



TEKSTİL VE MÜHENDİS
(Journal of Textiles and Engineer)



<http://www.tekstilvemuhendis.org.tr>

Yüksek Performanslı Kumaş Zırhların Balistik Dayanımlarının Sayısal Olarak İncelenmesi

Numerical Investigation of Ballistic Resistance of High Performance Fabric Armors

Seher EKEN
İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Maslak-İstanbul

Online Erişime Açıldığı Tarih (Available online): 30 Mart 2017 (30 March 2017)

Bu makaleye atıf yapmak için (To cite this article):

Seher EKEN (2017): Yüksek Performanslı Kumaş Zırhların Balistik Dayanımlarının Sayısal Olarak İncelenmesi, Tekstil ve Mühendis, 24: 105, 2-12.

For online version of the article: <https://doi.org/10.7216/1300759920172410501>



Araştırma Makalesi / Research Article

YÜKSEK PERFORMANSLI KUMAŞ ZIRHLARIN BALİSTİK DAYANIMLARININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Seher EKEN*

İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Maslak-İstanbul

Gönderilme Tarihi / Received: 08.08.2016

Kabul Tarihi / Accepted: 18.01.2017

ÖZET: Bu çalışmada, yumuşak yapılı kumaş zırhların balistik çarpması sayısal benzetim yoluyla gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar için zırh malzemesi olarak yüksek performanslı kumaş seçilmiştir. Bu şekilde kumaşın balistik çarpma cevabi ileri sonlu farklar yöntemi ile hesaplanmıştır. Düz-uçlu Parçacık Simülasyon Mermisinin (PSM), iki-eksenli kumaşa 90°'lik açı ile dik çarpması analiz edilmiştir. Kare latislerden oluşmuş pim-eklem sisteminde düğüm noktalarındaki eklemler arasındaki iplik parçaları ayırık kütle-yay-sönümleyici kullanılarak modellenmiştir. Çarpmadan belli bir süre sonra yer değiştirmeler, hızlardaki değişim, malzemede oluşan göçme miktarı hesaplanmış ve grafiksel olarak gösterilmiştir. Kıvrım etkisinin zırhın balistik performansına olan etkisi incelenerek yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yüksek performanslı kumaş zırhlar, parçacık simülasyon mermisi, balistik performans, ileri sonlu farklar metodu

NUMERICAL INVESTIGATION OF BALLISTIC RESISTANCE OF HIGH PERFORMANCE FABRIC ARMORS

ABSTRACT: In this study numerical simulation of ballistic impact is carried out for the soft fabric armors. For the simulations, high performance fabrics are chosen as the armor material. In this manner, the ballistic impact response of the fabric is computed using forward finite difference method. Flat-nosed Fragment Simulation Projectile (FSP) hitting the biaxial composite fabric at an angle 90° is analyzed. The yarn segments between hinged joints at crossovers are modeled using discrete mass-spring-damper in pin-joint systems consisting of planar square lattices. After a certain time of impact; displacement of the fabric, change in the velocities and the failure in the material is computed and depicted graphically. The effect of crimp on the ballistic performance of the fabric is examined and discussed.

Keywords: High performance fabric armors, fragment simulation projectile, ballistic performance, forward finite difference method

* **Sorumlu Yazar/Corresponding Author:** durmazseh@itu.edu.tr

DOI: 10.7216/1300759920172410501, www.tekstilvemuhendis.org.tr

1. 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 zirhler kullanmıştır. 1940'larda laboratuvar ortamında üretilmiş sentetik polimerlerin sahaya inmesi ile birlikte, zirh malzemesi olarak kullanılmaya başlanılmış, 1970'lerde yüksek dayanıma sahip hafif kumaşların (örnek: Dyneema®, Kevlar®, Spectra®, Twaron® ve benzeri) ortaya çıkışı ile kişisel, hafif ve ağır zirhlerin malzemesi olarak piyasaya yüksek performanslı kumaşlar hâkim olmuştur. Günümüzde araç zirhlerinde, uçak kokpit kapılarında ve giysi zirhlerinde bu tür liflerden üretilmiş kumaşlar kullanılarak düşük/orta/yüksek hızlı balistik çarpmaya dayanıklı zirhler geliştirilmektedir.

Öte yandan, yüksek performanslı liflerden üretilmiş zirhlara balistik çarpma olayı, 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.

Çok katmanlı kumaşlardan yapılmış zirhlerin 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 modelleri kullanılmıştır. Latis, iplik parçalarını temsil eden elastik çubuklar ile düğüm noktalarında bağlanmıştır, ayrıca iplik kütesini temsilen düğüm noktalarında noktasal kütle yerleştirilmiştir. 1990'ların başında bu modeller evrilerek, dokunmuş kumaş için atkı ve çözgü yönünde kıvrımlı ipliklerden oluşmuş, ayrıca düğüm noktalarındaki kontak basma kuvvetini doğrusal olmayan yaylar kullanılarak temsil eden modeller üretilmeye başlanılmıştır [7-9]. Benzer modeller Shim ve arkadaşları tarafından 2005 yılında önerilmiştir [10-12]. Bu modeller iplik kıvrımları, 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 Fahrentfold [14-15] tarafından geliştirilen hibrit parçacık metodu ile yüksek performanslı kumaşların balistik performans analizleri yapılarak dokuma tipinin etkisini incelenmiştir.

Yumuşak yapıya sahip yüksek performanslı kumaş zirhlerin balistik çarpma cevabını irdelemek üzerine sayısal ve deneysel

çalışmaların yanında analitik çalışmalar da yapılmıştır. Son yıllarda, Phoenix ve ekibi tarafından [16-18] gerçekleştirilen analitik çalışmada düz uçlu bir çarpanın 2-boyutlu membrana çarpmasını incelenerek, membranın balistik cevabı elde edilmiştir.

Bu konu üzerine Türkiye'de de birçok öncü çalışmalar yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Mesela Özşahin ve Tolun tarafından 2010 yılında [19-20] alüminyum levhaların yüksek hızlı çarpma dayanımları deneysel olarak incelenmiştir. Yüzey kaplama, destek katmanı eklenmesi gibi çeşitli performans artırıcı yöntemlerin performans üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Bozdoğan ve ekibi tarafından [21] yürütülmüş bir çalışmada balistik koruma amaçlı tekstil materyallerinin secimi sırasında dünyanın kullandığı testler ve yöntemler hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Başka bir çalışmada, yüksek performanslı ipliklerden üretilen örme kumaşların kopma mukavemeti ve delinme direnci gibi mekanik etkilere karşı dayanım özelliklerinin incelenmiştir [22].

