



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 24.05.2024
Kabul Tarihi : 01.08.2024

Received Date : 24.05.2024
Accepted Date : 01.08.2024

HARDOX 450, ALUMİNYUM BALPETEĞİ VE ARAMİD/EPOKSİ TABAKALI HİBRİT ZIRH PLAKALARININ BALİSTİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF BALLISTIC BEHAVIOR OF HARDOX 450, ALUMINIUM HONEYCOMB AND ARAMID/EPOXY LAYER HYBRID ARMOUR PLATES

Mehmet ÖZER¹ (ORCID: 0000-0002-6212-1217)

Kaan FERİKEL² (ORCID: 0000-0009-0006-1616-0174)

İbrahim Kutay YILMAZÇOBAN² (ORCID: 0000-0000-0002-9886-5533)

Tayfur Kerem DEMİRCİOĞLU^{3*} (ORCID: 0000-0002-0518-0739)

Fatih BALIKOĞLU³ (ORCID: 0000-0000-0003-3836-5569)

Can ÇİVİ⁴ (ORCID: 0000-0002-5302-9072)

¹ Balıkesir Üniversitesi, Bigadiç Meslek Yüksekokulu, Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, Balıkesir, Türkiye

² Sakarya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

³ Balıkesir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, Türkiye

⁴ Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Manisa, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Tayfur Kerem DEMİRCİOĞLU, tkerem@balikesir.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, Hardox 450 çeliği, Aramid /epoksi laminat kompozit ve Alüminyum bal peteği malzemelerinden oluşan tekli ve çoklu hibrit zırh yapılarının balistik performansı araştırılmıştır. Test levhalarına 833 ± 15 m/s namli çıkış hızına sahip 7.62 tam metal kaplama mermi ile deneysel balistik testler gerçekleştirilmiştir. Balistik test uygulanacak levhalar 250×250 mm boyutlarına sahip olup kalınlıkları ise malzeme konfigürasyonuna göre farklılık göstermiştir. Test levhaları dört kenarından sabitlenmiştir. Balistik darbe levhanın vurma yüzeyine dik gelecek şekilde atış yapılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, vurma yüzeyine göre sırasıyla 4 mm Hardox 450, 24 kat Aramid /epoksi laminat kompozit ve 10 mm Alüminyum bal peteğinden oluşan hibrit zırh yapısı darbe enerjisine balistik direnç gösterememiştir. Öte yandan tekli yapı olarak kullanılan 6 mm Hardox 450 zırh plakası darbe enerjisine balistik direnç sergilemiştir. Sonlu elemanlar analizi LS-Dyna programında açık zaman entegrasyonu yöntemi ile yapılmış; arka yüzey çöküntü miktarı ve sönmülenen enerji miktarları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Balistik darbe, ls-dyna, hardox, alüminyum bal peteği, aramid

ABSTRACT

In this research, the ballistic performance of single and multiple hybrid armour systems made of Hardox 450 steel, Aramid/epoxy laminate composite, and aluminium honeycomb materials was studied. Ballistic testing was conducted on test plates using 7.62 full metal jacket bullets at a muzzle velocity of 833 ± 15 m/s. The sheets for ballistic testing are 250×250 mm and vary in thickness based on material configuration. Test plates have been fixed on four sides. The ballistic impact was achieved by firing perpendicular to the plate's striking surface. In experimental experiments, the hybrid armour design consisting of 4 mm Hardox 450, 24 layers of Aramid/epoxy laminate composite, and 10 mm Aluminium honeycomb, depending on the impacting surface, could not demonstrate ballistic resistance to impact energy. On the other hand, the 6 mm Hardox 450 armour plate used in a single structure showed ballistic resistance to impact energy. Finite element analysis was carried out using the open-time integration method in LS-Dyna software; the amount of back face signature and absorbed energy values were compared.

Keywords: Ballistic impact, ls-dyna, hardox, aluminium honeycomb, aramid

ToCite: ÖZER, M., FERİKEL, K., YILMAZÇOBAN, İ.K., DEMİRCİOĞLU, T.K., BALIKOĞLU, F., & ÇİVİ, C., (2024). HARDOX 450, ALUMİNYUM BALPETEĞİ VE ARAMİD/EPOKSİ TABAKALI HİBRİT ZIRH PLAKALARININ BALİSTİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4), 1621-1632.

GİRİŞ

Askeri araçların savaş ortamında görevlerini icra etmeleri sırasında çok çeşitli tehditlere maruz kalırlar. Araç içindeki personelin tehlikeye karşı korunması balistik sınırlama malzemeleri (zırhlar) ile sağlanabilir. Bu koruma niteliği, aracın cinsine, görev özelliğine ve içinde bulunan personel ve faydalı ekipmana göre değişir. Askeri araç koruma amacıyla çok çeşitli malzemelerin kullanıldığı bilinmektedir. Bu malzemeler genellikle çelik, kompozit, kumaş, seramik malzemeler ve bunların kombinasyonlarından oluşan hibrit zırh yapılarıdır. Aracın manevra kabiliyeti için koruyucu malzemenin ağırlığı ve kalınlığı büyük önem taşımaktadır. Aracın toplam ağırlığının artması, motor performansını ve taşınacak faydalı yük miktarını azaltacaktır. Patlama etkisi ve darbelere karşı korunmada zırh çeliklerinin, kritik öneme sahip malzemelerdir ve bu alanda lider konuma sahip oldukları bilinmektedir (Hazell, 2022; Poplawski vd., 2020; Lenihan vd., 2019)

