



## HAVA ARAÇ ZIRHLARININ BALİSTİK PERFORMANS KARAKTERİSTİĞİNİN SAYISAL İNCELENMESİ

Seher EKEN

İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Maslak Kampüsü 34469 Maslak İstanbul, [durmazseh@itu.edu.tr](mailto:durmazseh@itu.edu.tr)

DOI: [10.23890/SUHAD.2016.0113](https://doi.org/10.23890/SUHAD.2016.0113)

### ÖZET

Bu çalışmada hava araç zırhların balistik çarpması sayısal benzetim yoluyla gerçekleştirilerek performans tayinleri yapılmıştır. Yüksek performanslı elyaf kumaşlardan üretilmiş zırhların balistik çarpma cevabi ileri sonlu farklar yöntemi ile hesaplanmıştır. Silindirik merminin bükümlü ipliklerden dokunmuş kompozit kumaşa 90°'lik açı ile dik çarpması analiz edilmiştir. Pim-eklem (pin-joints) modeli kullanılarak iplik parçaları ayırık kütle-yay-sönümleyici kullanılarak modellenmiştir. Çarpmadan sonra yer değiştirmeler, hızlardaki değişim, malzemede oluşan göçme miktarı hesaplanmış ve grafiksel olarak gösterilmiştir. Büküm etkisinin hava araç zırhlarının balistik performansına olan etkisi incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hava araç zırhları, Elyaf takviyeli kompozit zırhlar, Silindirik mermi, İleri sonlu farklar metodu

### NUMERICAL INVESTIGATION OF THE BALISTICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF THE AIRCRAFT ARMORS

#### ABSTRACT

The performance of ballistic impacts of airborne armor was determined by numerical simulation. The ballistic impact response of armor made from high performance fiber fabrics was calculated by the advanced end difference method. An analysis of the perpendicular bending of the cylindrical bullet with a 90 ° angle was performed on the composite fabric woven from twisted yarns. Pin-joints (pin joints) are modeled for discrete mass-spring-damper. Subsequent changes, rapid changes, are computed locally and graphically displayed. The effect of aircraft on ballistic performance of armor has been examined.

**Keywords:** Air vehicle armor, Fiber reinforced composite armor, Cylindrical projectile, Advanced end difference method

#### 1. GİRİŞ

Günümüz balistik koruma sistemleri ileri kompozit teknolojisi kullanılarak üretilmektedir. Bu zırhlar hem mürettebatı hem de aracı korumak üzerine tasarlanmaktadır. Söz konusu hava araç zırhları olunca ağırlık ciddi bir önem arz etmeye başlar. Hava aracının korunması için sisteme eklenecek her bir kilogram ağırlık aracın performans kaybına veyahut paralı yükten belli ölçülerde feragate yol açar. Ayrıca hava aracı, muhabere esnasında atıklığını ve manevra kabiliyeti koruyarak yüksek balistik dayanım göstermelidir. Hafiflik ve yüksek balistik dayanım hava araç zırh tasarımlarında

malzeme seçiminde rol oynayan önemli faktörlerdir. Günümüzde, bu tür özellikleri karşılayan Dyneema®, Kevlar®, Spectra® ve benzeri malzemelerden üretilmiş elyaf takviyeli kumaşlar bu alanda yaygın olarak kullanılmaktadır ve düşük/orta/yüksek hızlı balistik çarpmaya dayanıklı hava araç zırhları geliştirilmektedir.

Öte yandan, kompozit malzemelerden üretilmiş zırhlara balistik çarpma işlemi, hem makro- hem de mikro-yapısal yönlerini sebebiyle ele alması zor bir problemdir. Buna bağlı olarak problemi doğru tahmin eden modellerin üretilmesi epey yavaş ve zahmetli olmuştur. Bu süreçte balistik performans tahminleri yapabilmek için deneysel çalışmaların

yanında daha az maliyetli sayısal çalışmalar da oldukça yaygın olarak kullanılmıştır.

