

KOMPOZİT ZIRH TASARIMI VE BALİSTİK DİRENCİNİN İNCELENMESİ

Yılmaz KÜÇÜK^{1*}, Berk Kaan ÇELİK²

¹ Bartın Üniversitesi, Müh. Mim. ve Tasarım Fak., Makine Mühendisliği Bölümü, 74100, BARTIN

² Bartın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 74100, BARTIN

Öz

Bu çalışmada lamine kompozit zırh tasarımı ve balistik direncinin incelenmesi amaçlanmıştır. Kompozit zırh yapısında mermi karşılama ve arka destek yüzeyi olarak 5 mm kalınlığında AISI 304 paslanmaz çelik plaka, mermi darbe şok enerjisini absorbe etmek amacıyla ara katman olarak 6 mm kalınlığında kevlar kompozit levha kullanılmıştır. Ayrıca sertlik artışı sağlamak suretiyle mermi deformasyonunu artırmak için çelik plakalara borlama işlemi de uygulanmıştır. Çalışma kapsamında araç zırhı için tam balistik koruma sağlayabilecek yeni bir zırh tasarımı ve prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve balistik performansı değerlendirilmiştir. Balistik testler 7.62 mm kalibreli kurşun çekirdekli ve yaklaşık 800 m/s mermi hızına sahip G3 piyade tüfeği ile 30 m mesafeden ve tek atış esasına göre gerçekleştirilmiştir. Son olarak borlanmış çelik ön ve arka destek katmanları arasında bulunan çift kevlar plakalar ile tam balistik koruma sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Zırh sistemi, balistik test, lamine kompozit.

DESIGN OF A COMPOSITE ARMOR AND INVESTIGATION OF ITS BALLISTIC RESISTANCE

Extended Abstract

This study aimed to design a laminated composite armor and to examine its ballistic resistance. In the designed composite armor structure, a 5 mm thick AISI 304 stainless steel plate was used as a bullet impact and back support surface. A 6 mm thick kevlar composite plate was also used as an interlayer to absorb the impact shock energy of the bullet. In addition, the boriding process was applied to the steel plates to increase the bullet's deformation by increasing the hardness. Hence, the surface hardness of the AISI 304 plate has been increased approximately 7 times by the boronizing process. It has been observed that this process significantly affected bullet deformation. Within the scope of the study, various armor designs and the production of prototypes that could provide complete ballistic protection for vehicle armor were carried out, and hence their ballistic performances were evaluated. Ballistic tests were performed on a single-shot basis from a distance of 30 m with a 7.62 mm lead core G3 rifle with a bullet velocity of approximately 800 m/s. It has been observed that a single layer of non-boronized steel (A) and boronized steel (B) could not provide sufficient ballistic resistance. In addition, the ballistic limit conditions with full penetration could be provided using the A+K+A laminated row ZM-3 armor model with a single layer of kevlar plate between the boron-free steel front and back support layer. Finally, it has been determined that the B+K+K+B laminated sequential armor model specified with ZM-4 completely stopped the G3 bullet. From this, it was concluded that the boriding process increased the bullet's deformation. The kevlar plate could also be used in such armor systems as a laminate to absorb the bullet's kinetic energy. Finally, full ballistic protection was achieved with double kevlar plates between the boronized steel front and back support layers.

Key Words: Armor system, ballistic test, laminated composite.

1. Giriş

Son yıllarda ülkemizin jeostratejik konumu itibarıyla savunma sanayi yatırım ve harcamaları ile ileri teknolojiye sahip silah ve mühimmat tedarikinde yerli ve milli üretime verdiği önem giderek artmaktadır. Şöyle ki, 2000'li yılların başında ülkemizin ihtiyaç duyduğu savunma sistemlerinin yaklaşık % 80'i ithalat yoluyla karşılanırken

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author):

Yılmaz KÜÇÜK; Bartın University, Faculty of Engineering, Architecture and Design, Department of Mechanical Engineering, 74100, Bartın-Turkey.

Geliş (Received) : 01.04.2023

Kabul (Accepted) : 25.04.2023

Basım (Published) : 31.07.2023

(Ziylan, 2001), 2020 yılı itibariyle bu ihtiyacın yaklaşık % 70'i yerli üretimle karşılanabilir duruma gelmiştir. (URL-1, 2020).

Savunma sanayisine yönelik silah ve mühimmat geliştirme ve üretiminin yanı sıra saldırıların vereceği hasarı en aza indirmek amacıyla balistik zırh uygulamaları da önem kazanmaktadır. Balistik zırh uygulamaları özellikle ve öncelikli olarak askeri alanda yoğunlukla araştırma konusu olmakla birlikte araç zırhına yönelik çalışmalarda artış da dikkat çekici seviyededir. Balistik uygulamalarda kullanılan zırhlarda temelde saldırı mühimmatı hasarının en aza indirilmesi zırhın fiziksel varlığıyla sağlanmaktadır (Hazell, 2016). Kullanım amacına göre zırhlar; kişisel vücut zırhı, hafif araç zırhı ve ağır zırh (tank vb. araçlar) olmak üzere üç kategoride sınıflandırılabilir (Meyers, 1994; Candan, 2005). Askeri araçlar için zırh koruması tehdidin tür ve seviyesine göre yapılmaktadır. Zırh uygulaması genel olarak meydana getireceği ağırlık artışından dolayı aracın manevra kabiliyetini kısıtlamaktadır. Askeri kara araçlarına manevra kabiliyetinden ödün vermeksizin balistik korumanın sağlanabilmesi hayati öneme sahiptir (Ash, 2016).