Zirhlerin tasarımı aşamasında balistik testlerin oluşturduğu deneysel çalışmalar büyük önem arz etmektedir. Ancak birçok farklı mekanik parametrenin bulunduğu balistik çarpma olayında her bir parametrenin deneysel araştırması oldukça zor ve maliyet açısından verimsiz olabilmektedir. Bununla birlikte, bilgisayar ortamında kurulan sayısal modeller, test maliyetlerinin fazlalığı sebebi ile deneysel çalışmalara nazaran ucuz ve etkili araçlar olarak oldukça fazla tercih edilmektedir. Maliyet performansları bir yana, teorik veya sayısal modellemeler sayesinde son derece karmaşık olan ve mikro saniyeler mertebesinde gerçekleşen ve deneysel olarak tespiti çok zor olan balistik çarpma olayının içyüzünün anlaşılması da mümkün olabilmektedir. Ek olarak, ürün geliştirme sırasında, bilgisayar ortamında kurulan modeller ile çeşitli malzemelerin ve çeşitli çarpma senaryolarının kapsamlı olarak benzetimini yapılabilmektedir. Sonuç olarak, salt bilgisayar ortamında kurulan modellemeler, düşük maliyetleri ve tasarımcıya ışık tutacak detaylı ve kapsamlı bilgi üretebilme potansiyelleri açısından sıklıkla ziyaret edilen yaklaşımdırlar.

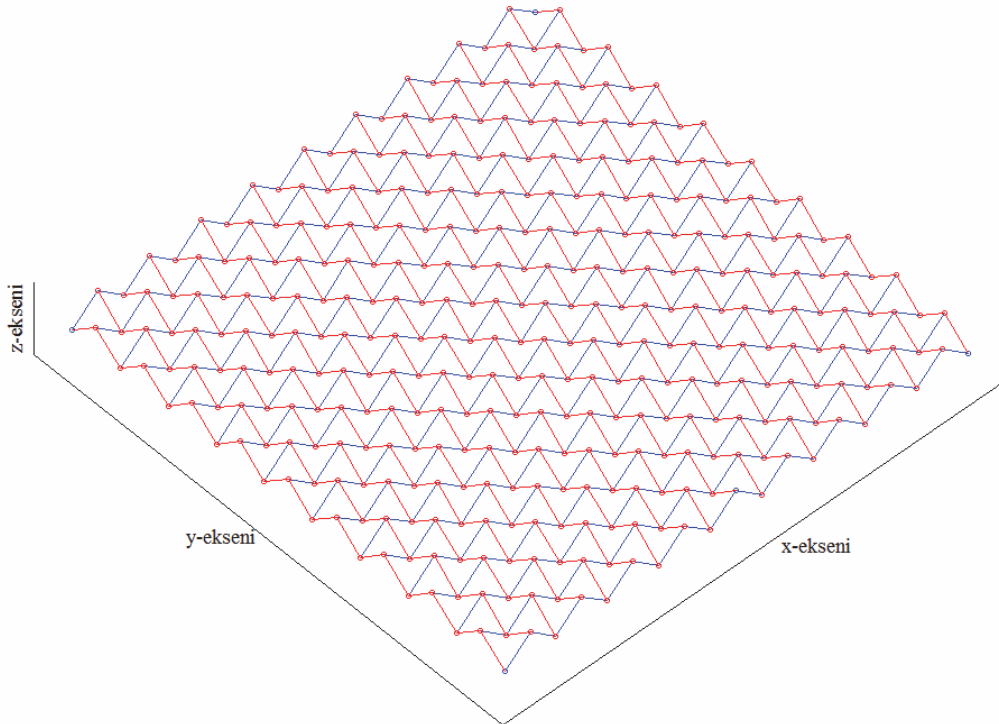
Bu bağlamda çalışmanın amacı, gerçek malzemelerle yapılan pahalı fiziksel testler ile kıyaslandığında daha etkili ve düşük maliyetli bir araç geliştirmek olup, yüksek performanslı kumaş zirhlerin balistik performansını sayısal olarak tayin edebilen bir model ortaya koymaktır. Elimizdeki bu model Cornell Üniversitesi'nce yıllar içinde geliştirilmiş olan sayısal simülasyon modeline dayanmaktadır [23-26]. Burada tek-katmanlı kumaşa Parçacık Simülasyon Mermisinin (PSM) balistik çarpma benzetimini gerçekleştirerek, ipliklerin yer değiştirmelerini, hızlarını, birim uzamaları ve kuvvet büyüklüklerini öngörülen zaman diliminde hesaplanmıştır. Ayrıca iplikler kıvrımlı olarak modellenerek, bu faktörün kumaşın balistik performansına olan etkisi incelenmiştir.

2. PROBLEMİN TANIMI

Bu bölümde sayısal modelin tanıtımı yapılarak mermi ve zirhin modellenmesi için dikkate alınan unsurlar ayrı ayrı açıklanacaktır. Öncelikle yapılan kabuller aşağıda listelenmiştir:

- Çarpma olarak, düz-uçlu Parçacık Simülasyon Mermisi (PSM) kullanılmıştır. Bu merminin kütlesi m_{mermi} , yarıçapı R_{mermi} olup v_{mermi} hızı ile 90° ’lik açıyla kumaşın tam ortasına çarpmaktadır. Ayrıca mermi rijit kabul edilerek çarpmadan sonra merminin yavaşlaması esnasında R_{mermi} ’nin değişmediği kabul edilmiştir.
- Zırh olarak, yumuşak yapılı balistik koruyucu malzemelerden üretilmiş yüksek performanslı kumaş seçilmiştir. Bu kumaş iki eksenli kıvrım etkisine sahip tek-katmanlı bir kumaştır. Kumaş yüzeyi, sınıra çarpma dalga yansımalarını dâhil etmeyecek kadar büyük belirlenmiştir.
- Çarpma esnasında, anlık hız düşüşü; mermi ile merminin kumaşa temas ettiği bölge arasındaki momentumun korunumu yardımı ile bulunmuştur ve $v_{mermi,0}$ ile gösterilmiştir.

İki-eksenli kıvrım etkisine sahip kumaş geometrisi Şekil 1’de verilmiştir [23-27]. Daha öncede belirtildiği gibi bu model Cornell Üniversitesinde geliştirilmiş olan “Laminar Crimp Model” ine dayanmaktadır [23-26]. Şekilden görüldüğü gibi kumaş, atkı (yatay) ve çözgü (dikey) yönlerinde eşit kıvrım etkisine sahip olarak modellenmiştir. Mavi çizgiler atkı (yatay) yönündeki iplikleri; kırmızı çizgiler ise çözgü yönündeki iplikleri gösterirken içi boş dairesel noktalar da düğüm noktalarıdır. Modellemede kolaylık sağlaması açısından atkı ve çözgü iplikleri üst üste veya alt alta geldikleri düğüm noktalarında çakışık kabul edilmiştir.



Şekil 1. Çarpma öncesi atkı ve çözgü yönlerinde eş kıvrım etkisine sahip kumaş geometrisi

Sayısal hesaplamalar; ileri sonlu farklar yöntemi kullanılarak yapılmış olup, Şekil 2(a)’da koyu gri olarak görülen hesaplama bölgesinde gerçekleştirilmiştir. Mermi-kumaş yapısının simetrik oluşu göz önüne alındığında, x-y ve y-z düzlemlerinde simetri şartı uygulanarak sistemin sadece çeyrek kısmı modellenmiştir. Şekil 2(a)’daki koyu çizgi ile çizilmiş çeyrek daire altında kalan kırmızı ile gösterilmiş düğüm noktalarına momentumun korunumu kullanılarak mermiden gelen hız ve kütle değerleri atanarak çarpışma süreci başlatılmıştır.