Katmanlı kompozit malzemelerden yapılmış zırhların balistik çarpışma problemi, Rakhmatulin ve arkadaşlarının [1-4] başı çektiği yarı-analitik çalışmalar ile 1940'lı yıllarda başlamıştır. Problemin sayısal modelleme ve simülasyonlarının gerçekleştirilebilmesi 1970'lerin ortasına kadar sürmüş, günümüzde de halen yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Dokunmuş kumaşlardan yapılmış yapılara balistik çarpma probleminin sayısal modellemesi Roylance ve arkadaşlarının öncü çalışmaları ile 1970'li yıllarda başlamıştır [5-6]. Burada düzlemsel kare latislerden oluşmuş pim-eklem (pin-joint) modelleri kullanılmıştır. Latis, iplik parçalarını temsil eden elastik çubuklar ile düğüm (cross-over) noktalarında bağlanmıştır, ayrıca iplik kütlelerini temsilen düğüm noktalarında noktasal kütle yerleştirilmiştir. 1990'ların başında

bu modeller evrilerek, dokunmuş kumaş için atkı ve çözgü yönünde bükümlü ipliklerden oluşmuş, ayrıca düğüm noktalarındaki kontak basma kuvvetini doğrusal olmayan yaylar kullanılarak temsil eden modeller üretilmeye başlanmıştır [7-9]. Benzer modeller Shim ve arkadaşları tarafından 2005 yılında önerilmiştir [10-12]. Bu modeller iplik bükümleri, sürtünme ve hem düğüm noktalarında hem de kumaş ile mermi arasındaki kayma etkilerini hesaba katmıştır. Dikkate değer bir başka çaba ise gergin bir ipteki viskoelastik davranışın modellenmesi üzerine olmuştur. Yine Shim [13] membran eleman kullanarak DYNA3D programında kumaşa balistik çarpma analizleri yapmış ve sonuç olarak hesaplamaların masraflı olduğunu raporlamıştır. Ayrıca, güncel olarak Shimek ve Fahrenfold [14-15] tarafından geliştirilen hibrit parçacık metodu ile kompozit kumaşların balistik performans analizleri yapılarak dokuma tipinin etkisini incelenmiştir.

Elyaf takviyeli kompozit zırhların balistik çarpma cevabını irdelemek üzerine sayısal ve deneysel çalışmaların yanında analitik çalışmalar da yapılmıştır. Son yıllarda, Phoenix ve ekibi tarafından [16-23] gerçekleştirilen analitik ve sayısal çalışmalar mevcuttur. Bu ekibin gerçekleştirdiği analitik çalışmalarda düz uçlu bir çarpanın 2-boyutlu membrana çarpmasını incelenerek, membranın balistik cevabı elde edilmiştir.

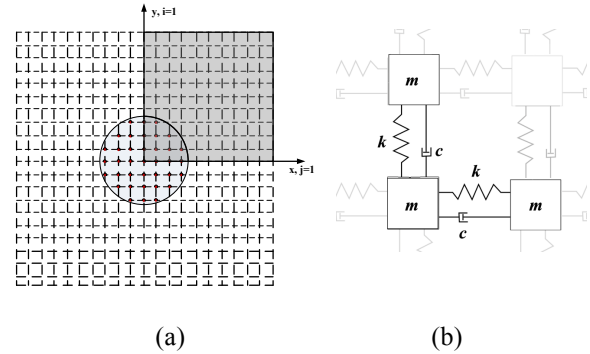
Bu çalışmanın amacı ise gerçek malzemelerle yapılan pahalı fiziksel testler ile kıyaslandığında daha etkili ve düşük maliyetli bir araç geliştirmek olup, elyaf takviyeli kompozit hava araç zırhlarının balistik performansını sayısal olarak tayin edebilen bir model ortaya koymaktır. Bunun için tek-katmanlı kumaşa silindirik bir merminin balistik çarpma benzetimini gerçekleştirerek, ipliklerin yer değiştirmelerini, hızlarını, birim uzamaları ve

kuvvet büyüklüklerini öngörülen zaman diliminde hesaplanmıştır. İplikler bükümlü olarak modellenerek, bu faktörün kumaşın balistik performansına olan etkisi incelenmiştir.

