

Hava Araç Zırhlarının Bilgisayar Hesaplamalı Balistik Çarpma Analizi

Seher EKEN^{*1}, A. Kadir YAVUZ², Stuart Leigh PHOENIX³

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul

² Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 34349 İstanbul

³ Cornell Üniversitesi, Sibley Okulu, Makina Mühendisliği Bölümü, 14853, Ithaca, New York

(Alınış / Received: 24.10.2016, Kabul / Accepted: 09.01.2017, Online Yayınlanma / Published Online: 23.03.2017)

Anahtar Kelimeler

Hava araç zırhları,
Elyaf takviyeli kompozit
zırhlar,
Silindirik mermi,
Balistik performans,
İleri sonlu farklar metodu

Özet: Hava araç zırhlarının tasarımında hafiflik ve balistik dayanım büyük önem arz eder. Sisteme eklenen zırhlar yüzünden araç, taşıdığı paralı yükten ve manevra kabiliyetinden ödün vermemelidir. Bunun yanında, düşman ateşi altında yüksek balistik korumaya sahip olmalıdır. Zırhların geliştirilmesi aşamasında bu taleplere cevap veren hafif ve yüksek balistik mukavemete sahip malzemeler seçilerek balistik çarpmaya dayanıklı tasarımlar üretilmektedir. Bu çalışmada hava araç zırhların balistik çarpması sayısal benzetim yoluyla gerçekleştirilmiştir. Elyaf takviyeli kompozit 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. Kare latislerden oluşmuş pim-elem (pin-joints) 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. Büküm etkisi ve ipliklerin birbirleri üzerinden kaymasının zırhın balistik performansına olan etkisi incelenerek yorumlanmıştır.

Computational Ballistic Impact Analysis of Aircraft Armors

Keywords

Aircraft armors,
Fiber reinforced composite
armors,
Cylindrical projectile,
Ballistic performance,
Forward finite difference
method.

Abstract: Lightweightness and ballistic resistance are significant parameters in the design of aircraft armors. Aircraft should not compromise the payload or its maneuverability due to the armors added to the system. In addition to this, the aircraft has to sustain high ballistic resistance under enemy fire. In the design of aircraft armors choosing light and high strength materials that respond to these demands ballistic impact resistant concepts are being developed. In this study numerical simulation of ballistic impact is carried out for the aircraft armors. The ballistic impact response of the fiber reinforced composite armor is computed using forward finite difference method. Cylindrical projectile hitting the woven crimp 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 and slip viscosity on the ballistic performance of the fabric is examined and discussed.

1. Giriş

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 feragat 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

*İlgili yazar: durmazseh@itu.edu.tr

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 problemidir. 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 Shim ve Fahrentfold [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 konu üzerine Türkiye'de de birçok öncü çalışmalar yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir.

Mesela Özşahin ve Tolun tarafından 2010 yılında [24-25] 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 [26] 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 [27].

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. Ayrıca ipliklerin birbirleri üzerinden kaymaları da modele dâhil edilerek, balistik performans üzerindeki etkileri incelenerek yorumlanmıştır.

2. Problemin tanımı

Bu bölümde sayısal model tanıtılarak mermi ve zırhın modellenmesi için dikkate alınan unsurlar ayrı ayrı açıklanacaktır. Sayısal model Cornell Üniversitesi ile birlikte geliştirmiş "Dokunmuş Bükümlü Kumaş" (Woven Crimp Model) modeline dayanmaktadır. Öncelikle yapılan kabuller aşağıda listelenmiştir:

- Çarpan olarak, düz-uçlu silindirik bir mermi kullanılmıştır. Bu merminin kütlesi m_{mermi} , yarıçapı R_{mermi} olup v_{mermi} ilk 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, balistik koruyucu malzemelerden üretilmiş elyaf takviyeli kompozit seçilmiştir. Bu kumaş, büküm etkisine sahip, çift eksenli dokunmuş tek-katmanlı bir kumaştır. Kumaş yüzeyi, sınıra çarpan dalga yansımaları 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.
- Mermi-kumaş yapısının simetrik oluşu göz önüne alındığında, $x-y$ ve $y-z$ düzlemlerinde simetri şartı uygulanarak sistemin sadece çeyrek kısmı modellenmiştir.

Sayısal hesaplamalar; ileri sonlu farklar yöntemi kullanılarak yapılmış olup, Şekil 1(a)'da koyu gri olarak görülen hesaplama bölgesinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 1(a)'da çeyrek daire altında kalan kırmızı ile gösterilmiş düğüm noktalarına momentumun korunumu kullanılarak mermiden gelen hız ve kütle değerleri atanarak çarpışma süreci başlatılmıştır.

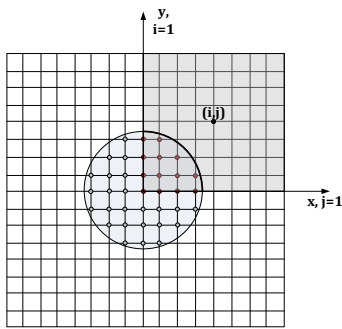
Kumaş yapısı kare latislerden oluşmuş pim-eklem modeli kullanılarak modellenmiştir. Şekil 1(b)'de atkı ve çözgü iplikleri ile dokunmuş kumaş verilmiştir. Burada gösterildiği gibi iplikler kütle-yay-sönümleyici sistemi ile temsil edilmiştir. Kullanılan ayrı küteller ipliklerin kütlelerini, yaylar ipliklerin elastik özelliklerini, sönümleyici ise ipliklerin viskoelastik özelliklerini temsil etmektedir.

Çarpma öncesi (deformasyon öncesi) çift-eksenli kumaş geometrisi Şekil 2(a)'da verilmiştir. Burada görüldüğü gibi kumaş, atkı ve çözgü yönlerinde eşit büküm etkisine sahip dokunmuş olarak modellenmiştir. Mavi çizgiler atkı yönündeki iplikleri, kırmızı çizgiler ise çözgü yönündeki iplikleri gösterirken içi boş dairesel noktalar da düğüm noktalarıdır.

