Şekil 7b,c'de test süresince kumaşın az miktarda deforme oluşu, ortadan (çarpma noktası) kopması ve dokuma tabakasının sayısal simülasyonu gösterilmiştir. Şekil 8a'da merminin sağdan girerken sola doğru hareket ettiği görülmektedir. Kumaş Şekil 7'dekinin aksine Şekil 8b'de büyük miktarda deforme olmaktadır. Kopma ilk olarak üst köşelerden başlayıp alt köşelerde devam ederek sınırlarda gerçekleşir. Kumaşın sayısal simülasyon aynı başlangıç şartları ile Şekil 8c'de görülmektedir. Şekil 8d'de ise kumaş tabakalarının soğurduğu ortalama enerji gösterilmektedir.

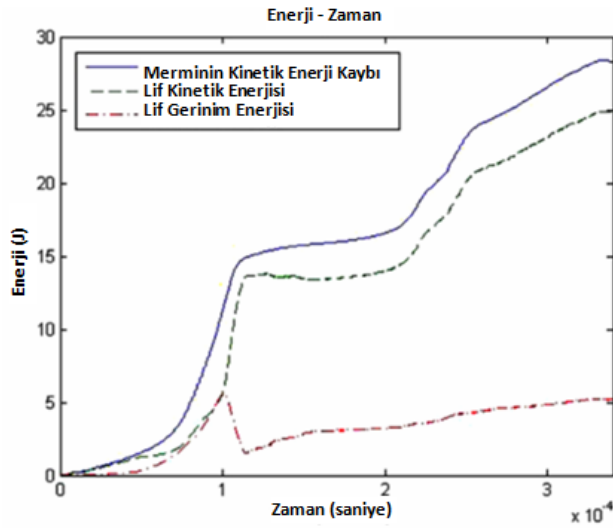


(a)

(b)



(c)



(d)

Şekil 8. Farklı Sınır Şartları İçin, a) Hızlı Kamera Görüntüsü, b) Merminin Kumaşa Çarpma Simülasyonu, c) Testlerde Kullanılan Kumaş, d) Zamana Göre Enerji Sönümlenme Miktarı (Zohdi ve Powell, 2006).

Sonuç

Terörle mücadele veya diğer adıyla asimetrik harp esnasında birliklerin sürat kazanmaları, istenen yer ve zamanda ani durumlar oluştuğunda konuşlanabilmeleri önem kazanmaktadır. Bu kapsamda, önemli bir ağırlık kalemini oluşturan zırhın daha hafif ve daha güçlü bir alternatifi ile yeniden ele alınarak geliştirilmesi, kuvvet çarpanı oluşturabilecek bir etkiye sahiptir. Örgülü kumaşların darbe fonksiyonları, lif ve ipliklerin malzeme özellikleri, dokuma yapısı, mermi geometrisi, kütlesi ve hızı, katmanların etkileşimi, sınır şartları, ipliklerin birbirleriyle ve mermi ile olan etkileşimleri gibi pek çok etkene bağlıdır. Çarpma hızı ve kütlesi bilinen bir mermiyi durduracak örgülü kumaşın malzeme özelliklerine göre minimum katman kalınlığı tahmin edilmeye çalışılmaktadır. Kumaşın çeşitli balistik darbe tepkilerine bağlı olarak farklı modeller geliştirilmektedir. Personelin, araçların ve binaların korunması amacıyla yeni geliştirilen ve darbe dirençleri yüksek Zylon, Kevlar, Spectra gibi örgülü kumaşların kullanılmaları tercih edilir hale gelmiştir. Bununla birlikte paraşüt, uçak gövdesi ve türbin kanatçıklarının kazalarına karşı korunması gibi havacılık ve uzay alanında da pek çok kullanım alanlarına sahiptirler. Zırh katman kalınlığının doğru ve güvenilir olarak tahmin edilmesi, yeterli korumayı sağlayacak optimum tasarımların yapılmasına yardımcı olacaktır.

