

Kompozit Zırhların Geometrisinin Balistik Dayanıma Etkisinin İncelenmesi

Mehmet Orhan Şenaslan^{1*}, İlyas İstif²

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye

²Makine Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye

*(mehmetorhansenaslan@gmail.com)

Özet – Katmanlı kompozit malzemeler, havacılık, uzay, otomotiv ve diğer birçok endüstride yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Bu malzemeler, yüksek elastisite modülü ve mukavemet gibi olağanüstü özelliklere sahip olmalarının yanı sıra belirli uygulamalar için veya belirli zorlama için özelleştirilebilme yetenekleri nedeniyle tercih edilmektedir. Bu çalışmada, cam ve fiber takviyeli dokuma kompozit plakalardan oluşan zırhların sahip olduğu geometrilerin, balistik etkiye karşı olan direnci incelenmiştir. Zırhların farklı geometrileri, eşit kalınlık ve eşit projeksiyon alanına sahip olarak tasarlanmıştır. Zırh tasarımında, eğrilik merkez açısı tasarım parametresi olarak belirlenmiştir. Tek eğrilik merkezine sahip zırhlar ANSYS ACP’de modellenmiş ve ANSYS Explicit Dynamics kullanılarak simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Her farklı hızdaki simülasyonlar için, sınır koşulları ve başlangıç koşulları sabit tutulmuştur. Simülasyonlarda, zırhların katman sayıları, katman kalınlıkları, katman sıraları, mermi geometrisi, mermi ağırlığı ve mermi-zırh mesafesi gibi parametreler aynı olarak belirlenmiştir. Simülasyon çıktıları arasında, merminin zırhtan ayrılma hızları ve zırh yüzeyinde oluşan kuvvetler yer almaktadır. Bu çıktılar, zırhların karşılaştırılması ve performans analizi için kullanılmıştır. Buna göre, eğri zırhların birçoğu, birçok farklı hızda düz plakaya kıyasla balistik etkiye karşı daha dayanımlı olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgular, katmanlı kompozit zırhların geometrik özelliklerinin enerji emilimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve eğrilik merkez açısının zırh tasarımında optimize edilmesinin performans artışı sağlayabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler – Katmanlı Kompozit Malzemeler; Zırh Teknolojisi; Balistik; Sonlu Elemanlar Yöntemi; Çarpma

I. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, farklı malzemelerin birleştirilerek yeni özellikler kazandırılan malzemelerdir. Balistik dayanıklılık, malzemenin kurşun, şarapnel ve yüksek hızlı nesnelere etkilerine karşı dayanma yeteneğini ifade eder. Kompozit malzemeler, farklı özelliklere sahip malzemelerin birleştirilmesiyle balistik dayanıklılığı artıracak şekilde tasarlanabilir. Bu malzemeler, savunma endüstrisinde balistik koruma ekipmanlarının tasarımında önemli bir rol oynamaktadır.

Son yıllarda, kompozit malzemelerin balistik performansını artırmak için birçok gelişme kaydedilmiştir. Bileşen sayısının artırılması, malzemelerin daha etkin bir şekilde bir araya

getirilmesi ve yeni bileşenlerin kullanımı gibi farklı yaklaşımlar bu gelişmelere örnek olarak gösterilebilir. Bu gelişmeler, balistik koruma ekipmanlarının performansını iyileştirmekte ve savunma endüstrisinde yeni fırsatlar yaratmaktadır.

A. Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler

Fiber takviyeli polimer (Fiber Reinforced Polymer) kompozit malzemeler, ticari ve askeri uygulamalarda yaygın olarak kullanılan [1,2] ve yüksek sertlik-ağırlık oranı, mukavemet, korozyon direnci, darbe direnci ve enerji emme kapasitesi gibi avantajlara sahip malzemelerdir [3]. Darbe hasarına eğilimli alanlarda kullanımları özellikle dikkate değerdir [4]. FRP kompozit panellerin zayıf noktalarından biri, zırh delmeye karşı

savunmasız olmalarıdır [5]. Bu nedenle, lamine kompozit destekli sert yüzeyli paneller kullanılır [6,7]. Cam/epoksi lamina kompozitler, yüksek mukavemeti ve sertliği nedeniyle iyi bir balistik dirence sahiptir [8]. Cam/epoksi katmanlı kompozit malzemeler, vücut zırhı, kasklar ve araç zırhı gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Balistik direnci artırmak için malzeme kalınlığı, fiber yönelimi optimizasyonu, fiber istiflenme optimizasyonu, cam elyafının mukavemeti ve özel kaplamalar gibi stratejiler kullanılabilir [9,10]. Bu stratejiler, cam/epoksi katmanlı kompozit malzemelerin balistik koruma potansiyelini optimize etme amacı taşır [11].