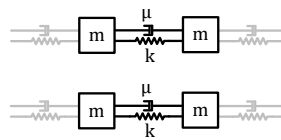
tki ve çözgü ipliklerinin üst üste veya alt alta geldikleri düğüm noktalarında Şekil 2(b)'de gösterildiği gibi modellenmiştir. Darbeden sonra atkı ve çözgü iplikleri birbirlerine göre hareket etmeye başlayacaklardır. Bu bağlı hareket, düğüm noktalarının hem pozisyon hem de hız değişimlerine sebep olacaktır. Buna bağlı olarak çekme/basma kuvveti ile atkı-çözgü ipliklerinin birbirlerinin üzerinden kaymalarına izin verecek kayma viskoelastik kuvveti (sliding viscoelastic force) oluşacaktır. Bu iki kuvvet ve modellemelerinde kullanılan parametreler Şekil 2(b)'de verilmiştir.

2.1. Sayısal model

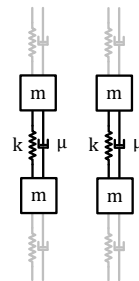
Önceden de belirtildiği üzere sayısal çözüm ileri-sonlu farklar yöntemi kullanılarak elde edilmiştir.



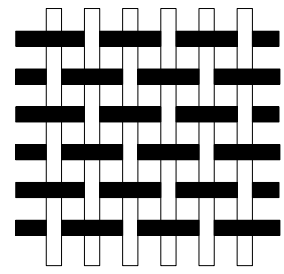
(a)



Atkı iplikleri



Çözgü iplikleri



Dokunmuş kumaş

(b)

Şekil 1. (a) Hesaplama alanı, (b) Pim-eklem ağı modelinde ayrı kütelle-yay-sönümleyici sistemi; atkı-çözgü iplikleri ve dokunmuş kumaş [23]

Newton'un hareket denklemleri düğüm noktalarındaki hızlar için her 3 Kartezyen koordinatı çözülür [23, 28-29].

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

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

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

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

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

$$\frac{m_{çözgü}}{\Delta t} (v_{çözgü,x}^t - v_{çözgü,x}^{t-\Delta t}) = \sum f_{çözgü,x}^{t-\Delta t} \quad (2d)$$

$$\frac{m_{çözgü}}{\Delta t} (v_{çözgü,y}^t - v_{çözgü,y}^{t-\Delta t}) = \sum f_{çözgü,y}^{t-\Delta t} \quad (2e)$$

$$\frac{m_{çözgü}}{\Delta t} (v_{çözgü,z}^t - v_{çözgü,z}^{t-\Delta t}) = \sum f_{çözgü,z}^{t-\Delta t} \quad (2f)$$

Burada $v_{atkı,x}^t$, $v_{atkı,y}^t$ ve $v_{atkı,z}^t$ atkı ipliklerinin; $v_{çözgü,x}^t$, $v_{çözgü,y}^t$ ve $v_{çözgü,z}^t$ çözgü ipliklerinin t -anındaki x-, y- ve z-yönlerindeki hız bileşenleridir. $f_{atkı,x}^{t-\Delta t}$, $f_{atkı,y}^{t-\Delta t}$ ve $f_{atkı,z}^{t-\Delta t}$ ise atkı ipliklerinin; $f_{çözgü,x}^{t-\Delta t}$, $f_{çözgü,y}^{t-\Delta t}$ ve $f_{çözgü,z}^{t-\Delta t}$ çözgü ipliklerinin $t-\Delta t$ anındaki çekme kuvvetinin x-, y- ve z-yönlerindeki iz düşümleridir.

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

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

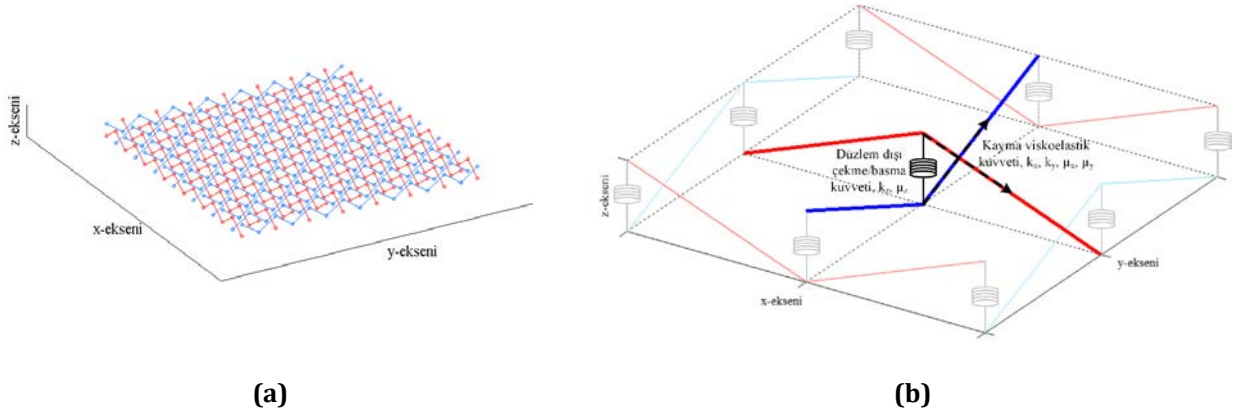
$$y_{atkı}^t = y_{atkı}^{t-\Delta t} + v_{atkı,y}^t \Delta t \quad (3b)$$

$$z_{atkı}^t = z_{atkı}^{t-\Delta t} + v_{atkı,z}^t \Delta t \quad (3c)$$

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

$$y_{çözgü}^t = y_{çözgü}^{t-\Delta t} + v_{çözgü,y}^t \Delta t \quad (3e)$$

$$z_{çözgü}^t = z_{çözgü}^{t-\Delta t} + v_{çözgü,z}^t \Delta t \quad (3f)$$



Şekil 2. (a) Çarpma öncesi atkı ve çözgü yönlerinde eş bükümlü kumaş geometrisi, **(b)** Atkı ve çözgü yönlerinde iç kuvvetler

