

HAVA ARAÇ ZIRHLARININ BALİSTİK PERFORMANS KARAKTERİSTİĞİNİN SAYISAL İNCELENMESİ

Seher Eken¹

İstanbul Teknik Üniversitesi,
Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, İstanbul

ÖZET

Bu çalışmada hava araç zırhlarının balistik çarpma analizleri sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar için zırh malzemesi olarak hafif ve yüksek dayanıma sahip polimer esaslı elyaflar seçilerek kompozit plağın balistik çarpmaya dinamik cevabı ileri sonlu farklar yöntemi ile elde edilmiştir. Düz-uçlu silindirik (RCC) bir mermimin, iki-eksenli (bi-axial) kompozit panele 90°'lik açı ile dik çarpması modellenmiştir. Çarpma anında, hızdaki anlık düşüş, malzemede oluşan göçme miktarı ve diğer parametreler yardımı ile zırhın balistik performans karakteristikleri tayin edilerek yorumlanmıştır.

GİRİŞ

İnsanoğlu en eski zamanlarından itibaren, kendini dışarıdan gelen saldırılardan korunmanın yollarını aramıştır. Saldırının tipine göre, hayvan derisi, bakır, tahta, çelik gibi geniş bir malzeme yelpazesinden üretilmiş zırhlar kullanmıştır. 1940'larda laboratuvar ortamında üretilmiş sentetik polimerlerin sahaya inmesi ile birlikte, zırh malzemesi olarak kullanılmaya başlanılmış, 1970'lerde yüksek dayanıma sahip hafif kumaşların (örnek: Dyneema®, Kevlar®, Spectra®, Twaron® vb) ortaya çıkışı ile kişisel, hafif ve ağır zırhların malzemesi olarak piyasaya çok katmanlı elyaflar hâkim olmuştur. Günümüzde hava araçlarında zırhlarında, uçak kokpit kapılarında elyaf tabanlı kompozitler kullanılarak düşük/orta/yüksek hızlı balistik çarpmaya dayanıklı zırhlar geliştirilmektedir.

Öte yandan, elyaf tabanlı 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. Bu çalışmada sayısal çalışmanın avantajlarından faydalanılarak, kompozit zırhlarının tasarımı ve iyileştirmesi için pratikte kullanılması hedeflenen bir model ortaya konacaktır.

Katmanlı kompozit malzemelerden yapılmış zırhların balistik çarpışma problemi, Rakhmatulin ve arkadaşlarının [Rakhmatulin 1947; Rakhmatulin 1951; Rakhmatulin 1952; Rakhmatulin, Rakhmatulin, Dem'yanov 1961] 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 çarpışma probleminin sayısal modellemesi Roylance ve arkadaşlarının öncü çalışmaları ile 1970'li yıllarda başlamıştır [Roylance, Wilde, Tocci 1973; Roylance, Wang 1980]. Burada düzlemsel kare latislerden oluşmuş pim-eklem (pin-joint) modelleri kullanılmıştır. Latis, ip parçalarını temsil eden elastik çubuklar ile atlama (cross-over) noktalarında bağlanmıştır, ayrıca ip