Literatürde çelik zırhların balistik performansları detaylı şekilde incelenmiştir. Hub ve Kneys (2013), Hardox 450 çeliği, alüminyum alaşımı Al 7039 ve titanyum alaşımı Ti-6Al-4V plakalarının 7.62×54R mermisine karşı balistik direncini, Ansys Autodyn programında sayısal simülasyonlar yoluyla incelemiştir. Analizi, hedefin tamamen delinmesini önlemek için balistik sınır kalınlığını tahmin etmek için kullandığını belirtmiştir. HARDOX 450 ve Ti-6Al-4V kalınlık açısından birbirine çok benzer çıkmıştır; fakat alüminyum alaşımı Al 7039 levhalarda ise HARDOX 450 ve Ti-6Al-4V malzemelerine kıyasla sırasıyla 2.5 ve 2.9 daha fazla kalınlığa gereksinim duyulmuştur. Hardox 450 malzemesinin alan ağırlığı Ti-6Al-4V malzemesine göre 2 kat, Al 7039 malzemesine göre ise 1.8 kat daha yüksek olduğunu vurgulamıştır. En düşük alan ağırlığına sahip olan Ti-6Al-4V malzemesinin aynı zamanda en düşük kalınlığa da sahip olduğu belirlenmiştir. Bu koruyucu malzemenin uçak kokpit alanına ilave edilmesinin kokpitin iç alanının azaltılmasında olumlu etki yapacağını ifade etmiştir. Hub ve Komenda (2009), 10 mm kalınlığındaki Hardox 450 sac levhasının, 6500 J darbe enerjisine sahip mermilerin dik ve hafif eğimli doğrultudaki darbesine karşı balistik direncini araştırmıştır. Ayrıca Hardox 450 sacının balistik darbe davranışını Ansys Autodyn v11.0 yazılımında iki boyutlu simetrik yarı-modelin neticeleri ile karşılaştırmıştır. 10 mm kalınlıktaki plakanın, 3000 J ile 4000 J (kalibreye bağlı olarak) darbe enerjisine sahip dik gelen mermiler ile 6500 J'e kadar eğimli gelen mermilere karşı balistik koruma sağlamıştır. Børvik vd. (2009), çalışmada farklı yüksek mukavemetli çeliklerin delinme direncini belirlemiş ve birbirleriyle karşılaştırmıştır. Kullanılan alaşımlar Weldox 500E, Weldox 700E, Hardox 400, Domex 500 ve Armox 560T çelikleridir. Zırh plakalarının delinme direncini belgelemede Avrupa normu EN1063'e göre iki farklı balistik koruma sınıfını dikkate aldıklarını ifade etmişlerdir. Bunlar BR6 (7.62 mm bilyeli mermilere karşı koruma için) ve BR7'dir (7.62 mm AP mermilere karşı koruma için), burada mermilerin çarpma hızı her iki durumda da yaklaşık 830 m/s'dir. Ayrıca, her iki koruma sınıfına ait gereklilikleri karşılayan çeliklerin 2×6 mm kalınlığında zırh çelikleri Domex Koruma 500 ve Armox 560T olduğu bulunmuştur. 6 mm ve 2×6 mm kalınlığa sahip Weldox 500E, Weldox 700E ve Hardox 400 yapısal çelikleri ise, BR6 veya BR7 için şartları sağlayamamış ve EN1063 spesifikasyonlarını karşılamak için kalınlıklarının artırılması gerektiği vurgulanmıştır. Farklı mermilerin ayrıntılı modellerini içeren doğrusal olmayan 2 boyutlu aksel simetrik sonlu eleman modelleri hazırlanmıştır. Mermilere ilişkin malzeme verileri literatürden alınmış, Johnson-Cook ve Cockcroft-Latham kırılma kriterleri kullanılmıştır. Sert çekirdekli zırh delici mermiler için Ls-dyna Lagrangian formülasyonu kullanıldığında simülasyonlar ile deneysel veriler arasında genel olarak iyi bir uyum elde edildiği sonucuna ulaşmışlardır. Bekci vd. (2021), Ramor 500 ve Ramor 550 zırh çeliği plakalarının balistik performanslarını 7.62 mm' lik mermiye karşı çeşitli koşullarda deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Yekpare levha, çift katmanlı levha ve eğik levha olmak üzere deneysel çalışmada üç farklı konfigürasyon kullanılmıştır. 6.7 mm kalınlığında Ramor 500 ve 6.2 mm kalınlığında Ramor 550 monolitik plakalar testlerde başarısız olmuştur. Çift katmanlı test levhalarında ise yüz plakası olarak Ramor 550 olan yapı daha iyi balistik direnç göstermiştir. Çarpma açısı arttıkça plakaların balistik direncinin arttığı sonucu raporlanmıştır. Mohotti vd. (2011) çalışmada BR7 EN 1063 Avrupa normuna göre farklı şekilli mermilerin kalın çelik plakalarda neden olduğu penetrasyon değerlerini araştırmışlardır. Sayısal simülasyonlar için LS-Dyna da bulunan Johnson-Cook malzeme model kartı ile Lagrangian yöntemlerini kullanmıştır. APM2 mermisi ile delinen 6 mm kalınlığında Weldox 460E plakası için balistik sınır eğrisi elde ettiğini belirtmiş, aynı zamanda sayısal ve deneysel testlerde elde ettiği bulguları karşılaştırmıştır. Abdullah vd. (2020), zırhlı araç uygulaması için yüksek mukavemetli çelik ve alüminyum alaşımından oluşan birleştirici hafif metal lamine panelin balistik performansını araştırmışlardır. Ar500 ve Al7075-T6 malzemeleri, %20-30 ağırlık azalmasını sağlamak için lamine panel tasarımı için seçilmiştir. Malzemelerin birleştirmesi için hem lehim yöntemi hem de yapıştırma yöntemi kullanılmıştır. Poliüretanla yapıştırıcı uygulaması lamine panelin balistik performansını ve lamine panelin mermiyi durdurması için gereken sürenin artmasını sağlamıştır. Senthil ve Iqbal (2021), Armox 500T, yumuşak çelik ve Al 7075-T651 levhaların tabakalı konfigürasyonlarının 7.62 AP mermilerine karşı normal ve eğik atışlarda balistik performansını

incelemiştir. En iyi konfigürasyon olarak, üst katmanda düşük süneklik- yüksek mukavemetli ArmoX 500T, orta katman ve alt katmanda ise yüksek süneklik-düşük mukavemetli Al 7075-T651 veya orta mukavemet-orta sünek yumuşak çelik kullanılması önerilmiştir.

Araştırmacılar çelik zırh malzemeleri, seramik (SiC, B₄C, Al₂O₃), ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (Dyneema®) ve aramid (Kevlar®) gibi farklı malzemeler ile oluşturulan çok katmanlı tabakalı malzemelerin balistik darbe dirençlerini de incelemiştir. Peng vd. (2022), SiC, B₄C seramik katmanları, Dyneema®, aramid (Kevlar®) ve sıkıştırılmış ahşap malzemeler ile geliştirilen hibrit tabakaların 7.62 mm mermi tehdidi karşısında balistik dirençlerini karşılaştırmışlardır. Test numuneleri 806 ile 887.5 m/s hız aralığında 7.62 mm (×39 mm) mermilerle saha balistik testlerine tabi tutulmuştur. Balistik sonuçlara göre, B₄C-Dyneema kompozit panel en düşük alan yoğunluğu ve kalınlığıyla en iyi balistik performansı sağlamıştır. Sıkıştırılmış ahşap malzemenin ise hafif malzemelerden biri olmasına rağmen balistik performansı ve enerji emilimi zayıf olduğu gözlemlenmiştir. Palta vd. (2018) çalışmasında, Weldox 700E çeliği ve Kevlar 129/epoksi plakalarının doğrusal olmayan sonlu eleman (Fe) modellerini oluşturmuş aynı zamanda sayısal verileri deneysel verilere karşılaştırmıştır. NATO Seviye I veya EN1063 BR5 standartlarına uygun şekilde, monolitik çelik plakaların, çok katmanlı çelik plakaların ve çelik ve Kevlar hibrit plakaların balistik performansını araştırmak için sayısal modellerin kullanıldığı parametrik çalışma hazırlanmıştır. Çift katmanlı çelik plakalar için, arka katmanı daha kalın olanın, daha ince arka katmanı olanlara göre daha fazla balistik dirence sahip olduğu görülmüştür. Aynı çelik katman kalınlığına sahip çift katmanlı hibrit plakalar için, arka katmanda Kevlar kullanılan plakanın daha iyi korumaya sahip olduğu ve daha verimli olduğu raporlanmıştır. Üç ve dört katmanlı plakalar için çelik-Kevlar-çelik konfigürasyonu, tüm çok katmanlı hibrit plakalar arasında en başarılısı olmuştur. Tek Kevlar katmanı kullanılmasının, iki Kevlar katmanının kullanılmasından daha iyi balistik koruma sağladığı gözlemlenmiştir. Kraus vd. (2019), çalışmasında Kevlar cep içerisinde çelik ve seramik plakaları yerleştirerek oluşturdukları heterojen yapının balistik darbe karşısında etkileşimini sayısal olarak incelemişlerdir. Ulaştıkları sonucu, doğrudan sayısal simülasyon temelinde, çelik+B₄C zırh plakasının en iyi ağırlık ve boyut parametrelerine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Kartıkeya vd. (2022), çelik/ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) kompozit zırh sistemini, 7.62 × 39 mm sertleştirilmiş çelik çekirdek (HSC) mermisine karşı balistik olarak test etmiştir. 3 mm kalınlığında yüksek sertlikteki çelik (HHS) levhaya sahip çelik/UHMWPE kompozit yapı, 700 m/s hızla ateşlenen 7.62×39 mm HSC mermilerine karşı koruma sağlamıştır. Daha düşük kalınlıktaki HHS levhalara sahip hibrit sistem tutarlı sonuçlar sağlayamamıştır. Literatürde, bal peteği yapıları kullanımı artık hızı, kinetik enerjiyi ve hasar alanını azaltarak sandviç yapının balistik darbe tepkisine önemli bir katkı sağlamıştır. Alüminyum bal peteği yapılarının balistik performansları sandviç kompozit yapılarda araştırılmıştır (Khaire vd., 2023; Rathod vd., 2022; Gunes vd., 2019; Zhang vd., 2018; Arslan vd., 2017). Bu çalışmada ise, bal peteği malzemesi zırh çeliği ve kompozit laminat tabakalar ile kullanılmasının enerji sönmeme kabiliyetine katkısı incelenmiştir.