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

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

2.2. Giriş parametreleri ve değişkenleri

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

2.3. Büküm faktörü

Büküm faktörü, ISO 7211-3 [23, 30] yönergesinde aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$k = \% \frac{P - L}{L} \quad (5)$$

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

Bu çalışmada ise büküm faktörü olarak $\alpha = \tan(\varphi)$ kullanılmıştır. İlerideki simülasyonlarda kullanılan büküm faktörünün açısal değerleri ve ISO yönergesindeki değerler ile kıyaslamaları Tablo 2'te verilmiştir.

Bu tablodan da görüleceği üzere $\alpha=0.0$ tamamıyla düz iplik iken, $\alpha=0.4$ büküm faktörü ipliğin boyunun % 7.70 uzatılmış haline denk gelir.

3. Bilgisayar Simülasyonları ve Yorumlar

Analiz ve simülasyonlar için Dyneema® ipliklerinden dokunmuş balistik kumaş kullanılmıştır. Bu malzemenin özellikleri Tablo 3'te verilmiştir. 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.

$\alpha = 0.15$ bükümlü ipliklerden dokunmuş bir kumaşa çarpan merminin $\tau=60$ boyutsuz zamanında (=24.71 μ s gerçek zamanı) balistik çarpma simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Balistik performans tayini için gerekli büyüklükler grafiksel olarak gösterilmiştir. Bu büyüklüklerden ilki kumaşın darbe etkisi altındaki deformasyonudur. Şekil 4, çarpma etkisiyle kumaşa oluşan yer değiştirmeleri göstermektedir. Yine balistik performans için önemli olan dikey hızlardaki değişim, yatay hızlardaki değişim, birim uzamalardaki ve dikey kuvvetlerde darbe sonrası meydana gelen değişim sırasıyla Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de hem üstten, hem yandan hem de 3-boyutlu görünüş olarak gösterilmiştir.

Şekil 4'te verilen kumaşın deplasman sonucu incelendiğinde, 24.71 μ s ($\tau=60$) zaman içinde 9 mm civarında bir deformasyon gözlenmiştir. Ayrıca, mermi ile temasta kalan bükümlü ipliklerin düzleşerek merminin hareketi için yer açtığı görülmüştür. Bu durum mermi ile temas etmeyen iplikler için geçerli olmayıp, bu iplikler ilk büküm oranını halen korumaktadırlar.

Merminin ilk hızı 406 m/s, çarpmadan hemen sonra momentumun korunumu yardımı ile yapılan hesaplama ile 401.11 m/s'ye düşmüştür. Dikey hız dağılımını gösteren Şekil 5 incelendiğinde, 24.71 μ s'de ($\tau=60$) merminin bu hızı yavaşlatılarak 300 m/s'ye düştüğü gözlenmiştir.

Yatay hız dağılımını gösteren Şekil 6'da verilen grafiklerde ise malzeme akışı gözlenmektedir. Darbe konisinde ipliklerin birbirleri üzerinden kaymaları sonucu hızlar bu bölgede artmıştır. Ayrıca merminin z-yönlü hareketine yer açmak için ipliklerin temas yüzeyine doğru hızlanarak çekildikleri gözlenmiştir.

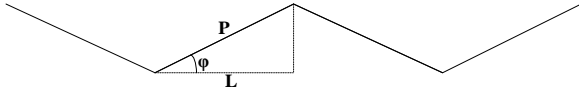
Şekil 7'de gösterilen birim uzamalar grafiğinde ise birim uzamalar temas yüzeyi etrafında en yüksek değerini alarak % 0.9 olmuştur. Kullandığımız Dyneema® malzemesinin kopma birim uzama değeri % 2.81 olduğuna göre göçme olmadığı görülmüştür.

Tablo 1. Kodda kullanılan fiziksel büyüklükler ve simülasyon parametreleri

Semboller	Tanımlar
E_x	x-yönündeki Young Modülü
E_y	y-yönündeki Young Modülü
ρ_{kumas}	Kumaş malzemesinin yoğunluğu
AD	Kumaş malzemesinin alan yoğunluğu
v_{mermi}	Çarpmadan önceki mermi hızı
$v_{mermi,0} = \frac{v_{mermi} m_{mermi}}{\pi R_{mermi}^2 AD + m_{mermi}}$	Çarpmadan sonraki mermi hızı (momentum değişimi)
m_{mermi}	Mermi kütlesi
R_{mermi}	Mermi çapı
α	Büküm faktörü
η	Sallanma viskozitesi
μ	Kayma viskozitesi
ζ	Merminin altından kayma viskozitesi
$\tau = \frac{R_{mermi} t}{a_0}$	Boyutsuz zaman
$a_0 = \sqrt{E_x / \rho_{kumas}}$	Gerilme dalga hızı
$d = AD / \rho_{kumas}$	Kumaşın kalınlığı
$m_{gp} = \frac{ADdL^2}{2}$	Düğüm noktasının kütlesi
n_a	Zaman adımı sayısı
n_e	Kare kumaştaki toplam eleman boşluğu
dL	Çözüm ağı boyutu
dt	Zaman adımı

Şekil 7'deki bu grafikten $\tau=60$ boyutsuz zamanı (=24.71 μ s gerçek zamanı) için gerilme dalgası ulaştığı yer de görülebilir (Bunu gösterebilmek için yama oranı ($K_{yama}=0.4$) diğer grafiklere göre daha yüksek seçilmiştir).