Kaynaklar

- Cheeseman, B.A., Bogetti, T.A. (2003). Ballistic Impact Into Fabric and Compliant Composite Laminates. *Compos. Struct.*, 61, 161–173.
- DARPA DSO Technology Thrust, Personnel Protection. http://www.darpa.mil/dso/thrust/md/str_5.htm. adresinden alınmıştır.
- Duan, Y., Kefe, M., Bogetti, T.A. (2005). Cheeseman BA. Modeling the role of friction during ballistic impact of a high-strength plain-weave fabric. *Compos Struct*, 68, 331–7.
- Duan, Y., Kefe, M., Bogetti, T.A. (2005). Cheeseman BA. Modeling friction effects on the ballistic impact behavior of a single-ply high strength fabric. *Int. J. Impact Eng.*, 31, 996–1012.
- Duan, Y., Kefe, M., Bogetti, T.A. (2006). Powers B. Finite element modeling of transverse impact on a ballistic fabric. *Int. J. Mech. Sci.*, 48, 33–43.
- Evcı, C., Gülgeç, M. (2012). An experimental investigation on the impact response of composite materials. *Int. J. Impact Eng.*, 43, 40–51.
- First Defense. http://www.firstdefense.com/html/vest_kevlar_vs_spectra.htm adresinden alınmıştır.

- Gray, G.T. (2000) Classic Split-Hopkinson pressure bar testing ASM Handbook. Vol. 8: Mechanical Testing and Evaluation ed. H. Kuhn and D. Medlin (Materials Park, OH: ASM International), 462–76.
- Powell, D., Zohdi, T.I., Johnson, G. (2008). Multiscale modeling of structural fabric undergoing impact. *FAA report DOT/FAA/AR-08/38*.
- Powell, D., Zohdi, T.I. (2009). Attachment mode performance of network-modeled ballistic fabric shielding. *Compos. Part B: Engrg*, 40(6), 451–460.
- Powell, D., Zohdi, T.I. (2009). A note on flaw-induced integrity reduction of structural fabric. *Int. J. Fract./Lett. Micromech*, 158, 89–96.
- Zohdi, T.I. (2002). Modeling and simulation of progressive penetration of multilayered ballistic fabric shielding. *Comput. Mech.*, 29, 61–67.
- Zohdi, T.I., Steigmann, D.J. (2002). The toughening effect of microscopic filament misalignment on macroscopic fabric response. *Int. J. Fract.*, 115, 9-14.
- Zohdi, T.I., Powell, D. (2006). Multiscale construction and large-scale simulation of structural fabric undergoing ballistic impact. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 195(1-3), 94–109.
- Zohdi, T.I. (2007). Computation of strongly coupled multifield interaction in particlefluid systems. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 196, 3927–3950.
- Zohdi, T.I. (2009). Microfibril-based estimates of the ballistic limit of multilayered fabric shielding. *Int. J. Fract./Lett. Micromech.*, 158, 81–88.
- Zohdi, T.I. (2010). High-speed impact with electromagnetically sensitive fabric and induced projectile spin. *Comput. Mech.*, 46, 399–415.
- Zohdi, T.I. (2010). Simulation of coupled microscale multiphysical-fields in particulate-doped dielectrics with staggered adaptive FDTD. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 199, 79–101.
- Zohdi, T.I. (2011). Electromagnetically-induced deformation of functionalized fabric. *J. Elast.*, 10(1–2), 381–398.

Extended Summary

Analysis of Energy Dissipation Mechanisms of Woven Fabrics Subjected to Ballistic Impact

It is important for combat vehicles and technological defense systems used in the battlefield to be lightweight for maneuverability while they still provide effective protection for survivability. Desired ballistic protection of defense systems may be attained by armor systems developed with different materials. The most important factor in the design of armor is the optimization of ballistic protection/weight ratio. The protection degree needed for sufficient survivability is limited by the factors such as maneuver elements, speed, weight, confidentiality and fuel demand of vehicles. In order to ensure the most effective protection with the least sacrifice, newly developed ballistic braided fabrics such as Zylon, Kevlar, Spectra with high impact resistance and strength are used. These materials possess high strength, fracture toughness, fatigue resistance and excellent ballistic properties. In this study, by using multi-scale approach the most accurate estimation of macro-scaled fracture behavior of ballistic woven fabric has been analyzed based on the micro-scaled material properties of the fibers. Penetration of a bullet into the armor depends on parameters such as material properties of fibers and yarns, woven structure, bullet geometry, mass and velocity, the interaction of the layers, boundary conditions, interaction of yarns between each other and bullet. Correct determination of the minimum layer thickness of woven fabric which is expected to stop a bullet with known impact velocity and mass is the most important design process.