Bu çalışmada, 7.62x51 mm ful metal ceket (FMJ) mermisine karşı koruma sağlayan tek bileşenli 4 mm ve 6mm kalınlığında Hardox 450 zırh çeliği plakaları ile bunun yanında 4 mm Hardox 450 zırh çeliği plakasının aramid-epoksi kompozit ve alüminyum bal peteği malzemeler ile hibritleşmesi sağlanmıştır. Çalışmanın amacı 6 mm Hardox 450 çelik plakasının ağırlığından daha hafif, 4 mm Hardox 450 çeliği içeren ikili hibrit (yani, 4 mm Hardox 450 ve aramid-epoksi kompozit) ve üçlü hibrit (4 mm Hardox 450 ve aramid-epoksi kompoziti ve Alüminyum bal peteği) zırh yapılarını üretmek ve balistik davranışlarını belirlemektir. Zırh yapılarının ayrı ayrı balistik performansları araştırılmıştır. Bu bağlamda çalışmanın deneysel ve sayısal açıdan uyumlu olduklarının doğrulanması ve kalınlık artışına bağlı olarak delinme/sehim ve artık hız değişimi sunulmuştur.

MATERYAL VE METOT

Malzeme

Balistik teste tabi tutulan zırh çeliği malzemesi İsveç- SSAB firmasından temin edilmiştir (SSAB, 2024). SSAB firmasının ürün kataloğunda Hardox 450' nin mekanik özellikleri 420 – 475 HBW sertlik değeri, 1200 MPa akma dayanımı, 1400 MPa çekme dayanımı ve 35J /- 40°C darbe enerjisine sahip olduğu belirtilmiştir. Balistik teste tabi tutulan zırh çeliği plaka 250×250×4 mm ve 250×250×6 mm boyutlarındadır. Tablo 1' de Hardox 450' nin kimyasal kompozisyonu, Tablo 2' de ise temel mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Hardox 450' deki Maksimum Alaşım Elementi İçeriği (SSAB, 2024)

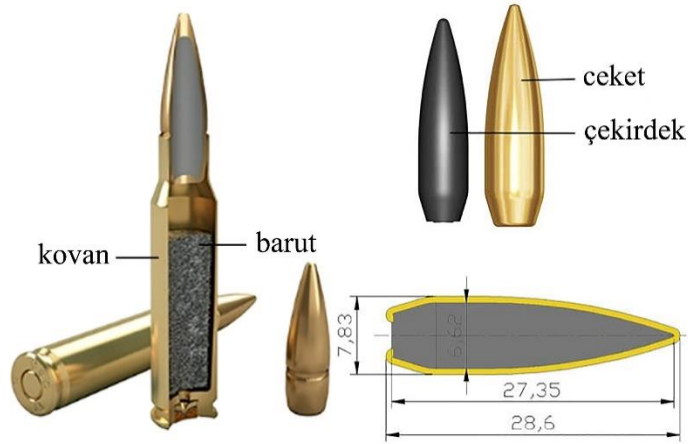
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
0.26%	0.70%	1.60%	0.025%	0.010%	1.40%	1.50%	0.60%	0.005%

Tablo 2. Hardox 450 Temel Mekanik Özellikleri (Hub ve Komenda, 2009)

Özellikler	Sembol	Birim	Değer
Sertlik	HBW	-	420-475
Darbe tokluk at -40 °C (Charpy)	KV	J	35
Akma dayanımı	$R_{p0,2}$	MPa	1200
Çekme dayanımı	R_m	MPa	1400
Uzama	A_5	%	10

Not: A_5 (ekstansometre aralığı 5 mm)

Yapılan çalışmada, NIJ STD-0108.01 Seviye III (Stewart, 1985) testlerinde tercih edilen 7.62x51 mm FMJ (ful metal ceket) mermisi kullanılmıştır. Bu nedenle testler öncesinde mermi hızı, kovan içindeki barut miktarı ile ayarlanmış 7.62x51 mm NATO FMJ mermisi için 833 ± 15 m/s hız aralığında tutulmuştur. Şekil 1' de testlerde ve analizde kullanılan 7.62x51 mm FMJ mermisinin resmi verilmiştir. 7.62x51 mm tam metal kaplamalı merminin özellikleri Tablo 3'te gösterilmiştir.

**Şekil 1.** 7.62x51 mm FMJ Mermi ve Boyutları**Tablo 3.** 7.62x51 mm Tam Metal Kaplama (FMJ) Mermisinin Teknik Özellikleri

Kullanılan Mermi	7.62 mm FMJ
Mermi Çekirdek Çapı	7.83 mm
Mermi Çekirdek Ağırlığı	9.60 g
Mermi Kovan Ağırlığı	11.84 g
Mermi Uzunluğu	28.6 mm
Barut Miktarı	2.768±0.005 g

Kevlar 29 veya muadili para-aramid liflerinden dokunmuş kumaş (Twaron CT709), alan ağırlığı 200 g/m^2 olan, balistik kurşungeçirmez yelek imalatında kullanılan, yüksek performanslı, hafif, su-tutmaz aramid elyaf kumaştır. Alüminyum bal peteği panel, alan ağırlığı 5.0 kg/m^2 olan, hücre çapı yaklaşık 9 mm, folyo kalınlığı yaklaşık $50 - 70 \mu\text{m}$, eğilme değeri $21.900 \text{ kNm}^2/\text{m}$, hafif paneldir. Deneysel çalışmada kullanılacak olan zırh plakalarını tanımlayan kodlama, toplam kalınlık ve toplam ağırlık bilgileri Tablo 4' te sunulmuştur. Bu zırh yapılarından 4H24K plakası 6H' ya göre 4.96 kg/m^2 ağırlık avantajı sunmakta öte yandan 4H24K10B plakası 6H' ya göre 1.28 kg/m^2 dezavantaj göstermektedir. Zira elde ettiğimiz bu sonuçlar bizden sonraki araştırmacılara bu konuda fikir vereceğinden literatürde yer alması bizim açımızdan kıymet arz etmektedir.

Tablo 4. Balistik Test Plaka Detayları

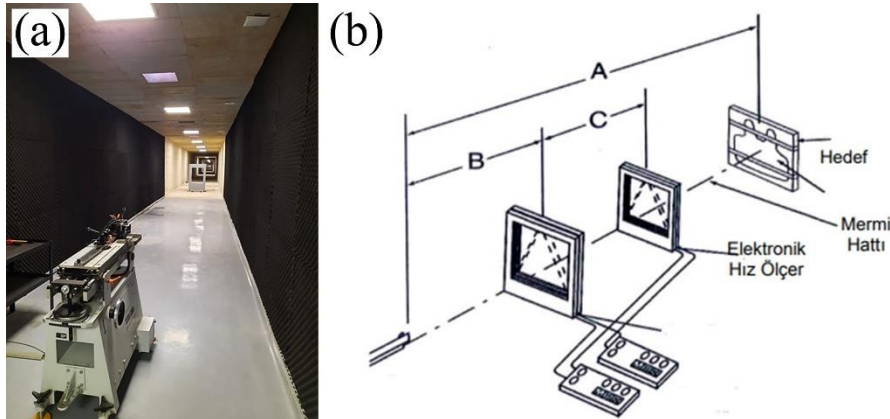
Zırh Plakası	Kod	Toplam Kalınlık (mm)	Toplam Ağırlık (kg/m^2)	Ağırlık Artışı (%)
4 mm Çelik	4H	4	31.20	-
4 mm Çelik+ 24 kat Aramid fiber	4H24K	14.75	41.92	34.3
6 mm Çelik	6H	6	46.88	50.25
4 mm Çelik+ 24 kat Aramid fiber +10 mm Alüminyum bal peteği	4H24K10B	24.75	48.16	54.35