Diğer bir sonuç olarak, Şekil 8'de gösterilen dikey kuvvetin kumaş yüzeyi üzerindeki dağılımı incelenmiştir. Temas kenarlarındaki süreksizlik nedeni ile kuvvet değerleri yüksek olarak elde edilmiş, temasın olmadığı ipliklerde ise bu değerler sıfır olarak okunmuştur.

**Şekil 3.** Büküm parametreleri

3.1. Büküm faktörünün balistik performansa etkisi

Büküm etkisi balistik performansı etkileyen önemli bir parametredir. Bu etkiyi incelemek üzere gerekli analizler yapılarak Şekil 9(a) ve 9(b) elde edilmiştir. Bu grafiklerden Şekil 9(a)'da farklı büküm faktörlerinin, ipliklerin birim uzama oranların zamanla değişimi üzerindeki etkisini göstermektedir. Öncelikle tüm büküm faktörleri için birim uzama oranı $\epsilon_{atki}/\epsilon_{maks}$ değerinin 1'e ulaşmadığı gözlenerek kopma birim uzamasına

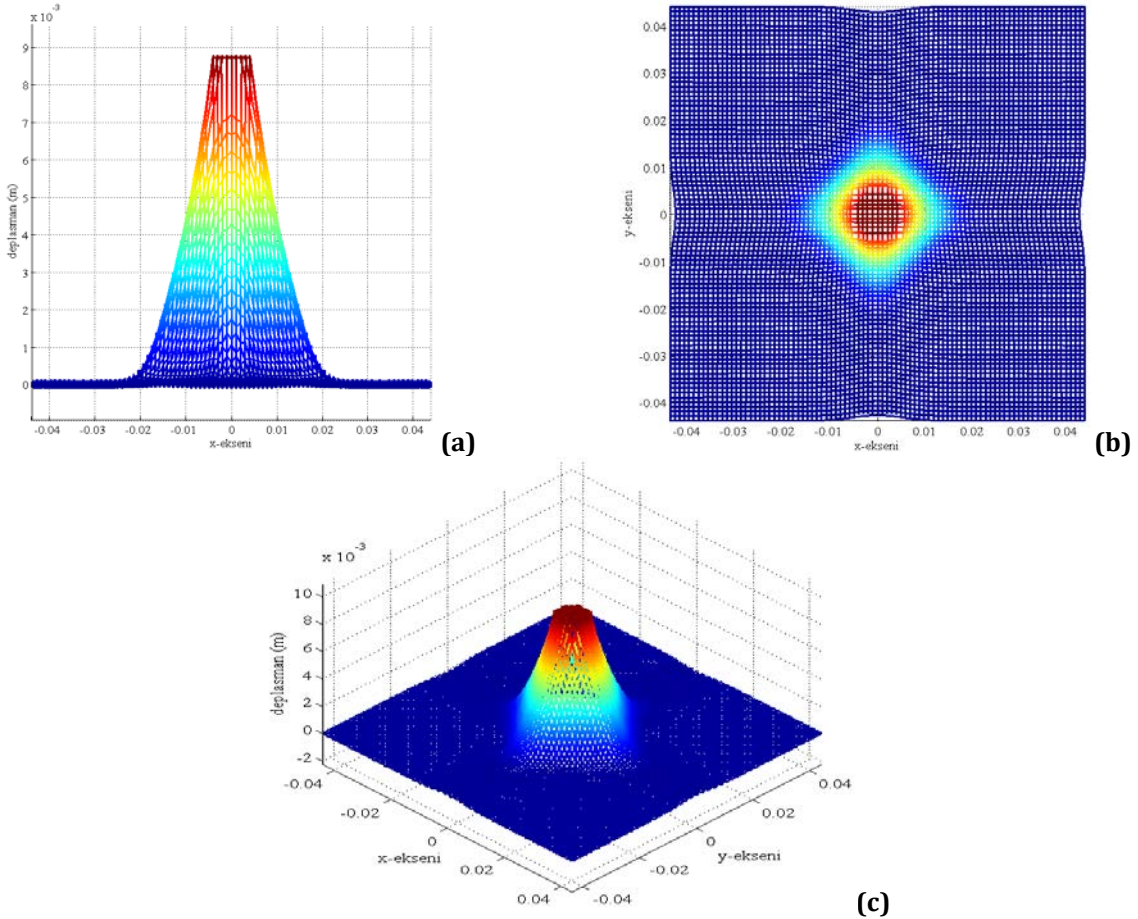
erişilmediği gözlenmiştir. Ayrıca büküm faktörünün artması ile elde edilen birim uzama değerlerinde düşüş gözlenmiştir. En düşük birim uzama oranları en yüksek büküm etkisi olan $\alpha = 0.4$ 'te okunmuştur. Önemli bir sonuç olan bu eğilim büküm faktörünün ipliklerin dayanımını olumlu yönde etkilediği şeklinde de yorumlanabilir. Merminin çarpması ile enine darbeye maruz bırakılan kumaşın yapacağı yer değiştirme öncelikle bükümlü ipliklerden karşılanarak, daha büyük büküm faktörüne sahip ipliklerde merminin hareketi için daha fazla yer sağlanabilecektir. Ayrıca yüksek bükümlü ipliklerden dokunmuş kumaşların V50 hızlarında da bir artış olacaktır. Bilindiği üzere zırh tasarımında V50 hızının artırılması önemli bir önceliktir.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan büküm değerleri ve kıyaslanması