Impact response of armor materials at high strain rates and temperatures may be accepted to be among the most important armor design criteria. Different fibers with high strength to weight ratio and a wide range of strain values are woven with certain geometries to provide the highest ballistic efficiency. High performance fibers such as Dyneema which is a high modulus polyethylene (HMPE) fibre, Kevlar, Twaron and Technora which are para-aramid fibers, Nomex which is a meta-aramid fiber, Vectran which is a high performance fiber and Zylon which is a synthetic fibre with an extremely high tensile strength and modulus are especially used in aerospace and defense industries. While the fibers alone can not resist against impact loading, woven fabrics offer higher impact strength than sum of individual strength of fibers which make up the whole fabric. The overall efficiency of the fabric is strictly dependent on the weaving geometry and cell size of woven structure.

Multiscale modeling of structural fabrics subjected to impact loading is one of the most widely used approaches to determine the impact response of ballistic fabrics. Macro-scale ballistic fabric is made up of micro-scale fibers aligned under certain geometries and circumstances. Dynamic response of ballistic fabric is closely related to fiber dimensions, fiber arrangement, fiber material and standard deviations in material properties. At the same time weaving geometry, woven cell sizes and strain capacity of fibers are determinative material properties under impact characterization. Boundary conditions, stress wave propagation and interference of the waves will also effect the stress distribution in the material.

Velocity profile of a yarn is supposed to be linear and symmetric with respect to the yarn junction points and it may be expressed as follows:

$$v(x) = v_p \frac{x}{\frac{L_0}{2}} \quad (1)$$

In this expression L_0 is the yarn length and v_p is the bullet velocity.

Energy balance in a woven fabric subjected to impact of a bullet may be written as follows:

$$\frac{1}{2} m_p (v_p^{(i)})^2 - w(U^*) = \frac{1}{2} m_p (v_p^{(i+1)})^2 + \frac{\rho A_0 L_0}{6} (v_p^{(i+1)})^2 \quad (2)$$

The first left term in Equation-2 gives the kinetic energy of the bullet in the i th layer of the fabric, the second left term is the elastic strain energy stored while the first right term is the kinetic energy of the bullet in the $i+1$ th layer of the fabric and the second right term is the kinetic energy of the woven fabric. Here ρ is the density, A_0 is the cross-sectional area and L_0 is the length of the yarns. Total layers of ballistic fabrics needed to stop the bullet may be given as:

$$i^* = \frac{1}{\ln \alpha} \ln \left(\frac{-\beta/\alpha}{(\alpha-1)(v_p^{(0)})^2 - \beta} \right) \quad (3)$$

where

$$\alpha = \frac{m_p}{m_p + \frac{\rho_0 A_0 L_0}{3}} \quad \beta = \frac{2w(U^*)}{m_p + \frac{\rho_0 A_0 L_0}{3}}$$

Since the bullet is three dimensional with both translational and rotational motions moment effect of the interaction forces with the i th layer of the fabric (f_{-pi}) should also be taken into account. If r_{-i} denotes the contact distance to the bullet center, the moment effect of the interaction force may be written as $M_{-pi} = r_{-i} \times f_{-i}$. Consequently, the net moment with respect to the bullet center is

$$m_p \ddot{u}_{-p} = \sum_{-pi} f_{-pi} \quad (4)$$

where m_p is the bullet mass, u_p is the bullet displacement, and f_{pi} is the interaction forces with the i th layer of the fabric. Since total sum of moments of all interaction forces equals the change in angular momentum of the bullet;

$$\frac{d}{dt}(I_p \cdot \omega_p) = \sum_{-pi} M_{-pi} \quad (5)$$

where I_p is the mass moment of inertia, ω_p is the angular velocity and M_{pi} is moment of all interaction force at i th layer of the fabric. Since the moment of inertia and angular velocity of the bullet changes with time as the bullet penetrates into the composite fabric Equation 5 may be rewritten as:

$$I_{-p} \cdot \dot{\omega}_{-p} + I_{-p} \cdot \dot{\omega}_{-p} = \sum_{-pi} M_{-pi} \quad (6)$$

Damage structure and damage area under impact may be determined with macro-scale models using micro-scale properties. Different models prove that ballistic damage in composite fabrics is related to parameters such as material properties of fibers and yarns, weaving structure, bullet geometry, mass and velocity, the interaction of the layers, boundary conditions, interaction of yarns between each other and bullet. Determination of the minimum layer thickness of woven fabrics to stop the bullet threat with a certain kinetic energy is a critical step in the design of composite armor systems.