¹ Dr., Uçak Müh. Böl., E-posta: durmazseh@itu.edu.tr

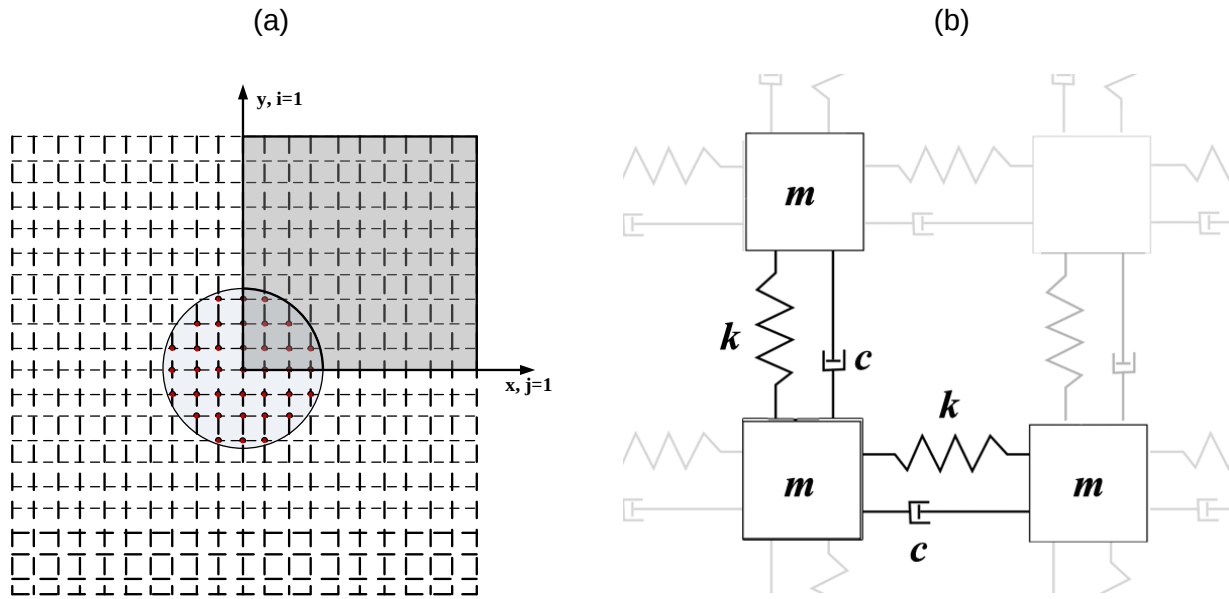
kütlesini temsilen atlama noktalarına noktasal kütle vardır. 1990'ların başında bu modeller evrilerek, dokunmuş kumaş için atkı çözgü iplerinin modellenerek büküm etkisi dâhil edilmiş, ayrıca atlama noktalarındaki kontak basma kuvvetini modellemek doğrusal olmayan yaylar kullanılmaya başlanılmıştır [Ting, Ting, Cuniff, Roylance 1998; Cuniff, Ting 1999; Roylance, Chammass, Ting, Chi, Scott 1995]. Benzer modeller Shim ve arkadaşları tarafından 2005 yılında önerilmiştir [Zeng, Shim, Tan 2005; Tan, Shim, Zeng 2005; Zeng, Tan, Shim 2006]. Bu modeller iplik bükümleri, sürtünme ve hem atlama 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 [Lim, Shim, Ng 2003] membran eleman kullanarak DYNA3D programında kumaşa balistik çarpışma analizleri yapmış ve sonuç olarak hesaplamaları masraflı olduğunu raporlamıştır. Ayrıca, güncel olarak Shimek ve Fahrentfold [Shimek, Fahrentfold 2012; Shimek, Fahrentfold 2015] tarafından geliştirilen hibrit parçacık metodu ile kompozit kumaşların balistik performans analizleri yapılarak dokuma tipinin etkisini incelenmiştir.

Elyaf tabanlı kompozit zırhların balistik çarpma cevabını irdelemek üzerine sayısal ve deneysel çalışmaların yanında analitik çalışmalar da yapılmıştır. Son yıllarda, Phoenix ve ekibi tarafından [Phoenix, Porwal 2003; Porwal, Phoenix 2005; Porwal, Phoenix 2008] gerçekleştirilen analitik çalışmada düz uçlu bir çarpanın 2-boyutlu membrana çarpmasını incelenerek, membranın balistik cevabı elde edilmiştir.

Bu çalışmanın amacı tek-katmanlı kompozite çarpan düz uçlu silindirik merminin (right circular cylinders-RCC) balistik çarpma benzetimini gerçekleştirmektir. Liflerin yer değiştirmelerini, hızlarını, birim uzamaları ve kuvvet büyüklüklerini öngörülen zaman diliminde hesaplanacaktır. Ayrıca, büküm (crimp) etkisi, dokuma tipi ve alan yoğunluğu gibi parametrelerin balistik performansa olan etkileri incelenecektir. Çalışmadan elde edilecek sonuçlar balistik performansı yüksek hava araç zırhlarının tasarımında kullanılabilecektir.