Literatürden elde edilen bilgiler doğrultusunda yüksek sertliğe sahip malzemenin ön tarafa konumlandırılması gerektiği çünkü mermi çekirdeğinin uç geometrisini bozarak mermiyi mümkün olduğu kadar fazla deformasyona uğratarak delme gücünü azaltması şeklinde anlatılmıştır. Öte yandan ikincil zırh olarak ise balistik kompozit malzeme kullanılmasıdır ki bu durum literatürde merminin kinetik enerjisinin mümkün olduğu kadar geniş alana yayılmasını sağlayıp enerjinin absorbe edilmesi amaçlanmaktadır. Zira zırh yapısı içerisinde merminin daha fazla mesafe kat etmesi enerji yayılımı için yüzey temas alanını artırır böylece daha yüksek balistik limite çıkılması sağlanır şeklinde anlatılmıştır. Son olarak arka tarafta nispeten daha güncel malzeme olan Alüminyum bal peteği kullanılmıştır. Bu durum ise merminin öndeki katmanlardan geçmesi halinde kalan enerjisini absorbe etmek maksadıyla kullanılmıştır.

Hibrit hale getirme işlemi için herhangi bir yapıştırıcı kullanılmamıştır. Uygun ölçülerde hazırlanmış olan plakalar daha önce belirtilmiş olan sırayla zırh plakası tutucusu içine sırayla dizilmiş ve plaka tutucu 4 kenarından rijit bir şekilde sabitlenerek balistik test için mermi atışına hazır hale getirilmiştir. Ayrıca aramid-epoksi kompozit plaka üretimi el yatırma yöntemi ile yapılmıştır. Dost Kimya firmasından temin edilen 200 g/m² düz dokuma Kevlar® 29 elyaflar 250×250 mm boyutlarında kesilmiştir. Kompozit plakalar %45.7 elyaf kütle oran değerine sahiptir. MGS Laminasyon Epoksi Setinden (Reçine: L285/Sertleştirici: H285) reçine ve sertleştirici oranı 100:40 olacak şekilde hazırlanan karışım fırça yardımıyla elyaflara kat kat emdirilmiştir. Her kat laminasyonun alüminyum rulo yardımıyla ıslanması ve hava boşluklarının tahliyesi edilmesini sağlanmıştır. Laminat kompozitler kürleşme sonrası 24 saat oda sıcaklığı koşullarında bekletilmiştir.

Balistik Testler

Hardox 450 çeliği zırh plakası balistik testi, Balıkesir ilindeki ZSR A.Ş. firmasında bulunan kapalı atış poligonunda gerçekleştirilmiştir. Hedef plakanın kapalı poligon içerisine yerleşimi NIJ STD-0108.01 Seviye III standardına (Stewart, 1985) uygun olarak Şekil 2b’de belirtildiği gibi konumlandırılmıştır. Ayrıca, 7.62x51 mm M80 FMJ mermisi Prototypa marka atış düzeneğinden atılmıştır. Prototypa marka atış düzeneği Şekil 2a’da verilmiştir. Bunun yanında, hedef plaka, hız ölçerler ve silah arasındaki mesafe durumu ve mermi hızı standart doğrultusunda düzenlenmiştir. Test plakası ve namlu arası mesafe 15 metre olarak belirtilmiştir. Test numunesi, çarpma noktasında merminin uçuş hattına dik olacak şekilde konumunun ve tutumunun kolaylıkla ayarlanmasına olanak tanıyan çelik çerçeve ile desteklenerek dört kenarından sabitlenmiştir. Tam delinme hasar modu oluşmayan numunede arka yüzey deformasyonu derinlik kumpası ile belirlenmiştir.



Şekil 2. a. ZSR A.Ş. Firmasında Kapalı Poligonda Bulunan Prototypa Marka Atış Düzeneği b. Şematik Test Standardı (NIJ-0108.01) (Stewart, 1985)

SONLU ELEMENLAR ANALİZİ

Çözüm Metodu

Sonlu elemanlar analizi LS-Dyna programında gerçekleştirilmiştir. Numerik Analizin tamamı LS-Prepost programında hazırlanmıştır. Açık (explicit) zaman entegrasyonu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözümler yapılmıştır. 7.62x51 mm FMJ M80 mermi, 4 mm Hardox 450 zırh çeliği, 24 kat aramid /epoksi laminat kompozit ve 10 mm Alüminyum bal peteği katmanlarından oluşmuş hibrit kompozit zırh plakası sonlu elemanlar modeli görüntüsü Şekil 3b’ de verilmiştir. Programın yaptığı “Adım-Süresi” hesabı, temas ilişkisinin daha iyi çalışması için 0.85 faktörü ile CONTROL_TIMESTEP kartı ile küçültülmüştür. Ayrıca “HOURGLASS” enerjileri ve CONTROL_ENERGY kartı eklenerek hesaba katılmıştır.

Temas İlişkisi

Penetrasyon sırasında mermi bileşenleri ve hedefler arasındaki teması programa tanımlamak için ERODING_SURFACE_TO_SURFACE seçilmiştir. Hedeflerin ve mermilerin kendi içlerindeki temas ilişkisi ile ERODING_SINGLE_SURFACE temas algoritmaları kullanılmıştır. "ERODING" temas algoritmasının seçilmesinin sebebi, temasta bulunan yüzeyler deforme oldukça veya aşındıkça, temas yüzeylerinin algoritma içinde güncellenmesidir. Ayrıca temas kartları içerisinde, opsiyonel olan SOFT seçeneği 2 (Pinball teması segmentlere dayalı tepki formülü) olarak seçilmiştir. Doğruluğu arttırmak için, temasa giren her bir parça arasındaki, seçilen temas ilişkisinde kullanılması gereken "adım-süresi" ve "temas-rijitliği" elle hesaplanıp programa tanımlanmıştır. Deneysel çalışmaların sonucunda, kevlar katlar arasında delaminasyon oluşmadığı göz önünde bulundurularak, katlar arasındaki laminasyon ilişkisinin tanımlanması için TIED_SURFACE_TO_SURFACE temas algoritması kullanılmıştır. Laminasyon temas ilişkilerinde SOFT seçeneği varsayılan (0) olarak seçilmiştir.

Eleman Ağı Yapısı (Mesh)