## 2. PROBLEMİN TANIMI

Kullanacağımız sayısal model Cornell Üniversitesi'nde geliştirmiş "Dokunmuş Bükümlü Kumaş" (Woven Crimp Model) modeline dayanmaktadır [20-23]. Sayısal hesaplamalar için sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Şekil 1a'da görülen hesaplama bölgesinde gerçekleştirilmiştir. x- ve y- yönlerinde eksenel simetri kabulü altında analizler ve simülasyon 1. dördte bir bölgede yapılmıştır. Şekil 1a'deki çeyrek daire alanı altında kalan kırmızı ile gösterilmiş atlama noktalarına momentumun korunumu kullanılarak mermiden gelen hız ve kütle değerleri atanmış ve çarpışma süreci başlatılmıştır.

Elyaf Şekil 1b'de gösterildiği gibi kütle-yay-sönümleyici sistem kullanılarak modellenmiştir. Kullanılan ayrıntı kütleler ipliklerin kütlelerini, yaylar ipliklerin elastik özelliklerini, sönümleyici ise



Şekil 1. (a) Hesaplama alanı, (b) Panelini gösteren pim-eklem (pin-joint) ağı modelinde ayrıntı kütle-yay-sönümleyici sistemi

viskoelastik özelliklerini temsil etmektedir.

### 2.1 Sonlu Farklar Yöntemi

Newton'un hareket denklemleri atlama (cross-over) noktalarındaki hızlar için çözülür. Bu denklemlerden x-yönünde olanı impuls-momentum formunda yazılarak aşağıdaki şekilde gösterilebilir [23]:

$$\frac{m}{\Delta t} \left( v_{(x)}^t - v_{(x)}^{t-\Delta t} \right) = \sum f_{(x)}^{t-\Delta t}$$

Denklemler ve değişkenler sadece x-yönü için verilmiştir, y- ve z-yönleri için de benzeri kullanılmıştır. Burada  $v_{(x)}^t$  t-anındaki x-yönündeki hız bileşenidir.  $f_{(x)}^{t-\Delta t}$  ise t-Δt anındaki çekme kuvvetinin x-yönündeki iz düşümüdür ve aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\sum f_{(x)}^{t-\Delta t} = \sum \left( T_{(x)}^{t-\Delta t} - P_{(x)}^{t-\Delta t} \right)$$

Hız alanı elde edildikten sonra bunlar kullanılarak atlama noktalarının pozisyonları hesaplanır.  $x$ -yönü için aşağıdaki şekilde yapılır:

$$x^t = x^{t-\Delta t} + v_{(x)}^t$$

Yay eleman uzunlukları hesaplanıp, aşağıdaki formulasyon ile birim uzamalar güncellenir:

$$\varepsilon^t = \varepsilon^{t-\Delta t} + \frac{L^t - L^{t-\Delta t}}{L^{t-\Delta t}}$$

## 2.2 Giriş parametreleri ve değişkenleri

Sayısal modelimiz MATLAB platformunda geliştirilmiş bir yazılımdır. Kodun çalıştırılması için gerekli fiziksel büyüklükler ve parametreleri aşağıdaki verilen Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Kodda kullanılan fiziksel büyüklükler ve simülasyon parametreleri

Semboller	Tanımlar
$E_x, E_y$	$x$ - ve $y$ -yönündeki Young Modülü
$\rho_{kumas}$	Kumaş malzemesinin yoğunluğu
$v_{mermi}$	Çarpmadan önceki mermi hızı
$m_{mermi}$	Mermi kütlesi
$R_{mermi}$	Mermi çapı
$\alpha$	Büküm faktörü
$\tau = \frac{R_{mermi} t}{a_0}$	Boyutsuz zaman
$a_0 = \sqrt{E_x / \rho_{kumas}}$	Gerilme dalga hızı
$n_a$	Zaman adımı sayısı
$n_e$	Kare kumaştaki toplam eleman boşluğu
$dL$	Çözüm ağı boyutu
$dt$	Zaman adımı

