



Araştırma Makalesi

## Journal of Innovative Engineering and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jieng>

### 3 katmanlı elyaf takviyeli kompozitlerin balistik analizi

<sup>ID</sup>Yalçın Boztoprak<sup>a\*</sup>, <sup>ID</sup>Seval Turgut<sup>b</sup>, <sup>ID</sup>Murat Yazıcı<sup>c</sup>, <sup>ID</sup>Burak Matyar<sup>c</sup>, <sup>ID</sup>Haluk Duga<sup>d</sup> <sup>ID</sup>Mahmut Kayar<sup>e</sup>

<sup>a</sup>Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Maltepe, İstanbul 34854, Türkiye.

<sup>b</sup>Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Göztepe, İstanbul 34722, Türkiye.

<sup>c</sup>Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Otomotiv Mühendisliği, Görükle, Bursa, 16059, Türkiye.

<sup>d</sup>İstanbul Ticaret Üniversitesi Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Tekstil ve Moda Tasarımı, Küçükyağ, İstanbul 34840, Türkiye.

<sup>e</sup>Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Tekstil Mühendisliği, Maltepe, İstanbul, 34854, Türkiye.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Geçmişi:

Geliş 14 Mayıs 2024

Düzeltilme 1 Temmuz 2024

Kabul 18 Temmuz 2024

Çevrimiçi mevcut

##### Anahtar Kelimeler:

3 katmanlı kompozit

Balistik

Sonlu elemanlar analizi

Karbon elyaf

Aramid elyaf

#### ÖZET

Bu çalışmada, z yönünde bağlayıcı ipliklerle birlikte 3 katmanlı tasarlanan kompozit levhaların balistik özellikleri, oluşturulan sonlu elemanlar modeli ile sayısal olarak incelenmiştir. Burada bağlayıcı z-ipliklerin kompozit levhaların balistik özelliklerine katkıları incelenmiştir. Kompozit levhalar tasarlanırken epoksi reçine matris malzemesi olarak belirlenmiş, takviye malzemesi olarak karbon ve aramid elyaflar kullanılmıştır. Levhalar 3 katmanlı olacak şekilde ve bağlayıcı iplik bulunması/bulunmaması durumu ile 4 farklı levha şeklinde MSC Digimat programında tasarlanmıştır. MSC Digimat programında bez ayağı kumaş örgü modeli ile tasarlanan 3 boyutlu kompozit levhaların mekanik özellikleri program üzerinden alınarak sonlu elemanlar analizlerinde malzeme modeli olarak kullanılmıştır. ABAQUS programında VUMAT alt programı kullanılarak oluşturulan kompozit malzeme modelleri levhalara tanımlanmıştır. Balistik bir analiz yapabilmek adına mermi çekirdeği modeli için Parabellum 9x19 mm fişek tercih edilmiştir. Analizlerde mermi modeli rijit cisim olarak tasarlanmış olup merminin levhaya çarpmadan önceki ilk hızı ve çarptıktan sonraki son hızlarının karşılaştırması nümerik olarak yapılmıştır. NIJ 0108.01 standardı test prosedürüne göre ABAQUS programında Dinamik/Eksplicit olarak çözdürülen sonlu elemanlar analizleri sonucunda merminin ilk ve son hızı, merminin kinetik enerjisi, levhaların absorbe ettiği enerji ve mermi çekirdeğinin levhaya temas ettiği bölgedeki deplasmanlar nümerik olarak incelenmiştir. Karşılaştırmalı olarak sunulan simülasyon sonuçları doğrultusunda 3 katmanlı kompozit levhaların mermiyi yavaşlattığı ancak durduramadığı görülmüştür. Bağlayıcı z-ipliklerin levhaların performanslarına bazı olumlu etkilerinin olduğu ortaya çıkmıştır.

### Ballistic analysis of 3-layer fiber reinforced composites

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 14 May 2024

Received in revised form 1 July 2024

Accepted 18 July 2024

Available online

##### Keywords:

3 layer composite

Ballistic

Finite element analysis

Carbon fiber

Aramid fiber

#### ABSTRACT

In this study, the ballistic properties of 3-layer designed composite plates with connecting thread in the z direction were numerically examined with the established finite element model. Here, the contributions of connector z-threads to the ballistic properties of composite sheets were examined. When designing composite sheets, epoxy resin was determined as the matrix material, and carbon and aramid fibers were used as reinforcement materials. The sheets were designed in the MSC Digimat program as 3 layers and 4 different sheets with/without connecting thread. The mechanical properties of 3D composite plates designed with the fabric foot fabric knitting model in the MSC Digimat program were taken from the program and used as material models in finite element analyses. Composite material models established using the VUMAT subprogram in the ABAQUS program were defined on the sheets. In order to perform a ballistic analysis, Parabellum 9x19 mm cartridge was preferred for the bullet model. In the analysis, the bullet model was designed as a rigid body, and the comparison of the initial speed of the bullet before it hit the plate and the final speed after it hit was made numerically. As a result of the finite element analyzes solved Dynamically/Explicitly in the ABAQUS program according to the NIJ 0108.01 standard test procedure, the initial and final speed of the bullet, the kinetic energy of the bullet, the energy absorbed by the plates and the displacements in the area where the bullet core contacts the plate were numerically examined. In line with the simulation results presented comparatively, although it was seen that the 3-layer composite plates slowed down the bullet but could not stop it, it was revealed that the connecting z-threads had some positive effects on the performance of the plates.

## I. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin gelişimiyle ortaya çıkan ihtiyaçlar doğrultusunda malzemelerin çok daha üstün performans göstermesi, beklentiler arasındadır. Bu beklenti gün geçtikçe konvansiyonel malzemelerin yerine kompozit malzemelerin kullanımını yaygınlaştırmıştır. Bu malzemeler, geleneksel olarak adlandırdığımız malzemelerin sahip olmadığı en iyileştirilebilir düzeyde tolerans ve performans göstergelerine sahiptirler. Tasarım esnekliği açısından tek fazlı olarak adlandırılan yapılara kıyasla kolay işlenebilirlik, üstün ısı yük dayanımı, yüksek mukavemet, absorbe edebilme kabiliyeti, daha iyi mekanik, elektrik, termal vb. özelliklerinden dolayı tercih sebebidirler.

Kompozit malzemeler farklı malzemelerin kendine has bazı özelliklerini bir araya getirerek daha üstün yeni yapılar ortaya çıkarma amacı ile birçok alanda kullanılmaktadırlar. Hafifliğin ve mukavemetin önemli olduğu, birbirine zıt fonksiyonları yerine getirmesi beklenen komponentlerde kompozit malzemelerin kullanımı önemlidir ve yaygındır. Özellikle hafifliğin ön planda tutulduğu havacılık ve otomotiv sektörlerinde, balistik ve araç zırhı amaçlı kullanımı açısından ise savunma sanayisinde sıklıkla tercih edilmektedirler [1].

Savunma sanayi alanında sürekli olarak gelişen mühimmat çeşitliliği ve mühimmatların yıkıcı güçlerinin de bununla birlikte artması, kompozit malzemelerin bu alanda kullanılmasını da yaygınlaştırmıştır. Kompozit malzemelerin absorbe etme yeteneğinin birçok malzemeye göre üstün olması, personel koruma amacıyla kullanılan kaskların ve kurşungeçirmez yeleklerin üretiminde kullanılmasına olanak sağlamıştır. Bir başka açıdan bakıldığında ise koruma seviyesini artırmak amacıyla zırhlı araçların yapımında yine kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Dolayısıyla kompozit malzemelerin savunma sanayine sağlamakta olduğu ve gelecekte sağlayacağı katkıların çeşitliliği açısından bu alanda araştırma ve geliştirme çalışmaları tüm hızıyla sürmektedir.

Yanen ve Solmaz, tabakalı hibrit kompozitlerin bireysel zırh malzemesi olarak kullanılabilirliğini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışma kapsamında farklı fiber takviye açılarına, tabaka sayılarına ve kalınlıklara sahip cam fiber/aramid fiber/karbon fiber tabakalı kompozit plakaların balistik deneyleri yapılmış ve sonuçları incelenmiştir. Bu amaçla 200x200 mm boyutlarındaki farklı fiber takviye açılarına ve kumaş dokuma şekillerine sahip çok tabakalı farklı kalınlıklardaki plakaların balistik performanslarını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda twill dokuma kumaşların daha iyi balistik performans sergilediği sonucuna ulaşmışlardır [2].