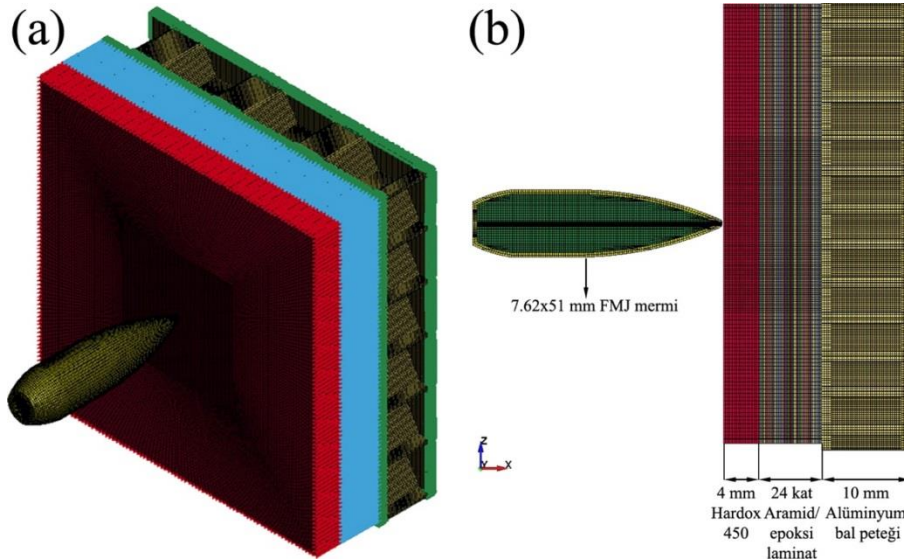
Eleman ağı (Mesh) bahsedildiği üzere LS-Prepost programında hazırlanmıştır. Sayısal modellerin ağ yapısı detayları Tablo 5'te verilmiştir. Hedef plakaların (Hardox 450 ve Kevlar) deformasyonunun asıl gerçekleştiği alanda daha sıkı bir ağ yapısı kullanılmış ve asıl deformasyon bölgesinden uzaklaştıkça eleman boyutu büyütülmüştür. Bu sayede işlem gücü ihtiyacı, sistem gereksinimleri ve işlem süresi ihtiyaçları düşürülmüştür. Diğer tüm parçalar gibi kevlar da katı olarak modellenmiş ve malzeme modeli detayından 0-90 açılı tanımlanmıştır. Bal peteği yapısında, yapının iç kısmında duvar genişliği 0.2 mm olduğu ve düzgün altı yüzlü eleman yapısı (Hexahedral) korunmak istediği için, tamamen 0.2 mm eleman boyutu sabit olacak şekilde ağ yapısı oluşturulmuştur. Mermi bileşenlerinin ağ yapısında, son derece yüksek oranda tamamen düzgün altı yüzlü eleman yapısı kullanılmıştır.

Tablo 5. Sonlu Elemanlar Analiz Detayları

Katman	Eleman Boyutu	Eleman Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı
Hardox 450	0.25-0.625	276480	296497
Kevlar Tek Kat	0.25-0.625	17280	34882
Kevlar 24 Kat	0.25-0.625	829440	1674336
Bal Peteği	0.2	802730	1073217
Kurşun Çekirdek	0.25-0.07 (Köşelerde)	75075	75441
Bakır Ceket	0.25	14560	21843

Sınır Koşulları

Deneysel çalışmalarda kullanılan plaka tutucu düzeneğine uygun olacak şekilde her hedef plakanın dört (4) kenar yüzeyleri, her serbestlik derecesinden tutulup tamamen sabitlenmiştir (Şekil 3a). Merminin çarpma doğrultusundaki hibrit plaka dizilimine ait sayısal model kesiti Şekil 3b'de verilmiştir. Sonlu elemanlar modelinde mermi ağırlığı 9.60 gramdır.



Şekil 3. Sayısal Modelin Ayrıntıları a. Serbestlik Derecesi Sıfırlanan Noktalar b. Kesit Görüntüsü

Malzeme Modelleri

Hardox 450 çelik plaka modeli olarak, şekil değiştirme hızının dinamik olarak değiştiği durumlarda (Hyper-Velocity çarpışmalar gibi) şekil değiştirme hızından etkilenmeden yüksek doğruluk sağlayabilmesi ve koruyabilmesi için MAT_015_JOHNSON_COOK materyal modeli kullanılmıştır. Öte yandan bir başka sunduğu avantaj ise, yaygın olarak ulaşılabilen seviyedeki deneyler üzerine yapılan, standart haline gelmiş belirli sayısal analizler ile materyal modeli parametrelerinin tamamen belirlenebilmesinin yanında, hasara uğrama mekanizmasının son derece detaylı olup birden fazla kriteri aynı anda uygulatabilmesidir. Bu durum, malzemeye ait parametrelerin girilmesi ardından, kuvvetler sonucu doğacak akma gibi mekanik özelliklerin etki ettiği ve farklı türdeki gerilmelerin neden olduğu kırılma ve şekil değiştirme hasarlarının belirlenebilmesini sağlamaktadır. Literatür de ve kılavuzlarda görüldüğü üzere ikisi de ayrı ayrı hesaplanıp, sonuç gerilmelerin birleşimi ile hasar meydana gelir. Bu sayede, materyalde kırılma gerçekleşmese bile çatlaklar oluşur.

MAT_015_JOHNSON_COOK Katı modeller için kullanıldığında, durum denkleminde (Equation of state (EOS)) ihtiyaç duymaktadır (Hub ve Komenda, 2009). MAT_015_JOHNSON_COOK materyal modeline uygun Hardox 450 materyal parametreleri literatürde bulunamamıştır. Bu sebeple literatürde bulunan deneyler baz alınarak malzeme modelinin parametreleri hesaplanmıştır.

Mermi bileşenlerinin modellenmesi için ve bal peteği yüzleri için, işlem gücünden ve çözüm süresinden tasarruf sağlamak amacıyla, balistik konusunda materyal davranışının doğruluğunun, çatlak gelişmesi ve kırılma mekanizması dışında, MAT_015_JOHNSON_COOK ile aynı olması ve işlem gücü gerekliliği arasında optimum seviyeyi sunan MAT_098_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK malzeme modeli olarak seçilmiştir.

Bal peteği yapısı için, MAT_024_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY seçilmiştir. İşlem gücü ihtiyacının düşük olması, bükülme ve ezilme gibi durumlar için kullanılan bu kart, bal peteği yapısının sergileyeceği davranış göz önünde bulundurulunca en uygunu olarak bulunmuştur (Gunes vd., 2019). Tablo 6'da izotropik malzeme özellikleri verilmiştir.

Tablo 6. Sayısal Modellemede Kullanılan İzotropik Malzemelerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı
Hardox 450	8129	200	0.30
Kurşun	11350	13.8	0.42
Bakır	8912	172.1	0.33
Bal Peteği	2730	70	0.33
Alüminyum 3003 H-19			
Bal Peteği Yüzü	2713	68.9	0.33
Alüminyum 1100 H-14			

Lamine edilmiş Kevlar Plakaların malzeme modeli için mikro-mekanik tabanlı, MAT_058_SOLID_LAMINATED_COMPOSITE_FABRIC malzeme modeli kullanılmıştır. Bu materyal modeli, malzemenin üç eksenindeki özelliklerini ve hasar için dayanım kriterlerini kullanmaktadır ve aynı zamanda hasarı belirlerken bu kriterlerin her birini kontrol edebilmektedir. Literatürde (Tepedüzü ve Karakuzu, 2019) bulunan malzeme özelliklerine ilave olarak yarı statik batma deneyi gerçekleştirilip, normal ekseninde batma direnci ve basınca bağlı kırılma değerleri hesaplanmıştır. Kevlar 29/epoksi ortotropik malzeme özellikleri Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Kompozit Laminat Sayısal Modele Ait Ortotropik Malzeme Sabitleri

Elastisite Modülü X (GPa)	Elastisite Modülü Y (GPa)	Elastisite Modülü Z (GPa)
17.20	17.20	10.40
Kayma Modülü XY (GPa)	Kayma Modülü YZ (GPa)	Kayma Modülü ZX (GPa)
5.50	3.30	3.30
Poisson Oranı XY	Poisson Oranı XZ	Poisson Oranı YZ
0.20	0.12	0.12

BULGULAR

DeneySEL ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması

4H kodu verilmiş, kalınlığı 4 mm ve bir metre karesinin ağırlığı 31.20 kg/m² olan 250×250 mm'lik Hardox 450 çeliği zırh plakasının balistik test sonucu Şekil 4' de verilmiştir. Sonlu elamalar analiz sonucu ise Şekil 8a' da verilmiştir. Analiz neticesinde merminin artık hızı 716 m/s olarak belirlenmiştir (Şekil 9). Test Sonuçlarından görüldüğü üzere 4 mm kalınlığındaki Hardox 450 çeliğinden oluşan tek katmanlı zırh plakası 7.62 tam metal kaplama mermisine karşı balistik dayanım gösterememiş test tam delinme olarak sonuçlanmıştır (Şekil 4a, b, c). Plakanın arka yüzeyinde ise taç yaprak oluşumunun görüldüğü tam penetrasyon gerçekleşmiştir (Şekil 4c).



