

Armox 500T Zırh Çeliği İçeren Hibrit Zırh Plakalarının 7.62 mm Tam Metal Kaplama Mermi Karşısındaki Balistik Davranışının Deneysel ve Sayısal Olarak Araştırılması

Mehmet ÖZER¹, Kaan FERİKEL², İbrahim Kutay YILMAZÇOBAN³, Tayfur Kerem DEMİRCİOĞLU^{4*}, Fatih BALIKOĞLU⁵, Can ÇİVİ⁶

Öz

Bu çalışmada, Armox 500T zırh çeliği, Aramid/epoksi laminat kompozit ve Alüminyum bal peteği malzemelerinin tekli ve çoklu hibrit zırh yapıları çeşitli kombinasyonlarla bir araya getirilmiş ve balistik performansları araştırılmıştır. Deneysel çalışma, namlu çıkış hızı 847 ± 10 m/s olan 7.62×51 mm tam metal kaplama mermi ile balistik testler gerçekleştirilmiştir. Balistik darbe levhanın vurma yüzeyine dik gelecek şekilde atış yapılarak gerçekleştirilmiştir. Balistik test levhaları 250×250 mm boyutlarına sahip olup kalınlıkları ise malzeme konfigürasyonuna göre farklılık göstermiştir. Sonlu elemanlar analizi LS-Dyna programında açık zaman entegrasyonu yöntemi ile yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda, monolitik çelik ve hibrit oluşan zırh yapısı balistik koruma sağlamamıştır. Bununla birlikte, metal ve kompozit levhaların hibritleşmesi ile sönmülenen balistik darbe enerji miktarı artırmıştır. Ayrıca, çalışmaya dahil edilen tüm zırh kombinasyonları ağırlık ve kalınlık açısından değerlendirilmiş birbirlerine üstünlükleri belirlenmeye çalışılmıştır. Hibritleşme ile elde edilen enerji sönmüleme değerleri, plakaların ağırlığındaki artışa göre daha büyük bir yüzdesel artış sergilemiştir. Zırh kombinasyonlarının sonlu elemanlar analizi neticeleri deneysel veriler ile karşılaştırılması sağlanmış ve iyi uyum gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Balistik, Sonlu Eleman Analizi, Armox 500T, Alüminyum bal peteği, Aramid/epoksi.

Experimental and Numerical Investigation of the Ballistic Behaviour of Hybrid Armor Plates Containing Armox 500T Armour Steel Against 7.62 mm Full Metal Jacket Bullet

Abstract

In this study, single and multiple hybrid armour structures made of Armox 500T armour steel, Aramid/epoxy laminate composite, and Aluminium honeycomb materials were combined in a variety of configurations to investigate their ballistic performance. Ballistics tests were conducted using 7.62×51 mm full metal jacket bullets with a muzzle velocity of 847 ± 10 m/s. The ballistic impact was made by shooting perpendicular to the striking surface of the plate. The ballistic test plates were 250×250 mm and their thickness varied based on the material configuration. Finite element analysis was conducted using the explicit time integration approach in the LS-Dyna software. The experimental study demonstrated that the armour structure consisting of monolithic steel and hybrid did not provide ballistic protection. However, with the hybridization of metal and composite sheets, the amount of energy absorbed from ballistic impact has increased. In addition, all armour combinations included in the research were tested in terms of weight and thickness, with the goal of determining their superiority over each other. The absorbed energy values achieved by hybridization exhibit a greater percentage increase compared to the increase in weight of plates. The finite element analysis results of the armour combinations were compared against experimental data, showing good agreement.

Keywords: Ballistic, Finite Element Analysis, Armox 500T, Aluminium honeycomb, Aramid/epoxy.

¹Balıkesir Üniversitesi, Bigadiç Meslek Yüksekokulu, Balıkesir, Türkiye, oz@balikesir.edu.tr

^{2,3}Sakarya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye, kaanferikel@gmail.com kyilmaz@sakarya.edu.tr

^{4,5}Balıkesir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, Türkiye, tferem@balikesir.edu.tr fatih@balikesir.edu.tr

⁶Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Manisa, Türkiye, can.civi@cbu.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Patlama etkisi ve darbelere karşı korunmada Armox zırh çelikleri, kritik öneme sahip malzemelerdir ve bu alanda lider konuma sahip oldukları bilinmektedir. Savunma sanayisine yönelik uygulamalara bakıldığında Armox çelikleri, piyade savaş araçları, tanklar, devriye araçları, mayın temizleme araçları ve zırhlı personel taşıyıcılarda ana zırh malzemesi olarak kullanıldığı görülmektedir. Bunun yanında, Armox zırh çelikleri ürün gamının askeri ve diğer sivil uygulamalarına da çokça rastlanılmaktadır (Popławski ve ark., 2020). Örneğin; banka araçları, güvenlik kapıları, zırhlı veri merkezleri, zırh korumalı binalar ve mayın kafesleri gibi başlıca uygulamalar karşımıza çıkabilmektedir.

Literatürde, Armox 500T çeliği diğer armox çeliği üyeleri arasında daha fazla talep görmesinin nedeni ise, zıt özelliklerinin benzersiz kombinasyonuna sahip olmasıdır. Martenzitik özelliğe sahip olan bu çelik, yüksek tokluk, sertlik ve gerilme mukavemeti sergilemektedir (Valpolini, 2013). Armox 500T'yi diğer armox sınıfına ait çeliklerden ayıran bir başka özelliği ise gerek makineyle gerekse el işçiliğiyle işlenebilirliğinin daha kolay olmasıdır. Armox 500T'yi penetrasyon ve patlama koruması için vazgeçilmez kılan durum sertliği ve tokluğu arasındaki mükemmel dengedir.