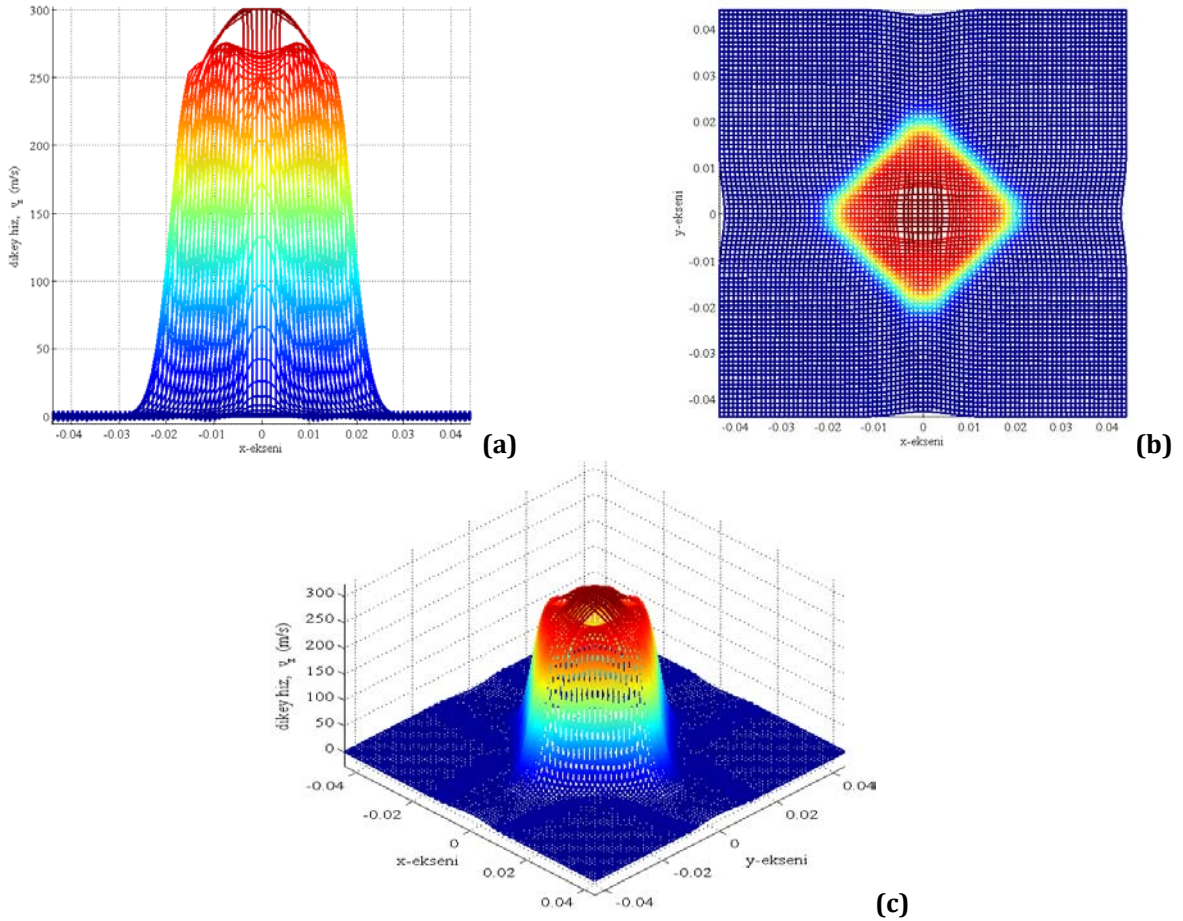
α	φ	$k = \%(\sqrt{1 + \alpha^2} - 1)$
0.0	0°	% 0
0.1	5.71°	% 0.5
0.2	11.31°	% 1.98
0.3	16.70°	% 4.40
0.4	21.80°	% 7.70

Tablo 3. Dyneema® malzemesinin özellikleri

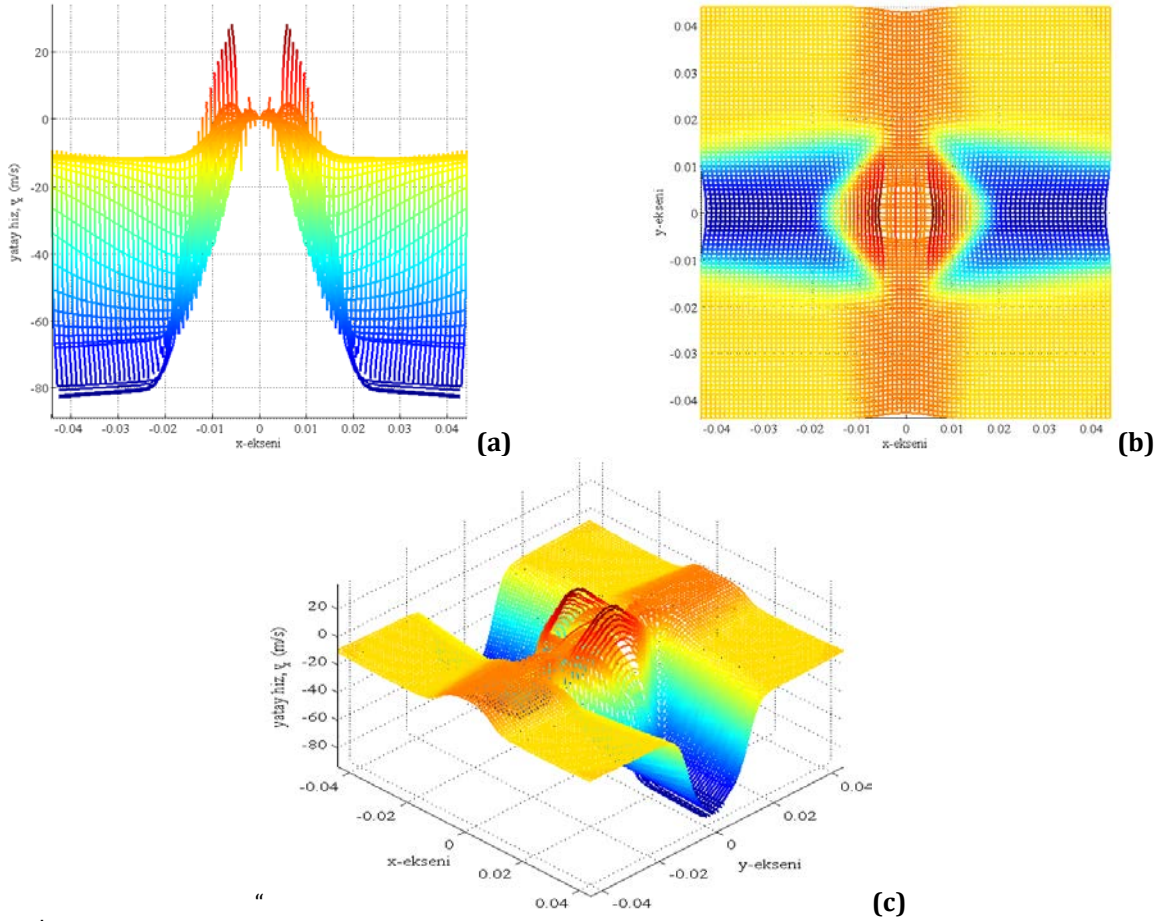
E_x	Young modülü (x yönü)	117 GPa
E_y	Young modülü (y yönü)	117 GPa
ρ	Yoğunluk	980 kg/m ³
ϵ_{maks}	Kopma birim uzaması	% 2.81