## 3. SİMÜLASYONLAR

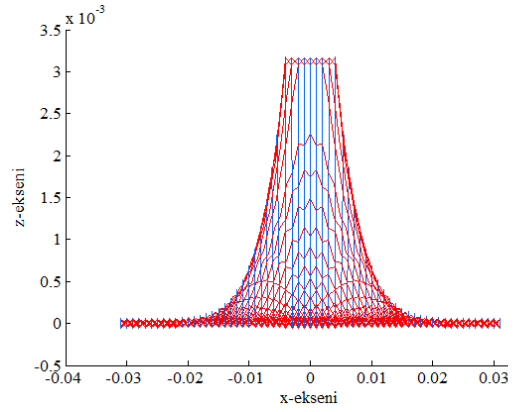
Şekil 2’den Şekil 5’e  $0.5m \times 0.5m$ ’lik Dyneema® iplerinden dokunmuş kumaşa çarpan merminin balistik performansı gösterilmiştir. Bu malzemenin özellikleri Tablo 2’te verilmiştir.

Tablo 2. Dyneema® malzemesinin özellikleri

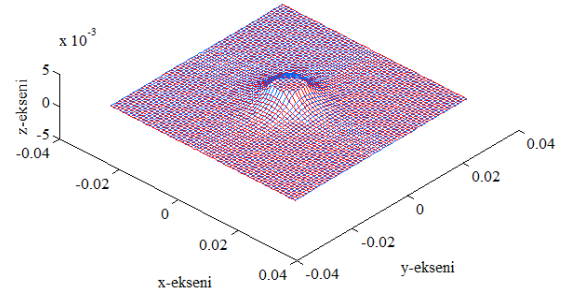
$E_x$	Young modülü ( $x$ yönü)	117 GPa
$E_y$	Young modülü ( $y$ yönü)	117 GPa
$\rho$	Yoğunluk	980 kg/m <sup>3</sup>

$$\varepsilon_{maks} \quad \text{Kopma birim uzaması} \quad \% 2.81 \quad (2)$$

Balistik çarpma analizleri için kullanılan silindirik mermi ise 8 gr ağırlığında olup 9 mm’lik çapa sahiptir. Merminin ilk hızı 406 m/s olarak belirlenmiştir.  $\alpha=0.1$  bükümlü ipliklerden dokunmuş bir kumaşa çarpan merminin  $\tau=20$  boyutsuz zamanında balistik çarpma simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Balistik performansın belirlenmesi için gerekli büyüklükler grafiksel olarak gösterilmiştir. Şekil 2 silindirik merminin çarpmasıyla zırhta meydana gelen yer değiştirmeleri göstermektedir. Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5’te sırasıyla dikey hızlardaki değişim, yatay hızlardaki değişim ve birim uzamalardaki değişim hem yandan hem de 3-Boyutlu görünüş olarak verilmiştir.

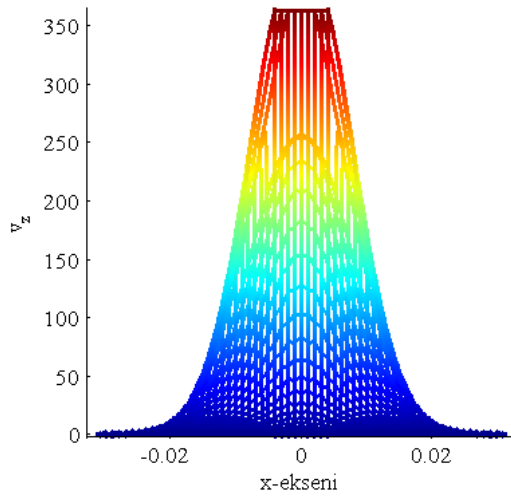


(a)