Literatürde, Armox 500T çelikleri ile ilgili bir dizi çalışma bulunmaktadır ve bunların çoğu seramik ve çelik levhadan yapılmış eklenti zırhın darbe direnci ile ilgilidir (Bekci ve ark., 2021; Coufal ve ark., 2022; Garašić ve ark., 2019; Göçmen ve ark., 2023; Kumlu ve ark.; Mao ve ark., 2024). Senthil ve ark. (2017) yumuşak çelik plakaların 7.62 AP mermilerine karşı balistik direncini, ABAQUS/Explicit programında sayısal simülasyonlar yoluyla incelemiştir. Mermiler, farklı kalınlıktaki hedef plakalara değişen geliş açılarında çarpmıştır. Genel olarak, hedef eğikliği arttıkça hedefin direncinin arttığı bulunmuştur. Mermi sekmesinin kritik açısının, hedef kalınlıktaki artışla azaldığı bulunmuştur. Yumuşak çelik hedeflerin verilen tüm kalınlıkları için balistik limit değerleri sayısal olarak elde edilmiştir. Paman ve ark. (2020) çalışmalarında çok katmanlı bir zırh modülüne ait malzeme katmanlarının optimal sırasını ve kalınlıklarını hem 7.62 zırh delici mermiye karşı balistik direnç hem de minimum ağırlık sağlamak amacıyla sayısal simülasyon ve balistik deneyler ile belirlemişlerdir. Metodoloji, üç farklı metal alaşımına uygulanarak gösterilmiştir: Armox-500T, Ti-6Al-4V ve Al-2024. AUTODYN-3D kodu kullanılarak bu üç malzemenin balistik darbe davranışını incelemek için önce sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmişlerdir. Balistik deneyler sırasıyla 5.5, 8.5 ve 13 mm kalınlığa sahip Armox-500T/Ti-6Al-4V/Al-2024 dizisinin 7.62 mm zırh delici mermiye karşı en iyi dirence sahip yapı olduğunu göstermiştir. Ayrıca, tek tip malzemelerin performansı, optimize edilmiş üç katmanlı bir zırh modülü ile karşılaştırılmıştır. Kompozit modülünün ağırlık açısından Armox-500T, Al-2024' e göre verimli olduğu ve zırh kalınlığı bakımından ise Al-2024 'e göre daha iyi performansa sahip olduğu bulunmuştur. Ti-6Al-4V

malzemesinin ise ağırlık ve kalınlık verimliliğinin kompozit modül ile karşılaştırılabilir olduğu bulunmuştur. Yeter (2019) Armox 500T ve Alüminyum 7075-T6 plakalarının düşük ağırlık ve balistik darbe yüklerine karşı hasar modlarını araştırmıştır. Başlangıç hızı 800 m/s olan 7.62 API mermisine karşı, 10 mm Armox-500T ve 26 mm Al7075-T6 plakalar balistik koruma sağlamıştır. Ağırlık düşme testi sonuçlarında ise Armox-500T plakasının maksimum darbe yüklerinin Al7075-T6 malzemeye kıyasla daha yüksek olduğu ve deformasyon miktarının da daha az olduğu gözlemlenmiştir. Farklı kalınlık ve yönlerde Armox 500T ve Al7075-T6 malzemelerinin çeşitli kombinasyonlarından oluşan farklı hibrit modeller tanımlamıştır. Bu tasarımlar birbirleriyle karşılaştırılarak balistik darbe yüklerine daha dayanıklı olanlar belirlenmiştir.

Farklı bir çalışmada ise, yüksek sertliğe sahip birincil seramik katmanlar ön tarafta kullanılmıştır (De Oliveira Braga ve ark., 2018). Bunun nedeni, çekirdek uç geometrisini bozarak, mümkün olduğu kadar fazla deformasyona uğratıp delme gücünü azaltmaktır (Da Silva ve ark., 2014). İkincil zırh olarak, balistik kompozit malzeme kullanılmasıdaki amaç ise, mermi kinetik enerjisinin mümkün olduğu kadar geniş alana yayılmasını sağlayıp enerjiyi absorbe etmesidir (Pirvu ve Deleanu, 2018). Bu nedenle elyaflardaki spesifik enerji emilme hızı önemlidir. Zırh yapısı içerisinde merminin daha fazla mesafe kat etmesi, enerji yayılımı için yüzey temas alanını artırır böylece daha yüksek balistik limite çıkılması sağlanır (Sabet ve ark., 2009).

Saleh ve ark. (2016), Armox 500T plakanın 7.62 mm APM2 mermisine gösterdiği balistik tepkisi üzerine sayısal analizler yapmıştır. Sayısal modellemede kullandıkları değerleri, malzemenin tepkilerini, yarı statik test deneyleri ve Split Hopkinson testi kullanılarak yüksek gerinim oranı deneylerinden elde etmişlerdir. Deneysel olarak belirlenen bu yüksek gerinim oranı verileri, akış gerilimi için Johnson- Cook (J-C) hesaplama modellerine ve plakanın kırılma modeli için literatür kaynaklı parametrelere dahil etmişlerdir. Artık gerilimin, ARMOX 500T zırh çeliğinin balistik performansı üzerindeki rolü hakkındaki sonuçlar raporlanmıştır. Iqbal ve ark. (2016), Armox 500T çeliğinin, zırh delici (API) mermisinin balistik etkisine karşı değişen gerilme durumu, gerilme hızı ve sıcaklık altındaki davranışını incelemek için ayrıntılı bir araştırma yapmışlardır. Çalışmasında, Armox 500T çeliği için kalibre edilmiş J-C modeli, Split Hopkinson testi ile gerçekleştirilen yüksek gerinim hızı gerginliği sayısal olarak simüle edilmesiyle doğrulamıştır. Balistik deneyler, 8 ve 10 mm kalınlığında Armox 500T çelik hedef plakalara, ortalama 830 m/s hıza sahip 7.62 ve 12.7 API mermilerle atışlar yapılmıştır. Bunun yanında, hedef için kalibre edilmiş J-C modeli ve mermi malzemesi kullanılarak sonlu eleman programında simülasyonları gerçekleştirmişlerdir. Hesapladıkları hasar modlarının ve artık hızların deneylerle doğru bir şekilde uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, hedef materyalin balistik sınırı sayısal olarak elde edilmiş ve elde edilen değerler RECHT-IPSON ampirik model aracılığıyla doğrulandığını da vurgulamışlardır. Kędzierski ve ark. (2015) 7.62×54 B32 zırh delici (AP) merminin normal etkisine maruz kalan iki katmanlı zırhın