Yazıcı ve ark., kompozit yüzey plakalı ve alüminyum çekirdekli sandviç levhaların balistik performanslarını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Bu çalışmada amaç, kompozit malzemenin enerji sönmeme mekanizmalarını kullanarak ön kompozit plakada mermi enerjisinin düşürülmesi, orta alüminyum plakanın plastik deformasyon ve sürtünme kabiliyetinden yararlanma, arka kompozit plakada ise merminin nihai enerjisinin yayılarak tamamen yok edilmesi şeklindedir. Bu kapsamda çalışmada karbon ve aramid takviyeli epoksi matrisli kompozit levhaların arasında alüminyum çekirdek kullanılmış ve Parabellum FMJ (Full Metal Jacket) fişek tercih edilmiştir. LS-DYNA üzerinde rijit yapıda bir mermi kullanarak sonlu elemanlar modeli kurulmuş ve farklı hızlarda dinamik olarak sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı NIJ standartlarına uygun (NIJ II-A ve NIJ II) mermi hızlarında merminin sandviç yapıyı delmediği gözlemlenmiştir [3].

Hassoon ve ark., farklı kalınlık ve katman sayısına sahip Kevlar 49 ve Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE) ile güçlendirilmiş epoksi için ABAQUS programında düşük hızda düşme deneyi (drop weight test)

kullanarak bir sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmişlerdir. Kullanıcı tanımlı malzeme olan VUMAT alt programı tabanlı progresif hasar modeli ve ABAQUS Dynamic/Explicit sonlu elemanlar kodunda uygulanan Hashin hasar kriterlerini kullanmışlardır. Ek olarak katmanlar arası hasar modelleri, kohezyonlu bölge modeline (CZM) bağlıdır. Sayısal modelin güvenilirliğini doğrulamak için sayısal simülasyon sonuçlarını deney verileriyle karşılaştırmışlardır [4].

Muñoz ve ark., yaptıkları çalışmada asimetrik lif dağılımına sahip hibrit bir 3D dokuma ortogonal kompozitin balistik etkisi altındaki mekanik davranışını, darbe testlerini ve hasar mekanizmalarını X-ışını bilgisayarlı tomografi analizinin bir kombinasyonu aracılığıyla incelemişlerdir. Bu çalışma kapsamında kullanılan karbon-cam elyafli dokuma kumaşa, parçanın kalınlık doğrultusunda uzanan ve z-ekseni doğrultusunda yerleşen bağlayıcı liflerin balistik performansa etkisini incelemişler ve ABAQUS programında kullanıcı tanımlı VUMAT alt programı tabanlı Hashin progresif hasar modeli malzeme tasarımını kullanarak kompozit tanımını yapmışlar ve dinamik/explicit analizler için sonlu elemanlar modeli oluşturmuşlardır. Oluşturulan bu yapıda sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen ve aynı zamanda deneysel olarak elde edilen verileri karşılaştırmışlardır. Kalınlık boyunca z-ipliklerin varlığının, her iki durumda da hasarın mermi yörüngesi çevresinde lokalize olması nedeniyle 2D dokuma kompozitlerle karşılaştırıldığında balistik performansı önemli ölçüde iyileştirmediği görülmüştür. Bununla birlikte hibrit 3D dokuma kompozitler tarafından dağıtılan enerji, karbon elyafa çarptığında artmıştır. Son olarak artık hız eğrilerinin yanı sıra enerji dağılım mekanizmalarının, sonlu elemanlar analizi çerçevesinde gömülü eleman yöntemine dayanan sayısal simülasyonlar yoluyla yeniden üretilebileceğini göstermişlerdir [5].

Bu alanda yapılan çalışmalar incelendiğinde, bezayağı dokuma yöntemi ile tasarlanan karbon ve aramid elyafli 3D kompozit yapılarda z-eksenindeki bağlayıcı ipliklerin mekanik özelliklere etkisinin incelenmiş olduğu, balistik performansa etkisinin de incelenmesi gerektiği yönünde bir çalışma ihtiyacı olduğu görülmüştür.

Yapılan bu çalışmada ise karbon elyaf ve aramid elyafli epoksi kompozit malzeme ile tasarlanan 3 katmanlı kompozit levhaların z-eksenindeki bağlayıcı ipliklerinin balistik performansa etkisi sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Kompozit malzemelerin tasarımı MSC Digimat programında gerçekleştirilmiştir. Balistik değerlendirmeler için NIJ 0108.01 standartına göre sonlu elemanlar analizleri ise ABAQUS programında gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma sonucunda, eklenen bağlayıcı z-iplikler sayesinde levhaların rijitliğinin artırıldığı görülmektedir. Rijitliğin artması her ne kadar aramid elyafın mermiyi durdurma gücünü artırmamış olsa da burada elde edilen veriler ışığında bağlayıcı z-iplikli elyafların mermiye karşı direnç ihtiyacı gerektiren tasarımlarda kullanılmasının mümkün olduğu görülmüştür. Bu çalışmayla balistik amaçlı kompozitlerde sadece tek tip takviye kullanılması yerine birden fazla elyaf içeren hibrit takviyesi kullanılmasıyla optimum rijitlik, mukavemet ve enerji sönmeme özelliğine ulaşılabileceği ve kompozit yapılarda hedeflenen balistik yeterliliğin kolaylıkla sağlanabileceği sonucuna varılmıştır.

## II. TEORİK METOD

### 2.1 Kumaş ve Kompozit Malzeme Tasarımı

Kumaş tasarımı için makro yapının matrisi olarak epoksi reçine tercih edilmiştir. Karbon elyaf malzeme için TORAY markasının T300 kodlu ürünü tercih edilmiştir. Tercih edilen karbon elyaf, 3000 filament sayısına sahiptir. Elyaf çapı 7 mikrometredir. Aramid elyaf için DUPONT markasının Kevlar-49 kodlu ürünü tercih edilmiştir. Tercih edilen aramid elyaf, 768 filament sayısına sahiptir. Elyaf çapı 12 mikrometredir. Kumaş tasarımlarında kullanılan malzemelerin elastisite modülü, yoğunluk ve poisson oranı değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan elyafların özellikleri Tablo 2’de görülmektedir.

**Tablo 1.** Kumaş tasarımı için kullanılan malzemelerin temel özellikleri

Malzeme	Elastisite Modülü (GPa)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Poisson Oranı (ν)
Epoksi Reçine	35.9	1.15	0.389
Karbon Elyaf	230	1.76	0.27
Aramid Elyaf	112.4	1.44	0.36

Kumaş tasarımı, MSC Digimat programında MF modülü yardımıyla gerçekleştirilmiştir. MF modülünde Tablo.1’de verilen malzeme özellikleri tanımlanarak kullanılacak ana malzemeler programa tanımlanmıştır. Malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra yapı oluşturma ekranında ‘Fabric’ seçeneği işaretlenerek örgü yapı oluşturma tanımı yapılmıştır. Burada oluşturulan malzemelerden epoksi reçine matris olarak, karbon ve aramid elyaflar ise iplik olarak seçilmiştir.

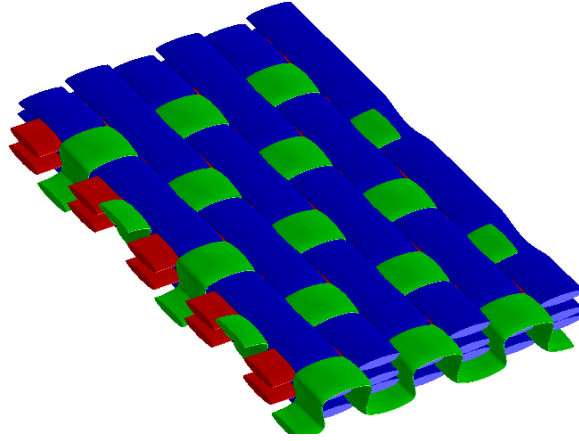
**Tablo 2.** İplik tasarım özellikleri

İplik	Elyaf Çapı (µm)	Filament Sayısı	İplik Genişliği (mm)	İplik Yüksekliği (mm)
Karbon	7	3000	1	0.15
Aramid (Kevlar)	12	768	0.75	0.15

Bezayağı örgü modelinde 3 katmanlı bir kumaş tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kumaşın tasarımında karbon elyaf için cm<sup>2</sup>’de 9 atkı ve çözüğü tanımı yapılmıştır. Aramid elyafın iplik genişliği daha düşük olduğundan kumaş modeli çıkarılırken cm<sup>2</sup>’de 13 atkı ve çözüğü tanımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımda 3 katlı kumaş oluşturulduğunda, 4 levha için de oluşan toplam kalınlık 0.9 mm olmuştur. Bağlayıcı iplikler 3 kat kumaşta dikey yönde 3 katı birden tutmaktadır (Şekil 1). MSC Digimat programı tarafından elde edilen kompozit malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 3’te verilmiştir.