II. MATERYAL VE YÖNTEM

A. Nümerik Yöntemler

ANSYS AUTODYN, askeri ve sivil amaçlar için tasarlanmış ve çarpma konusunda özelleştirilmiş bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Bu program, patlama, penetrasyon, parçacık etkisi, şok gibi non-linear problemlerin başarılı bir şekilde çözümünde kullanılır. Program, dinamik problemleri sonlu elemanlara böler ve zaman adımlarına ayırarak çözer. Her zaman ve her zamana bağlı adımında Tablo 1. ve Tablo 2.'deki kütle, momentum ve enerji korunumu kanunları her bir birim elemana uygulanır [12].

Tablo 1. Lagrange Yaklaşımı Korunum Kanunları

Korunum Kanunları	Lagrange Yaklaşımı
Kütle	$\frac{dp}{dt} + \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0$ (1)
Momentum	$\frac{dv_i}{dt} = f_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i}$ (2)
Enerji	$\frac{dE}{dt} = -\frac{p}{\rho} \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \dot{\epsilon} S_{ij}$ (3)

Tablo 2. Euler Yaklaşımı Korunum Kanunları

Korunum Kanunları	Euler Yaklaşımı
Kütle	$\frac{dp}{dt} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} = 0$ (4)
Momentum	$\frac{dv_i}{dt} + v_i \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = f_i + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i}$ (5)
Enerji	$\frac{\partial E}{\partial t} + v_i \frac{\partial E}{\partial x_i} = \frac{p}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{\rho} \dot{\epsilon} S_{ij}$ (6)

B. Problem Tanımı

Zırh geometrisinin balistik dayanıma etkisinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda;

- Kompozit zırhların projeksiyon alanları
- Kompozit zırhlarda kullanılacak malzemeler (Tablo 3.)
- Kompozit zırhın katmanlarının kalınlıkları ve istiflenme sırası
- Mermi geometrisi
- Kompozit zırhların sınır şartları
- Zırhın ve merminin modellenmesinde kullanılan mesh yapısı ve miktarı

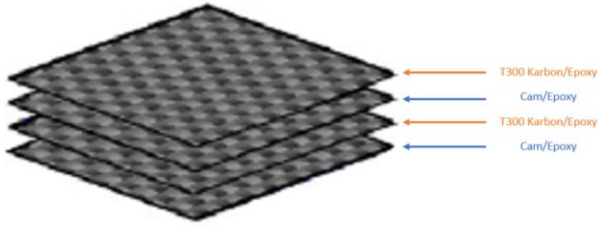
Gibi parametreler, sabit ve tüm tasarlanan zırhlarda eşit olarak uygulanmıştır.

Tablo 3. Cam/epoxy ve T300 karbon/epoxy kompozit katmanlarının mekanik özellikleri [13,14]