Şekil 4. 4H Monolitik Zırh Yapısının Balistik Test Sonucu **a.** 4 mm Hardox 450 Zırh Plakasının Ön Yüzü **b.** 4 mm Hardox 450 Zırh Plakasının Arka Yüzü **c.** 4 mm Hardox 450 Zırh Plakasının Yan Yüzü Görselleri

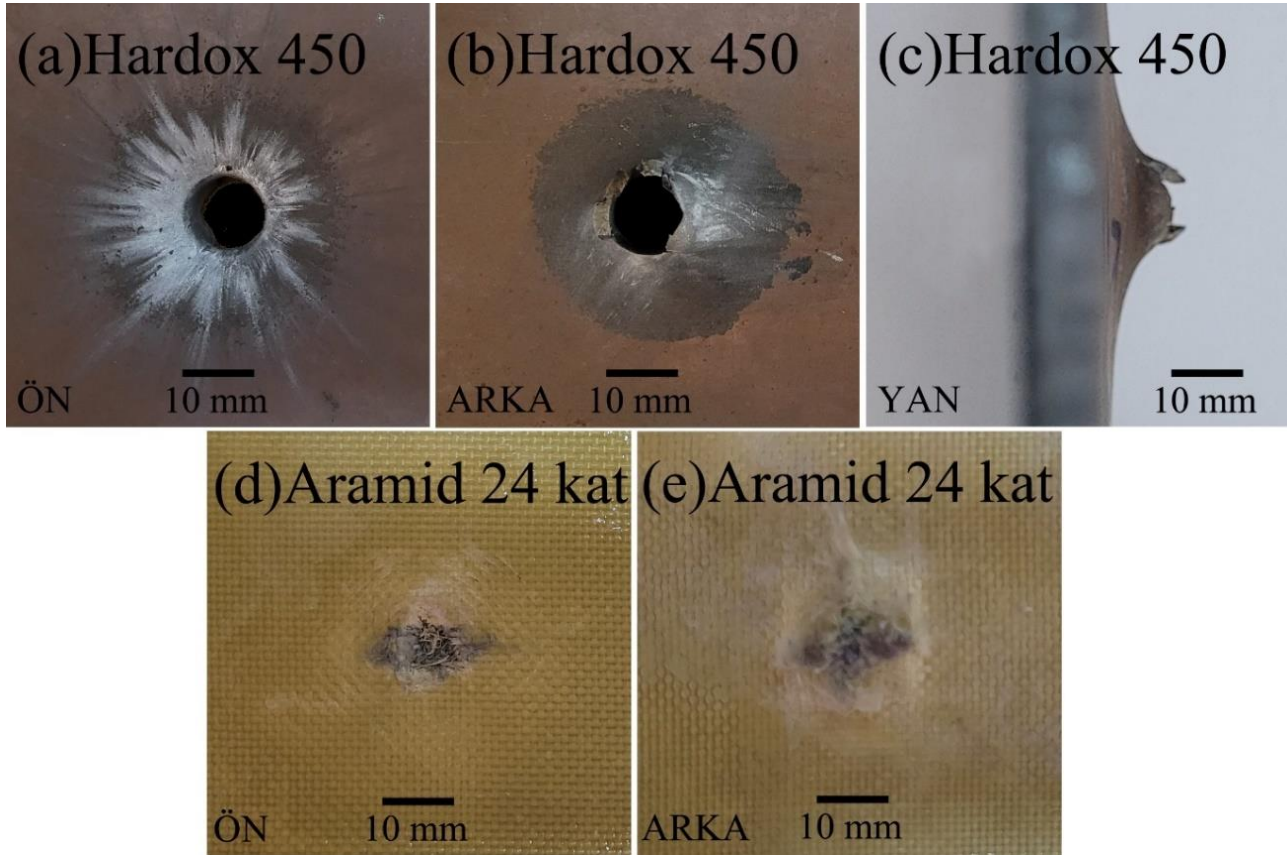
6H kodu verilmiş, kalınlığı 6 mm ve bir metre karesinin ağırlığı 46.88 kg/m² olan 250×250 mm'lik Hardox 450 çeliği zırh plakasının balistik test sonucu Şekil 5'te verilmiştir. 4H plakası ile karşılaştırıldığında ağırlık artışı %50.25'dir. Sonuçlardan görüldüğü üzere 6 mm kalınlığındaki Hardox 450 çeliği zırh plakası 7.62 tam metal kaplama mermisinin çarpmasına balistik direnç göstermiştir (Şekil 5a, b, c). Zırh plakası arka yüzeyinden çıkıntı geometrisinin tepe noktasına kadar 1.9 mm yüksekliğin ölçüldüğü çöküntü hasar modu oluşmuştur (Şekil 5c). Sonlu elemanlar analizi neticesi test verilerini doğrulamıştır (Şekil 8b). Bu kombinasyon balistik dayanım göstererek merminin kinetik enerjisinin tamamını sönmüştür (Şekil 9).



Şekil 5. 6H Monolitik Zırh Yapısının Balistik Test Sonucu **a.** 6 mm Hardox 450 Zırh Plakasının Ön Yüzü **b.** 6 mm Hardox 450 Zırh Plakasının Arka Yüzü **c.** 6 mm Hardox 450 Zırh Plakasının Yan Yüzü Görselleri

4H24K kodu verilmiş, toplam kalınlığı 14.75 mm ve bir metre karesinin ağırlığı 41.92 kg/m² olan 250×250 mm'lik Hardox 450 çeliği ve 24 kat Aramid /epoksi laminat kompozit plakalarından oluşan zırh yapısının balistik test sonucu Şekil 6'da verilmiştir. Bu yapıdaki ağırlık artışı 4H ile kıyaslandığında %34.3'tür. Sonlu elemanlar analizinde test verilerinin doğrulandığı görülmüştür (Şekil 8c). Analiz neticesinde merminin artık hızı 674 m/s olarak belirlenmiştir (Şekil 9). Test sonuçlarından görüldüğü üzere 4 mm kalınlığındaki Hardox 450 ve 24 kat Aramid /epoksi laminat kompozit plakalarından oluşan iki katmanlı zırh plakası 7.62 tam metal kaplama

mermisinin çarpmasına karşı balistik direnç gösterememiş ve test tam delinme olarak sonuçlanmıştır. 4H numunesi ile kıyaslandığında enerji sönümlenme oranında artış sağlanmıştır (Tablo 8). Literatürde benzer neticeler elde edilmiştir. Kompozit levhaların, zırh çeliği malzemelerinin arka yüzeyinde kullanılması balistik artık hızların düşmesine ve neticesinde absorbe edilen enerji miktarlarının artışına neden olmuştur (Palta vd., 2018).