**Tablo 3.** Digimat MF tarafından hesaplanan yapıların mekanik özellikleri

Malzeme	Tutucu İplik	E <sub>1</sub> (GPa)	E <sub>2</sub> (GPa)	E <sub>3</sub> (GPa)	ν <sub>12</sub>	ν <sub>13</sub>	ν <sub>23</sub>	G <sub>12</sub> (GPa)	G <sub>13</sub> (GPa)	G <sub>23</sub> (GPa)	d (g/cm <sup>3</sup> )
Karbon-Epoksi	Var	121,57	139,69	105,14	0,24	0,38	0,35	40,55	35,05	36,693	1,53
Karbon-Epoksi	Yok	150,64	150,64	116,38	0,26	0,36	0,36	54,79	39,64	39,64	1,58
Aramid-Epoksi	Var	79,64	82,31	74,72	0,34	0,38	0,38	26,77	25,32	25,84	1,35
Aramid-Epoksi	Yok	84,54	84,54	75,93	0,35	0,39	0,39	31,9	28,8	28,8	1,34



Şekil 1. Bağlayıcı iplikli 3D kumaş tasarım örneği

## 2.2 Matematiksel Model

Bu çalışmada kullanılan karbon ve aramid elyafli epoksi kompozit malzemelerin hasar başlangıcı görülebilmesi için matematiksel model hazırlanırken ‘Hashin Hasar Kriterleri’ kullanılmıştır. Hasar başlangıcı, maddesel bir noktada bozulmanın başlamasını ifade eder. ABAQUS'te elyaf takviyeli kompozitler için hasar başlangıcı kriterleri, Hashin'in teorisine dayanmaktadır [6, 7]. Bu kriterler dört farklı hasar başlatma mekanizmasını göz önünde bulundurur: fiber çekme, fiber basma, matris çekme ve matris basma olarak tanımlanabilir. Bu hasar başlangıcı mekanizmasının takip ettiği temel matematiksel model ise Denklem (1), (2), (3) ve (4) ile verilmiştir.

Fiber çekme ( $\hat{\sigma}_{11} \geq 0$ ) :

$$F_f^t = \left( \frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^T} \right)^2 + \alpha \left( \frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2 \quad (1)$$

Fiber basma ( $\hat{\sigma}_{11} < 0$ )

$$F_f^c = \left( \frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^C} \right)^2 \quad (2)$$

Matris çekme ( $\hat{\sigma}_{22} \geq 0$ )

$$F_m^t = \left( \frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^T} \right)^2 + \left( \frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2 \quad (3)$$

Matris basma ( $\hat{\sigma}_{22} < 0$ )

$$F_m^c = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{2S^T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y^c}{2S^T}\right)^2 - 1\right] \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^c}\right) + \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L}\right)^2 \quad (4)$$

Denklem takımında belirtilen  $X^T$  boyuna çekme dayanımı,  $X^C$  boyuna basma dayanımı,  $Y^T$  enine çekme dayanımı,  $Y^C$  enine basma dayanımı ve  $S^{L,T}$  ise boyuna ve enine kayma dayanımlarını temsil etmektedir. Yine aynı şekilde denklem takımında görünen  $\alpha$ , kayma geriliminin elyaf çekme yönünde hasar başlangıcı kriterine katkısını belirleyen bir katsayıdır.  $\hat{\sigma}_{11}$ ,  $\hat{\sigma}_{22}$  ve  $\hat{\tau}_{12}$  ise etkin gerilim tensörünün bileşenleridir.

$\hat{\sigma}$ , hasar başlangıç kriterlerini değerlendirmek için kullanılır ve aşağıdaki denklem takımından hesaplanır:

$$\hat{\sigma} = M\sigma$$

Burada  $\sigma$  nominal gerilmeyi,  $M$  ise hasar operatörünü temsil eder:

$$M = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{1-d_f}\right) & 0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{1}{1-d_m}\right) & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{1}{1-d_s}\right) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$d_f$ ,  $d_m$ ,  $d_s$  değişkenleri; fiber, matris ve kayma hasarını karakterize eden hasar değişkenleridir. Bu değişkenler hasar değişkenlerinden türetilen  $d_f^t$ ,  $d_f^c$ ,  $d_m^t$ ,  $d_m^c$  ve 4 moda karşılık gelen değişkenlerdir.

$$d_f = \begin{cases} d_f^t & \text{if } (\hat{\sigma}_{11} \geq 0) \\ d_f^c & \text{if } (\hat{\sigma}_{11} < 0) \end{cases} \quad (6)$$

$$d_m = \begin{cases} d_m^t & \text{if } (\hat{\sigma}_{22} \geq 0) \\ d_m^c & \text{if } (\hat{\sigma}_{22} < 0) \end{cases} \quad (7)$$

$$d_s = 1 - (1 - d_f^t)(1 - d_f^c)(1 - d_m^t)(1 - d_m^c) \quad (8)$$

Herhangi bir hasar başlangıcı ve evriminden önce  $M$ , hasar operatörü birim matrise eşittir yani  $\hat{\sigma} = \sigma$  olur. En az bir mod için hasar başlangıcı ve gelişimi gerçekleştiğinde hasar operatörü, diğer modların hasar başlatma kriterlerinde önemli hale gelir. Etkin gerilimin, iç kuvvetlere etkili bir şekilde direnen hasarlı alan üzerinde etkili olan gerilimi temsil etmesi amaçlanır [6, 7].

Hasarın başlamasından önce malzeme, bir ortotropik malzemenin düzlem gerilme rijitlik matrisi ile doğrusal olarak elastiktir. Daha sonra, malzemenin tepkisi şu şekilde hesaplanır:

$$\sigma = C_d \varepsilon, \quad (9)$$

Burada  $\varepsilon$  birim şekil değiştirme ve  $C_d$  hasarlı esneklik matrisidir:

$$C_d = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} (1-d_f)E_1 & (1-d_f)(1-d_m)\vartheta_{21}E_1 & 0 \\ (1-d_f)(1-d_m)\vartheta_{12}E_2 & (1-d_m)E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1-d_s)GD \end{bmatrix} \quad (10)$$

Bu matriste  $D = 1 - (1-d_f)(1-d_m)\vartheta_{21}\vartheta_{12}$ ,  $d_f$  fiber hasarının mevcut durumunu,  $d_m$  matris hasarının mevcut durumunu,  $d_s$  kayma hasarının mevcut durumunu,  $E_1$  fiber doğrultusundaki elastisite modülünü,  $E_2$  matris doğrultusundaki elastisite modülünü,  $G$  kayma modülünü,  $\vartheta_{21}$  ve  $\vartheta_{12}$  poisson oranlarını temsil eder.

Hasar ilerlemesinde 4 hasar modunun her biri için eşdeğer gerilme ve eşdeğer deplasman aşağıdaki Tablo 4'teki gibi tanımlanır, burada  $L_c$  karakteristik uzunluğu temsil etmektedir.

**Tablo 4.** Her mod için eşdeğer gerilme ve eşdeğer yer değiştirme [8]

Hasar modu	Eşdeğer Yer Değiştirme	Eşdeğer Gerilme
Fiber çekme hasarı	$L_c \sqrt{(\epsilon_{11})^2 + (\epsilon_{12})^2 + (\epsilon_{31})^2}$	$L_c(\sigma_{11}\epsilon_{11} + \sigma_{12}\epsilon_{12} + \sigma_{31}\epsilon_{31})/\delta_{1,eq}$
Fiber basma hasarı	$L_c \sqrt{(-\epsilon_{11} - (\epsilon_{33}) \cdot E_{33}/E_{11})^2}$	$L_c(E_{11}(-\epsilon_{11} - (\epsilon_{33}) \cdot E_{33}/E_{11}))/\delta_{2,eq}$
Matris çekme hasarı	$L_c \sqrt{(\epsilon_{22})^2 + (\epsilon_{12})^2 + (\epsilon_{23})^2}$	$L_c(\sigma_{22}\epsilon_{22} + \sigma_{12}\epsilon_{12} + \sigma_{23}\epsilon_{23})/\delta_{3,eq}$
Matris basma hasarı	$L_c \sqrt{(-\epsilon_{22} - (\epsilon_{33}) \cdot E_{33}/E_{22})^2 + (\epsilon_{12})^2}$	$L_c(E_{22}(-\epsilon_{22} - (\epsilon_{33}) \cdot E_{33}/E_{22}) + \sigma_{12}\epsilon_{12})/\delta_{2,eq}$

Bu denklem takımlarının yardımı ile Abaqus programında kompozit malzemelerin Hashin hasar tanımlamaları Tablo 5'te verilmiştir.