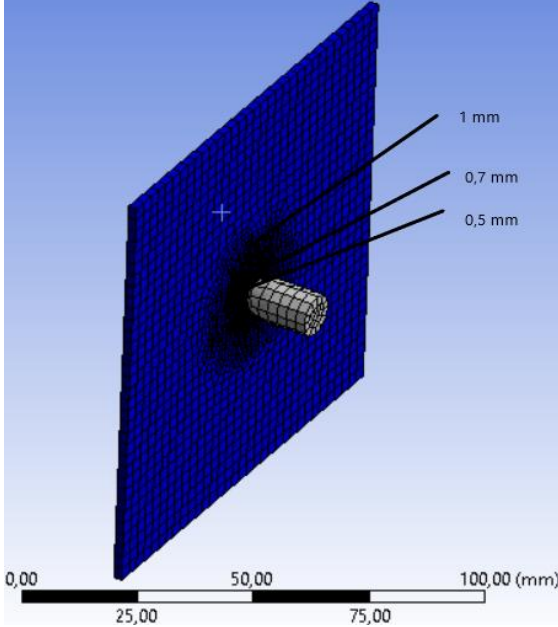
Mekanik Özellikler	Birim	Cam/epoxy	T300 karbon/epoxy
Young Modülü (x)	GPa	48,7	136,7
Young Modülü (y=z)	GPa	16,8	8,2
Poisson oranı (xy=xz)	-	0,28	0,29
Poisson oranı (yz)	-	0,4	0,42
Kayma Modülü (xy=xz)	GPa	5,83	4,45
Kayma Modülü (yz)	GPa	3	2,91
Çekme Dayanımı (x)	GPa	1,17	1,604
Çekme Dayanımı (y=z)	GPa	0,0305	0,0405
Basma Dayanımı (x)	GPa	0,977	1,305
Basma Dayanımı (y=z)	GPa	0,114	0,2397
Kayma Dayanımı (xy=xz)	GPa	0,072	0,084
Kayma Dayanımı (yz)	GPa	0,046154	0,032
Yoğunluk	Kg/m ³	2000	1490

C. Zırh Geometri ve Modelleme

100x100 mm projeksiyon alanına sahip, katman sayısı 4 (Cam/epoxy-T300 karbon/epoxy-cam/epoxy-T300 karbon/epoxy), her bir katmanın kalınlığı 0,5 mm olarak toplam zırhların kalınlıkları 2 mm olarak ve istiflenme sırası Şekil 1.'deki gibi tasarım yapılmıştır. Mermi ise 10 mm çapa ve 16,75 mm uzunluğa, 9,32 gr ağırlığa sahip, malzeme olarak yapı çeliği atanmış ve zırhlardan 0,1 mm uzaklıkta konumlandırılmıştır.

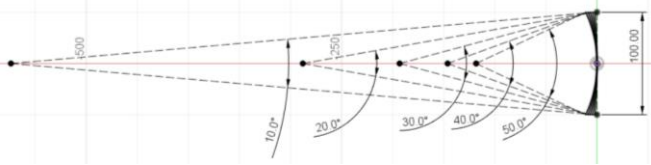


Şekil 1. Kompozit zırhların istiflenme sırası



Şekil 2. Kompozit zırhın ve merminin mesh modeli

Şekil 2.'daki gibi, 10 mm çapındaki merkeze 0,5 mm, 20 mm çapındaki alana 0,7 mm, 30 mm çapındaki kısma 1 mm ve genel olarak 3 mm mesh atanmıştır.



Şekil 3. Merkez açısına bağlı profiller

Daha sonra merkez açıları ile değişen yüzeylerden oluşan, düz, merkez açısı 10°, 20°, 30°, 40° ve 50° olarak tasarlanmıştır.

Tablo 4. Tasarlanan zırhların özellikleri

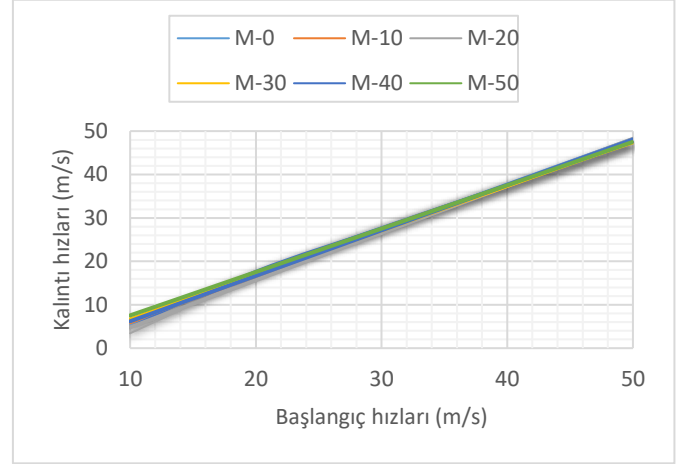
Zırh	Kodu	Ağırlığı (kg)	Mesh miktarı
Düz Plaka	M-0	0,349	2513
Merkez açısı 10°	M-10	0,3494188	2684
Merkez açısı 20°	M-20	0,35072755	2697
Merkez açısı 30°	M-30	0,3529437	2715
Merkez açısı 40°	M-40	0,3560847	2740
Merkez açısı 50°	M-50	0,36018545	2790