optimizasyonu üzerine bir araştırma yürütmüşler. Alümina Al_2O_3 'ün alüminyum alaşım AA2024-T3 veya zırh çeliği Armox 500T ile desteklendiği iki durum için analizler yapılmıştır. Panelin delinme sonrası artık hızını ve panelin alansal yoğunluğunu en aza indirecek şekilde katman kalınlıklarını belirlemişlerdir. Sayısal analizler, LS-DYNA, LS-OPT ve HyperMorph yazılımları ile yapılmıştır. Zırh çeliği, mermi malzemesi ve alüminyum alaşımının tepkisi J-C modeli ile tanımlanmıştır. Ayrıca alümina malzemeyi Johnson-Holmquist modeli ile tanımlamışlardır. Bu bağlamda, optimizasyon süreci, en hafif panelin alansal yoğunluğunun Al_2O_3 -Arnox 500T ve Al_2O_3 -AA2024-T3 için sırasıyla 71.07 kg/m^2 ve 71.82 kg/m^2 olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmada, $7.62 \times 51 \text{ mm}$ tam metal kaplama (FMJ) mermisine karşı koruma sağlayan tek bileşenli 4 mm kalınlığında Armox 500T zırh çeliği plakası aramid-epoksi kompozit ve alüminyum bal peteği malzemeler ile hibritleşmesi sağlanarak balistik performansları incelenmiştir. Bu bağlamda çalışmanın deneysel ve sayısal açıdan uyumlu olduklarının doğrulanması ve kalınlık artışına bağlı olarak balistik direnç ve artık hız değişimi sunulmuştur.

2. Materyal ve Metot

2.1. Malzeme

Balistik teste tabi tutulan zırh çeliği malzemesi İsveç- SSAB (SSAB, 2024) firmasından temin edilmiştir. Armox 500T'nin mekanik özellikleri 480–540 HBW sertlik değeri, 1250 MPa akma dayanımı, 1450–1750 MPa çekme dayanımı ve 32J /- 42°C darbe enerjisine sahip olduğu SSAB firmasının ürün kataloğunda belirtilmiştir. Balistik teste tabi tutulan zırh çeliği plaka $250 \times 250 \times 10$ mm boyutlarındadır. Tablo 1' de Armox 500T'nin kimyasal kompozisyonu, Tablo 2'de ise temel mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Armox 500T'deki maksimum alaşım elementi içeriği (SSAB, 2024).

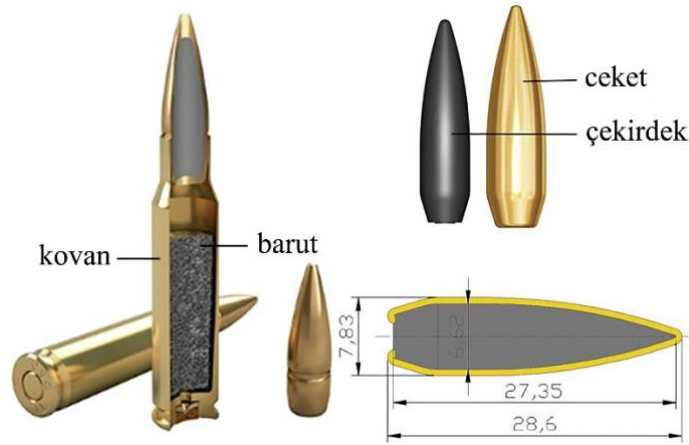
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
0.32%	0.4%	1.2%	0.015%	0.010%	1.01%	1.18%	0.7%	0.005%

Tablo 2. Armox 500T temel mekanik özellikleri (SSAB, 2024).

Özellikler	Sembol	Birim	Değer
Sertlik	HBW	-	480-540
Darbe tokluk at -40 °C (Charpy)	KV	J	32
Akma dayanımı	$R_{p0.2}$	MPa	1250
Çekme dayanımı	R_m	MPa	1450-1750
Uzama	A_5	%	8
Uzama	A_{50}	%	10

Not: A_5 (ekstansometre aralığı 5 mm), A_{50} (ekstansometre aralığı 50 mm)

Yapılan çalışmada, NIJ 0108.01 Seviye III-A (Stewart, 1985) testlerinde tercih edilen 7.62×51 mm FMJ tam metal kaplama mermisi kullanılmıştır. Balistik test koşulları Bölüm 2.2.'de detaylı olarak açıklanmıştır. Bunun yanında, hedef plaka, hız ölçerler ve silah arasındaki mesafe durumu ve mermi hızı aynı standart doğrultusunda düzenlenmiştir. Bu nedenle testler öncesinde mermi hızı, kovan içindeki barut miktarı ile ayarlanmış 7.62×51 mm M80 NATO FMJ mermisi için 847 ± 10 m/s hız aralığında tutulmuştur. Şekil 1'de testlerde ve analizde kullanılan 7.62×51 mm tam metal kaplama merminin boyutları ve kısımları verilmiştir. 7.62×51 mm tam metal kaplamalı merminin özellikleri Tablo 3'te gösterilmiştir.



Şekil 1. Balistik testlerde ve analizde kullanılan 7.62×51 mm tam metal kaplama (FMJ) mermi ve boyutları.

Tablo 3. 7.62×51 mm tam metal kaplama (FMJ) merminin 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 kurşun geçirmez 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 μm , eğilme rijitlik değeri $21900 \text{ kNm}^2/\text{m}$, hafif paneldir. Deneysel çalışmada kullanılacak olan zırh plakalarını tanımlayan kodlama, toplam kalınlık ve toplam ağırlık bilgileri Tablo 4' te sunulmuştur.

Tablo 4. Balistik test plaka detayları.

