



ORGANİK MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEME KULLANILARAK OLUŞTURULAN HİBRİT ZİRH PLAKASININ TERMİNAL BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

T.Kerem Demircioğlu¹, Can Candan², İrfan Ay¹

¹ Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, Türkiye

² 6'ncı Ana Bakım Merkezi Komutanlığı, Balıkesir, Türkiye
tkerem@balikesir.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada askeri araçların zırhlandırılmasına yönelik olarak, 9 mm'lik mermi tehdidine karşı, para-aramid (Kevlar®) ve st37 sac malzeme kullanılarak elde edilen zırh malzemesine dünya standartlarına uygun balistik test yöntemi uygulanmıştır. Bu test sonuçları, sonlu elemanlar programı AUTODYN kullanılarak yapılan sayısal analiz çalışmalarının neticeleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Yapılan test sonuçlarıyla, elde edilen sayısal sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Organik matrisli kompozit malzeme, para-aramid, terminal balistik, sonlu elemanlar.

1. GİRİŞ

Son yıllarda terör olaylarının artması sonucu balistik zırhlarda tabakalı kompozit yapılar üzerine çalışmalar yaygınlaşmaktadır. Tabakalı zırhlar esas olarak ön katman ve destek katmanlarından oluşmaktadır. Sert metal ya da seramik gibi malzemelerden oluşan ön tabakalar mermi uç geometrisini balistik etkiyi azaltacak şekilde bozmaktadır. Kompozit malzemedan oluşan destek tabakası ya da tabakaları, ön katman tarafından kısmen durdurulan tehdidin kalan enerjisini soğurmaktadır [1].

Balistik darbe analiz ve tasarımı için genellikle deneysel ve sayısal çalışmalar paralel olarak yürütülmektedir. Sağlıklı analizlerin yapılması için, öncelikle darbe sırasında gerçekleşen ardışık olayların iyi şekilde kavranması gerekmektedir. Balistik darbe sırasında o derece ani bir basınç yüklemesi olmaktadır ki, darbeye maruz kalan zırh malzemesi ve mermi bu etkiyi kendi içinde iletmeye zaman bulamamaktadır. Bu durumda katı malzeme içinde ilerleyen bir şok dalgası oluşmaktadır. Geometri, ağırlık, darbe hızı ve çeşitli malzeme özellikleri gibi pek çok etmene bağlı olarak değişen bu şok dalgası büyük sıkıştırma, genleşme ve kayma (*shear*) oluşması olarak kendini göstermektedir. Ortaya çıkan yüksek basınç yükleri metal gibi malzemelerin dayanım sınırlarının çok üstünde olduğundan, malzeme akışkan bir davranış göstermektedir. Ayrıca sıkışma ve buna bağlı ortaya çıkan yüksek enerji nedeni ile ısınma ve ani bölgesel sıcaklık artışları elde edilmektedir. Tüm bu karmaşık dinamik yüklemenin saniyenin binde birinden çok daha kısa bir zaman dilimi içinde olup bitmesi, hem test yöntemlerinin hem de analizlerin gerçekleştirilmesini ve değerlendirilmesini karmaşık hale getirmektedir [1].

Sayısal analiz yöntemi olarak eksplisit sonlu elemanlar yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemler için kullanılan malzeme modelleri çok kapsamlı malzeme değerleri ve model değişkenlerinin kullanımını gerektirmektedir [1]. Deneysel çalışma sonuçlarına göre sayısal model için gerekli olan değişkenler seçilmektedir.

Bu çalışmada Kevlar® 129 ve st37 çelik saç malzeme, zırh malzemesi olarak kullanılmıştır. 9 mm' lik mermi, 5 metre mesafeden deney düzeneğindeki zırh üzerine atılarak hem zırh malzemesi üzerinde hem de merminin kendisinde meydana gelen deformasyon, sayısal analiz ve deneysel olarak irdelenmiştir.

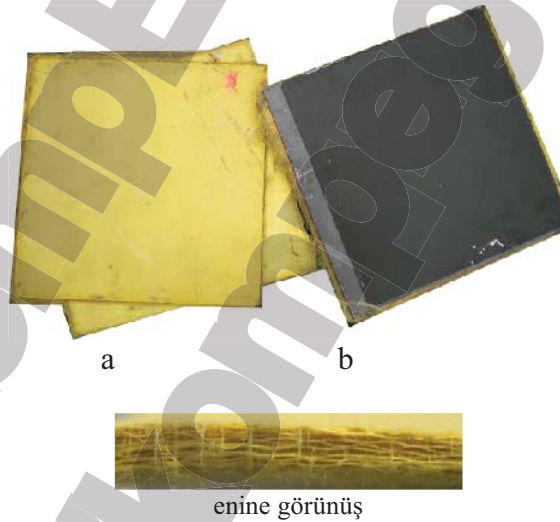
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Kevlar® Plaka Malzemenin Hazırlanması