Tasarlanan bu zırhlar 4 kenarından sabit mesnetli, mermi ise başlangıç hızları 10, 20, 30, 40 ve 50 m/s ile kompozit zırhın merkez noktalarına atışlar simüle edilmiştir. Bu simülasyonların çıktıları

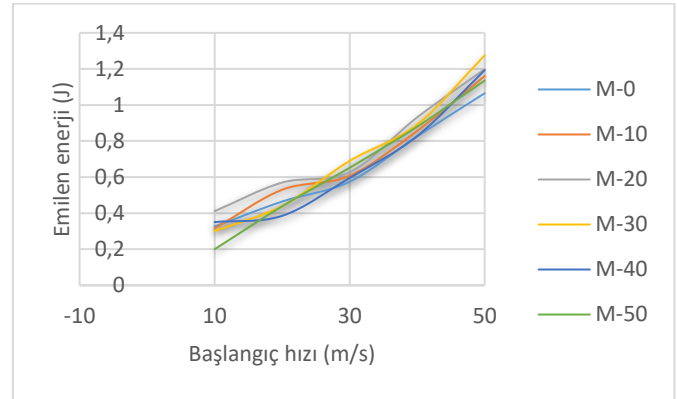
olarak, çıkış hızları ve emilen enerjiler incelenmiştir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tasarlanan zırhlara uygulanan farklı hızlara sahip mermilerin uyguladığı zorlama neticesinde, mermilerin giriş-çıkış hızları grafiği Şekil 4.'de verilmiştir.



Şekil 4. Zırhların başlangıç-kalıntı hız grafiği



Şekil 5. Zırhların başlangıç hızı-emilen enerji

Şekil 5.'te, başlangıç hızları-emilen enerji miktarları verilmiştir. Burada görüldüğü üzere, düz plakaya (referans) göre, eğimli plakalar daha yüksek enerji emilimi göstermektedir. 20 m/s hıza kadar, en yüksek enerji emilimi merkez açısı 20° olan zırhta, 30 m/s üzerinde ise merkez açısı 30° olan zırhta gerçekleşmektedir.

Tablo 5. Zırhların farklı hızlardaki dayanımları

Başlangıç hızı (m/s)	Zırh	Emilen enerji (J)	Referansa göre değişim (%)	Max. Tepki kuvveti (N)
10	M-0	0,325746614	0	681,39
10	M-10	0,314872719	-3,338	607,45
10	M-20	0,41096758	+26,162	1111,7
10	M-30	0,300447124	-7,767	1189,4
10	M-40	0,350448701	+7,583	949,87

10	M-50	0,199791035	-38,667	664,13
20	M-0	0,464467326	0	600,92
20	M-10	0,529905376	+14,089	821,29
20	M-20	0,569659109	+22,648	564,22
20	M-30	0,43980929	-5,309	630,07
20	M-40	0,385202143	-17,066	640,68
20	M-50	0,438179502	-5,660	374,4
30	M-0	0,57466579	0	494,97
30	M-10	0,607060362	+5,637	622,06
30	M-20	0,626942937	+9,097	577,44
30	M-30	0,689838049	+20,042	715,37
30	M-40	0,595674081	+3,656	484,78
30	M-50	0,651911166	+13,442	591,5
40	M-0	0,826111002	0	368,55
40	M-10	0,856309069	+3,655	694,06
40	M-20	0,931502666	+12,758	434,77
40	M-30	0,891686228	+7,938	548,89
40	M-40	0,827517091	+0,170	437,23
40	M-50	0,879437581	+6,455	639,08
50	M-0	1,065367891	0	398,41
50	M-10	1,16109376	+8,985	469,47
50	M-20	1,198644436	+12,510	530,62
50	M-30	1,275302871	+19,705	791,17
50	M-40	1,193347246	+12,013	627,45
50	M-50	1,135875	+6,618	927,79