Zırh malzemesi olarak çelik, ilk defa 1. Dünya Savaşı sırasında tanklarda kullanılmıştır (Hazell, 2016). 2. Dünya Savaşında zırh çeliği olarak bilinen haddelenmiş homojen zırhlar (RHA) kullanılmaya başlanmıştır. RHA diğer çeliklere göre sahip olduğu yüksek rijitlik ve yüksek tokluk nedeniyle halen araç zırh malzemesi olarak kullanılmaktadır (Bitlisli, 2019). Ancak günümüz araç zırhı uygulamalarında tamamen çelikten oluşan zırhların kullanımının önündeki en büyük engel çeliklerin yüksek ağırlığıdır (Übeyli vd., 2007; Fernández-Fdz & Zaera, 2008). Ağırlığı azaltmak ve sertlikten çok fazla ödün vermemek için ilk tercih edilen malzeme seramiklerdir. Kara taşıtlarında en yaygın olarak kullanılan seramik, sunduğu performans ve maliyet avantajları dikkate alındığında alüminyum oksit (Al₂O₃) tir (Ash, 2016). Ağırlığın daha kritik olduğu uygulamalarda (zırhın daha da hafif olması istenen durumlar), silikon karbür (SiC) veya bor karbür (B₄C) gibi daha yüksek performanslı seramikler kullanılmaktadır (Güneş, 2015). Ancak seramikler kırılma yapıları nedeniyle mermi isabeti ve patlayıcı mühimmat şok etkileri karşısında dağılma gibi dezavantajlarından dolayı tek başına bir zırh malzemesi olarak kullanılmazlar.

Günümüzde gelişen silah teknolojisi ile birlikte zırhlı askeri kara araçları için yeterli balistik koruma sağlayan hafif zırh malzemelerine olan talep giderek artmaktadır (Lo'pez-Puente vd., 2005). Bunun yanı sıra savunma sistemlerinde balistik tehditlere karşı hafif zırh malzemelerinin geliştirilmesi ve uygulanması, özellikle yakıt tasarrufu ve araç hareket kabiliyetinin artırılması açısından da oldukça önemlidir. Dolayısıyla, hafif zırh uygulamalarının geliştirilmesinde çeliklere alternatif olabilecek zırh malzemesinin çeliklerle aynı seviyede veya daha yüksek balistik koruma sağlayabilen, daha hafif, düşük maliyetli, üretim ve uygulanabilirliğinin yüksek olması aranan başlıca özelliklerdir. Bu özelliklerin tamamına sahip olabilecek malzemelerin başında kompozitler gelmektedir. Balistik etkilere karşı koruyucu zırh üretimi alanında yapılan çalışmalar sonucunda monolitik metallerin dışında, seramik kompozit zırh, polimer kompozit zırh ve lamine (katmanlı-tabakalı) zırh gibi çeşitli kompozit zırh sistemleri geliştirilmiştir. Bu uygulamalardaki ana fikir, mermiyi çok sert bir yüzeye kırmak ve daha sonra daha yumuşak ve sünek bir arka destek malzemesi kullanarak mermi ve/veya zırh parçalarının kalan enerjisini sönmektir (Meyers, 1994).

Medvedovski (2010) çalışmasında seramik zırh malzemelerinin özellikleri ve balistik darbeler altında kırılma özellikleri kullanılarak çoklu vuruş performansına sahip hafif ve ucuz zırh sistemlerinin elde edilebileceğini vurgulamıştır. Übeyli vd. (2011), çeliğin önünde seramik bir ön tabaka kullanılmasının monolitik metalik malzemelere göre daha yüksek balistik direnç sağlandığını bildirmişlerdir. Flores-Johnson vd. (2011), çalışmalarında 775-950 m/s hız aralığında 7.62 mm APM2 mermisinden etkilenen çelik veya alüminyumdan oluşan monolitik, çift ve üç katmanlı metal plakaların veya bu malzemelerin bir kombinasyonunun balistik performansını sayısal modelleme ile incelemişlerdir. Monolitik plakaların, aynı malzemeden yapılmış çok katmanlı plakalardan daha iyi bir balistik performansa sahip olduğu saptanmıştır. Rahman vd. (2016), farklı katman konfigürasyonlarının (monolitik, çift katmanlı ve üç katmanlı), toplam ağırlıkların ve başlangıç hızlarının, 7.62 mm APM2 mermi etkisine karşı balistik limit hızına, penetrasyon sürecine ve kalıcı deformasyona etkisini araştırmışlardır. HSS çelik ve Al7075 T6 alüminyum alaşımı plaka katmanlarının çift katman olarak kullanıldığı duruma göre üç katmanlı kompozit yapının balistik direncinin daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Gençler (2016), borlanmış çelik plakalar, polimer yapıştırıcı ve metal tozlarından oluşturulan metal tabakalı borür kompozit zırhın BR2 tehdidine karşı gerekli balistik performansı sağlayamadığını belirtmişlerdir. Bu durumu kullanılan çelik plakaların yeterli kalınlıkta olmaması sebebiyle borür tabakasının çelik plakaların tokluk ve sünekliğini düşürmesine bağlamışlardır. Jinzhu vd. (2017), tungsten alaşımı merminin Alümina/603 zırh çeliği kompozitine penetrasyonuna ilişkin deneyleri ve simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak seramik kalınlığının artmasıyla birlikte arka çelik plaka yüzeyinde oluşan penetrasyon derinliğinin azaldığı belirtilmiştir. Seramiğin mermi etki bölgesinde ciddi şekilde ufalandığı tespiti yapılmıştır. Söz konusu seramiğin dağılması ve toplam zırh

ağırlık artışı gibi dezavantajların etkisini minimize etmek amacıyla kompozit zırh yapısına polimer kompozitlerin ilave edildiği çalışmalar da mevcuttur.