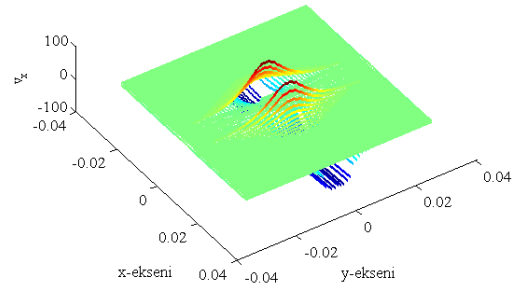


(b)

Şekil 2. İplerin konumu (a) yandan görünüm, (b) 3-B görünüm,  $\alpha=0.1$ ,  $\tau=20$

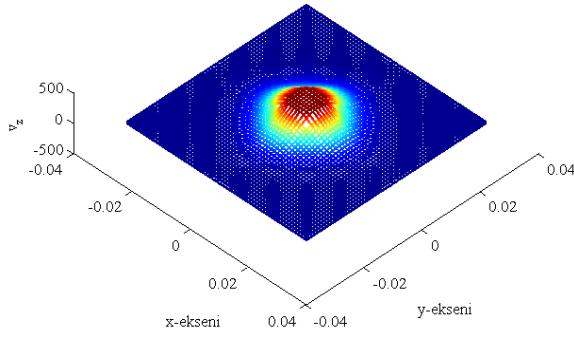


(a)



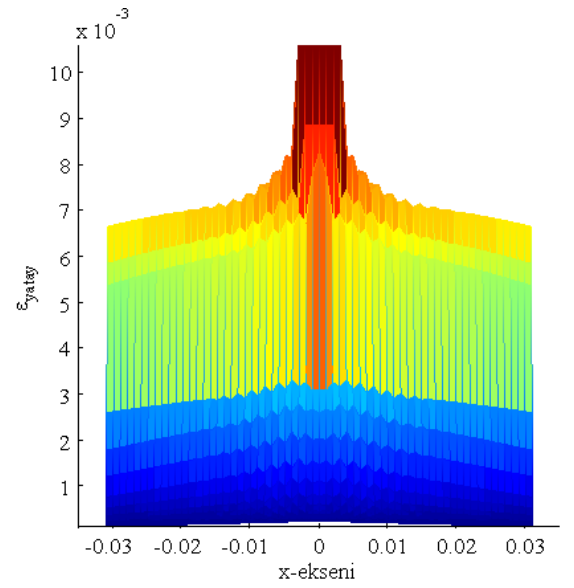
(b)

Şekil 4. İplerin yatay hızı (a) yandan görünüm, (b) 3-B görünüm,  $\alpha=0.1$ ,  $\tau=20$

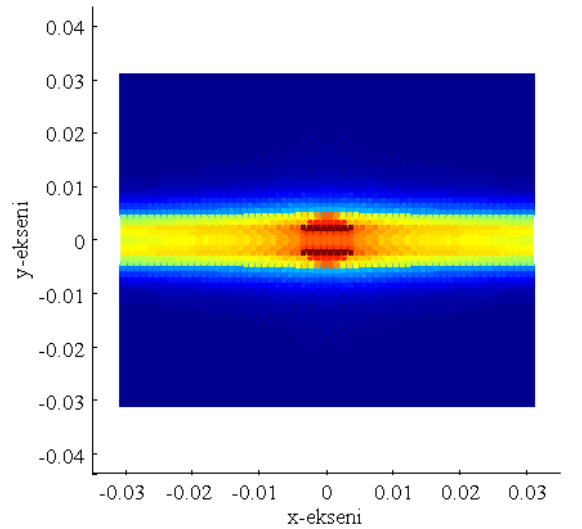


(b)

Şekil 3. İplerin dikey hızı (a) yandan görünüm, (b) 3-B görünüm,  $\alpha=0.1$ ,  $\tau=20$