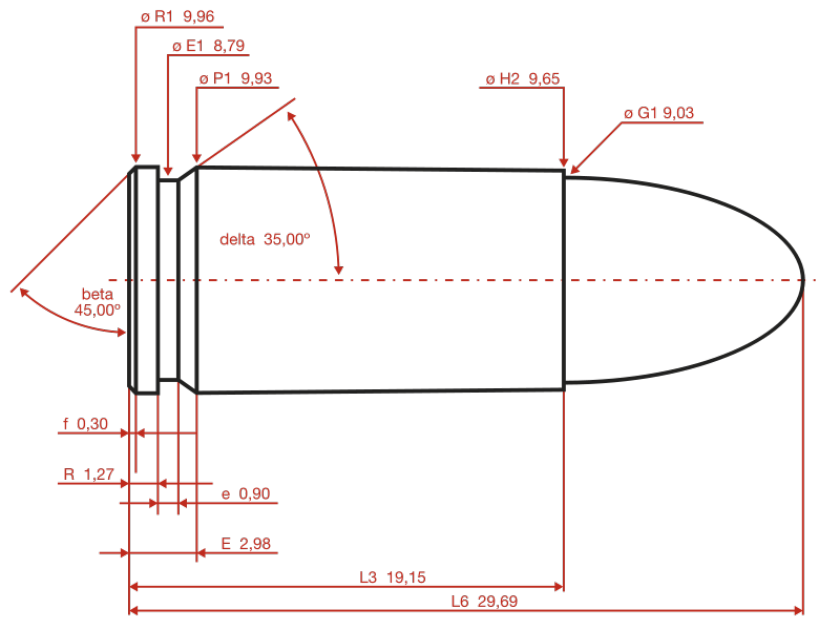
**Tablo 5.** Hashin hasar tanımları [4,5]

	$X_t$ (MPa)	$X_c$ (MPa)	$Y_t$ (MPa)	$Y_c$ (MPa)	$S_{t,c}$ (MPa)	$G_{It}$ (N/mm)	$G_{Ic}$ (N/mm)	$G_{2t}$ (N/mm)	$G_{2c}$ (N/mm)
Karbon-Epoksi	2210	1800	69	111	42	127	94	1	8
Aramid-Epoksi	2490	700	800	700	53	81.5	106.3	0.28	0.79

Tablo 5'te belirtilen  $X_t$  boyuna çekme dayanımı,  $X_c$  boyuna basma dayanımı,  $Y_t$  enine çekme dayanımı,  $Y_c$  enine basma dayanımı,  $S_{t,c}$  ise enine ve boyuna kayma dayanımı olarak temsil etmektedir.  $G$  sembolü ile gösterilen değerler ise kırılma tokluklarını temsil etmektedir. Burada  $G$  değerleri, eşdeğer gerilme ve eşdeğer yer değiştirme eğrisinin altında kalan alan hesaplanarak elde edilmektedir.

### 2.3 Parabellum Mermi Ölçüleri ve Standartlar

Mermi çekirdeği için 9x19 mm Parabellum mermi modeli de Şekil 2'ye uygun olacak şekilde modellenmiştir.



Şekil 2. 9x19 mm Parabellum mermi ölçüleri [9]

Mermi çekirdeği modellenirken rijit eleman şeklinde modellenmiş olup, uç noktasına 8 gr kütle tanımlaması yapılmıştır. Abaqus programında oluşturulan model Şekil 3'te verilmiştir.

Sonlu elemanlar modeli hazırlanırken ise mermi hızını belirlemek için Tablo 6'da verilen NIJ 0108.01 koruma seviyeleri ve mermi hızlarından faydalanılmıştır.

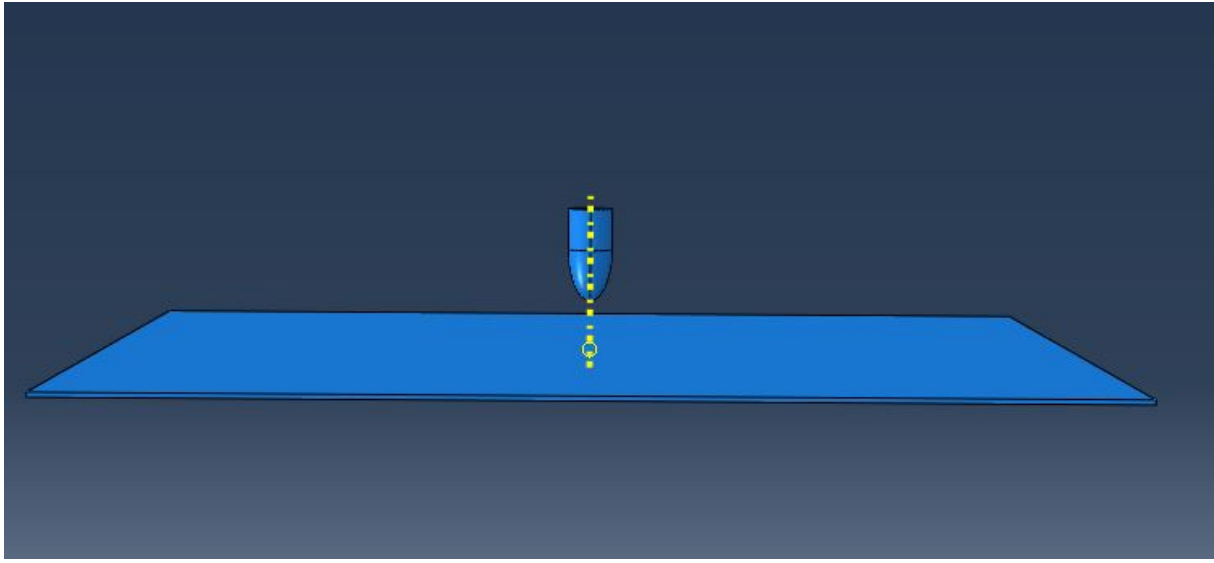
Tablo 6. NIJ 0801.01 koruma seviyeleri ve mermi hızları [10]

Koruma Seviyesi	Test Mühimmatı	Nominal Mermi Çekirdek Kütleleri	Önerilen Namlu Uzunluğu	Gerekli Mermi Hızı (m/s)	Numune Başına Gerekli Vuruş	İzin Verilen Penetrasyon
II-A	9 mm	8 g	10-12 cm	332 ± 12	5	0
II	9 mm	8 g	10-12 cm	358 ± 12	5	0
III-A	9 mm	8 g	24-26 cm	426 ± 12	5	0



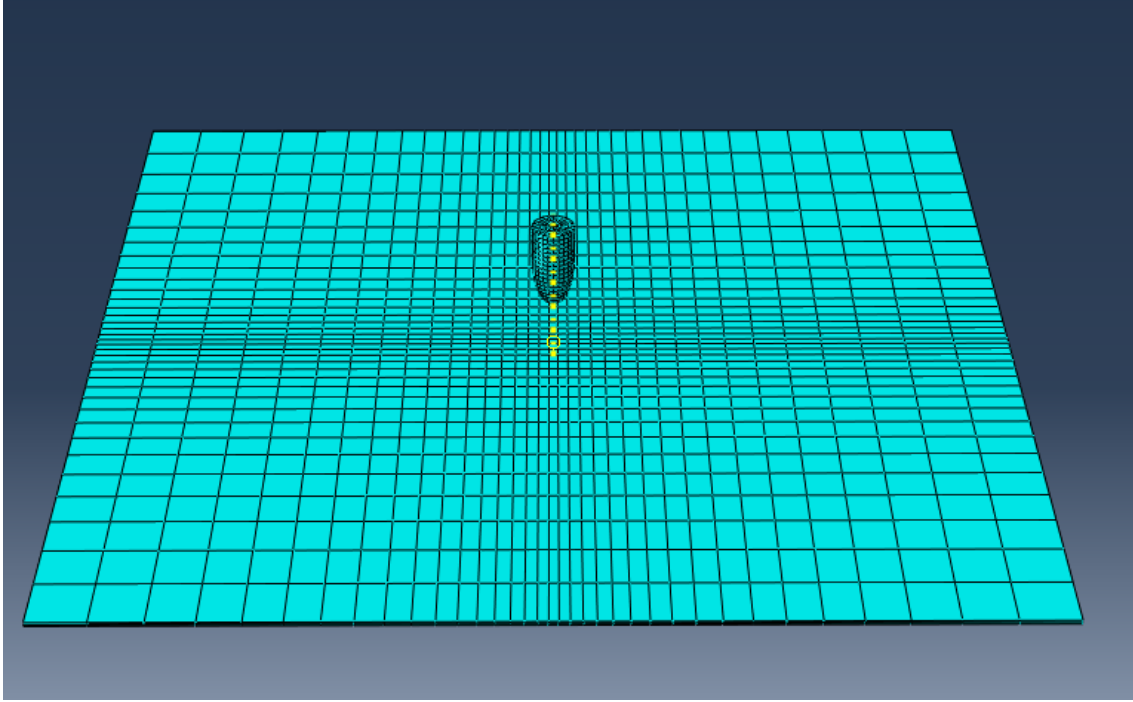
#### 2.4 Sonlu Elemanlar Modeli

Sonlu elemanlar modeli oluşturulurken levha ve mermi modellemeleri 3 boyutlu şekilde yapılmıştır. ABAQUS programında kompozit plakalar için 200x200x9 mm levha modellenmiştir. Tablo 3'teki malzeme özellikleri VUMAT alt program (subroutine) tanımı ile levhalara ayrı ayrı tanımlanmıştır. Aynı şekilde bu analizde ek olarak Tablo 5'teki Hashin kompozit hasar modelleri de levhaların malzeme kartlarına eklenmiştir. Kompozit levha 0.3 mm katman kalınlığına sahip 3 katmandan oluşmaktadır. Malzeme özellikleri 3 katman birleşmesinden hesaplatıldığı için kompozit levha toplam kalınlığı olan 0.9 mm kalınlığında, tek katmandan oluşacak şekilde modellenmiştir.