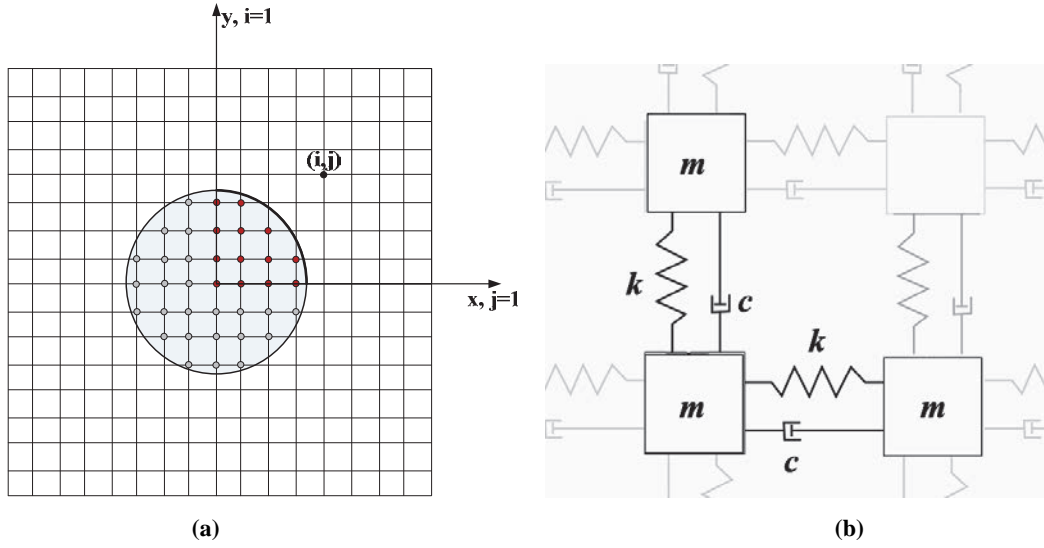
Kumaş modeli, kare latislerden oluşmuş pim-eklem sistemi kullanılarak kurulmuştur. Bu yapıda, Şekil 2(b)’de gösterildiği gibi, iplikler kütle-yay-sönümleyici sistem kullanılarak modellenmiştir. Kullanılan ayrı-kütleler ipliklerin kütlesini, yaylar ipliklerin elastik özelliklerini, sönümleyici ise ipliklerin viskoelastik özelliklerini temsil etmektedir.

2.1 Sayısal Model

Sayısal çözüm ileri-sonlu farklar yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Newton’un hareket denklemleri düğüm noktalarındaki hızlar için her 3 Kartezyen koordinatı çözülür.

$$f = m \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

Denklem (1)’i impuls-momentum formunda yazarak, x-, y- ve z- yönlerindeki çözülecek denklemleri aşağıdaki şekilde elde ederiz:



Şekil 2. (a) Hesaplama alanı, (b) Pim-eklem ağı modelinde ayırık kütle-yay-sönümleyici sistemi [23]

$$\frac{m}{\Delta t} (v_{(x)}^t - v_{(x)}^{t-\Delta t}) = \sum f_{(x)}^{t-\Delta t} \quad (2a)$$

$$\frac{m}{\Delta t} (v_{(y)}^t - v_{(y)}^{t-\Delta t}) = \sum f_{(y)}^{t-\Delta t} \quad (2b)$$

$$\frac{m}{\Delta t} (v_{(z)}^t - v_{(z)}^{t-\Delta t}) = \sum f_{(z)}^{t-\Delta t} \quad (2c)$$

Burada $v_{(x)}^t$, $v_{(y)}^t$ ve $v_{(z)}^t$ t-anındaki x-, y- ve z-yönlerindeki hız bileşenleridir. $f_{(x)}^{t-\Delta t}$, $f_{(y)}^{t-\Delta t}$ ve $f_{(z)}^{t-\Delta t}$ ise t-Δt anındaki çekme kuvvetinin x-, y- ve z-yönlerindeki iz düşümleridir ve aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\sum f_{(x)}^{t-\Delta t} = \sum (Y_{(x)}^{t-\Delta t} + D_{(x)}^{t-\Delta t}) \quad (3a)$$

$$\sum f_{(y)}^{t-\Delta t} = \sum (Y_{(y)}^{t-\Delta t} + D_{(y)}^{t-\Delta t}) \quad (3b)$$

$$\sum f_{(z)}^{t-\Delta t} = \sum (Y_{(z)}^{t-\Delta t} + D_{(z)}^{t-\Delta t}) \quad (3c)$$

Yukarıdaki denklemlerde yer alan Y ve D sembolleri yatay ve dikey yönlerdeki kuvvet bileşenlerini temsil etmektedir. Şekil 2(b) verilen sistem dikkate alındığında, yatay ve dikey ipliklerdeki kuvvetler aşağıda verilen ifadeler ile tanımlanmıştır.

$$Y_x = E_x d_{panel} dL (ir_{yatay} x_{yatay} + \eta_{yatay} \Delta v_{x,yatay}) \quad (4a)$$

$$D_x = E_y d_{panel} dL (ir_{dikey} x_{dikey} + \eta_{dikey} \Delta v_{x,dikey}) \quad (4b)$$

$$Y_y = E_x d_{panel} dL (ir_{yatay} y_{yatay} + \eta_{yatay} \Delta v_{y,yatay}) \quad (4a)$$

$$D_y = E_y d_{panel} dL (ir_{dikey} y_{dikey} + \eta_{dikey} \Delta v_{y,dikey}) \quad (4b)$$

$$Y_z = E_x d_{panel} dL (ir_{yatay} z_{yatay} + \eta_{yatay} \Delta v_{z,yatay}) \quad (4a)$$

$$D_z = E_y d_{panel} dL (ir_{dikey} z_{dikey} + \eta_{dikey} \Delta v_{z,dikey}) \quad (4b)$$

Burada $E_x d_{panel} dL (ir_{yatay} x_{yatay})$ terimi yatay iplerde oluşan elastik yay kuvvetini, yani kx 'i ifade ederken, $E_x d_{panel} dL (\eta \Delta v_{x,yatay})$ terimi ise sönümleyici kuvvet olan $c\dot{x}$ 'i ifade eder. η viskozite terimi olup birimi s/m'dir ve yatay ve dikey iplikler için eşit olarak seçilmiştir. Bunun yanında ir_{yatay} ise birimi 1/m olan bir terimdir.

Hız alanı elde edildikten sonra bunlar kullanılarak düğüm noktalarının pozisyonları hesaplanır ve aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$x^t = x^{t-\Delta t} + v_{(x)}^t \Delta t \quad (5a)$$

$$y^t = y^{t-\Delta t} + v_{(y)}^t \Delta t \quad (5b)$$

$$z^t = z^{t-\Delta t} + v_{(z)}^t \Delta t \quad (5c)$$

Düğüm noktaları pozisyonları tespit edildikten sonra, bunlar kullanılarak yay eleman uzunlukları hesaplanıp L^t , aşağıdaki formülasyon ile birim uzamalar güncellenerek elde edilir.

$$\varepsilon^t = \varepsilon^{t-\Delta t} + \frac{L^t - L^{t-\Delta t}}{L^{t-\Delta t}} \quad (6)$$

Sayısal yöntemin daha detaylı bir incelemesine yazarın önceki çalışmalarından [24-26] ulaşılabilir.