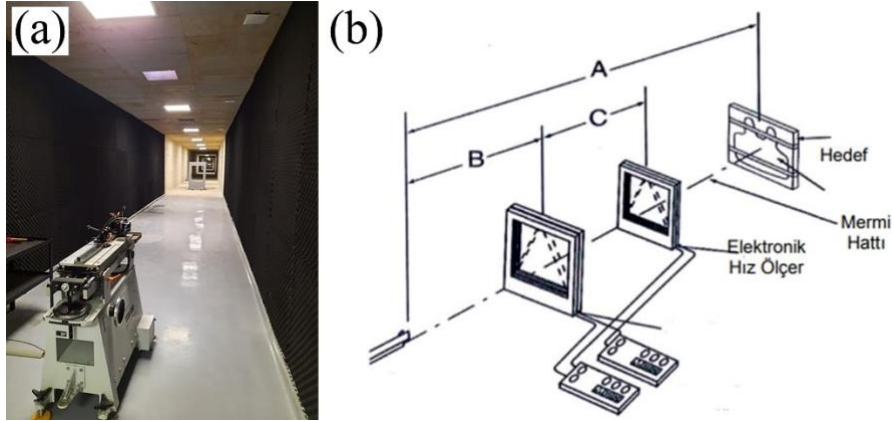
Zırh Plakası	Kod	Toplam Kalınlık (mm)	Toplam Ağırlık (g)	Ağırlık Artışı (%)
4mm Çelik	4A	4	2130	-
4mm Çelik+6 kat Aramid fiber	4A6K	6.7	2310	8.5
4mm Çelik+12 kat Aramid fiber	4A12K	9.4	2480	16.4
4mm Çelik+6 kat Aramid fiber +10mm Alüminyum bal peteği	4A6K10B	16.7	2700	26.8

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 (Palta vd., 2018; Peng vd., 2022). 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.

2.2. Balistik Testler

Armox 500T çeliği zırh plakası balistik testi, Balıkesir ilindeki ZSR Patlayıcı San. A.Ş. firmasında bulunan kapalı atış poligonunda gerçekleştirilmiştir. Balistik test düzeneği “NIJ 0108.01 Ballistic Resistant Protective Materials” standart kapsamında III. koruma seviyesinde ayarlanmıştır (Stewart,1985). Balistik testler kapalı poligonda gerçekleştirilmiştir. Kapalı poligonda iklimlendirme mevcut ve ortam sıcaklığı 22 °C de sabit tutulmaktadır. Bu ortam sıcaklığı standartta verilen 20-28 °C dereceleri arasındadır. 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. Sonlu elemanlar modelinin sınır koşullarında bu duruma dikkat edilmiş ve detaylı bilgi 2.3.2. kısmında verilmiştir. Ayrıca, testler 7.62×51 mm M80 tam metal kaplama mermisi ile Prototipa marka balistik atış düzeneği kullanılarak yapılmıştır (Şekil 2). Test plakalarına standarda uygun olarak 5 atış yapılmıştır. Mermilerin plaka üzerinde oluşturduğu hasarları temsil eden detaylı tek bir fotoğrafa makalede verilmiştir (Bkz. Şekil 4-7). Standartta belirtildiği gibi test numuneleri için destek macunu kullanılmamıştır. Test sonrası komple delinme olmayan 6A

plakasının lokal deplasman değeri derinlik kumpası ile belirlenmiştir. III. koruma seviyesinde test plakası ve namlu arası mesafe 15 metre olacak şekilde sağlanmıştır (Stewart, 1985).



Şekil 2. (a) ZSR A.Ş. firmasında kapalı poligonda bulunan Prototypa marka atış düzeneği ve (b) şematik test standardı (NIJ 0108.01) (Stewart, 1985).

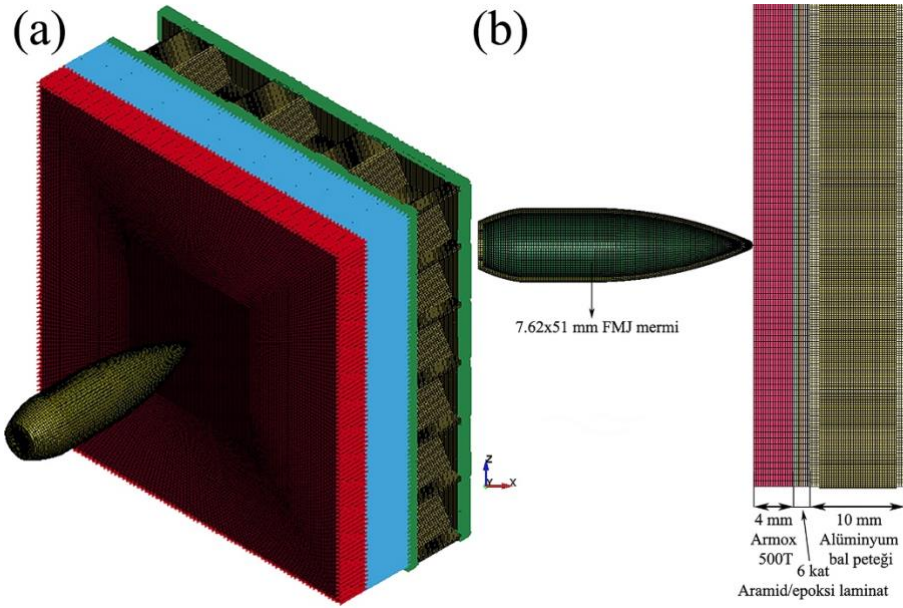
2.3. Sonlu Elemanlar Analizi

2.3.1. 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 ArmoX 500 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. Mermi ve plaka boyutları Bölüm 2.1. 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.

2.3.2. Sınır Koşulları

Deneysel çalışmalarda kullanılan plaka tutucu düzeneğine uygun olacak şekilde her hedef plakasının 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 ve (b) kesit görüntüsü.

2.3.3. 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.

2.3.4. Eleman Ağı Yapısı (Mesh)

Eleman ağı (Mesh) bahsedildiği üzere LS-Prepost programında hazırlanmıştır. Sayısal modellerin ağ yapısı detayları Tablo 5’te verilmiştir. Hedef plakaların (ArmoX 500 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 açıları 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
Armox 500	0.25-0.625	276480	296497
Kevlar-Tek Kat	0.25-0.625	17280	34882
Bal Peteği	0.2	802730	1073217
Kurşun Çekirdek	0.25-0.07 (Köşelerde)	75075	75441
Bakır Ceket	0.25	14560	21843

2.3.5. Malzeme Modelleri

Armox500T çelik plakanın malzeme modeli olarak, şekil değiştirme hızının dinamik olarak değiştiği durumlarda (Hyper-Velocity çarpışmalar gibi) şekil değiştirme hızından etkilenmeden yüksek doğruluk sağlayabilmesi ve sağlıklı davranışını koruyabildiği 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.

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 (Hub ve Komenda, 2009) ile aynı olması ve işlem gücü gerekliliği arasında optimum seviyeyi sunan MAT_098_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK malzeme modeli olarak seçilmiştir (Patton ve Hart, 2024).