Problem Tanımı

Sayısal hesaplamalar için sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Şekil 1a'da görülen hesaplama bölgesinde gerçekleştirilmiştir. x- ve y- yönlerinde ekstenel simetri kabulü altında analizler ve simülasyon 1. dörtte 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. Elyaflar Şekil 1b'de gösterildiği gibi kütle-yay-sönümleyici sistem kullanılarak modellenmiştir. Kullanılan ayrık kütleler iplerin kütlesini, yaylar iplerin elastik özelliklerini, sönümleyici ise viskoelastik özelliklerini temsil etmektedir.



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

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:

$$\frac{m}{\Delta t} (v_{(x)}^t - v_{(x)}^{t-\Delta t}) = \sum f_{(x)}^{t-\Delta t} \quad (1)$$

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 $t-\Delta t$ anındaki çekme kuvvetinin x -yönündeki iz düşümüdür ve aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\sum f_{(x)}^{t-\Delta t} = \sum (T_{(x)}^{t-\Delta t} - P_{(x)}^{t-\Delta t}) \quad (2)$$

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

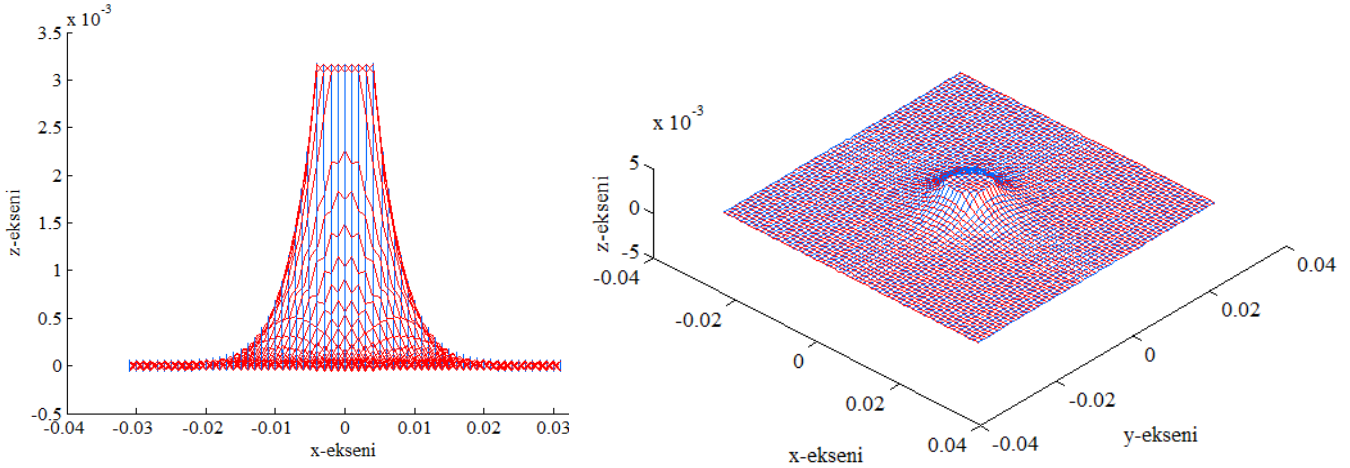
$$x^t = x^{t-\Delta t} + v_{(x)}^t \quad (3)$$