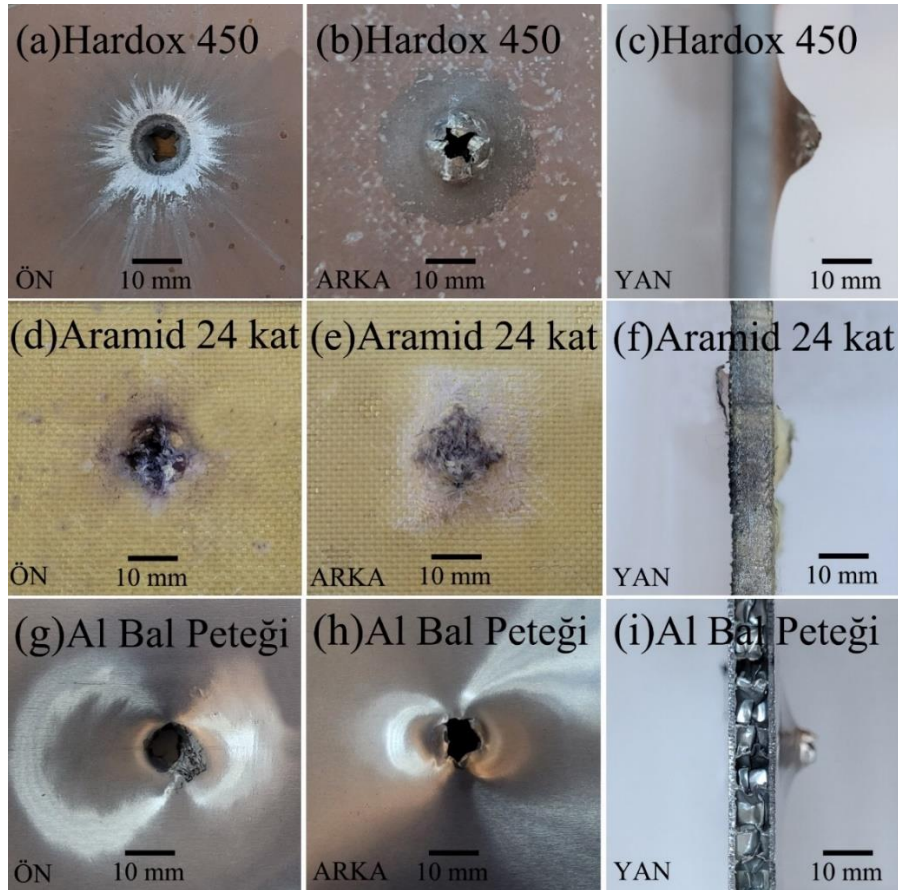


Şekil 6. 4H24K Hibrit Zırh Yapısının Balistik Test Sonucu **a.** 4 mm Hardox 450 Zırh Plakasının Ön Yüzü **b.** 4 mm Hardox 450 Zırh Plakasının Arka Yüzü **c.** 4 mm Hardox 450 Zırh Plakasının Yan Yüzü **d.** 24 kat Aramid /Epoksi Laminat Kompoziti Plakasının Ön Yüzü **e.** 24 kat Aramid /Epoksi Laminat Kompoziti Plakasının Arka Yüzü Görselleri

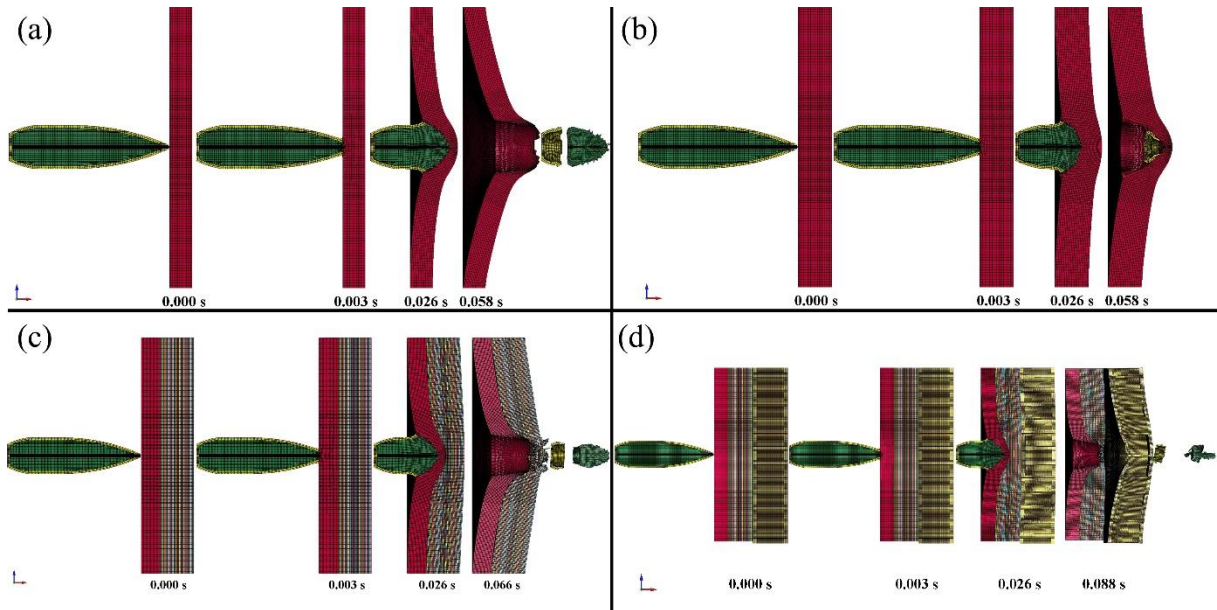
4H24K10B kodu verilmiş, toplam kalınlığı 24.75 mm ve bir metre karesinin ağırlığı 48.16 kg/m² olan 250×250 mm'lik Hardox 450 çeliği, 24 kat Aramid /epoksi laminat kompoziti ve 10 mm Alüminyum bal peteğinden oluşan hibrit zırh yapısının balistik test sonucu Şekil 7'de verilmiştir. Bu hibrit zırh plakasının ağırlık artışı ise 4H ile mukayese edildiğinde %54.35 olmuştur. Sonlu elemanlar analizinde test verilerinin doğrulandığı görülmüştür (Şekil 8d). Analiz neticesinde merminin artık hızı 655 m/s olarak belirlenmiştir (Şekil 9). Test sonuçlarından görüldüğü üzere 4 mm kalınlığındaki Hardox 450, 24 kat Aramid /epoksi laminat kompoziti ve 10 mm Alüminyum bal peteği içeren hibrit zırh plakası 7.62 tam metal kaplama mermisinin çarpmasına karşı balistik direnç gösterememiş ve test tam delinme olarak sonuçlanmıştır. Bal peteğinin hibrit yapıya eklenmesi ile monolitik (4H) ve ikili hibrit (4H24K) yapıya nazaran sönümlenene enerji miktarında artış sağlanmıştır (Tablo 8). Literatürde alüminyum bal peteği yapıların balistik darbe enerji sönümlenmede olumlu etkiye sahip olduğu raporlanmıştır (Rathod vd., 2022).

Tablo 8. Balistik Test Plakalarının Deneysel ve Sayısal Sonuç Detayları

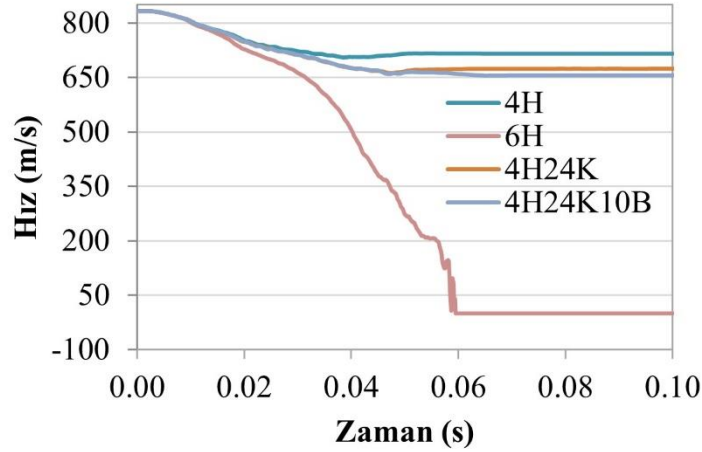
Kod	Namlu Çıkış Hızı (m/s)	Artık Hız (m/s)		Sönümlenen Enerji Oranı (%)		Arka Yüzey Çöküntü Miktarı (mm)
		Deneysel	Sayısal	Deneysel	Sayısal	
4H		679	716	33.56	26.12	-
6H		-	-	-	-	1.9
4H24K	833±15	638	674	41.34	34.53	-
4H24K10B		620	655	44.61	38.17	-