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 izotropik malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri (Hub ve Komenda, 2009; Gunes vd., 2019).

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı
Armox 500	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 eksendeki 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 (Tepedüzü ve Karakuzu, 2019).

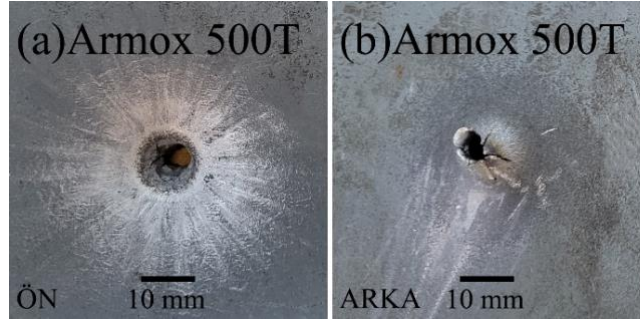
Elastisite Modülü X (GPa)	Elastisite Modülü Y (GPa)	Elastisite Modülü Z (GPa)
17.20	17.20	10.40
Kayma Modülü XY (GPa)	Kayma Modülü YZ (GPa)	Kayma Modülü ZX (GPa)
5.50	3.30	3.30
Poisson Oranı XY	Poisson Oranı XZ	Poisson Oranı YZ
0.20	0.12	0.12

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Deneysel ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması

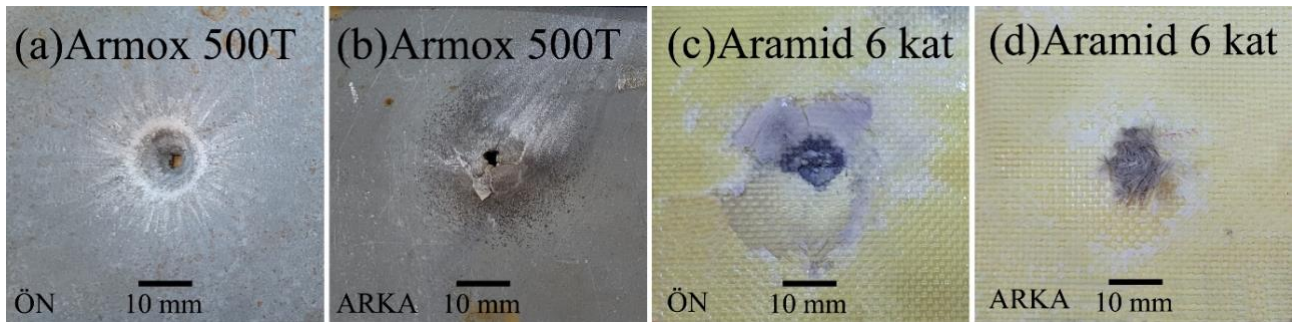
Kalınlığı 4 mm ve ağırlığı 2130 g olan 250×250 mm’lik Armox 500T çeliği zırh plakasının balistik test sonucu Şekil 4’ de verilmiştir. Sonlu elamalar analiz sonucu ise Şekil 8a’ da verilmiştir. Analiz neticesinde ise 500 m/s olarak belirlenmiştir (Şekil 9). Test sonuçlarından görüldüğü üzere 4 mm kalınlığındaki Armox 500T’den oluşan tek katmanlı zırh plakası 7.62 tam metal kaplama

mermisine karşı balistik dayanım gösterememiş, test tam delinme olarak sonuçlanmıştır (Şekil 4a, b). Plakanın arka yüzeyinde ise taç yaprak oluşumunun görüldüğü tam penetrasyon gerçekleşmiştir (Şekil 4b).



Şekil 4. 4mm Armox 500T çeliği zırh plakasının balistik test sonucu.

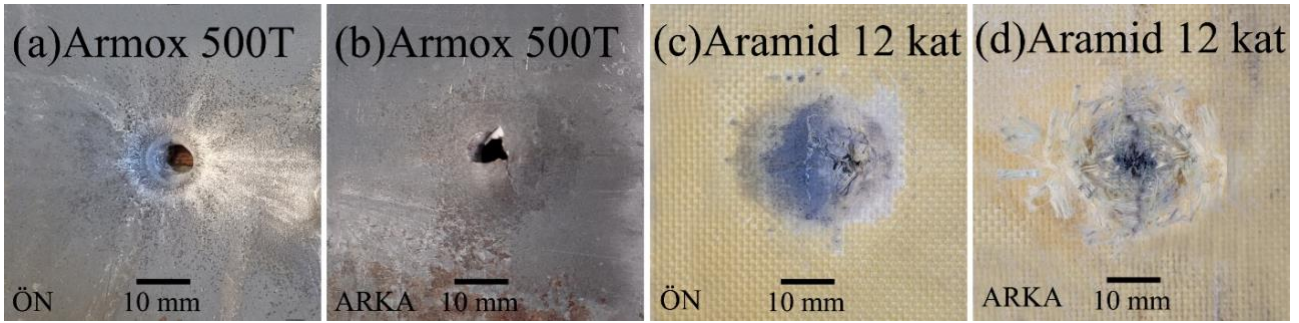
Toplam kalınlığı 6.7 mm ve toplam ağırlığı 2310 g olan 250×250mm'lik Armox 500T ve 6 kat Aramid /epoksi laminat kompozit plakalarından oluşan zırh yapısının balistik test sonucu Şekil 5'te verilmiştir. Bu hibrit plaka 4A plakası ile karşılaştırıldığında ağırlık artışı %8.5'tir. Analiz neticesinde mermi çıkış hızı 435 m/s olarak belirlenmiştir (Şekil 9). Sonuçlardan görüldüğü üzere 4 mm kalınlığındaki Armox 500T ve 6 kat Aramid /epoksi laminat kompozit plakalarından oluşan çoklu katmanlı zırh plakası 7.62 tam metal kaplama mermisine karşı balistik dayanım gösterememiş test tam delinme olarak sonuçlanmıştır (Şekil 5 a-d). Aramid /epoksi laminat plakanın arka yüzeyinde liflerin parçalanması ve kırılması şeklinde görülen tam penetrasyon durumu gerçekleşmiştir (Şekil 5c, d). Sonlu elemanlar analizi neticesi test verilerini doğrulamıştır (Şekil 8b).