Literatürde seramik veya seramik-metal kompozitin arkasına yerleştirilen aramidler gibi yüksek mukavemetli fiber astarlar, cam lifi ile reçine karışımından üretilen polimer katmanlar, lamine polietilenler ile yapıştırılarak kompozit zırh tasarımı yapıldığı görülmektedir. Polimer lamine kompozit zırhlarda sıklıkla aramid elyaftan üretilen örgü kumaş ve reçinenin sıcak preslenmesiyle elde edilen monolit plakalar kullanılmaktadır. Aromatik polyamidin kısaltması olan aramidler ilk olarak DuPont firmasınınca 1960 ların başında ticarileştirilmiş ve 1973'te Kevlar adı ile piyasaya sürülmüştür. Kevlar hala en iyi bilinen ve tercih edilen aramidlerden biri olmaya devam etmektedir. Aramid elyaflar ilk olarak 1970'lerde araç zırhında kullanılmış olup, günümüzde vücut zırhı, araç zırhı, askeri kasklar, koruyucu eldivenler ve itfaiyeciler için yanmaz giysilerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Ünaler (2005), çalışmasında, cam elyaf (E-cam) kumaş ve polyester reçinelerden kompozit laminalar üretmiştir. Ek olarak, kompozit yapının balistik dayanımını artırmak amacıyla alüminyum (Al) plakalar ve alümina (Al₂O₃) tabakalar kullanılarak çok tabakalı sandviç laminalar elde edilmiştir. Kompozit plakalar; 7.62 mm zırh delici (AP), parça benzetimli mermi (Fragment Simulating Projectile-FSP) ve ball (B) mermi ile 420-1173 m/s hızları arasında balistik testlere tabi tutulmuştur. Balistik testler sonrasında polimer kompozitlerin 7.62 mm parça benzetimli mermiye karşı 1001 m/s mermi hızlarına kadar dayanımlı olduğu, ancak herhangi bir destek tabakasına sahip olmadan zırh delici (AP) mermileri durdurmada yetersiz kaldığı gözlenmiştir. Seramik tabaka içeren sandviç paneller ise AP ve FSP mermilerine karşı uygulanan tüm hız aralıklarında (446-1020 m/s AP için 435-1173 m/s FSP için) sadece kısmi penetrasyon göstermiştir. Sonuç olarak çok tabakalı kompozit yapıların balistik tehditlere karşı hafif zırh malzemesi olarak kullanılabilmesi belirtilmiştir. Başaran (2007) tez projesinde silikon karbür ve kevlar zırh birleşimi için optimum seramik/kompozit kalınlık oranını yaklaşık 2 olarak bulmuştur. Gençer (2016) zırh malzemesi olarak borür esaslı seramik/metal katmanlı kompozit malzemeler üretmişlerdir. Bu amaçla, AISI 1010 çeliğinin yüzeyi kutu borlama tekniği ile borlanarak hazırlanmış borür/metal plakalar iki ayrı metotla çok katmanlı kompozit malzemeye dönüştürülmüştür. Birinci metotta, borür/çelik plakalar arasına metal tozları yerleştirilerek sıcak presleme yöntemi ile tabakalı (lamine) kompozitler üretilmiştir. İkinci teknikte ise, plakalar birbirlerine polimer esaslı yapıştırıcılar ile yapıştırılarak tabakalı kompozitler elde edilmiştir. Daha sonra bu çok katmanlı kompozit plakalar Kevlar destek üzerine yerleştirilip DIN EN 1063 standardında BR2 tehdit seviyesinde balistik testlere tabi tutulmuştur. Polimer esaslı malzemelerle yapıştırılarak elde edilen kompozit plakaların balistik testlerde başarılı olamadığı, metal tozları ile birleştirilen tabakalı kompozitlerin ise balistik testlerde başarılı sonuç verdiği belirtilmiştir. Demircioğlu vd. (2011) 9 mm' lik mermi tehdidine karşı askeri araçların zırhlandırılmasına yönelik, Kevlar ve St37 sac malzeme kullanılarak elde edilen zırh malzemesine balistik testler uygulamışlardır. Sonuç olarak zırhlı araç için en uygun konstrüksiyonun 11 kat Kevlar ve St37 sac'tan oluşan zırh malzemesi olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada ise 7.62mm kalibreli kurşun çekirdekli G3 mermisini (ortalama hız 800 m/s) tam durdurmaya yönelik katmanlı hibrit kompozit zırh tasarımı ve balistik direncinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Önerilen zırh modelinde literatürden farklı olarak borlanmış çelik ön katman ile arka destek çelik levha arasına yerleştirilen kevlar (12 kat) plaka yer almaktadır. Böylece borlamadan kaynaklanan sertlik artışı ile mermi deformasyonu artırılırken tüm kesitte ise tokluk ve sünekliğin etkisinin sürdürüldüğü bir mermi karşılama katmanı hedeflenmiştir. Daha sonraki esnek bir ara katman olarak Kevlar-epoksi polimer kompozit katmanı ile darbe şok enerjisinin sönmülmesi ve rijit bir çelik arka destek plakası ile tam balistik direncin sağlanması amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Numunelerin Hazırlanması