Şekil 7. 4H24K10B Hibrit Zırh Yapısının Balistik Test Sonucu **a.** 4 mm Hardox 450 Zırh Plakasının Ön Yüzü **b.** 4 mm Hardox 450 Zırh Plakasının Arka Yüzü **c.** 4 mm Hardox 450 Zırh Plakasının Yan Yüzü **d.** 24 kat Aramid /Epoksi Laminat Kompoziti Plakasının Ön Yüzü **e.** 24 kat Aramid /Epoksi Laminat Kompoziti Plakasının Arka Yüzü **f.** 24 kat Aramid /Epoksi Laminat Kompoziti Plakasının Yan Yüzü **g.** 10 mm Alüminyum Bal Peteği Plakasının Ön Yüzü **h.** 10 mm Alüminyum Bal Peteği Plakasının Arka Yüzü **i.** 10 mm Alüminyum Bal Peteği Plakasının Yan Yüzü Görselleri



Şekil 8. Sonlu Elemanlar Analizi Neticeleri **a.** 4 mm Hardox 450 Çeliği Zırh Plakası **b.** 6 mm Hardox 450 Çeliği Zırh Plakası, **c.** 4 mm Hardox 450, 24 kat Aramid /Epoksi Laminattan Oluşan İkili Zırh Yapısı **d.** 4 mm Hardox 450, 24 kat Aramid /Epoksi Laminat Kompoziti ve 10 mm Alüminyum Bal Peteğinden Oluşan Hibrit Zırh Yapısı



Şekil 9. Mermi Başlangıç ve Artık Hız-Zaman Grafiği

SONUÇLAR

Hardox 450 zırh çeliği, Aramid /epoksi laminat kompoziti ve Alüminyum bal peteği malzemelerinin bir araya getirilmesiyle elde edilen tekli, çoklu ve hibrit zırh yapılarının balistik darbe yüklerine karşı hasar dirençlerinin araştırılması çalışmanın konusu olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda zırh plakalarının yüksek hızlı darbe yükleri altındaki davranışları araştırmacılar açısından oldukça önem arz eden bir konudur. 4H kodu ile tanımlanan (4 mm Hardox 450) monolitik çelik plakası, 4H24K kodu ile tanımlanan (4 mm Hardox 450, 24 kat Aramid /epoksi laminat kompoziti) ikili zırh plakası ve 4H24K10B kodu ile tanımlanan (4 mm Hardox 450, 24 kat Aramid /epoksi laminat kompoziti ve 10 mm Alüminyum bal peteği) üçlü hibrit zırh plakaları balistik darbe karşısında koruma sağlamamıştır. Öte yandan 6H kodu ile tanımlanan 6 mm Hardox 450 monolitik çelik plakası balistik darbe karşısında koruma sağlamıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Manisa Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Birimi 2023-020 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. ZSR Patlayıcı San. A.Ş. firmasına poligonlarını kullandığı ve iş birliği yaptığı için teşekkürlerimizi sunarız.

Yazarlar, Ansys ve LS-DYNA desteğini dikkate alarak Dr. Yılmazçoban'ın "İKY Araştırma Grubu"nun çözüm ortağı olan "Numesys, Türkiye"ye teşekkür ederler.

KAYNAKÇA

- Abdullah, S., Abdullah, M., & Jamil, W. M. (2020). Ballistic performance of the steel-aluminium metal laminate panel for armoured vehicle. *Journal of Mechanical Engineering Sciences*, 14(1), 6452-6460. doi:https://doi.org/10.15282/jmes.14.1.2020.20.0505
- Arslan, K., Gunes, R., Apalak, M. K., & Reddy, J. N. (2017). Experimental tests and numerical modeling of ballistic impact on honeycomb sandwich structures reinforced by functionally graded plates. *Journal of Composite Materials*, 51(29), 4009-4028. doi: https://doi.org/10.1177/0021998317695423
- Bekci, M. L., Canpolat, B. H., Usta, E., Güler, M. S., & Cora, Ö. N. (2021). Ballistic performances of Ramor 500 and Ramor 550 armor steels at mono and bilayered plate configurations. *Engineering Science Technology, an International Journal*, 24(4), 990-995. doi:https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.01.001
- Børvik, T., Dey, S., & Clausen, A. (2009). Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 36(7), 948-964. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.12.003
- Gunes, R., Arslan, K., Apalak, M. K., & Reddy, J. N. (2019). Ballistic performance of honeycomb sandwich structures reinforced by functionally graded face plates. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 21(1), 211-229. doi: https://doi.org/10.1177/109963621668946

- Hazell, P. J. (2022). *Armour: materials, theory, and design*: CRC press.
- Hub, J., & Kneys, P. (2013). 3D Simulation Analysis of Aircraft of Aircraft Protection Material Impacting by 7.62 mm Ammunition. *University Review*, 7(3).
- Hub, J., & Komenda, J. (2009). Ballistic's Resistance of Steel Plate Hardox upon Impact of Non Penetrating Projectiles. *Advances in Military Technology*, 4(2), 79-91.
- Kartikeya, K., Chouhan, H., Ram, K., Prasad, S., & Bhatnagar, N. (2022). Ballistic evaluation of steel/UHMWPE composite armor system against hardened steel core projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 164, 104211. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104211>
- Khaire, N., Tiwari, G., Patel, V., & Iqbal, M. A. (2023). Assessment of the ballistic response of honeycomb sandwich structures subjected to offset and normal impact. *Defence Technology*, 28, 56-73. doi:<https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.12.018>
- Kraus, A., Kraus, E., & Shabalin, I. (2019). *Modelling of the processes of impact of a projectile with elements of individual defence*. Paper presented at the EPJ Web of Conferences.
- Lenihan, D., Ronan, W., O'Donoghue, P. E., & Leen, S. B. (2019). A review of the integrity of metallic vehicle armour to projectile attack. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design Applications*, 233(1), 73-94. doi:<https://doi.org/10.1177/1464420718759704>
- Mohotti, D., Ngo, T., & Mendis, P. (2011). Numerical simulation of impact and penetration of ogival shaped projectiles through steel plate structures.
- Palta, E., Gutowski, M., & Fang, H. (2018). A numerical study of steel and hybrid armor plates under ballistic impacts. *International Journal of Solids Structures*, 136, 279-294. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.12.021>
- Peng, L., Tan, M., Zhang, X., Han, G., Xiong, W., Al Teneiji, M., & Guan, Z. (2022). Investigations of the ballistic response of hybrid composite laminated structures. *Composite Structures*, 282, 115019. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115019>
- Popławski, A., Kędzierski, P., & Morka, A. (2020). Identification of ArmoX 500T steel failure properties in the modeling of perforation problems. *Materials Design*, 190, 108536. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108536>
- Rathod, S., Khaire, N., & Tiwari, G. (2022). A comparative study on the ballistic performance of aramid and aluminum honeycomb sandwich structures. *Composite Structures*, 299, 116048. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116048>
- Senthil, K., & Iqbal, M. A. (2021). *Prediction of superior target layer configuration of armour steel, mild steel and aluminium 7075-T651 alloy against 7.62 AP projectile*. Paper presented at the Structures. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.06.010>
- SSAB. (2024). https://www.ssab.com/api/sitecore/Datasheet/Get?key=e95fe73946d64960a9c462504235f6bd_tr-tr/ Accessed 24.05.24.
- Stewart, J. K. (1985). Ballistic resistant protective materials—NIJ standard 0108.01. Washington: National Institute of Justice.
- Tepeduzu, B., & Karakuzu, R. (2019). Ballistic performance of ceramic/composite structures. *Ceramics International*, 45(2), 1651-1660. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.042>
- Zhang, Q. N., Zhang, X. W., Lu, G. X., & Ruan, D. (2018). Ballistic impact behaviors of aluminum alloy sandwich panels with honeycomb cores: An experimental study. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 20(7), 861-884. doi: <https://doi.org/10.1177/1099636216682166>