Şekil 5. 4mm Armox 500T ve 6 kat Aramid /epoksi laminat kompozit zırh plakasının balistik test sonucu.

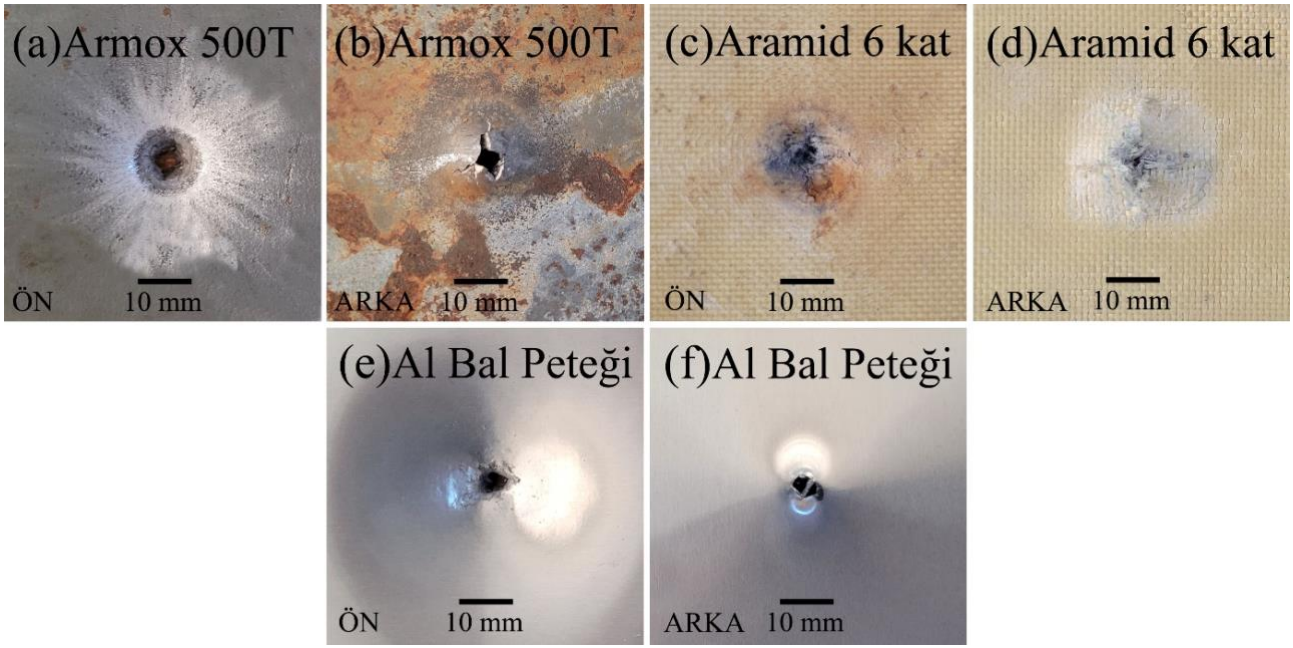
Toplam kalınlığı 9.4mm ve toplam ağırlığı 2480 g olan 250×250 mm'lik Armox 500T ve 12 kat Aramid /epoksi laminat kompozit plakalarından oluşan zırh yapısının balistik test sonucu Şekil 6'da verilmiştir. Bu yapıdaki ağırlık artışı 4A monolitik plaka ile kıyaslandığında %16.4' tür. Analiz neticesinde mermi çıkış hızı 365 m/s olarak belirlenmiştir (Şekil 9). Sonuçlardan görüldüğü üzere 4 mm kalınlığındaki Armox 500T ve 12 kat Aramid /epoksi laminat kompozit plakalarından oluşan

çoklu katmanlı zırh plakası 7.62 tam metal kaplama mermisine karşı balistik dayanım gösterememiş test tam delinme olarak sonuçlanmıştır (Şekil 6 a-d). Aramid /epoksi laminat plakanın arka yüzeyinde liflerin parçalanması ve kırılması şeklinde görülen tam penetrasyon durumu gerçekleşmiştir (Şekil 6c, d). Sonlu elemanlar analizi neticesi test verilerini doğrulamıştır (Şekil 8c). 4A numunesi ile kıyaslandığında aramid/epoksi katmanların zırh çeliği arkasında kullanılması ile 4A6K ve 4A12K numunelerinin enerji sönümlenme değerleri artmıştır (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. 4mm Armox 500T ve 12 kat Aramid /epoksi laminat kompozit zırh plakasının balistik test sonucu.