Üst kısmı fenolik reçine (PVB-Polyvinyl Butyral) filminden oluşan (3140 dtex) Kevlar® 129 prepreg tabaka, 300x300mm boyutlarında kesilip üst üste yerleştirilerek, önceden 160 C° sıcaklıkta ısıtılmış olan bir preste 4 bar basınçta, 10 dakika süre ile preslenerek istenilen kalınlıkta üretilmişlerdir. Üretimde prepreg (pre-impregnated) tabakaların kullanılmasıyla ayrıca bir reçine emdirme işlemine gerek kalmamıştır. Tabaka ağırlığının % 12 sini fenolik reçine oluşturmaktadır. 1,5 mm kalınlığındaki ön katman olarak kullanılacak olan st 37 çelik plaka, kontak tutkalı (kauçuklu yapıştırıcı) ile Kevlar® plakaya yapıştırılmıştır (bknz şekil 1a, 1b). Tablo 1' de Kevlar® 129 prepreg tabakanın özellikleri görülmektedir [2].

Tablo1. Kevlar® 129 prepreg tabakanın özellikleri

Dokuma Tipi	Toplam Ağırlık (g/m ²)	Kırılma dayanımı (cN/tex)	Uzama (%)	Modül (cN/tex)
1/1 Düz (plain weave)	450±20	190±5	2.9	6390±5



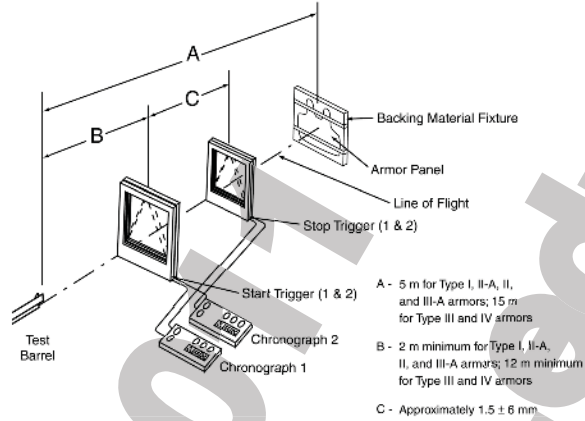
Şekil 1. a) “Kevlar® 129” plaka b) Kevlar® plakaya st 37 yapıştırılmış hali

2.2 Deneysel Düzenek

Şekil 2a' da görülen deney düzeneği, plakayı ve silahı sabitlediğimiz iki sehpadan oluşmaktadır. Şekil 2b' de şematik şekilde görülen kronograf (hızölçer) satın alınmış fakat bu çalışmada kullanılmadığından mermi hızı (NIJ 0101.04 standardında zırh tipi 3A daki 9 mm FMJ RN kurşun tehdidine göre) ortalama 430 m/s olarak kabul edilmiştir [3].



a) Deney düzeneği



b) Şematik hız ölçerli deney düzeneği

Şekil 2. Deney Düzeneği

Çalışmada 9x19 parabellum standart mermi kullanılmıştır. Antimon alaşımli kurşundan üretilen çekirdek ve pirinç gömlekten oluşan merminin kütlesi 8.2 gr dır. Atışlar mengeneye sabitlenmiş 9x19 kalibreli tabanca kullanılarak yapılmıştır (bknz şekil 2a).

2.3. Sayısal Analiz

Analiz çalışmalarında mermi çekirdeği ve gömleği şekil 3’ teki gibi gerçek boyutlarında, çözümlemede sayısal hataların da olabileceği göz önüne alınarak ANSYS ICEM CFD programında, Kevlar® plaka geometrisi katmanlar halinde ayrı ayrı değil bir bütün olarak ANSYS AUTODYN programında modellenmiştir.