Zırh katmanı olarak kullanılmak üzere 100x100x5 mm ölçülerinde AISI 304 paslanmaz çelik plakalar hazırlanmıştır. Paslanmaz çelik seçiminin nedeni alaşımız karbon çeliğine (27 J) göre yaklaşık 5 kat daha yüksek darbe enerjisine (155 J) sahip olmasıdır. Paslanmaz çelik plaka tokluktan ödün vermeksizin daha yüksek yüzey sertliğine sahip olması için kutu borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama işlemi sonunda tüm dış yüzeylerden difüzyon yoluyla sınırlı derinlikte sert bir borür kabuğu ile çevrelenen bir çelik kesiti elde edilmiştir. Böylece, sert borür katmanı ile mermiyi deforme edip kinetik enerjisini azaltmak mümkün olabilecektir. Ayrıca, bu yolla çelik kesiti orta bölgesinin tokluğu muhafaza edilerek mermi darbe enerjisini absorbe etmede avantaj sağlayacağı düşünülmüştür.

2.1.1. Borlama işlemi

Kullanılan AISI 304 paslanmaz çelik numunelerin üretici firma tarafından sunulan kimyasal bileşimi ağırlıkça % 18-20 Cr, % 8-10 Ni, % 2,0 Mn, % 0,75 Si, % 0,08 C, %0,045P, 0.03 wt% S ve geri kalan Fe elementlerinden oluşmaktadır. Borlanacak numuneler, AISI 304 paslanmaz çelik levhadan lazer kesim ile 100 × 100 mm boyutlarında kesilerek hazırlanmıştır. Düşük yüzey pürüzlülüğü ($R_a < 0.25 \mu m$) elde etmek için numunelerin tüm yüzeyleri 800 grit SiC zımpara kağıdına kadar kabadan inceye sıralı zımpara kağıtları kullanılarak zımparalanmıştır. Daha sonra numuneler damıtılmış suda yıkandıktan sonra 15 dakika boyunca asetonda ultrasonik temizleme işlemi uygulanarak temizlenmiştir. Numuneler inconel 718 Ni esaslı süper alaşımlardan yapılmış ağız hava almayacak şekilde kapatılabilen potanın ortasına yerleştirildikten sonra borlama tozu ilave edilerek ağız sıkıca kapatılan pota 950 °C de hazır bekletilen fırında 3 saat bekletilmiştir. Borlama işleminde kullanılan borlama tozu içeriği % 90 B₄C + % 10 NaBF₄ olarak seçilmiştir. Her bir borlama ısıl işleminin sonunda, numuneler fırın içerisinde bekletilerek dakikada 10 °C lik soğuma ile sıcaklıkları 950 °C'den 700 °C kadar düşürülmüştür. Ardından numuneler fırından çıkarılarak açık havada soğumaya bırakılmıştır. Oluşan borür katmanlarına ait mikroyapı incelemesi SEM ve EDS analizleri ile gerçekleştirilmiş olup, söz konusu katmanların sertlik değerleri nanoindentasyon yöntemi ile ölçülmüştür.

2.1.2. Kevlar Plaka Üretimi

Örgü kumaş formundaki Kevlar (Kevlar 29) malzeme 12 kat olacak şekilde prepreg reçinesi kullanılarak el yatırma yöntemi ve sonrasında yüzey alanına bağlı olarak 10-15 ton basma yükü altında 120 °C de sıcak presleme ile 6 mm kalınlığında plaka şeklinde üretilmiştir.

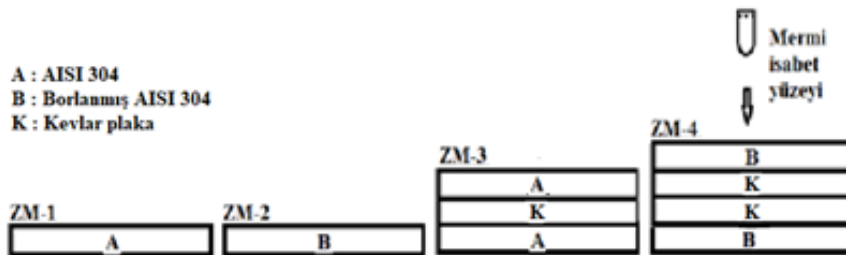


Şekil 1. Kevlar plaka üretimi a) kumaş ve reçine uygulaması b) sıcak presleme sonrası kesilerek hazırlanan kevlar zırh katmanı.

Kevlar plaka haline getirilen malzeme (Şekil 1a) su jeti ile kesilerek 100x100x6 mm ölçüsünde Kevlar zırh katmanı (Şekil 1b) elde edilmiştir.

2.2. Zırh Katmanlarının Belirlenmesi Ve Balistik Testler

Zırh balistik performansını değerlendirmek için planlanan zırh modellerine (ZM) ait şematik gösterim Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Zırh modeli kombinasyonları.