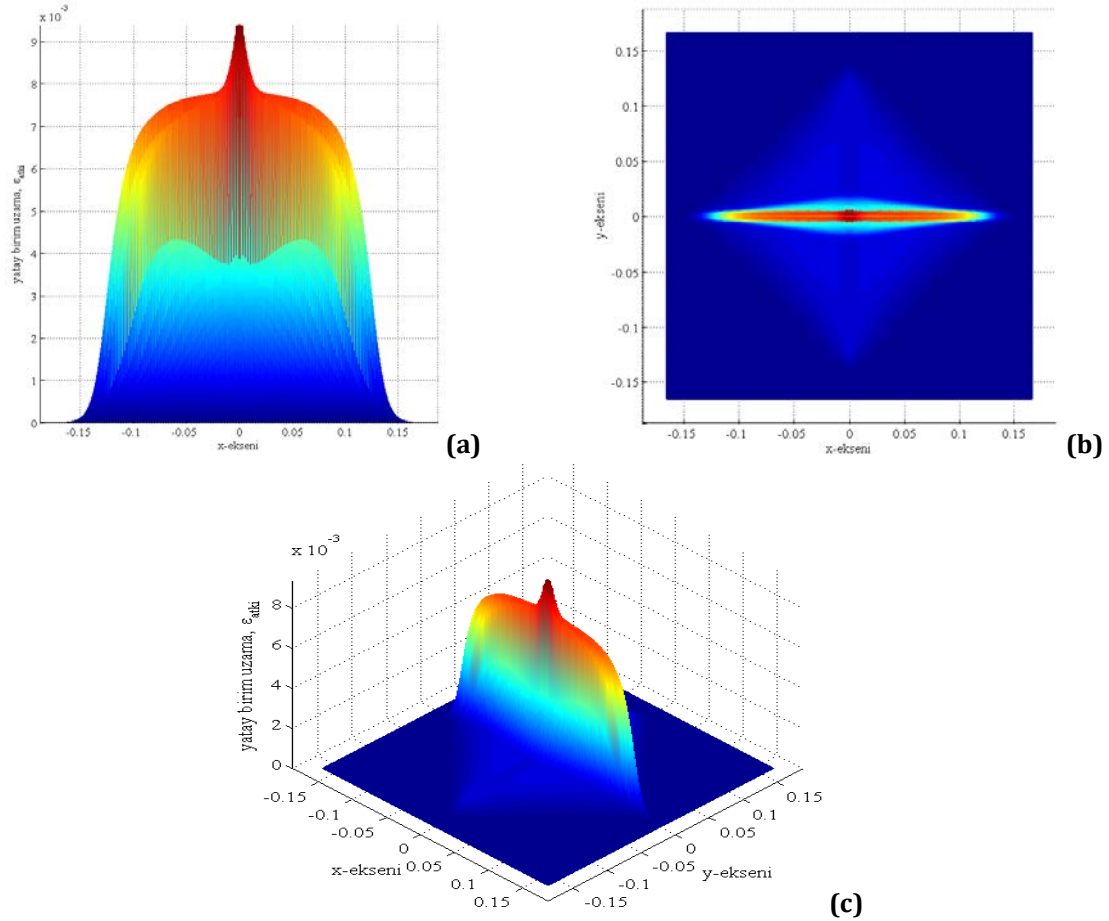
Şekil 4. İpliklerin yer değiştirmeler (a) üstten, (b) yandan (c) 3-B görünüş, $\alpha=0.15$, $\tau=60$, $K_{yama}=0.1$