Şekil 3. ABAQUS programında hazırlanan mermi ve levha modeli

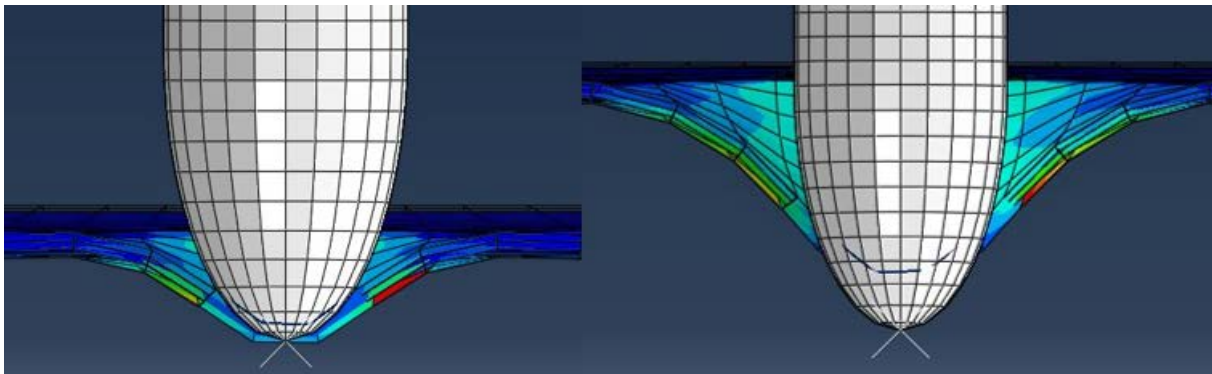
Modelin oluşturulmasından sonra sınır şartları belirlenmiştir. Sınır şartları tanımlamaları yapılırken, levha 4 kenarından ankastre mesnetlenerek her doğrultudaki öteleme ve dönme hareketi kısıtlanmıştır. Mermi için ise, dikey doğrultuda öteleme hareketi serbestliği verilmiştir. Oluşturulan modelde mermiye NIJ-II A koruma standartlarına göre 344 m/s ilk hız tanımlanmıştır. Mermi levhaya çarptıktan sonra merminin hızında meydana gelen değişim incelenmek istendiğinden bu tanımlama gerçekleştirilmiştir. Ayrıca mermi, rijit bir cisim olarak modellendiği için herhangi bir malzeme tanımlaması mermiye tanımlanmamıştır. Sonlu elemanlar analizinin gerçekleştirilebilmesi için kompozit levhanın ve mermi modelinin mesh ağı oluşturularak matematiksel model hazırlanmıştır. Sonlu elemanlar modelinde kompozit levha için "Continuum Shell" tanımı yapılmış ve SC8R kodlu elemanlar kullanılmıştır. Kompozit levhanın mesh yapısı 5184 düğüm noktası ve 3675 elemandan oluşmaktadır. Mermi çekirdeği ise 504 adet R3D4 ve 48 adet R3D3 kodlu rijit elemanlardan ve toplam 530 düğüm noktasından oluşmaktadır. Oluşturulan mesh modelde eleman erozyonu da açılarak hasar alan elemanların sonuç ekranında silinmesi amaçlanmıştır. Oluşturulan sonlu elemanlar modeli Şekil 4'te verilmiştir. Oluşturulan bu model ABAQUS programında Dynamic/Explicit analiz modeli olarak çözümlenmiştir.



Şekil 4. Sonlu elemanlar modeli

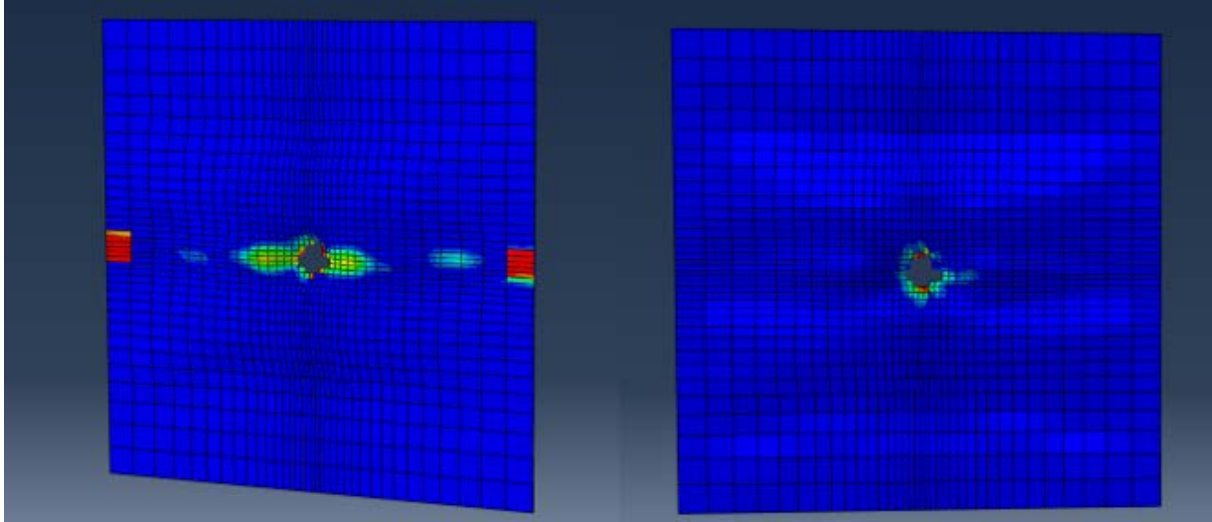
### III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Dinamik/Eksplicit sonlu elemanlar analizleri sonucunda mermi çekirdeği 4 kompozit levhayı da delip ilerlemeye devam etmiştir. Bunun sebeplerinden biri bu modelde kullanılan kompozit levhaların kalınlıklarının normalde kullanılanlara göre ince tasarlanmış olması ve 10-15 katmanlı yapılar yerine sadece 3 katman için değerlendirilmiş olmasıdır. Merminin ilk temas anı ve temas sonrası levhayı delme anında elde edilen görsel Şekil 5'te verilmiştir.

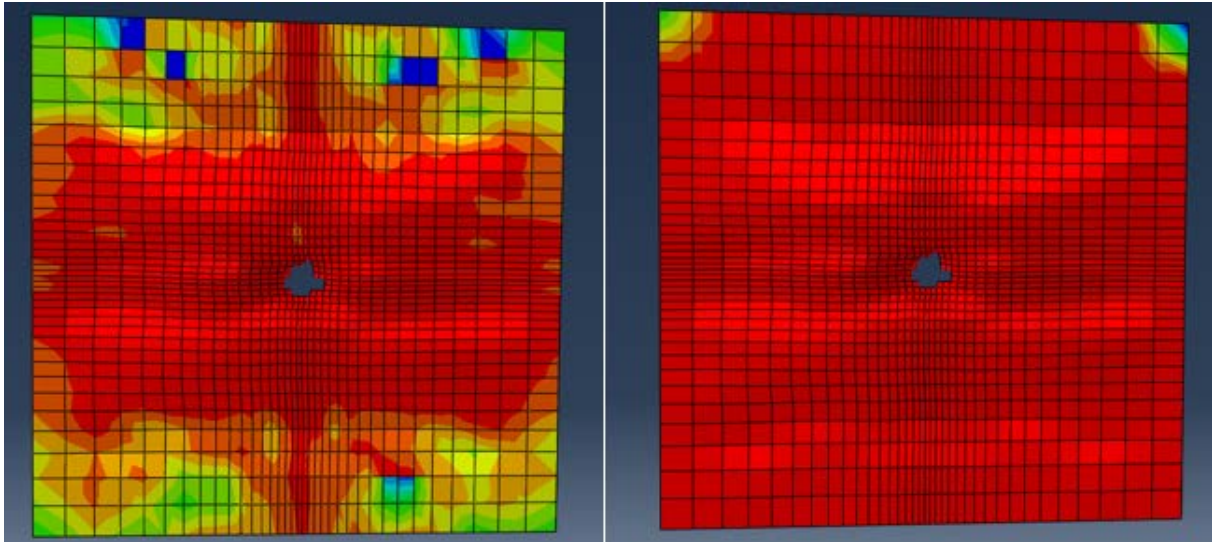


Şekil 5. Merminin temas anı(solda) ve merminin levhayı delme anı(sağda)

Merminin levhalar üzerinde bıraktığı fiber ve matris için çekme ve basma hasarları Şekil 6'da ve Şekil 7'de verilmiştir.