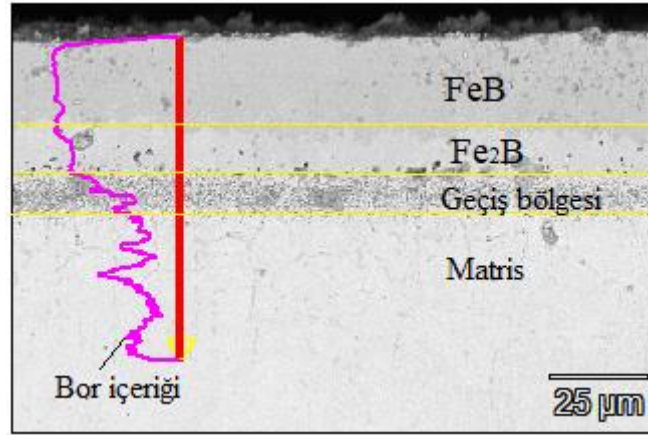
Her bir zırh kombinasyonu ayrı ayrı kontrplak arka zemine atış yüksekliğinde ve mermi çarpma açısı 90 derece olacak şekilde vidalanarak platforma sabitlenmiştir. Tek katmanlı ZM-1 ve ZM-2 zırh modelleri atış platformuna doğrudan vidalanmıştır. Çok katman içeren ZM-3 ve ZM-4 zırh modelleri katman kaymasını önlemek amacıyla 1

mm kalınlığında çelik sac (St 37) malzeme ile çerçeveye alınmıştır. Balistik atış testleri her bir zırh modeline NATO STANAG 4569 standardına uygun şekilde 30 m mesafeden tek atış olarak gerçekleştirilmiştir. Atışlar 3 kez tekrarlanarak hasar oluşumunun doğruluğu karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Balistik testlerde 7.62 mm kalibreye sahip kurşun çekirdekli G3 mermisi kullanılmış olup mermi ortalama hızı 800 m/s dir. Belirtilen mermi hızı ve atış mesafesi söz konusu standartta belirtilen değerlerle uyumludur.

3. Bulgular

3.1. Borlama Sonrası Mikroyapı

Yapılan borlama işlemi sonrası oluşan parça kesiti mikroyapısına ait SEM görüntüsü Şekil 3'te verilmiştir.

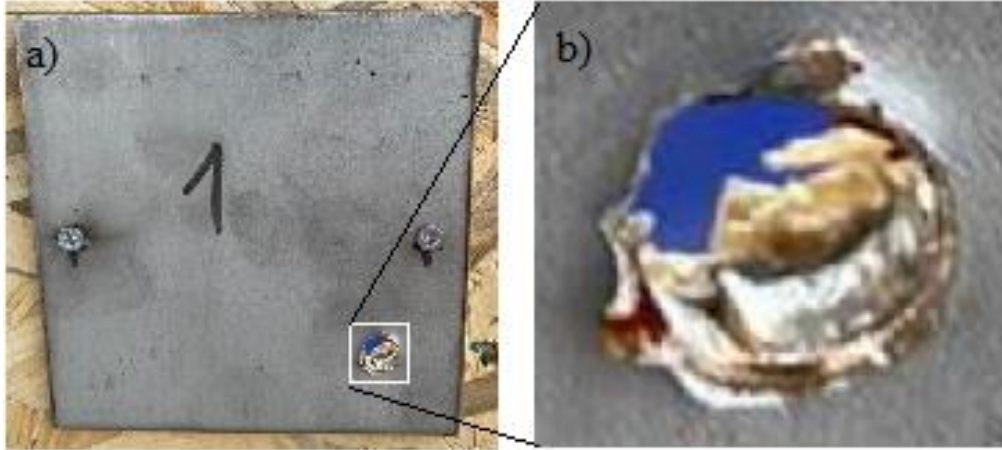


Şekil 3. 950 °C'de 3 saat borlama sonucu yüzeyde elde edilen borür tabakasının kesit mikroyapısı.

Şekil 3'te verilen bor difüzyonuna göre, paslanmaz çeliklerin borlanması üzerine gerçekleştirilen çalışmalarla uyumlu olarak, (Arslan vd., 2022; Campos-Silva vd., 2021; Arteaga-Hernandez vd., 2021; Günen vd., 2014; Kayali vd, 2013) bor içeriği yüzeyden içeriye derinlik boyunca azalan 3 ana bölge oluştuğu gözlenmiştir. Bu bölgeler sırasıyla FeB tabakası (daha koyu) Fe₂B (daha açık) ve geçiş bölgesi (gözenekli yapıya sahip) olarak sıralanmıştır (Şekil 3). Şekil 3'te görüldüğü üzere FeB, Fe₂B ve geçiş bölgesi katmanlarının kalınlıkları sırasıyla 25 µm, 12 µm, 14 µm civarındadır. Belirtilen katmanların ortalama sertlik değerleri ise sırasıyla 28 GPa, 27 GPa, 9GPa olarak ölçülmüştür. AISI 304 paslanmaz çeliğin borlama etkisi dışında kalan matris yapısının sertliğinin ise ortalama 4 GPa olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda mermi karşılama yüzeyinin sertlik değerinin yaklaşık 7 kat arttığı ve dolayısıyla mermi deformasyonunu sağlama açısından önemli bir avantaj oluşturduğu söylenebilir. Ayrıca tüm çelik kesiti borlanmadığı için iç bölgedeki sünek ve tok yapı korunarak deformasyon enerjisi (darbe enerjisi) sönümlenme kapasitesinden ödün verilmemiştir. Buna ek olarak elde edilen borür tabakasının yüzey boyunca sürekli olması, FeB ve Fe₂B arasında herhangi bir çatlak ya da ayrılma içermemesi uygulanan borlama parametrelerinin doğru seçildiğini göstermektedir.