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

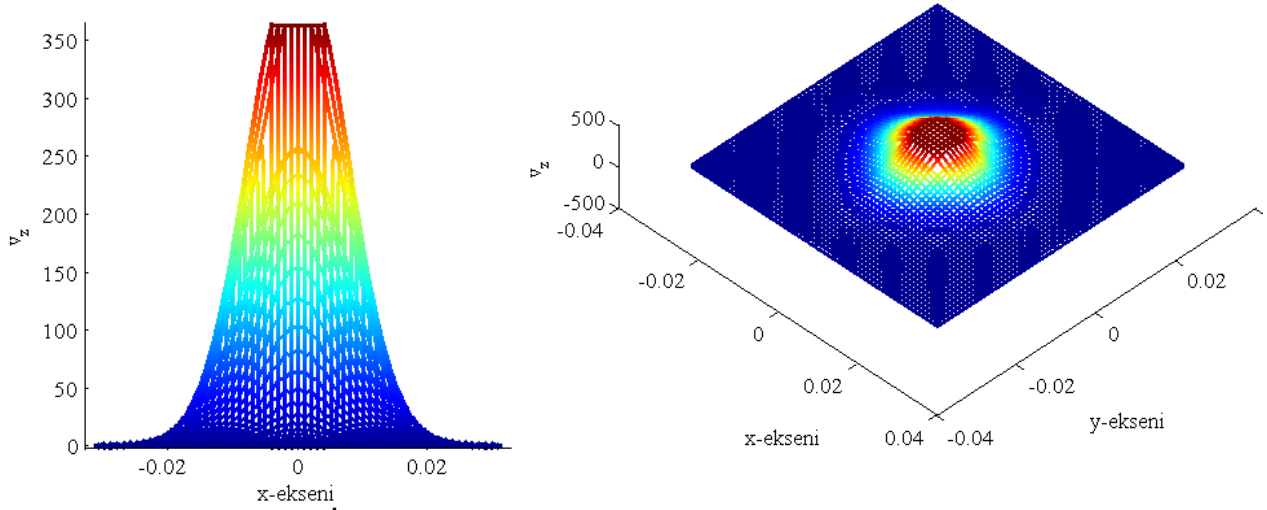
$$\varepsilon^t = \varepsilon^{t-\Delta t} + \frac{L^t - L^{t-\Delta t}}{L^{t-\Delta t}} \quad (4)$$

Simülasyonlar

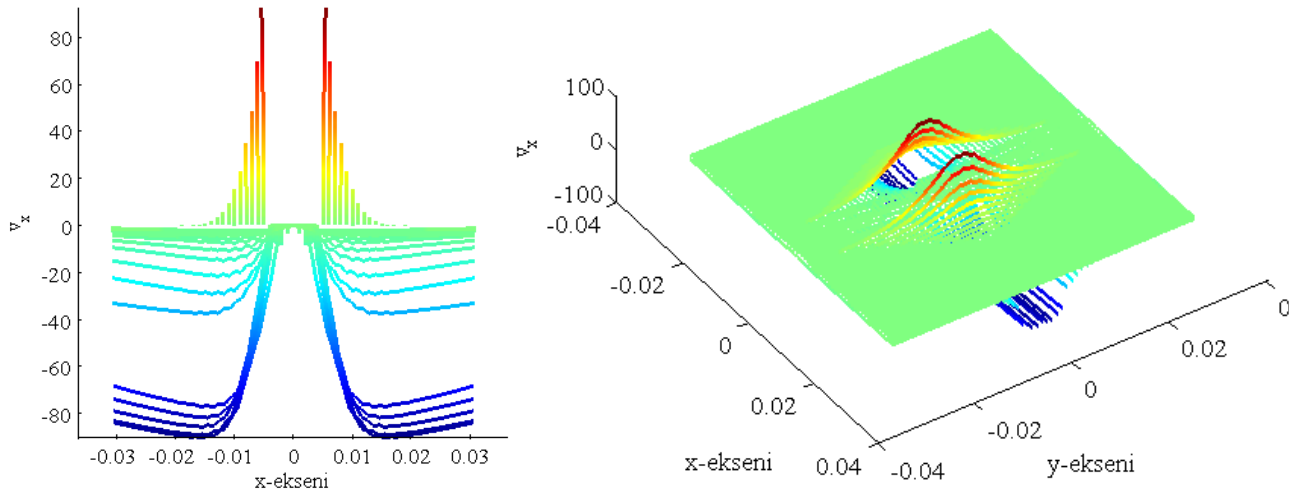
Şekil 2'den Şekil 5'e $0.5m \times 0.5m$ 'lik Dyneema® iplerinden dokunmuş kumaşa çarpan merminin balistik performansı gösterilmiştir. Şekil 2 silindirik merminin çarpmasıyla zırhta meydana gelen yer değiştirmeleri göstermektedir. Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'te sırasıyla dikey hızlardaki değişim, yatay hızlardaki değişim ve birim uzamalarındaki değişim hem yandan hem de 3-boyutlu görünüş olarak verilmiştir.