2.2 Giriş Parametreleri ve Değişkenleri

Sayısal modelimiz MATLAB platformunda geliştirilmiş bir yazılımdır. Kodun çalıştırılması için gerekli fiziksel büyüklükler, parametreler ve kullanılan sayısal değerleri aşağıdaki verilen Tablo 1'de verilmiştir.

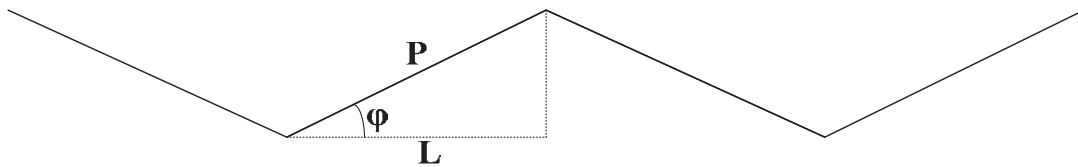
Tablo 1. Kodda kullanılan fiziksel büyüklükler, simülasyon parametreleri ve sayısal değerleri

KUMAŞ İLE İLGİLİ BÜYÜKLÜKLER (Dyneema®)		
Sembol	Tanım	Değer/Aralık
E_x	x-yönündeki Young Modülü	117 GPa
E_y	y-yönündeki Young Modülü	117 GPa
ρ_{kumas}	Kumaşın yoğunluğu	981 kg/m ³
ε_{maks}	İplerin kopma birim uzaması	0,0281
AD	Kumaşın alan yoğunluğu	5.11 kg/m ²
$a_0 = \sqrt{E_x / \rho_{kumas}}$	Gerilme dalga hızı	10920,9 m/s
$d = AD / \rho_{kumas}$	Kumaşın kalınlığı	0,0051 m
$m_{gp} = \frac{ADdL^2}{2}$	Kumaştaki düğüm noktalarının kütlesi	4,95x10 ⁻⁴ gr
MERMI İLE İLGİLİ BÜYÜKLÜKLER (PSM)		
Sembol	Tanım	Değer/Aralık
v_{mermi}	Çarpmadan önceki mermi hızı	570 m/s
m_{mermi}	Mermi kütlesi	1,1 gr
R_{mermi}	Mermi çapı	0,0028 m
SAYISAL MODELLEMEDE KULLANILAN BÜYÜKLÜKLER		
Sembol	Tanım	Değer/Aralık
$v_{mermi,0} = \frac{v_{mermi} m_{mermi}}{\pi R_{mermi}^2 AD + m_{mermi}}$	Çarpmadan sonraki mermi hızı (momentum değişimi)	511,45 m/s
α	Kıvrım faktörü	0-0,3 (Tablo 3)
η	Viskozite (Sonlu farklar metodunun doğası gereği ortaya çıkacak titreşimleri sönümlemede kullanılacak)	2x10 ⁻⁶ -2x10 ⁻⁵ s/m
$\tau = \frac{R_{mermi} t}{a_0}$	Boyutsuz zaman	0-100
n_a	Zaman adımı sayısı	741-1441
n_e	Kare kumaştaki toplam eleman boşluğu	411-816
dL	Çözüm ağı boyutu	0,0622 mm
dt	Zaman adımı	0,0274 μ s

İpliklerin kısalma oranı ISO 7211-3 [23, 27-29] yönergesinde aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$k = \% \frac{P - L}{L} \quad (7)$$

Burada P ipliğin gerçek uzunluğu, L ise ipliğin iki ucundan düzlemde alınan iz düşüm uzunluğudur, Şekil 3'te gösterilmiştir.

**Şekil 3.** Kıvrım parametreleri

İlerideki simülasyonlarda kullanılan kıvrım değerleri ve kıyaslamaları Tablo 2’te verilmiştir. Bu tablodan da görüleceği üzere $\alpha = 0,0$ tamamıyla düz iplik iken, $\alpha = 0,3$ kıvrım faktörü ipliğin boyunun % 4,40 uzatılmış haline denk gelir.

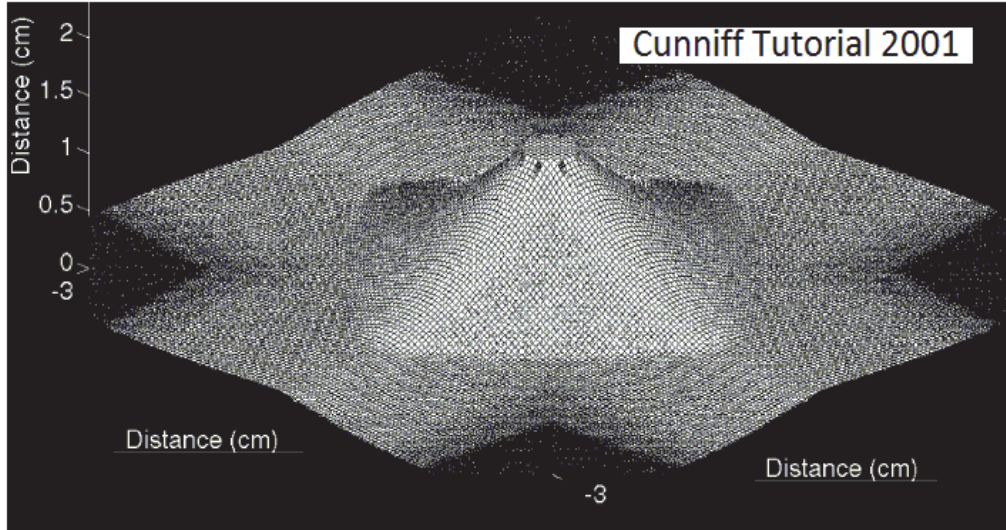
Tablo 2. Çalışmada kullanılan kıvrım değerleri ve kıyaslanması

$\alpha = \tan(\varphi)$	φ	$k = \%(\sqrt{1 + \alpha^2} - 1)$	φ
0.0	0°	% 0	
0.1	5,71°	% 0,5	
0.2	11,31°	% 1,98	
0.3	16,70°	% 4,40	

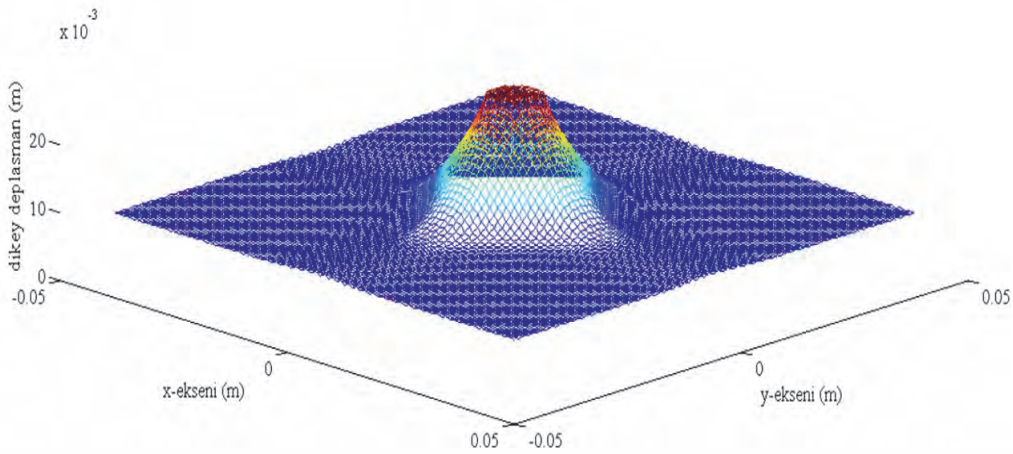
3. SİMÜLASYONLAR

Analiz ve simülasyonlar için Dyneema® ipliklerinden üretilmiş yumuşak yapılı balistik kumaş kullanılmıştır. İlk olarak yapılan sayısal çalışmanın literatür ile kıyaslaması yapılmıştır. Bunun için Cunniff [30] tarafından yapılmış bir çalışma kullanılarak Şekil 4 verilmiştir.