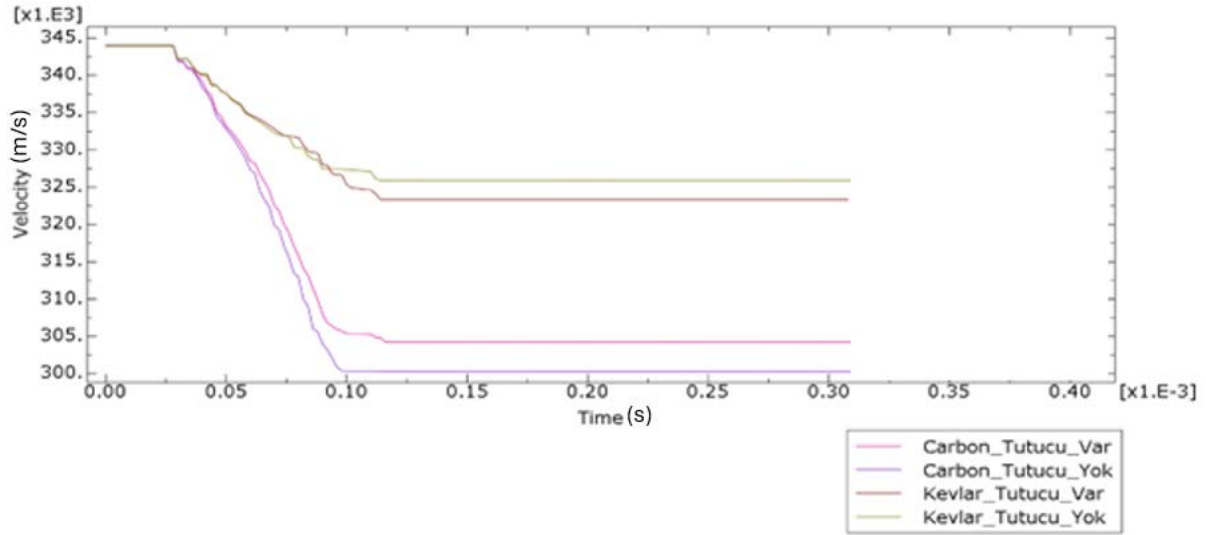
Şekil 6. Fiber basma(solda) ve fiber çekme(sağda) hasar bölgeleri



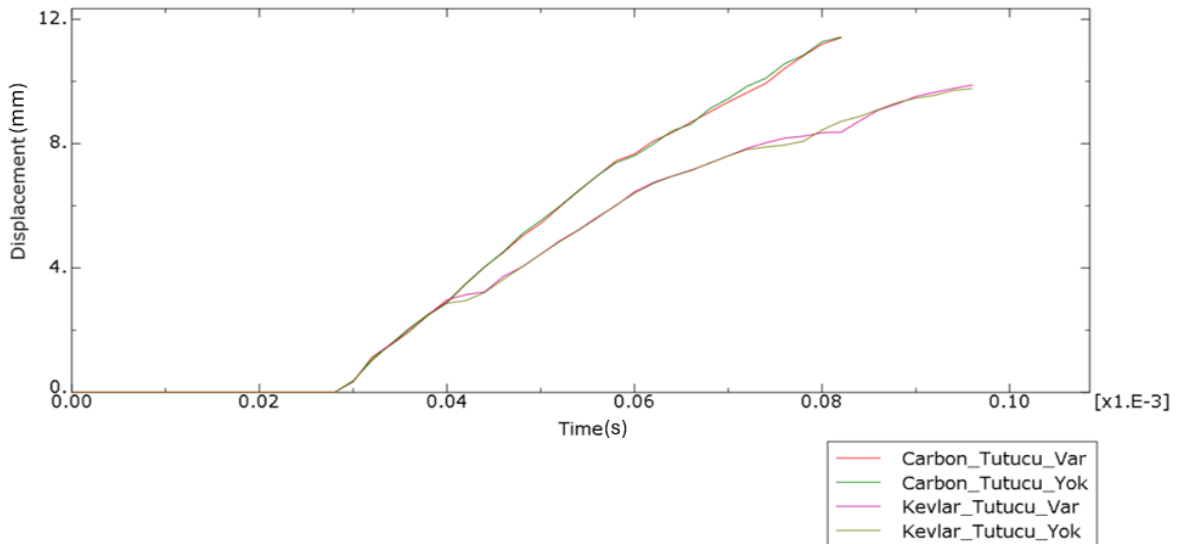
Şekil 7. Matris basma(solda) ve matris çekme(sağda) hasar bölgeleri

Mermi çekirdeğinden alınan ilk ve son hız verileri, analizi yapılan 4 farklı kompozit levha için de karşılaştırmalı olarak Şekil 8’de verilmiştir.

İlk hızının 344 m/s olduğu bilinen mermi çekirdeğinin son hızı, karbon ve aramid elyaflar için karşılaştırılmıştır. Burada yapılan analizlerde tutucu ipliklerin mermi çekirdeğinin hızında büyük farklılıklara yol açmadığı görülürken, karbon ve aramid elyaflar arasında farklılıklar söz konusudur. Bu analizlerde kullanılan hasar kriterleri ve malzeme özelliklerindeki farklılıklardan ötürü aramid elyaf ile karbon elyaf arasında 20 m/s’ye yakın mermi hızında farklılıklar olduğu görülmüştür. Mermi hızlarının farklılığına levhaların tasarımında kullanılan filamentlerin sayısındaki değişkenliğin (bkz. Tablo 2), bu değişkenliğin etkilemiş olduğu alansal yoğunluğun ve  $E_1$ ,  $E_2$  ve  $E_3$  değerlerinin farklılığının sebep olduğu söylenebilir. Levhanın mermi çekirdeği ile temas ettiği bölgede oluşan deplasman değerleri Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 8. Mermi çekirdeğinin hızı

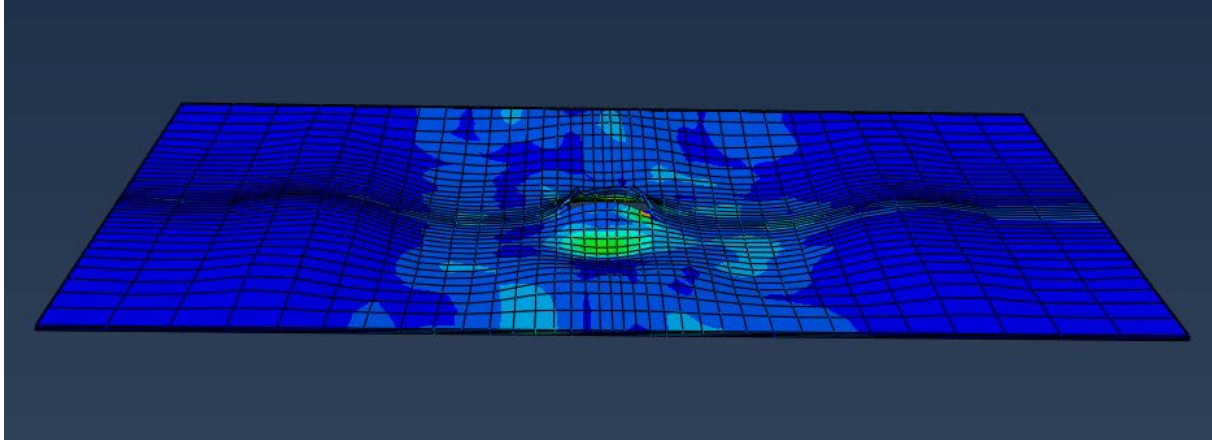


Şekil 9. Levhanın mermi çekirdeği ile temas ettiği bölgede oluşan deplasman

Merminin levhaya temas ettiği bölgede oluşan deplasman değerleri incelendiğinde, aramid elyafların kopmadan evvel karbon elyaflara göre az da olsa daha uzun süre dayandığı ve karbon elyaflara göre daha az deplasmana uğradığı görülmektedir. Aynı şekilde bu grafikten çıkarılabilecek yorumlardan bir diğeri, katman tasarımında tutucu iplik bulunan levhaların bulunmayanlara göre daha fazla deplasmana uğraması ancak daha uzun süre kopmadan dayanabilmesidir.