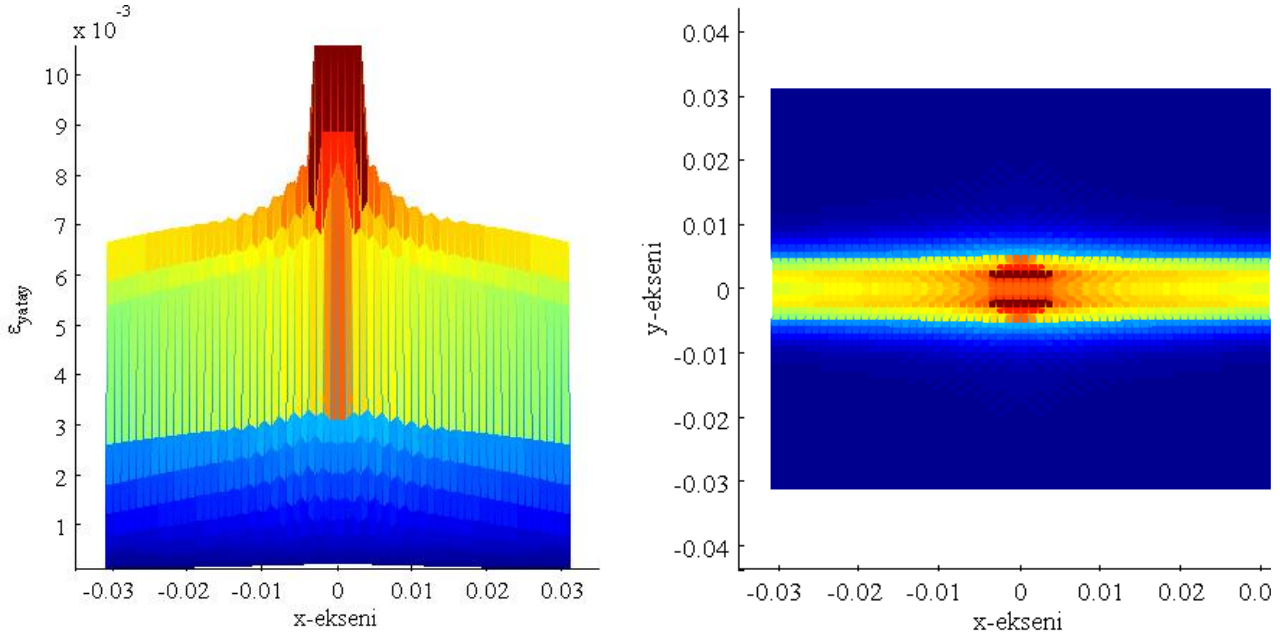
Şekil 2: İplerin konumu (a) yandan görünüm, (b) 3-B görünüm