Şekil 5, Parçacık Simülasyon Mermisi (PSM) çarpma etkisiyle kumaşa oluşan yer değiştirmeleri göstermektedir. Şekil 6, Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9’de sırasıyla dikey hızlardaki değişim, yatay hızlardaki değişim, birim uzamalarda ve dikey kuvvetlerde darbe sonrası meydana gelen değişim hem üstten, hem yandan hem de 3-boyutlu görünüş olarak verilmiştir.



(a)



(b)

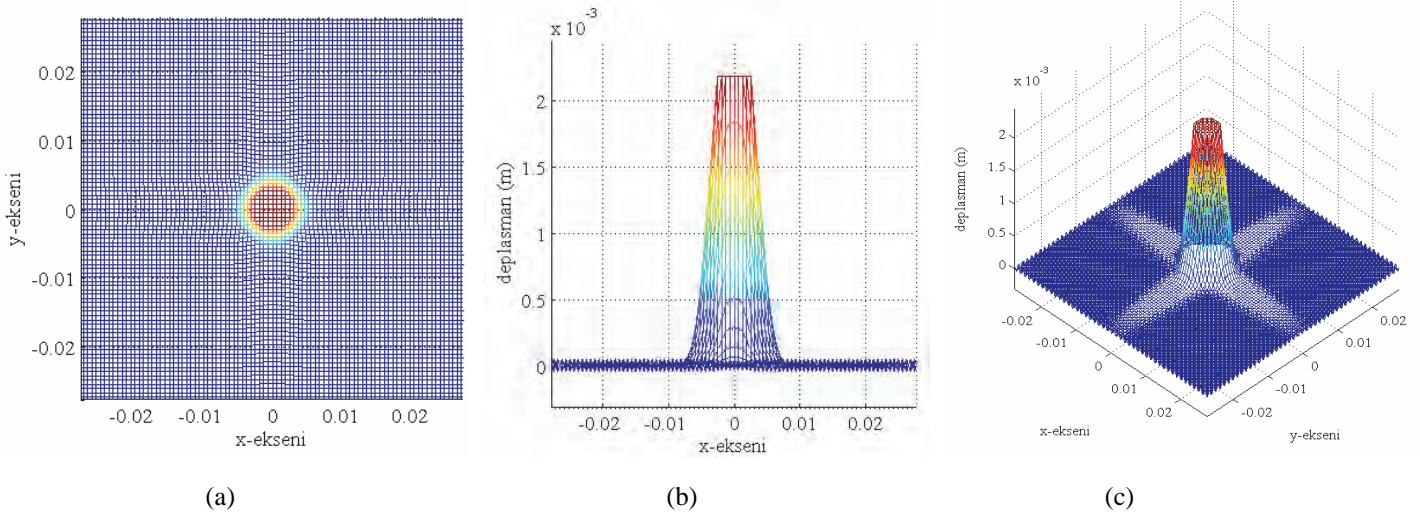
Şekil 4. Sayısal modelin karşılaştırılması, (a) kumaşın yer değiştirmesi [30], (b) kumaşın yer değiştirmesi ($t=31 \mu s$)

Şekil 5, detaylı olarak incelendiğinde, mermi ile temasta kalan kıvrımlı ipliklerin düzleşerek merminin hareketi için yer açtığı görülmüştür. Bu durum mermi ile temas etmeyen iplikler için geçerli olmayıp, bu iplikler ilk kıvrım oranını halen korumaktadırlar.

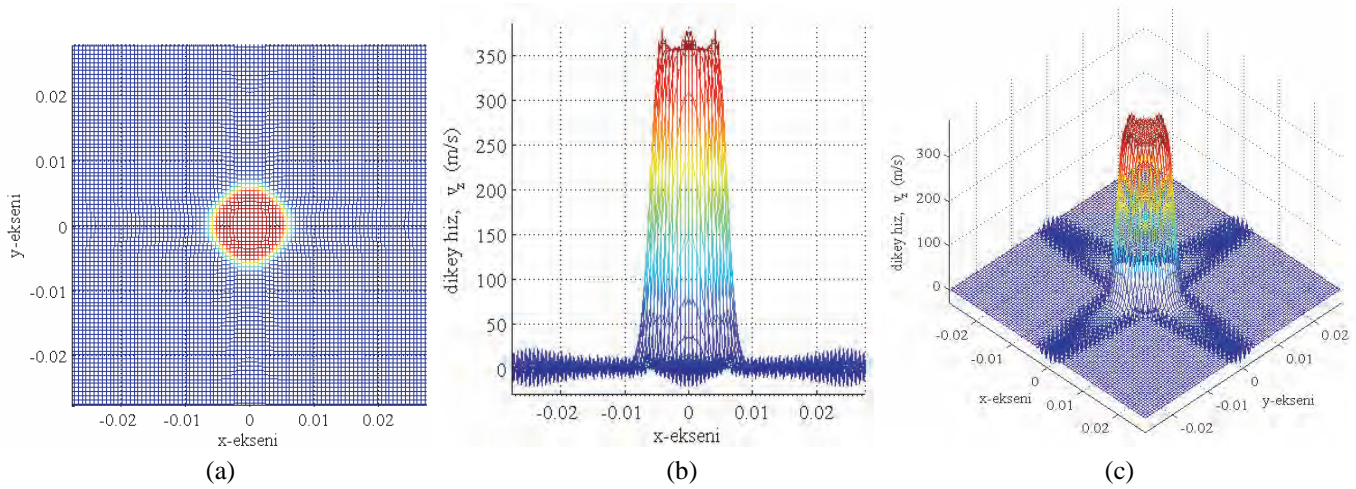
Şekil 6'teki dikey hız dağılımı grafiklerinde ise ilk hızı 570 m/s olan 1,1 gr ağırlığındaki merminin hızının 350 m/s'ye düşürüldüğü gözlenmiştir. Yatay hız dağılımını gösteren Şekil 7'da verilen grafiklerde ise malzeme akışı gözlenmektedir. Bir başka deyişle, merminin enine hareketinden (z-yönünde) kaynaklı olarak iplikler temas yüzeyine doğru çekilmişlerdir.

Şekil 8'de çizdirilen birim uzamalar grafiğinde ise birim uzamalar temas yüzeyi etrafında en yüksek değerini alarak % 1,3 olmuştur. Kullandığımız Dyneema® malzemesinin kopma birim uzama değeri % 2,81 olduğuna göre göçme olmadığı görülmüştür. Bu grafikten $\tau=20$ boyutsuz zamanı (=5,12 μ s gerçek zamanı) için gerilme dalgası ulaştığı yer de görülebilir.