3.2. Balistik Test Sonrası Hasar Analizi

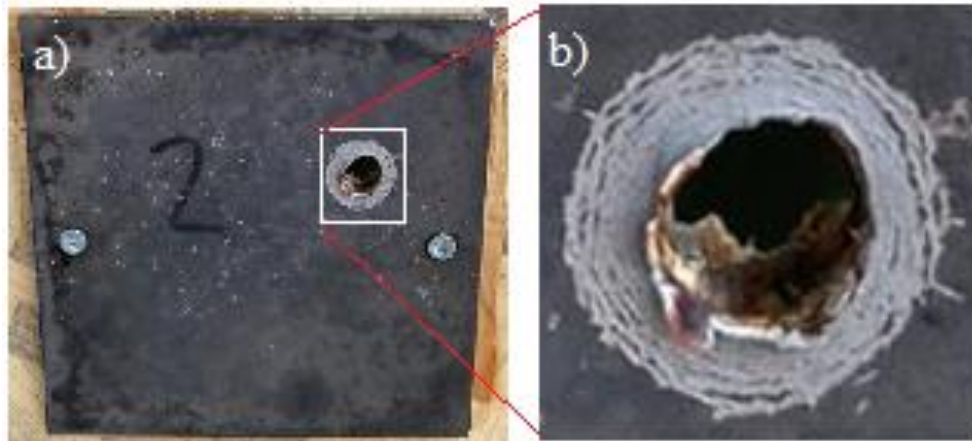
Şekil 4'te ZM-1 zırh modeline ait atış sonrası fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 4. ZM-1 tek katman (plaka ölçüleri: 100x100x5 mm) borlama yapılmamış AISI 304 çelik plakanın atış sonrası a) mermi hasarı b) mermi deliğinin büyütülmüş görüntüsü.

Şekil 4'te görüldüğü üzere mermi 100 mm x 100 mm x 5 mm ölçülerindeki AISI 304 paslanmaz çelik levhayı delip geçmiştir (perforasyon). Mermi isabet noktasının büyütülmüş görüntüsünde (Şekil 4b) mermi ceketine ait sıyrma artığı ile birlikte kenar çapağı oluşmuştur, delik çevresinin sünek malzeme yırtılma karakteristiği ile uyumlu düzgün kontura sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca mermi isabet çevresinde çarpma doğrultusunda ek bir deformasyon ve bükülme meydana gelmediği gözlenmiştir. Bu sonuca göre çok katmanlı zırh modelinde kullanılacak çelik plakanın çoklu isabet durumunda ek bir dezavantaj oluşturmayacağı söylenebilir.

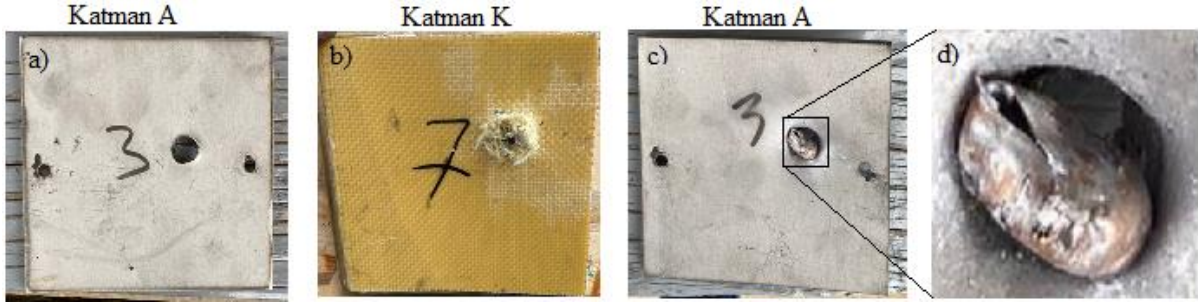
Şekil 5'te ise ZM-2 ye ait atış sonrası görüntüler verilmiştir.



Şekil 5. ZM-2 tek katman (plaka ölçüleri: 100x100x5 mm) borlanmış AISI 304 çelik plakanın atış sonrası a) mermi hasarı b) mermi deliğinin büyütülmüş görüntüsü.

Şekil 5'te görüldüğü üzere mermi 100 mm x 100 mm x 5 mm ölçülerindeki borlanmış AISI 304 paslanmaz çelik levhayı delip geçmiştir (perforasyon) ve oluşan delik düzgün kontura sahiptir. Şekil 5b'de verilen mermi isabet noktasının büyütülmüş görüntüsü incelendiğinde, mermi ceketine ait sıyrma artığı ile birlikte kenar çapağı olduğu gözlenmiştir. Buna ek olarak, delik çevresi borlama işlemi ile yüzeyde oluşan ince (yaklaşık 40 mikron) sert bor katmanının etkisini gösteren deformasyona bağlı radyal yönde çoklu halkalar şeklinde iz oluştuğu görülmektedir.