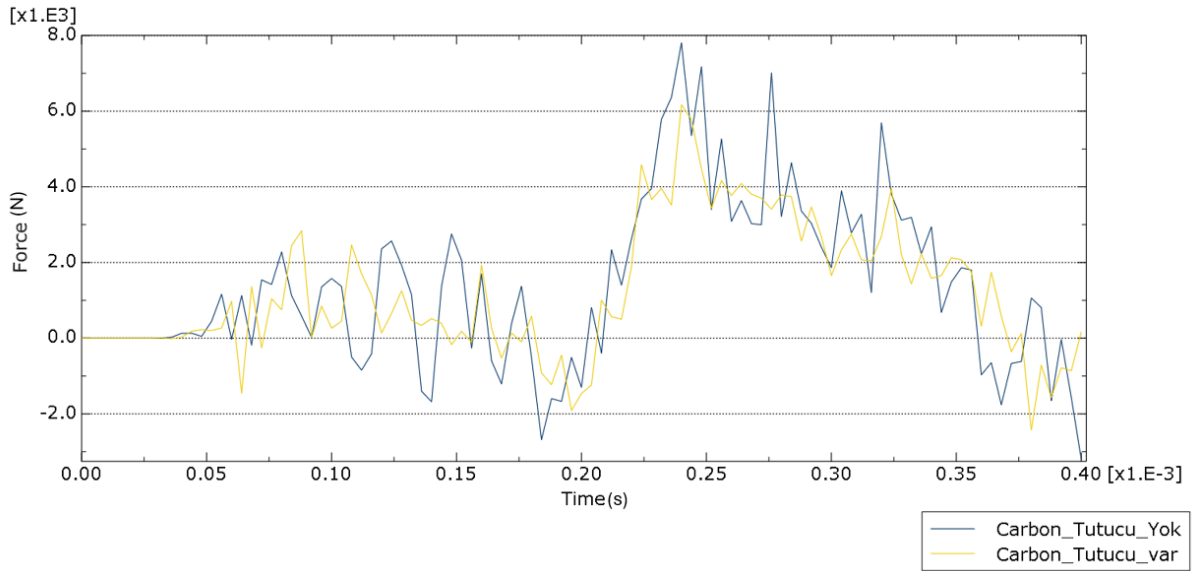
Mermi çekirdeğinin kompozit levhaya çarpması ile oluşan darbe kuvvetinin etkisi sonucu kompozit levha üzerinde ani bir gerilme dalgası oluşur. Bu dalganın yayılımı düzlem dışı deplasmanlara neden olarak levha boyunca her

iki yönde sinüzoidal bir dalga hareketi ortaya çıkarır. Oluşan bu şok dalgasının levhada neden olduğu formun belli bir andaki görünümü Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 10. Levhalarda oluşan dalgalanma hareketi

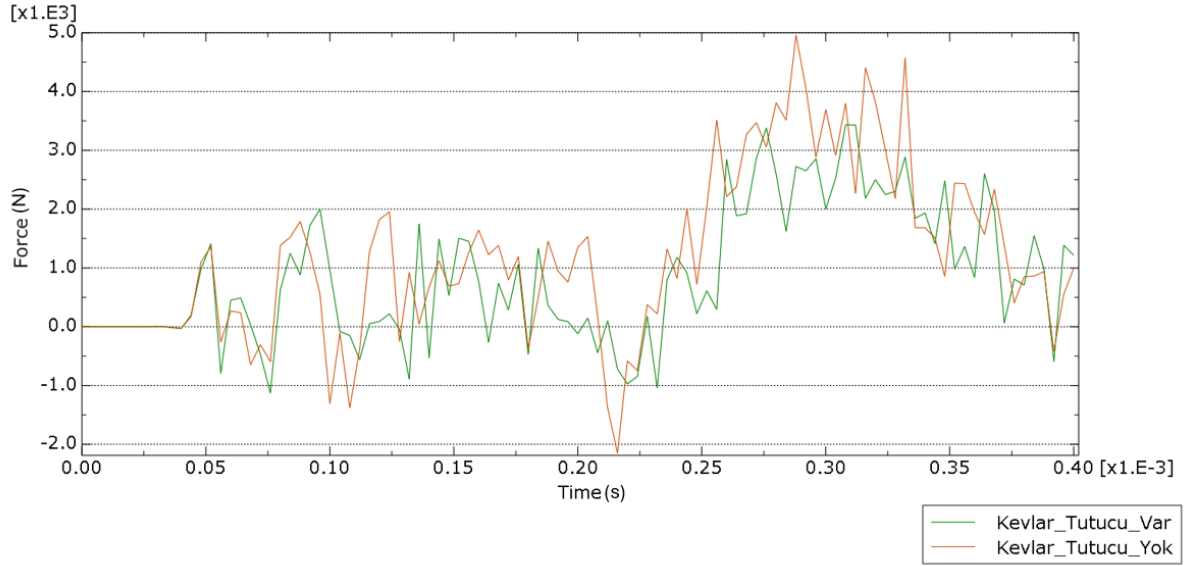
Levha dalgalandığı süre boyunca tepki kuvvetleri de yön değiştirir. Karbon ve aramid epoksi kompozit levhaların ayrı ayrı tepki kuvvetlerini gösteren grafikler Şekil 11 ve Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 11. Karbon elyaflı kompozit levhaların tepki kuvvetleri

Grafikler dikkatlice incelendiğinde, tutucu ipliklerin tepki kuvvetine karşı gösterdiği rijitlik açıkça görülmektedir. Hem karbon elyaflı hem de aramid elyaflı kompozit levhalar için tasarımında tutucu iplik kullanılan yapılar daha rijit hale geldiğinden dolayı bu iplikler dalgalanma hareketleri esnasında tepki kuvvetinin yönünün büyük sayısal değerler ile değiştirmesini engellemiştir. Ayrıca tutucu iplik bulunmayan kompozit levhalar, her iki yönde de

maksimum tepki kuvvetine ulaşan levhalar olmuşlardır. Bir diğer yandan karşılaştırılacak olursak, aramid elyafli kompozit levhanın tepki kuvvetlerinin zaman boyunca karbon elyafli levhalar kadar yüksek olmadığı kanısına varılabilir. Karbon elyafli levhalar maksimum 6 ila 8 N tepki kuvvetine maruz kalırken, aramid elyafli kompozit levhalar maksimum 5 N değerlerinde tepki kuvvetine maruz kalmışlardır.



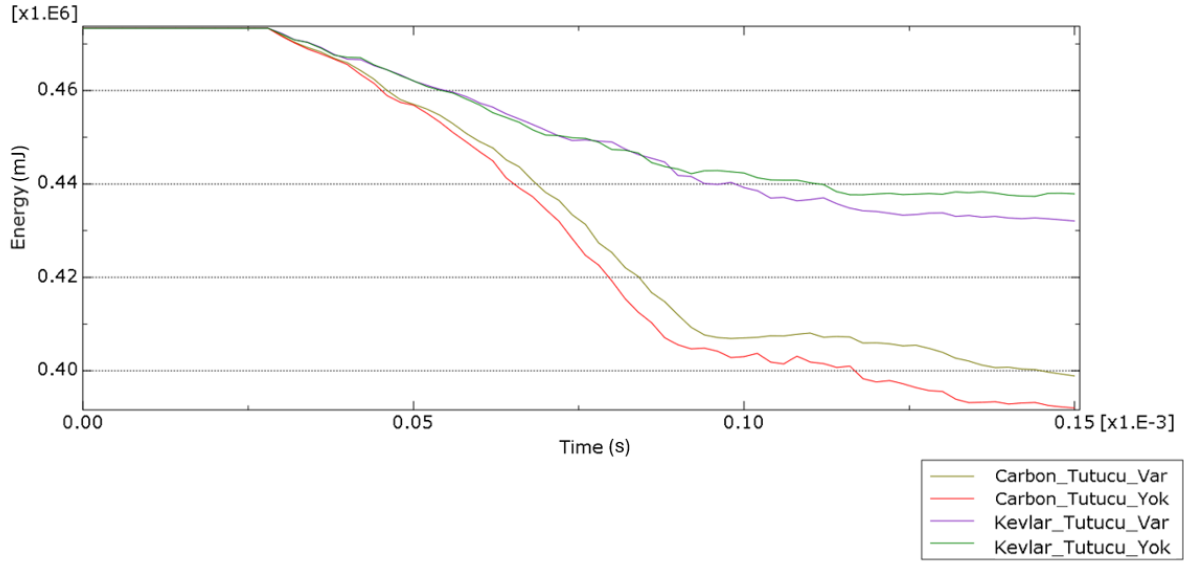
Şekil 12. Aramid elyafli kompozit levhaların tepki kuvvetleri