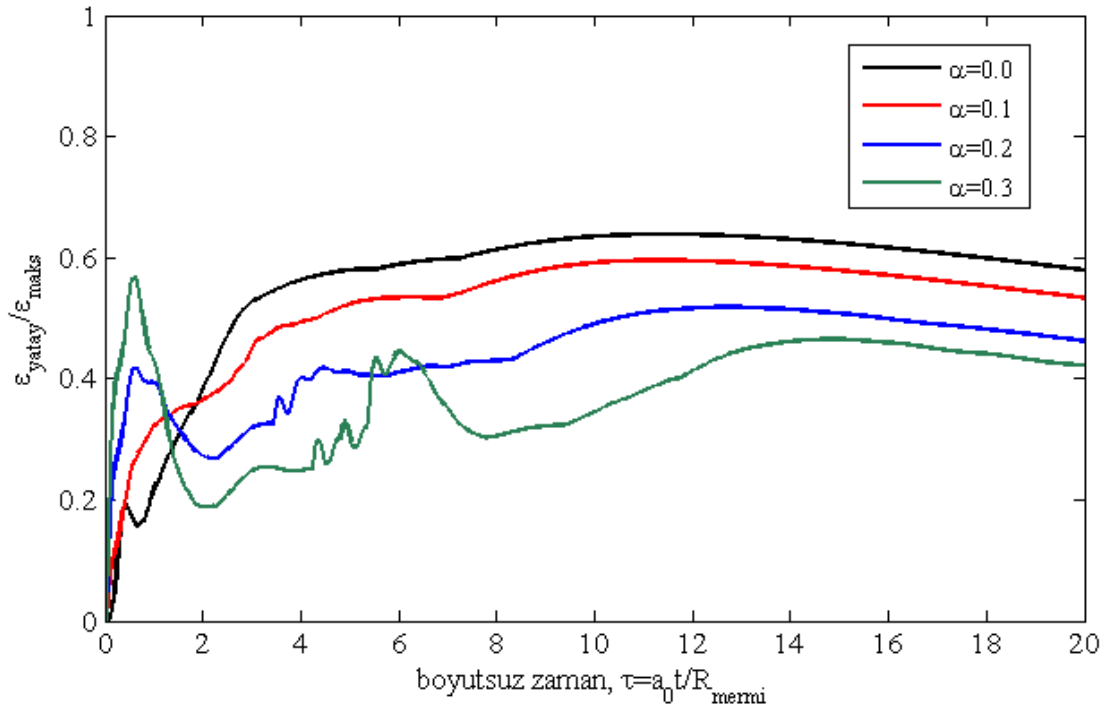
Şekil 3: İplerin dikey hızı (a) yandan görünüm, (b) 3-B görünüm



Şekil 4: İplerin yatay hızı (a) yandan görünüm, (b) 3-B görünüm



Şekil 5: İplerin yatay birim uzamaları (a) yandan görünüm, (b) üstten görünüm



Şekil 9: Birim uzamaların zamanla değişimlerinin büküm faktörüne göre kıyaslanması

SONUÇ

Bu çalışmada sunulan sayısal model ile düz uçlu merminin çarptığı elyaf takviyeli dokunmuş kompozit kumaşın balistik performans karakteristikleri elde edilmiştir. Büküm faktörü artıkcı düşük birim uzamalar gözlenmiştir. Aynı etki V50 hızının da yükselmesine sebep olacaktır.

Bu model yumuşak yapıli kumaş zırhlarının tasarımı için önemli bir araç olarak kullanılabilecektir. Farklı malzemeler ve farklı mermi uçları gibi birçok mekanik parametrenin zırhın balistik performansına etkisi incelenebilecektir.

Kaynaklar

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Rakhmatulin, KhA. 1947. *Impact on a flexible fiber*, Prikl. Mat. Mekh. 11, 379–82 (Rusça’dan çeviri).
- Rakhmatulin, KhA. 1951. *Normal impact at a varying velocity on a flexible fiber*. Uchenye Zapiski Moskovsk gos. Univ. 4, 154 (Rusça’dan çeviri).
- Rakhmatulin KhA. 1952. *Normal impact on a flexible fiber by a body of given shape*. Prikl. Mat. Mekh. 16, 2324 (Rusça’dan çeviri).
- Rakhmatulin KhA. Dem’yanov, YuA, 1961. *Strength Under High Transient Loads*, pp. 94-152 (İngilizce çevirisi).

- Roylance, D. Wilde, A. Tocci, G. 1973. *Ballistic impact of textile structures*, Textile Research Journal, 43, 34–41.
- Roylance, D. Wang, S. S. 1980. *Penetration mechanics of textile structures*, Ballistic Materials and Penetration Mechanics, Elsevier, Amsterdam.
- 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.
- Shimek, M. E. Fahrenthold, E. P. 2012. *Effects of Weave Type on Ballistic Performance of Fabrics*, AIAA Journal, 50, pp. 2558-2565.
- Shimek, M. E. Fahrenthold, E. P. 2015. *Impact Dynamics Simulation for Multilayer Fabrics of Various Weaves*, AIAA Journal, 53, 1793-1811.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.