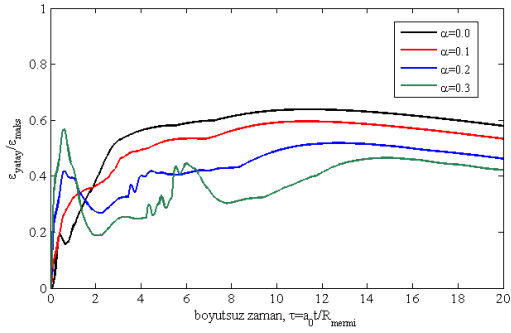


(a)



(b)

Şekil 5. İplerin yatay birim uzamaları (a) yandan görünüm, (b) üstten görünüm,  $\alpha=0.1$ ,  $\tau=20$



Şekil 6. Birim uzamaların zamanla değişimlerinin büküm faktörüne göre kıyaslanması

Büküm etkisini incelemek üzere Şekil 6 çizdirilmiştir. Bu şekilde, farklı büküm faktörlerinin ipliklerin birim uzama oranları üzerindeki etkisinin zamanla değişimini gösterilmiştir. Öncelikle tüm büküm faktörleri için birim uzama oranı  $\epsilon_{yatay}/\epsilon_{maks}$  değerinin 1'e ulaşmadığı gözlenerek kopma birim uzamasına erişilmediği gözlenmiştir (Dyneema® iplikleri için  $\epsilon_{maks}=0.0281$ , bakınız Tablo 2). Ayrıca büküm faktörünün artması ile elde edilen birim uzama değerlerinde düşüş gözlenmiştir. En düşük birim uzama oranları en yüksek büküm etkisi olan  $\alpha=0.3$ 'te okunmuştur. Bu sonuç büküm faktörünün ipliklerin dayanımını olumlu yönde etkilediği şeklinde de yorumlanabilir. Literatürde bu etkinin incelendiği birçok çalışma mevcuttur, bunlarda da benzer sonuçlar kaydedilmiştir [20-22, 24-25].

#### 4. SONUÇLAR VE TARTISMA

Bu çalışmada sunulan sayısal model ile silindirik bir merminin çarptığı elyaf takviyeli dokunmuş kompozit kumaşın balistik performans karakteristikleri elde edilmiştir. Sayısal hesaplamalar; ileri sonlu farklar yöntemi kullanılarak yapılmış olup, kumaş yapısını oluşturulan iplikler kütle-yay-sönümleyici elemanlar yardımıyla modellenmiştir. Büküm faktörünün balistik performans üzerinde önemli bir etkisi olduğu gözlenmiştir. Bükümlü ipliklerden dokunmuş kumaşın bükümsüz ipliklerden dokunmuş kumaşa göre daha düşük birim uzamalar verdiği gözlenmiştir. Bu etkinin kumaşın balistik performansına katkı sağladığı söylenebilir.

Sonuç olarak, eldeki sayısal model hava aracı zırh tasarımı için kullanılabilecek önemli bir araçtır. Son derece karmaşık olan balistik çarpma problemi analiz edilirken, bu sayısal çalışma sayesinde birçok mekanik parametrenin performansa etkisi incelenerek ürün geliştirme esnasında tasarımcıya yardımcı olacaktır.