Analizler sonucu elde edilen grafiklerden bir diğeri, kinetik enerjideki azalmalar olmuştur. Şekil 13'te Karbon ve Kevlar için ayrı ayrı kinetik enerjideki azalmalar görülmektedir. Kinetik enerji, hıza bağlı olduğundan mermi çekirdeği için çizdirilen hız grafiklerine benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Grafikler dikkatlice incelendiğinde, tutucu ipliklerin tepki kuvvetine karşı gösterdiği rijitlik açıkça görülmektedir. Hem karbon elyafli hem de aramid elyafli kompozit levhalar için tasarımında tutucu iplik kullanılan yapılar daha rijit hale geldiğinden dolayı bu iplikler dalgalanma hareketleri esnasında tepki kuvvetinin yönünün büyük sayısal değerler ile değiştirmesini engellemiştir. Ayrıca tutucu iplik bulunmayan kompozit levhalar, her iki yönde de maksimum tepki kuvvetine ulaşan levhalar olmuşlardır. Bir diğer yandan karşılaştırılacak olursak, aramid elyafli kompozit levhanın tepki kuvvetlerinin zaman boyunca karbon elyafli levhalar kadar yüksek olmadığı kanısına varılabilir. Karbon elyafli levhalar maksimum 6 ila 8 N tepki kuvvetine maruz kalırken, aramid elyafli kompozit levhalar maksimum 5 N değerlerinde tepki kuvvetine maruz kalmışlardır.

Analizler sonucu elde edilen grafiklerden bir diğeri, kinetik enerjideki azalmalar olmuştur. Şekil 13'te Karbon ve Kevlar için ayrı ayrı kinetik enerjideki azalmalar görülmektedir. Kinetik enerji, hıza bağlı olduğundan mermi çekirdeği için çizdirilen hız grafiklerine benzer sonuçlar elde edilmiştir.





Şekil 13. Farklı levhalara çarpan mermi çekirdeğinin kinetik enerji değişimi

Bu sonlu elemanlar analizleri sonucunda elde edilen sayısal verilerin karşılaştırması Tablo 7’de verilmiştir. Tablo 7’deki sonuçlar incelendiğinde karbon elyafli kompozit levhanın absorbe ettiği enerji miktarının, aramid elyafli kompozit levhaya göre yaklaşık 5 kat yüksek olduğu söylenebilir. Absorbe edilen enerji miktarının fazla olması sebebiyle aramid elyafli kompozit levhaya göre karbon elyafli kompozit levhanın, merminin hızını daha fazla yavaşlattığı görülmektedir.

**Tablo 7.** Karbon epoksi ile aramid epoksinin tutucu iplikli ve tutucu ipliksiz modellerinin karşılaştırmalı sayısal sonuçları

	Mermi Son Hızı (m/s)	Max. Deplasman (mm)	Absorbe Edilen Enerji (mJ)
Karbon Epoksi Tutucu İplikli	304,20	11,19	6336,16
Karbon Epoksi Tutucu İpliksiz	300,24	11,41	7659,75
Aramid Epoksi Tutucu İplikli	323,36	9,89	1704,04
Aramid Epoksi Tutucu İpliksiz	325,905	9,79	1309,72

#### IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, balistik alanında kullanılabilecek bezayağı dokuma yöntemi ile 3 katmanlı olarak tasarlanan karbon ve aramid elyafli 3D kompozit yapılarda z-eksenindeki bağlayıcı ipliklerin enerji absorpsiyonuna etkisi, sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir.

Yapılan bu çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar şu şekildedir;

- Modellemelerin hepsi 3 katman ve ince yapılar olmasından dolayı mermiyi durdurmaya yetmemiştir.
- Eklenen bağlayıcı z-iplikler sayesinde levhaların rijitliği artmıştır.
- Bağlayıcı z-iplikli elyafların mermiye karşı direnç ihtiyacı gerektiren tasarımlarda kullanılmasının mümkün olduğu görülmüştür.

- Mermi çekirdeğinin kompozit levhalara çarptıktan sonra levhaların dalgalanma hareketinin aramid elyafli kompozit levhalarda karbona göre, aynı şekilde de bağlayıcı z-iplikli olan tasarımların ipliksiz olanlara göre daha rijit davranış gösterdiği görülmüştür.
- Kompozit levhaların tasarımında kullanılan aramid ve karbon elyafın lif genişliğinin ve fiber çaplarının farklı olması sebebi ile aramid elyafli kompozit levhalar karbon elyafli kompozit levhalara göre tek başına üstünlük sağlayamamıştır.
- Bağlayıcı z-ipliklerin tasarımı, alansal yoğunluğun düşmesine sebep olmuştur. Ayrıca tasarlanan levhaların alansal yoğunlukları arasında farklılıklar olması, aramid elyafli ve karbon elyafli kompozitler arasında mermi durdurma kabiliyetleri arasında farklılıklar ortaya çıkarmıştır.
- Levhaların sadece 3 katmanlı tasarlanmış olması ve % 100 karbon ve % 100 aramid elyaf ile tasarlanmış olması sebebiyle levhalar mermiyi durdurmak için yeterli mukavemete erişememişlerdir.

Sonuçlar değerlendirildiğinde bu çalışmada yapılan modellemelerin hepsi 3 katman ve ince yapılar olmasından dolayı mermiyi durdurmaya yetmemiştir. Ancak eklenen bağlayıcı z-ipliklerin sayesinde levhaların rijitliğinin artırıldığı görülmektedir. Rijitliğin artması her ne kadar aramid elyafın mermiyi durdurma gücünü artırmamış olsa da burada elde edilen veriler ışığında bağlayıcı z-iplikli elyafların mermiye karşı direnç ihtiyacı gerektiren tasarımlarda kullanılmasının mümkün olduğu görülmüştür.

Yüksek mukavemetli elyaflar ile oluşturulan kompozit malzemelerde elyaf özelliklerine göre kompozitin rijitliği ve enerji sönmüleme davranışları arasında birbirlerine göre üstün veya zayıf yanları oluşmaktadır. Ele alınan kompozitlerin sadece tek tip takviye ile kullanılması yerine birden fazla elyaf içeren hibrit takviyeli çözümlerle optimum rijitlik, mukavemet ve enerji sönmüleme özelliğine ulaşılabileceği ve kompozit yapıda hedeflenen balistik yeterliliğin kolaylıkla sağlanabileceği sonucuna varılmıştır.

## KAYNAKLAR

1. Bitlisli B, Yazıcı M (2019) Araç zırhlamada kullanılan kompozit malzemelerin balistik performanslarının incelenmesi. Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 24(1):25–34. <https://doi.org/10.17482/uumfd.494262>
2. Yanen C, Solmaz M (2015) Tabakalı hibrit kompozitlerin bireysel zırh malzemesi olarak üretimi ve balistik performanslarının incelenmesi. El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, 2016(2):351–362. <https://doi.org/10.31202/ecjse.67164>
3. Yazıcı M, Boztoprak Y, Uygun S (2021) Kompozit yüzey plakalı ve alüminyum çekirdekli sandviç levhaların balistik performanslarının sonlu elemanlar analiz yöntemi ile incelenmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (31):933-942. <https://doi.org/10.31590/ejosat.999576>
4. Hassoon O, Abed M, Olewi J, Tarfaoui M (2022) Experimental and numerical investigation of drop weight impact of aramid and UHMWPE reinforced epoxy. J Mech Behav Mater 31:71-82. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0008>
5. Muñoz R, Martínez F, Hergueta F, Gálvez C, González J, Lorca L (2015) Ballistic performance of hybrid 3D woven composites: experiments and simulations, Compos Struct 127:141-151, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.03.021>
6. Hashin Z, Rotem A (1973) A fatigue criterion for fiber-reinforced materials. J Compos Mater 7:448–464.
7. Hashin, Z. (1980). Failure criteria for unidirectional fiber composites. J Appl Mech 47:329–334.



8. Xin SH, Wen HM (2015) A progressive damage model for fiber reinforced plastic composites subjected to impact loading. Int J Impact Eng 75:40-52. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.07.014>
9. URL (2021) Retrieved December 2, [https://tr.wikipedia.org/wiki/9x19mm\\_Parabellum](https://tr.wikipedia.org/wiki/9x19mm_Parabellum)
10. National Institute of Justice (1985) Ballistic Resistant Protective Materials NIJ Standard 0108.01.