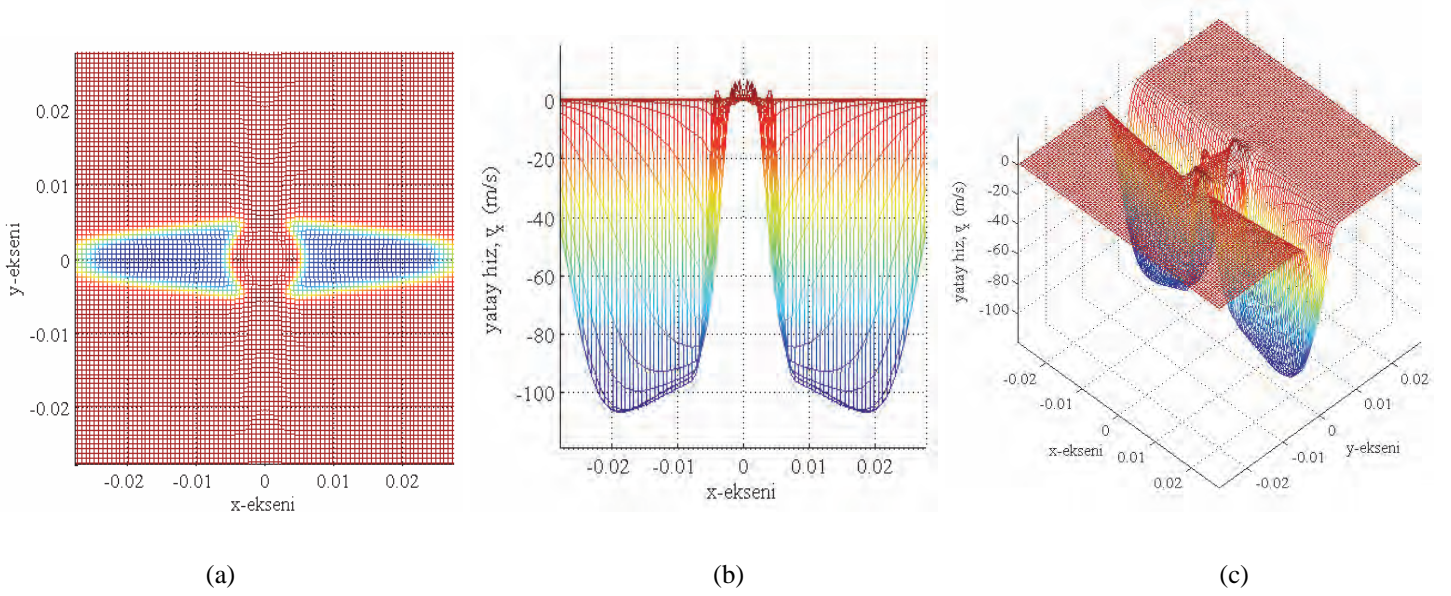
Diğer bir sonuç olarak, Şekil 9'de gösterilen dikey kuvvetin kumaş yüzeyi üzerindeki dağılımı incelendiğinde, temas kenarlarındaki süreksizlik nedeni ile kuvvet değerleri yüksek olarak elde edilmiş, temasın olmadığı ipliklerde ise bu değerler sıfır olarak okunmuştur.



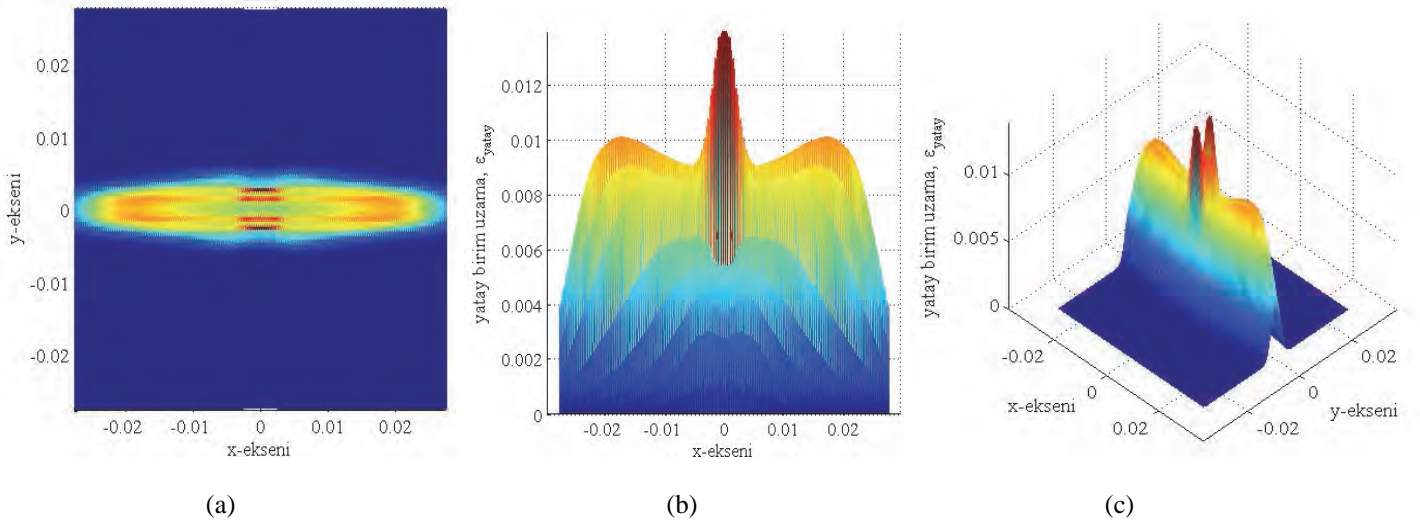
Şekil 5. İpliklerin yer değiştirmeler (a) üstten, (b) yandan (c) 3-b görünüş, $\alpha=0,15$, $\tau=20$



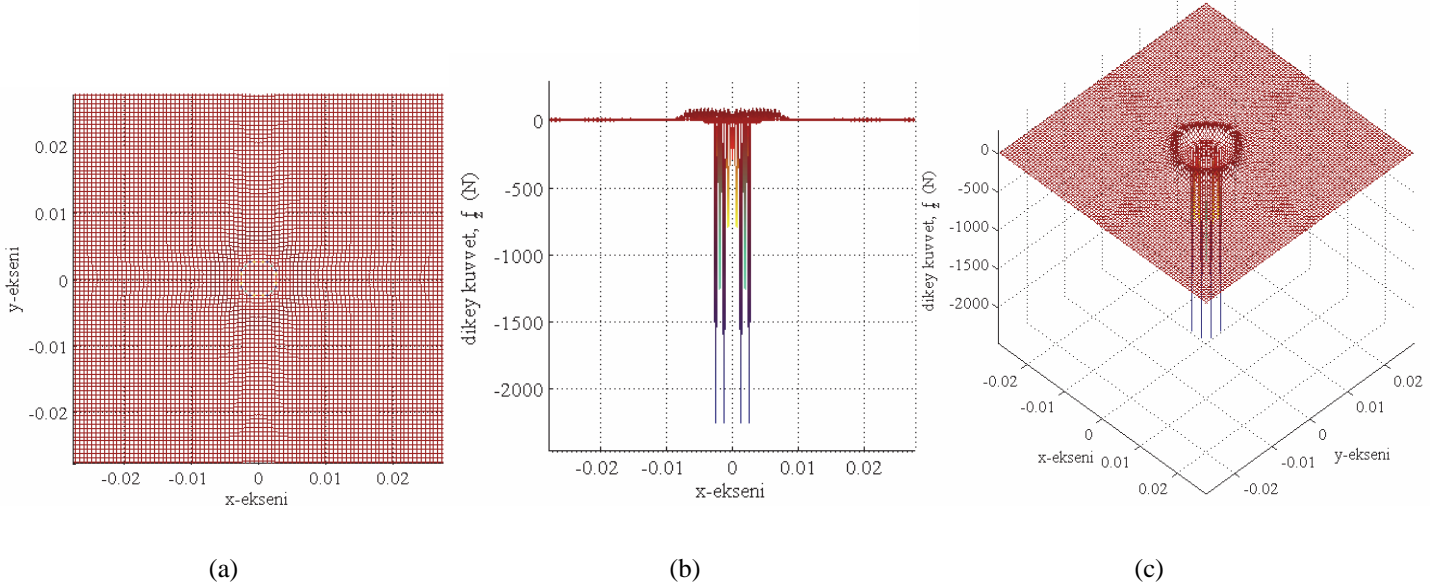
Şekil 6. İpliklerin dikey hız dağılımı (a) üstten, (b) yandan (c) 3-b görünüş, $\alpha=0,15$, $\tau=20$