#### KAYNAKLAR

- [1] Rakhmatulin KhA, (1947): Impact on a flexible fiber, Prikl Mat Mekh 11, 379–82 (Rusça'dan çeviri).
- [2] Rakhmatulin KhA, (1951): Normal impact at a varying velocity on a flexible fiber Uchenye Zapiski Moskovosk gos Univ 4, 154 (Rusça'dan çeviri).
- [3] Rakhmatulin KhA, 1952 Normal impact on a flexible fiber by a body of given shape Prikl Mat Mekh 16, 23–24 (Rusça'dan çeviri).
- [4] Rakhmatulin KhA, Dem'yanov YuA, (1961): Strength Under High Transient Loads, pp 94-152 (İngilizce çevirisi).
- [5] Roylance D, Wilde A, Tocci G, (1973): Ballistic impact of textile structures, Textile Research Journal, 43, 34–41.
- [6] Roylance D, Wang S S, (1980): Penetration mechanics of textile structures, Ballistic Materials and Penetration Mechanics, Elsevier, Amsterdam.
- [7] Ting C, Ting J, Cunniff P M, Roylance D, (1998): Numerical characterization of the effects of transverse yarn interaction on textile ballistic response, Proceedings of the 30th International SAMPE Technical Conference, 57–67.
- [8] Cunniff P M, Ting J, (1999): Development of a numerical model to characterize the ballistic behavior of fabrics, Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics, San Antonio TX, 15-19 November, 822-828.
- [9] Roylance D, Chammas P, Ting J, Chi H, Scott B, (1995): Numerical modeling of fabric impact, Proceedings of the National Meeting of the American Society of Mechanical Engineers ASME, San Francisco, October.
- [10] Zeng X S, Tan V B C, Shim V P W, (2006): Modelling inter-yarn friction in woven fabric armour, Int J Numer Meth Eng 66, 1309–1330.
- [11] Zeng X S, Shim V P W, Tan V B C, (2005): Influence of boundary conditions on the ballistic performance of high-strength fabric targets, Int J Impact Eng 32, 631–642.
- [12] Tan V B C, Shim V P W, Zeng X, (2005): Modelling crimp in woven fabrics subjected to ballistic impact, Int J Impact Eng 32, 561–574.
- [13] Lim C T, Shim V P W, Ng Y H, (2003): Finite-element modeling of the ballistic impact of fabric armor, Int J Impact Eng 28, 13–31.
- [14] Shimek M E, Fahrenthold E P (2015): Impact Dynamics Simulation for Multilayer Fabrics of Various Weaves, AIAA Journal, 53, 1793-1811.

- [15] Shimek M E, Fahrenthold E P (2012): Effects of Weave Type on Ballistic Performance of Fabrics, *AIAA Journal*, 50, pp 2558-2565.
- [16] Phoenix S L, Porwal P K, (2003): A new membrane model for ballistic impact response and V50 performance of multi-ply fibrous systems, *Int J Solids and Structures*, 40, 6723-6765.
- [17] Porwal P K, Phoenix S L, (2005): Modeling system effects in ballistic impact into multi-layered fibrous materials for soft body armor, *Int J Fracture*, 135, 217-249.
- [18] Porwal P K, Phoenix S L, (2008): Effects of layer stacking order on the V50 velocity of a two-layered hybrid armor system, *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 3, 627-639.
- [19] Yavuz A K, Phoenix, S L, Balkan D, (2012) New Model for Interlaced Yarns in the Ballistic Impact of Flexible Body Armors, *Advanced Materials Research* 445, 1023-1028.
- [20] Yavuz A K, Phoenix S L, Eken S. (2016) The Ballistic Impact Response of Flexible Composite Body Armor, *American Society for Composites 31 Technical Conference and ASTM Committee D30 Meeting*, September 19-22, 2016, Williamsburg, Virginia-USA.
- [21] Eken S, Phoenix S L, Yavuz A K (2016) Computational Model for Woven Fabrics Subjected to Ballistic Impact by a Projectile, *American Society for Composites 31 Technical Conference and ASTM Committee D30 Meeting*, September 19-22, 2016, Williamsburg, Virginia-USA.
- [22] Phoenix S L, Eken S, Yavuz A K, (2016) PC-Based Numerical Modeling of Ballistic Impact into Nonwoven Fibrous Targets, *American Society for Composites 31 Technical Conference and ASTM Committee D30 Meeting*, September 19-22, 2016, Williamsburg, Virginia-USA.
- [23] Zhou R, (2014) Effects of Crimp and Slip on Laminar and Woven Fabrics Subjected to Ballistic Impact, *Doktora Tezi*, Cornell Üniversitesi.
- [24] Lim J S, Lee B H, Lee C B, Han I-S, (2012) Effect of the Weaving Density of Aramid Fabrics on Their Resistance to Ballistic Impacts, *Engineering*, 4, 944-949.
- [25] Sadegh A M, Cavallaro P V, (2012) Mechanics of Energy Absorbability in Plain-Woven Fabrics: An Analytical Approach, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 7:1, 10-25.