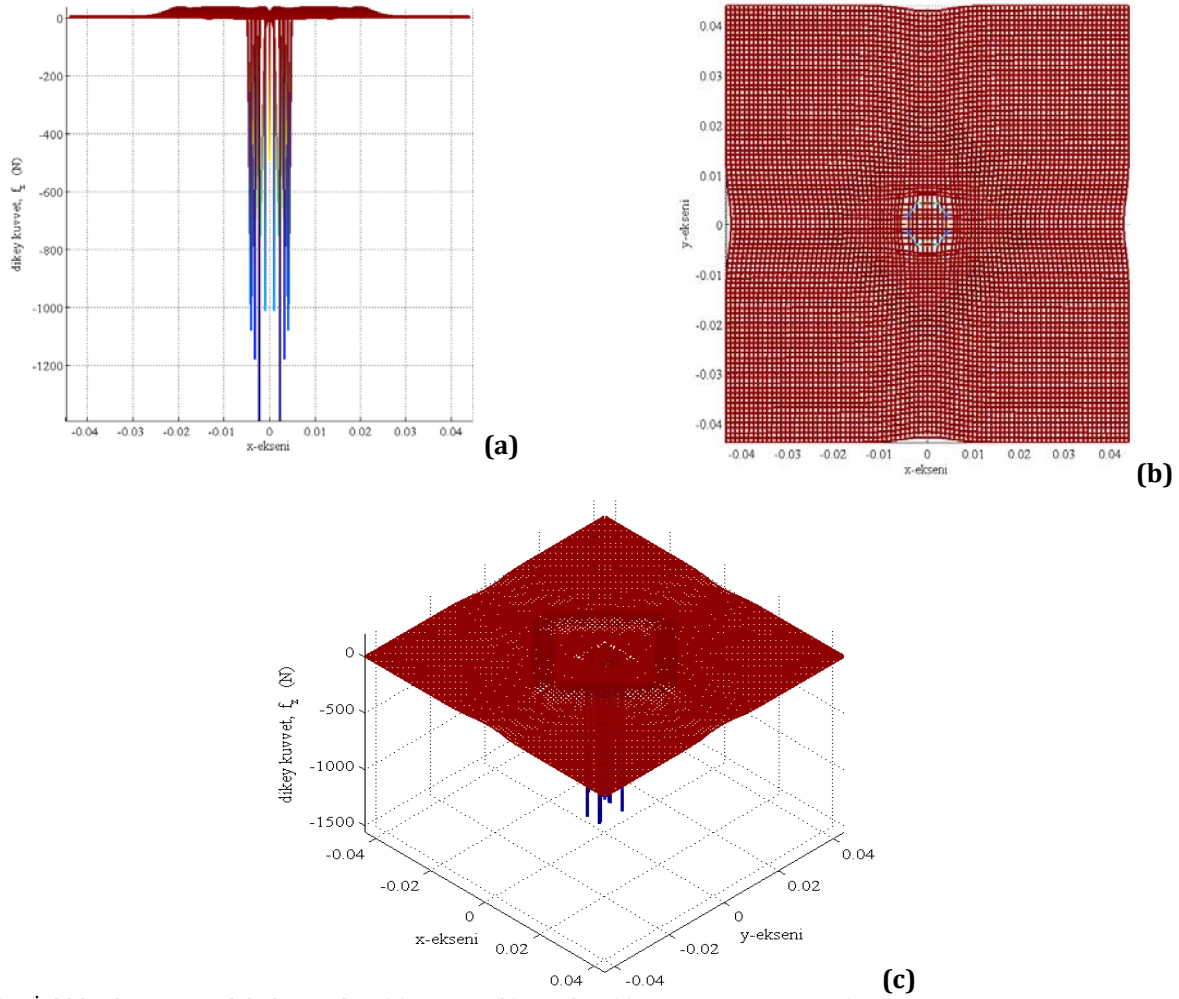
Şekil 5. İpliklerin dikey hız dağılımı (a) üstten, (b) yandan (c) 3-B görünüş, $\alpha=0.15$, $\tau=60$, $K_{yama}=0.1$



Şekil 6. İpliklerin yatay hız dağılımı (a) üstten, (b) yandan (c) 3-B görünüş, $\alpha=0.15$, $\tau=60$, $K_{yama}=0.1$



Şekil 7. Atkı yönündeki ipliklerin birim uzamaları (a) üstten, (b) yandan (c) 3-B görünüş, $\alpha=0.15$, $\tau=60$, $K_{yama}=0.4$



Şekil 8. İpliklerde z-yönündeki kuvvetler (a) üstten, (b) yandan (c) 3-B görünüş, $\alpha=0.15$, $\tau=60$, $K_{yama}=0.1$

Büküm etkisinin diğer bir incelemesi Şekil 9(b)'de dikey hızlar için yapılmıştır. Burada gözlenen ise büküm faktörünün yüksek olduğu ipliklerin hızı daha yavaş olarak düşmüştür. Diğer bir deyişle, büküm faktörünün düşük olması halinde mermi daha fazla yol kat edebilecek ve yavaşlaması buna bağlı olarak daha hızlı olacaktır.

3.1 Kayma viskozitesinin balistik performansa etkisi

Kayma viskozitesini incelemek üzere gerekli analizler yapılarak Şekil 10(a)-(c) elde edilmiştir. Burada kayma viskozitesinin değişiminin birim uzamalar, deplasmanlar ve dikey hızlara olan etkisi gösterilmiştir. Hem x - hem de y - yönündeki viskozite değeri eşit olarak alınmıştır. Bu parametre, iplikler arasında ne kadar viskoz kayma olduğunu kontrol eder. Şekil 10(a) incelendiği zaman kayma etkisinin birim uzamalar üzerinde olumlu bir etkisi olduğu görülmektedir. Birim uzamalar iplikler arasında oluşan kaymanın artması ile düşerken Şekil 10(b) ve Şekil 10(c)'den görüleceği üzere deplasman ve dikey hızlarda olumsuz bir etki yaratmıştır. Diğer bir deyişle, deplasmanlar kayma ile artmış, dikey hızlardaki düşüş ise kayma ile daha az olmuştur.

4. Genel Sonuçlar

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.