Şekil 7. İpliklerin yatay hız dağılımı (a) üstten, (b) yandan (c) 3-b görünüş, $\alpha=0,15$, $\tau=20$



Şekil 8. Atkı yönündeki ipliklerin birim uzamaları (a) üstten, (b) yandan (c) 3-b görünüş, $\alpha=0,15$, $\tau=20$



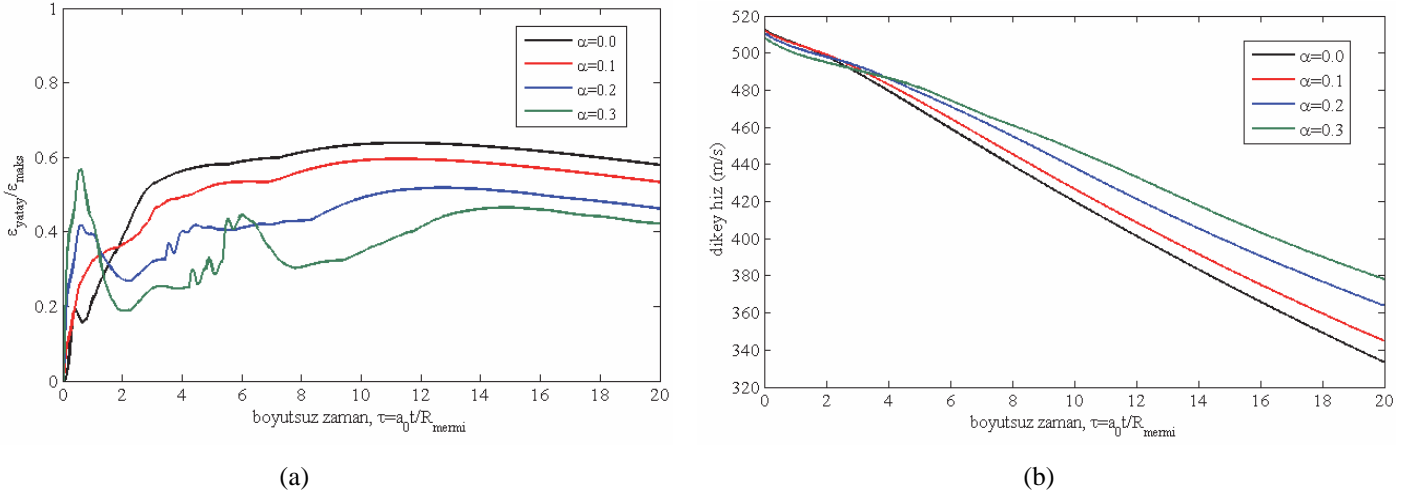
Şekil 9. İpliklerde z-yönündeki kuvvetler (a) üstten, (b) yandan (c) 3-b görünüş, $\alpha=0,15$, $\tau=20$

3.1 Kıvrım Faktörünün Etkisinin İncelenmesi

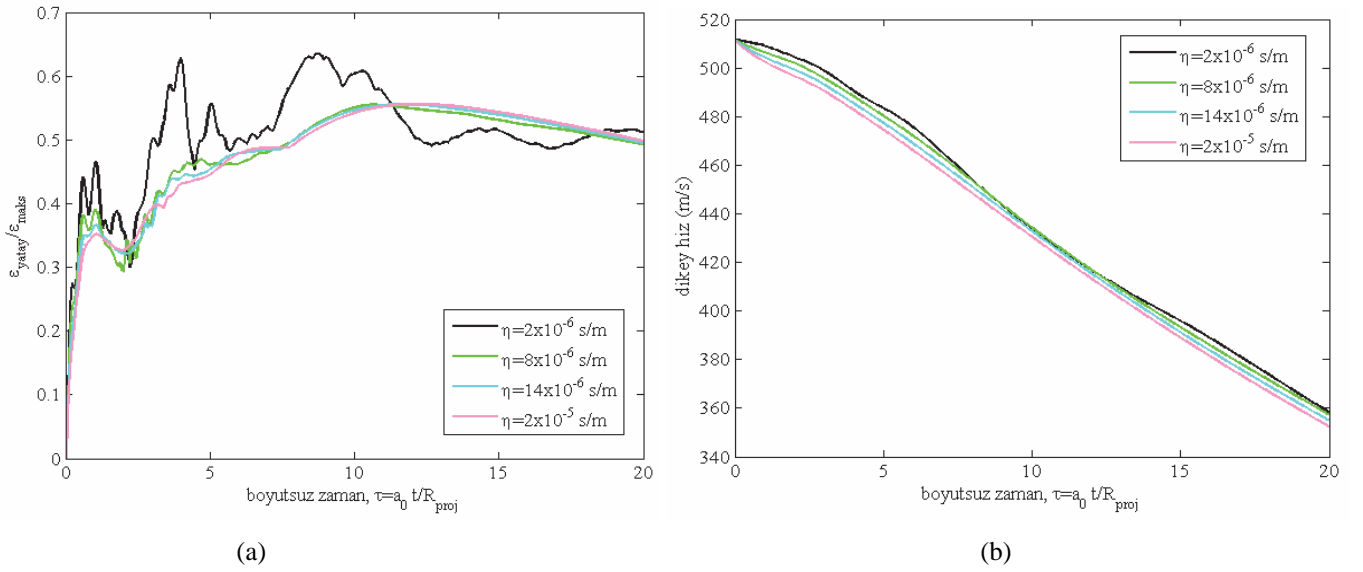
Kıvrım etkisini incelemek üzere gerekli analizler yapılarak Şekil 10(a) ve 10(b) elde edilmiştir. Bu grafikler farklı kıvrım faktörlerinin, ipliklerin birim uzamalar ve dikey hızlarının zamanla değişimi üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekil 10(a)'da birim uzamaların zamanla değişimi çizdirilmiştir. Öncelikle tüm kıvrım faktörleri için $\varepsilon_{yatay}/\varepsilon_{maks}$ değerinin 1'e ulaşmadığı gözlenmiştir. Bu değer 1'e ulaşması daha önce de belirtildiği gibi Dyneema® ipliklerinin kopma birim uzamasına eriştiğini gösterir. Aksi durum, yani $\varepsilon_{yatay}/\varepsilon_{maks}$ değerinin 1'in altında kaldığı durum, ipliklerin güvenli bir şekilde merminin darbesine dayanmasını ifade eder. Ayrıca kıvrım faktörünün artması ile elde edilen birim uzama değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Önemli bir sonuç olan bu eğilim kıvrım faktörünün ipliklerin balistik dayanımını artırdığı şeklinde de yorumlanabilir. Merminin çarpması ile enine darbeye maruz bırakılan kumaşın yapacağı yer değiştirme öncelikle kıvrımlı ipliklerden karşılanarak, daha büyük kıvrım faktörüne sahip ipliklerde merminin hareketi için daha fazla yer sağlanabilecektir. Literatürde bu etkinin incelendiği birçok çalışma mevcuttur, bunlarda da benzer sonuçlar kaydedilmiştir [24-26, 28, 31]. Ayrıca yüksek kıvrımlı ipliklerden dokunmuş kumaşların V50 hızlarında da bir artış olacaktır. Bilindiği üzere zırh tasarımında V50 hızının artırılması önemli bir önceliktir.