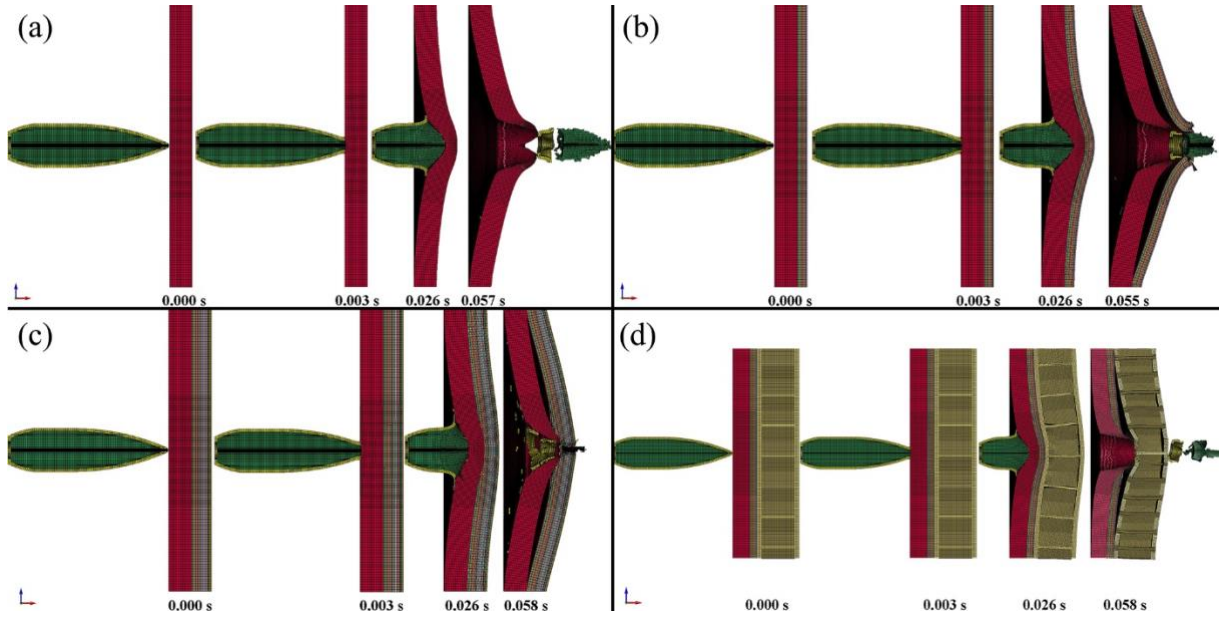
Toplam kalınlığı 16.7 mm ve toplam ağırlığı 2700 g olan 250×250mm’lik Armox 500T, 6 kat Aramid /epoksi laminat kompozit ve 10 mm Alüminyum bal peteğinden oluşan zırh yapısının balistik test sonucu Şekil 7’de verilmiştir. Bu hibrit zırh plakasının ağırlık artışı ise 4A ile mukayese edildiğinde %26.8 olmuştur. Analiz neticesinde mermi çıkış hızı 255 m/s olarak belirlenmiştir (Şekil 9). Sonuçlardan görüldüğü üzere 4 mm kalınlığındaki Armox 500T ve 6 kat Aramid /epoksi laminat kompozit plakalarından oluşan çoklu katmanlı zırh plakası 7.62 tam metal kaplama mermisine karşı balistik dayanım gösterememiş test tam delinme olarak sonuçlanmıştır (Şekil 7 a-d). Sonuçlardan görüldüğü üzere 4 mm kalınlığındaki Armox 500T, 6 kat Aramid /epoksi laminat kompozit ve 10 mm Alüminyum bal peteği içeren hibrit zırh plakası 7.62×51 mm tam metal kaplama mermisine karşı balistik dayanım gösterememiş test tam delinme olarak sonuçlanmıştır (Şekil 7 a-f). Aramid /epoksi laminat plakanın arka yüzeyinde liflerin parçalanması ve kırılması şeklinde görülen tam penetrasyon durumu gerçekleşmiştir (Şekil 7c, d). Alüminyum bal peteği plakada ise tıpkı çelik katmanda olduğu gibi mermi çıkış tarafında taç yaprak hasar modu oluşmuştur (Şekil 7f). Tam delinme hasar modu hibrit yapıda sonlu elemanlar analizi neticeleri ile doğrulanmıştır (Şekil 8d). Bal peteğinin hibrit yapıya eklenmesi ile monolitik (4A) ve ikili hibrit (4A6K) yapıya nazaran sönümlenen enerji miktarında artış sağlanmıştır (Tablo 8). Literatürde alüminyum bal peteği yapıların balistik darbe enerji sönümlemede olumlu etkiye sahip olduğu raporlanmıştır (Rathod vd., 2022).



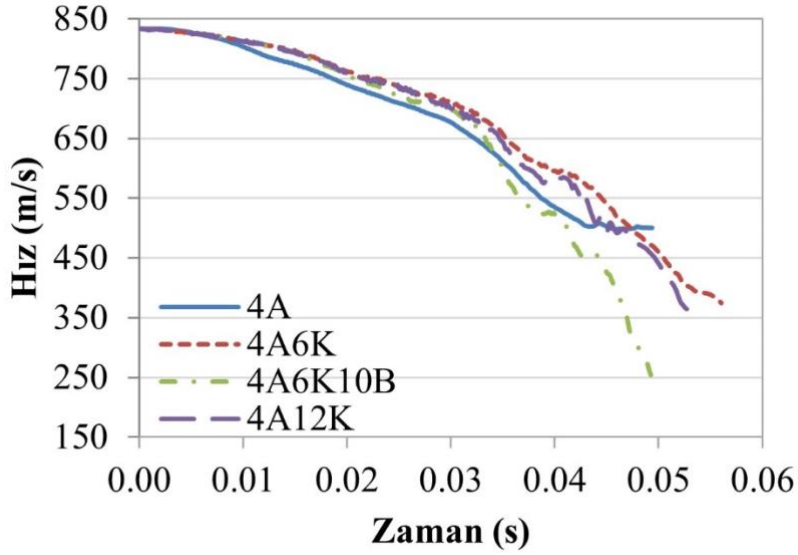
Şekil 7. 4mm Armox 500T, 6 kat Aramid /epoksi laminat kompozit ve 10mm Alüminyum bal peteği zırh plakasının balistik test sonucu.

Tablo 8. Balistik test plakalarının deneysel ve sayısal sonuç detayları.

Kod	Namlu Çıkış hızı (m/s)	Artık Hız (m/s)		Sönümlenen Enerji (J)	
		Deneysel	Sayısal	Deneysel	Sayısal
4A		474	500	2365	2244
4A6K	847±10	412	435	2629	2535
4A12K		346	365	2869	2804
4A6K10B		242	255	3162	3131



Şekil 8. Sonlu elemanlar analizi neticeleri (a) 4mm Armox 500T çeliği zırh plakasının balistik test sonucu, (b) 4mm Armox 500T ve 6 kat Aramid /epoksi laminat, (c) 4mm Armox 500T ve 12 kat Aramid /epoksi laminat, (d) 4mm Armox 500T, 6 kat Aramid /epoksi laminat kompozit ve 10mm Alüminyum bal peteği.



Şekil 9. Mermi başlangıç ve artık hız-zaman grafiği.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada Armox 500T zırh çeliği, Aramid /epoksi laminat kompoziti ve Alüminyum bal peteği malzemelerinin tekli, çoklu ve hibrit zırh yapıları çeşitli kombinasyonlarla bir araya getirilmiştir. Oluşturulan zırh plakalarının balistik darbe yüklerine karşı hasar dirençleri incelenmiştir. Zırh plakalarının yüksek hızlı darbe yükleri altındaki davranışları araştırmacılar açısından oldukça önem arz eden bir konudur. Monolitik çelik plaka ve hibrit çelik, kompozit ve bal peteği katmanlardan oluşan çoklu zırh plakaları 7.62 x 51 mm tam metal mermi (FMJ) mermi tehdidine karşı balistik koruma sağlamamış, fakat hibritleşme test plakalarında sönmülenen enerji miktarını artırmıştır. Hibritleşme ile elde edilen enerji sönmüleme değerlerindeki artış, plakaların ağırlığındaki artışa göre daha yüksek çıkmıştır. Balistik koruma sağlamak amacıyla ilerleyen çalışmalarda kompozit katman sayısında artış sağlanarak testlerin devam etmesi planlanmaktadır.