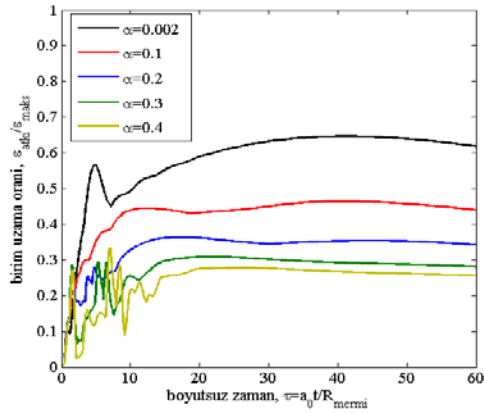
Yapılan analizler ve simülasyonlar sonucunda, büküm faktörü arttıkça düşük birim uzamalar gözlenmiştir. Bu etkinin kumaşın balistik performansına katkı sağladığı söylenebilir. Ayrıca, aynı etki V50 hızının da yükselmesine sebep olacaktır. Fakat yine aynı etki merminin hızını daha yavaş azaltacaktır ki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

Ayrıca iplikler arasındaki oluşan kayma incelenerek, birim uzamaları üzerinde olumlu bir etkisi olduğu gözlenmiştir. Balistik performans tayini için önemli olan büyüklüklerden deplasmanlar ve dikey hızlar için ise negatif bir etki yarattığı görülmüştür.

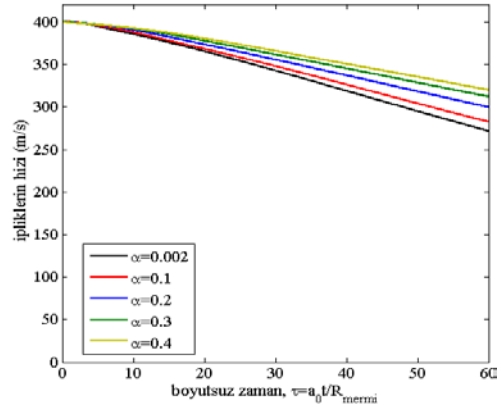
Sonuç olarak, eldeki sayısal model hava aracı zırh tasarımı için kullanılabilir önemli bir araçtır. Son derece karmaşık olan balistik çarpma problemi

analiz edilirken, bu sayısal çalışma sayesinde birçok mekanik parametrenin performansa etkisi

incelenerek ürün geliştirme esnasında tasarımcıya yardımcı olacaktır.

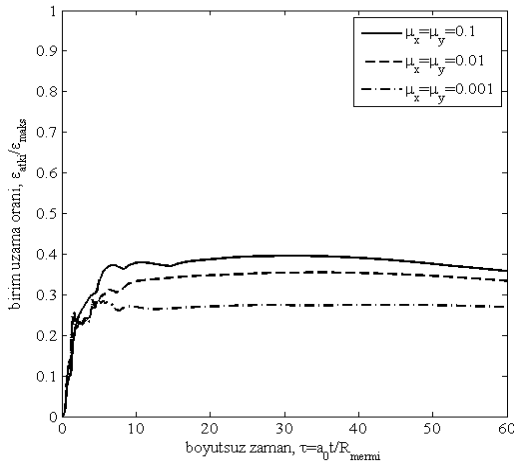


(a)

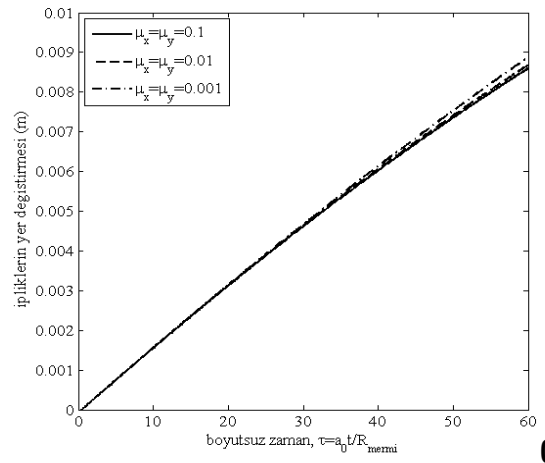


(b)

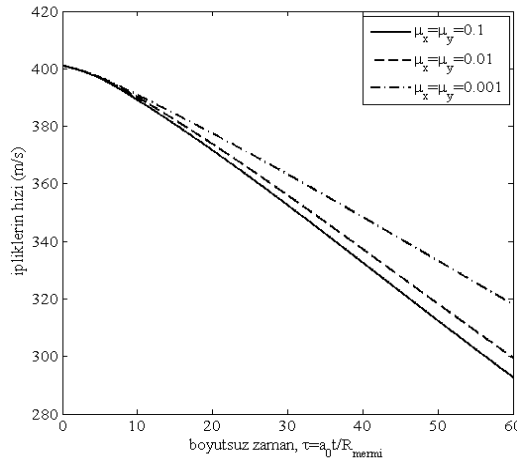
Şekil 9. (a) Birim uzamaların ve (b) dikey hızın zamanla değişimlerinin büküm faktörüne göre kıyaslanması



(a)



(b)



(c)

Şekil 10. (a) Birim uzamaların, (b) yer değiştirmenin ve (c) dikey hızın kayma viskozitesine göre kıyaslanması, $\alpha=0.15$

Kaynakça

- [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] 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 31st 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 31st 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 31st 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] 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.
- [25] Özşahin, E., Tolun, S., 2010. Yüzey Kaplaması ve Destek Katman İlavesinin Alüminyum Levhaların Balistik Performansına Etkileri, *Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, Cilt:4, Sayı:4, 41-50s.
- [26] 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.
- [27] Oğlakcıoğlu, N., Ertekin, G., Marmaralı, A., 2014. Yüksek Performanslı İpliklerden Üretilen Örme Kumaşların Mekanik Etkilere Karşı Dayanımlarının İncelenmesi, *Tekstil ve Mühendis*, 21: 95, 1-8.
- [28] Novotny, W. R., Cepus, E., Shahkarami, A., Vaziri, R., Poursartip, A., 2007. Numerical investigation of the ballistic efficiency of multi-ply fabric armors during the early stages of impact, *Int. J. Impact Eng.* 34 2007 71-88.
- [29] Shahkarami, A., 1999. A numerical investigation of ballistic impact on textile structures, *Yüksek Lisans Tezi*, British Columbia Üniversitesi.
- [30] ASTM International. 2008. Standard test method for yarn crimp and yarn take-up in woven fabrics. ASTM D3883-04.