Kıvrım etkisinin diğer bir incelemesi Şekil 10(b)'de dikey hızlar için yapılmıştır. Burada gözlenen ise kıvrım faktörünün yüksek olduğu ipliklerin hızı daha yavaş olarak düşmüştür. Diğer bir deyişle, kıvrım faktörünün düşük olması halinde mermi daha fazla yol kat edebilecek ve yavaşlaması buna bağlı olarak daha hızlı olacaktır.

Son olarak, Şekil 11(a) ve 11(b)'de viskozitenin analiz sonuçlarına olan etkisi gösterilmiştir. Şekil 10(a) ve 10(b)'de arasında hem birim uzamalar hem de dikey hızların grafiklerinde titreşimler görülmektedir. Bu titreşimler fiziksel kaynaklı olmaktan ziyade sayısal kaynaklıdır ve Şekil 10(a) ve 10(b)'den görüleceği üzere kıvrım faktörü artıkça artmaktadır. Önceden de belirtildiği üzere, sayısal hesaplamalar sırasında ortaya çıkacak titreşimleri sönmölemek amacıyla η ile gösterilen viskozite kullanılmıştır. Şekil 11(a)'da birim uzamaların, Şekil 11(b)'de dikey hızların $\alpha=0,15$ kıvrım faktörü için farklı viskozite değerlerinde zamana bağlı değişimleri çizilmiştir. Görüldüğü gibi viskozitenin değeri artıkça analizlerde ortaya çıkan titreşimler sönmölenmektedir. Not olarak belirtilmelidir ki viskozite hem x-, hem y- hem de z- koordinatlarında verilmiş olup, en fazla titreşim ise hareketin büyük kısmının gerçekleştiği z-yönünde oluşmuştur.



Şekil 10. (a) Birim uzamaların ve (b) dikey hızın zamanla değişimlerinin kıvrım faktörüne göre kıyaslanması



Şekil 11. (a) Birim uzamaların ve (b) dikey hızın viskoziteye göre kıyaslanması, $\alpha=0,15$

4. SONUÇ ve TARTIŞMA

Bu çalışmada sunulan sayısal model ile Parçacık Simülasyon Mermisinin çarptığı yüksek performanslı 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.

Yapılan analizler ve simülasyonlar sonucunda, kıvrım faktörü arttıkça düşük birim uzamalar gözlenmiştir. Bu etkinin kumaşın balistik dayanımına katkı sağladığı söylenebilir. Ayrıca, aynı etki V50 hızının da yükselmesine sebep olacaktır. Fakat yine aynı etki mermi hızını daha yavaş azaltacaktır ki bu performansı negatif yönde etkileyecektir.

Sayısal hesaplamalardan kaynaklı titreşimlerin sönümlemesi için kullanılan viskozitenin analizlere etkisi incelenmiş ve titreşimlerin yoğun olduğu bölge için bu değer artırılarak titreşimlerin sönümlemesi sağlanmıştır.

Sonuç olarak, eldeki sayısal model yumuşak yapılu kumaş zirhlerinin tasarımı için kullanılabilir önemli bir araçtır. Çeşitli iplik malzemeleri ve diğer birçok mekanik parametrenin zirh balistik performansına etkisi sayısal simülasyonlar yapılarak incelenebilecektir. Bu şekilde gerekli fiziksel testlerin sayısını azaltılarak zirh tasarımı ve ürün geliştirme esnasında maliyetler düşürülebilir.

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 Moskovsk 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. Özşahin E, Tolun S, (2010): Yüzev Kaplaması ve Destek Katman İlavasının Alüminyum Levhaların Balistik Performansına Etkileri, Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Dergisi, Cilt:4, Sayı:4, 41-50s.
20. Özşahin E, Tolun S, (2008): Havacılıkta Kullanılan Alüminyum Levhaların Yüksek Hızlı Çarpma Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi, II Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı (UHUK'2008) İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 15-17 Ekim.
21. Bozdoğan, F Üngün, S Temel, E Süpüren Mengüç G (2015): Balistik Koruma Amaçlı Kullanılan Tekstil Materyalleri, Özellikleri ve Balistik Performans Testleri, Tekstil ve Mühendis, 22: 98, 84-103.
22. Oğlakcıoğlu N, Ertekin G, Marmaralı A, (2014): Yüksek Performanslı İpliklerden Üretilen Örne Kumaşların Mekanik Etkilere Karşı Dayanımlarının İncelenmesi, Tekstil ve Mühendis, 21: 95, 1-8.
23. Zhou R, (2014) Effects of Crimp and Slip on Laminar and Woven Fabrics Subjected to Ballistic Impact, Doktora Tezi, Cornell Üniversitesi.
24. Yavuz A K, Phoenix S L, Eken S, (2016): The Ballistic Impact Response of Flexible Composite Body Armor, American Society for Composites 31st Technical Conference and ASTM Committee D30 Meeting, September 19-22, Williamsburg, Virginia-USA.
25. 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 31st Technical Conference and ASTM Committee D30 Meeting, September 19-22, Williamsburg, Virginia-USA.
26. Phoenix S L, Eken S, Yavuz A K, (2016): PC-Based Numerical Modeling of Ballistic Impact into Nonwoven Fibrous Targets, American Society for Composites 31st Technical Conference and ASTM Committee D30 Meeting, September 19-22, Williamsburg, Virginia-USA.
27. Novotny W R, Cepus E, Shahkarami A, Vaziri R, Poursartip A, (2007): Numerical investigation of the ballistic efficiency of multi-ply fabric armours during the early stages of impact, Int. J. Impact Eng. 34: 2007 71–88.
28. 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.
29. ASTM International. 2008. Standard test method for yarn crimp and yarn take-up in woven fabrics. ASTM D3883-04.
30. Cunniff P M, (2001): Dimensional Analysis of Textile Body Armor, U.S. Army Soldier Systems Center, Natick MA 01760. Private communication.
31. 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.