Şekil 4 ve Şekil 5'te verilen görüntülerden de anlaşıldığı üzere tek katman sırasıyla borlanmamış ZM-1 ve borlanmış ZM-2 zırh modellerinin G3 mermisini durdurmada başarısız olduğu görülmüştür. Kevlar ara katman kullanılarak mermiyi durdurmaya yönelik tasarlanan ZM-3 zırh modeline yapılan atışlar sonucunda ortaya çıkan hasar Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. ZM-3 zırh modelinde atış sonrası oluşan hasar görüntüleri.

Şekil 6'a göre mermi karşılama yüzeyinde borlanmasız A katmanında düzgün kontura sahip bir delik oluşmuştur. Mermi ara katman olan kevlar plakayı da (katman K) delip geçerek (Şekil 6b) arka destek plakasını delmiş ancak tam perforasyon yerine tam penetrasyon olduğu görülmüştür (Şekil 6d) diğer bir ifadeyle mermi çıkış hızı sıfırdır. Balistik limit, merminin hedefi delemeyen en yüksek hızdır veya bir diğer ifadeyle balistik limit hızının altındaki hızlarda mermi hedefi tam perforasyona (delip geçme) uğratamamaktadır (Carlucci & Jacobson, 2008). Bu durum ZM-3 modeli için balistik limiti sağlayan zırh modeline işaret etmektedir.

Şekil 7'de ise ZM-4 zırh modeline ait mermi hasarı verilmiştir.



Şekil 7. ZM-4 zırh modelinde atış sonrası oluşan hasar görüntüleri a) borlanmış çelik (B) b) çift katman kevlar plaka (K+K) c) borlanmış çelik (B).

Şekil 7 incelendiğinde mermi karşılama yüzeyi olarak kullanılan borlanmış çelik (B) katmanı ve çift katman kevlar (K+K) plakaların delindiği görülmektedir. Ancak arka destek olarak kullanılan borlanmış çelik katmanının (B) ise delinmeden kaldığı anlaşılmaktadır. Diğer bir ifade ile ZM-4 olarak kodlanan üstten alta doğru B+K+K+B olarak katmanlanmış zırh kombinasyonu G3 mermisini tam olarak durdurmuştur. Buradan hareketle hem borlama işlemi sayesinde sertliği yaklaşık 7 kat artırılan B katmanının mermiyi deforme ederek enerjisini dağıtmada etkili olduğu hem de çift katman (K+K) kevlar plakaların merminin kalan kinetik enerjisini örgü kumaş ve reçine ile plaka haline getirilen ve yüksek sürtünme yüzeyi sağlayan esnek yapısı sayesinde sönmüleyebildiği söylenebilir.

4. Sonuçlar

Yapılan çalışmada, yüksek tahrip gücüne sahip G3 mermisine karşı balistik koruma sağlayabilecek yeni bir araç zırhı modelinin tasarımı, prototip üretimi ve balistik testlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında 7.62 mm kalibreli kurşun çekirdekli ve yaklaşık 800 m/s namlu çıkış hızına sahip G3 mermisinin 30 m atış mesafesinden gerçekleştirilen balistik testlerinden elde edilen bulguları aşağıdaki şekilde özetlemek mümkündür.

- AISI 304 paslanmaz çelik diğer karbon çeliği ve alaşımlı çeliklere oranla yaklaşık 5 kat daha yüksek darbe sönmüleme enerjisine sahip olması nedeniyle zırh uygulamalarında metal katman olarak tercih edilebilir.
- Borlama işlemi ile AISI 304 plaka yüzey sertliği yaklaşık 7 kat artırılmıştır. Bu durumun mermi deformasyonunda önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

- Tek katman borlanmamış çelik (A) ve borlanmış çelik (B) katmanlarının yeterli balistik direnci sağlayamadığı gözlenmiştir.
- Borlamasız çelik ön ve arka destek katmanının arasında tek katman kevlar plakasının yer aldığı A+K+A lamine sıralı ZM-3 zırh modelinin tam penetrasyon ile balistik limit şartlarını karşıladığı saptanmıştır.
- ZM-4 ile belirtilen B+K+K+B lamine sıralı zırh modelinin G3 mermisini tam olarak durdurduğu tespit edilmiştir. Buradan hem borlama işleminin mermi deformasyonunda hem de çift katman kevlar plakasının mermi kinetik enerjisini absorbe etmede başarılı sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

Bu makale çalışmasının gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı Müslüm KELEKÇİ'ye teşekkür ederiz.