Tablo 5, Şekil 4 ve 5'te yapılan simülasyonların sonuçları verilmiştir. Tablo 5'te zırhların balistik etkiye karşı olan dayanımları, referans zırh ile kıyaslanmıştır. Özellikle 30 m/s ve üzerindeki hızlarda, eğimli zırhların tümünün dayanımları referans plakanın dayanımının üzerine çıkmıştır. 10 ve 20 m/s hızlarda ise, tüm eğimli zırhlar referans düz plakadan daha yüksek miktarda enerji emmemiştir. Referans plakaya nazaran, bazı çarpmalarda %20 iyileşmiş performanslar görülmektedir.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, düz ve merkez açısına bağlı olarak tasarlanan eğimli plakaların farklı darbe hızlarına karşı davranışları incelenmiştir. Yapılan simülasyonların sonuçları, çıkış hızları ve absorbe edilen enerji miktarları bakımından karşılaştırılmıştır. Çalışma şu maddelerce özetlenebilir:

- 50 derece ve altında merkez açısına sahip eğimli zırhlar, düz plakaya nazaran balistik dayanımı daha yüksektir.
- Her zırhın, farklı hızlarda farklı performansı vardır. 30° merkez açısına sahip zırh, 10 ve 20 m/s hızlarda, en kötü

dayanımı verirken, daha yüksek hızlarda daha yüksek enerji emilimi gerçekleştirmiştir.

- Eğimli zırhlar, düz plakadan daha yüksek tepki kuvvetleri oluşturmuştur.
- Eğimli plakaların hasar alanı, düz plakaya nazaran daha yüksektir. Daha fazla malzemenin koparılması, merminin daha yüksek enerji kaybetmesine neden olmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] A.K. Bandaru, L. Vetiyatil, S. Ahmad "The effect of hybridization on the ballistic impact behavior of hybrid composite armors," *Composites Part B: Engineering*, vol. 76, pp.300–319, 2015.
- [2] I. Goda, G. L'Hostis, P. Guerlain, "In-situ non-contact 3D optical deformation measurement of large capacity composite tank based on close-range photogrammetry," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 119, pp. 37–55, 2019.
- [3] F.S. Wang, Y.Y. Ji, X.S. Yu, et al., "Ablation damage assessment of aircraft carbon fiber/epoxy composite and its protection structures suffered from lightning strike," *Composite Structures*, vol. 145, pp. 226–241, 2016.
- [4] S.N.A. Safri, M.T.H. Sultan, M. Jawaid, et al., "Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review," *Composites Part B: Engineering*, vol. 133, pp. 112–121, 2018.
- [5] W. Liu, Z. Chen, Z. Chen, et al., "Influence of different back laminate layers on ballistic performance of ceramic composite armor," *Materials & Design*, vol. 87, pp. 421–427, 2015.
- [6] D.B. Rahbek and B.B. Johnsen, "Fragmentation of an armour piercing projectile after impact on composite covered alumina tiles," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 133, pp. 103332, 2019.
- [7] R. Zaera, "Ballistic impacts on polymer matrix composites, composite armor, personal armor," in *Impact Engineering of Composite Structures*, vol. 526, pp. 305–403, 2011.
- [8] Y. Bai, Z. Jin, and J. Wang, "Damage tolerance of glass/epoxy composites under impact loading," *Composites Part B: Engineering*, vol. 94, pp. 186–194, 2016.
- [9] V. V. Bondrya, V. V. Bondarenko, and A. V. Bondarenko, "Investigation of the impact damage of glass fiber reinforced epoxy composites," *Materials Science and Engineering A*, vol. 644, pp. 317–323, 2015.
- [10] S. Goda, T. Takagi, and K. Ueda, "Impact damage tolerance of glass/epoxy composites with functionally graded interlayers," *Composites Part B: Engineering*, vol. 169, pp. 106–116, 2019.
- [11] S. J. Park and J. H. Seo, "Impact damage behavior of glass fiber reinforced polymer composites: A review," *Composites Part B: Engineering*, vol. 43, no. 12, pp. 2801–2814, 2012.

- [12] D. Fiserova, "Numerical Analyses Of Buried Mine Explosions With Emphasis On Effect Of Soil Properties On Loading," Phd Thesis, Defence College Of Management And Technology, Cranfield University, 2006.
- [13] Z. Song, Y. Zhou, and X. Wu, "Fatigue life prediction of composite laminates by fatigue master curves," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 6, pp. 6094-6105, 2019.
- [14] A.R. Satkar, A. Mache, and A. Kulkarni, "Numerical investigation on perforation resistance of glass-carbon/epoxy hybrid composite laminate under ballistic impact," *Materials Today: Proceedings*, vol. 59(1), pp. 734-741, 2022.