Bu konu hakkında daha sonra çalışma yapmak isteyen araştırmacılar için balistik testlerde zırh delici mermi kullanımını ayrıca mermi eksenine göre plakaların farklı açılarla konumlandırılarak balistik testlerin gerçekleştirilebileceğini öneririz.

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.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Bekci, M. L., Canpolat, B. H., Usta, E., Güler, M. S., and 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.
- Coufal, V., Křesťan, J., and Vnouček, M. (2022). Ballistic Resistance of ARMOX Advance according to NATO standard AEP-55 STANAG 4569. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- Da Silva, M., Stainer, D., Al-Qureshi, H., and Hotza, D. (2014). Ceramic armors for ballistic applications: a review. *Cerâmica*, 60, 323-331. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132014000300003>
- De Oliveira Braga, F., Da Luz, F. S., Monteiro, S. N., and Lima Jr, É. P. (2018). Effect of the impact geometry in the ballistic trauma absorption of a ceramic multilayered armor system. *Journal of materials research technology*, 7(4), 554-560. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.06.019>
- Garašić, I., Jurica, M., Ilkić, D., and Barišić, A. (2019). Determination of ballistic properties on ARMOX 500T steel welded joint. *Engineering Review: Međunarodni časopis namijenjen publiciranju originalnih istraživanja s aspekta analize konstrukcija, materijala i novih tehnologija u području strojarstva, brodogradnje, temeljnih tehničkih znanosti, elektrotehnike, računarstva i građevinarstva*, 39(2), 186-196.
- Göçmen, Y., Erdogan, C., and Yalçinkaya, T. (2023). A numerical ballistic performance investigation of Armox 500T steel through ductile damage models. *Engineering Fracture Mechanics*, 292, 109658.
- Gunes, R., Arslan, K., Apalak, M. K., and 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. <https://doi.org/10.1177/109963621668946>
- Hub, J., and Komenda, J. (2009). Ballistic's Resistance of Steel Plate Hardox upon Impact of Non Penetrating Projectiles. *Advances in Military Technology*, 4(2), 79-91.
- Iqbal, M. A., Senthil, K., Sharma, P., and Gupta, N. (2016). An investigation of the constitutive behavior of Armox 500T steel and armor piercing incendiary projectile material. *International Journal of Impact Engineering*, 96, 146-164.
- Kędzierski, P., Morka, A., Sławiński, G., and Niezgoda, T. (2015). Optimization of two-component armour. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, 63(1).
- Kumlu, U., AKAR, M. A., Başer, D., Hükümdar, Ö., and Karaçor, B. Ballistic evaluation of armor plates at different angles. In (pp. 230).

- Mao, K., Toussaint, G., Komrakova, A., and Hogan, J. D. (2024). High-velocity impact failure modeling of Armox 500T steel: Model validation and application to structural design. *International Journal of Impact Engineering*, 183, 104790.
- Palta, E., Gutowski, M., and Fang, H. (2018). A numerical study of steel and hybrid armor plates under ballistic impacts. *International Journal of Solids Structures*, 136, 279-294. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.12.021>.
- Patton, E. G., and Hart, R. J. (2024). Experimental and computational investigation into the damage mechanisms in composite metal hybrid panels subjected to high pressure blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, 190, 104970. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2024.104970>.
- Peng, L., Tan, M., Zhang, X., Han, G., Xiong, W., Al Teneiji, M., and Guan, Z. (2022). Investigations of the ballistic response of hybrid composite laminated structures. *Composite Structures*, 282, 115019. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115019>.
- Paman, A., Sukumar, G., Ramakrishna, B., and Madhu, V. (2020). An optimization scheme for a multilayer armour module against 7.62 mm armour piercing projectile. *International Journal of Protective Structures*, 11(2), 185-208.
- Pirvu, C., and Deleanu, L. (2018). Ballistic testing of armor panels based on aramid. In *Ballistics*. IntechOpen.
- Popławski, A., Kędzierski, P., and Morka, A. (2020). Identification of Armox 500T steel failure properties in the modeling of perforation problems. *Materials Design*, 190, 108536.
- Rathod, S., Khaire, N., and Tiwari, G. (2022). A comparative study on the ballistic performance of aramid and aluminum honeycomb sandwich structures. *Composite Structures*, 299, 116048. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116048>.
- Sabet, A. R., Beheshty, M. H., and Rahimi, H. (2009). Experimental study of sharp-tipped projectile perforation of GFRP plates containing sand filler under high velocity impact and quasi-static loadings. *Polymer Composites*, 30(10), 1497-1509.
- Saleh, M., Luzin, V., Kariem, M. M., and Ruan, D. (2016). Analysis of the residual stress in ARMOX 500T armour steel and numerical study of the resultant ballistic performance. *Residual Stresses*, 437.
- Senthil, K., Iqbal, M. A., and Gupta, N. (2017). Ballistic resistance of mild steel plates of various thicknesses against 7.62 AP projectiles. *International Journal of Protective Structures*, 8(2), 177-198.
- SSAB, (2024). <https://ssabwebsitecdn.azureedge.net/-/media/files/en/armox/armox-protectionsteel-in-buildings-en.pdf?m=20170619110513>, Erişim Tarihi: 28 Şubat 2024.
- Stewart, J. K. (1985). Ballistic resistant protective materials—NIJ standard 0108.01. Washington: National Institute of Justice.
- Tepeduzu, B., and Karakuzu, R. (2019). Ballistic performance of ceramic/composite structures. *Ceramics International*, 45(2), 1651-1660. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.042>.
- Valpolini, P. (2013). Passive armour: the final barrier. *Supplement to Armada Int*, 37(2), 22-28.
- Yeter, E. (2019). Damage resistance investigation of Armox 500T and Aluminum 7075-T6 plates subjected to drop-weight and ballistic impact loads. *Sakarya University Journal of Science*, 23(6), 1080-1095.