Kaynaklar

1. Arslan, M., Karimzadehkhoei, M., Sireli, G.K., Coskun, O.K., Sert, M. & Timur, S. (2022). Investigating Growth of Iron Borides with the Formation of Monolithic Fe₂B Layer on AISI 304 Stainless Steel via Cathodic Reduction and Thermal Diffusion-Based Boriding. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(4), 3274-3286.
2. Arteaga-Hernandez, L.A., Cuao-Moreu, C.A., Gonzalez-Rivera, C.E., Alvarez-Vera, M., Ortega-Saenz, J.A. & Hernandez-Rodriguez, M.A.L. (2021). Study of boriding surface treatment in the tribological behavior of an AISI 316L stainless steel. *Wear*, 477, 203825.
3. Ash, R.A. (2016). *Vehicle Armor. Lightweight Ballistic Composites: Military and Law-Enforcement Applications*. Elsevier Ltd., Woodhead Publishing, New York.
4. Başaran, B. (2007). *Computational Analysis Of Advanced Composite Armor Systems* (Master's thesis, Orta Doğu Teknik Üniversitesi).
5. Bitlisli, B. (2019). *Zırhlı Araçlarda Kullanılan Kompozit Zırh Malzemelerinin Balistik Performanslarının İncelenmesi* (Master's thesis, Bursa Uludağ Üniversitesi).
6. Campos-Silva, I., Hernández-Ramirez, E.J., Contreras-Hernández, A., Rosales-Lopez, J.L., Valdez-Zayas, E., Mejía-Caballero, I. & Martínez-Trinidad J. (2021). Pulsed-DC powder-pack boriding: Growth kinetics of boride layers on an AISI 316 L stainless steel and Inconel 718 superalloy. *Surface and Coatings Technology*, 421, 127404.
7. Candan, C. (2005). Zırh Teknolojilerindeki Gelişmeler. Zırh Teknolojileri Semineri, 10-11 Mart, Ankara, Milli Savunma Bakanlığı Arge ve Teknoloji D. Bşk.lığı
8. Carlucci, D.E. & Jacobson, S.S. (2008). *Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition*. CRC Press. p. 310. ISBN 978-1-4200-6618-0.
9. Demircioğlu, T.K., Candan, C. & Kasım, İ.A. (2011). Organik Matrisli Kompozit Malzeme Kullanılarak Oluşturulan Hibrit Zırh Plakasının Terminal Balistik Özelliklerinin İncelenmesi. I. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, 17-19 Kasım, İzmir.
10. Fernández-Fdz, D. & Zaera, D. (2008). A New Tool Based on Artificial Neural Networks for the Design of Lightweight Ceramic-Metal Armour Against High-Velocity Impact of Solids. *International Journal of Solids and Structures*, 45, 6369-6383.
11. Flores-Johnson, E.A. & Saleh, M. & Edwards, L. (2011). Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile. *International Journal of Impact Engineering*, 38(12), 1022-1032.
12. Gençer, Y. (2016). Zırh Malzemesi Olarak Borür/Metal Tabakalı Kompozitlerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu. Tübitak projesi, Proje No. 213M166.
13. Günen, A., Kurt, B., Orhan, N. & Kanca, E. (2014). The investigation of corrosion behavior of borided AISI 304 austenitic stainless steel with nanoboron powder. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 50(1), 104-110.
14. Güneş, R. (2015). Fonksiyonel Kademelendirilmiş Sandviç Plakaların Balistik Darbe Etkisi Altında Lineer Olmayan Mekanik Analizleri. Tübitak projesi, Proje No: 112M917.
15. Hazell, P.J. (2016). *Armour Materials, Theory and Design (First Edition)*. CRC Press, Taylor & Francis Group, New York.
16. Jinzhu, L., Liansheng, Z. & Fenglei, H. (2017). Experiments and Simulations of Tungsten Alloy Rods Penetrating into Alumina Ceramic/603 Armor Steel Composite Targets. *Int. Journal of Impact Engineering*, 101, 1-8.
17. Kayali, Y., Büyüksağış, A. Güneş, I. & Yalçın, Y. (2013). Investigation of corrosion behaviors at different solutions of boronized AISI 316L stainless steel. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*,

- 49(3), 348-358.
18. **Lo ´pez-Puente, J., Arias, A., Zaera, R. & Navarro, C. (2005).** The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study. *International Journal of Impact Engineering*, 32, 321–336.
 19. **Medvedovski, E. (2010).** Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1. *Ceramics International*, 36 (7), 2103-2115.
 20. **Meyers, M.A. (1994).** *Dynamic Behavior of Materials*. John Wiley & Sons Inc, New York, pp. 597.
 21. **Rahman, N.A., Abdullah, S., Zamri, W.F.H., Abdullah, M.F., Omar, M.Z. & Sajuri Z. (2016).** Ballistic Limit of High-Strength Steel and Al7075-T6 Multi-Layered Plates Under 7.62-mm Armour Piercing Projectile Impact. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13, 1658-1676.
 22. **URL-1, (2020).** <https://ayam.com.tr/arastirma/turkiyede-son-5-yilda-yasanan-gelismeler-savunma-sanayi-2015-2020/>
 23. **Übeyli, M., Yıldırım, R.O. & Ögel, B. (2007).** On the comparison of the ballistic performance of steel and laminated composite armor. *Materials and Design*, 28, 1257–1262.
 24. **Übeyli, M., Deniz, H., Demir, T., Ögel, B., Gürel, B. & Keleş, Ö. (2011).** Ballistic impact performance of an armor material consisting of alümina and dual phase steel layers. *Materials & Design*, 32 (3), 1565-1570.
 25. **Ünal, E. (2005).** *Development And Characterization Of Light-Weight Armor Materials* (Master's thesis, İzmir İleri teknoloji Enstitüsü).
 26. **Ziylan, A. (2001).** Savunma Nereden Nereye Türkiye’de Savunma Sanayii Tarihçesi. *Ulusal Strateji Dergisi*, 1-7. <https://www.inovasyon.org/images/makaleler/pdf/AZ.Savunma%20Nereden%20Nereye.pdf> Son erişim tarihi: 20 Şubat 2023.