Şekil 3. 9 mm FMJ kurşun ve çekirdeğinin geometrisi ve ölçüleri

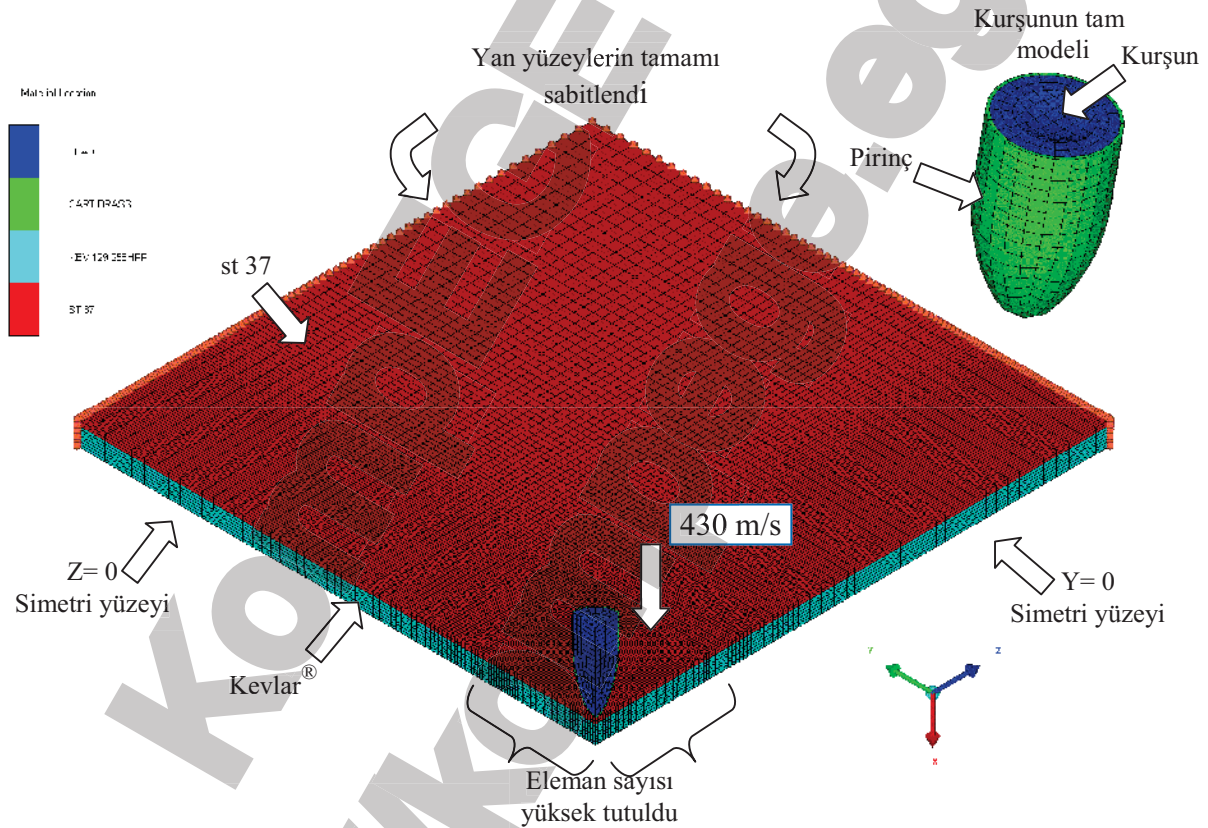
Kevlar® dan yapılmış olan zırh plakasının balistik direnci hidrokod (hydrocode) simülasyonları kullanılarak değerlendirilmiştir. Hidrokod, gerilmeleri, hızları ve şok dalgalarının yayılmasını yer ve zamanın fonksiyonuna göre hesaplayabilen bir bilgisayar programıdır. Son 20 yıldır hidrokodlar alüminyum ve çelik gibi izotropik malzemelerin yüksek hızlı çarpışma simülasyonlarında kullanılmaktaydı. Daha güçlü ve hafif fiber malzemelerinin gelişmesiyle (Kevlar®, Spectra® ve Zylon® gibi) hydrocode yazılımları izotropik olmayan malzemelerin çarpışma simülasyonlarında daha çok kullanılır olmuştur. İzotropik olmayan kompozit malzemelerin balistik etkisi çelik ve alüminyum gibi izotropik

olan malzemelerinkinden daha karmaşıktır ve daha çok malzeme tanımlaması gerektirmektedir ve hidrokod yazılımı aşağıdaki esasları hesaba katmaktadır.

Bunlar;

- Anizotropik mukavemet azalması,
- Malzeme anizotropisi
- Erime, buharlaşma ve ayrışma,
- Şok tepkisi,
- Hacimsel ve sapma gerilmesinin (deviatoric stress) birlikte tepkisidir [4].

Mermi, mermi gömleği, Kevlar® ile st37 plakalar için lagrange çözücüsü ve hexahedron (altıyüzeyle) elemanlar kullanılmıştır. (bkz şekil 4). Deneysel çalışmada çarpışma olduktan sonra kurşunun Kevlar® ve St37 malzemelerindeki deformasyon alanının en fazla 100x100mm lik alanda yoğunlaştığı gözlemlendiğinden ve ayrıca hesaplama süresini ve bilgisayardaki alanı azaltmak için kurşun ve plakalar $Y=0$ ve $Z=0$ yüzeylerine göre simetrik alınmış ve 300x300mm plakalar, 100x100mm olarak modellenmiştir.



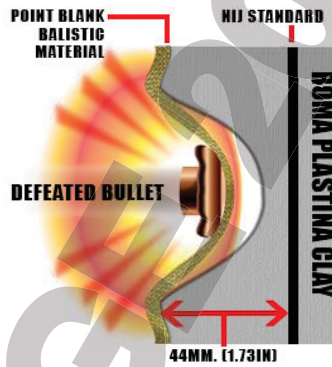
Şekil 4. Mermi, zırh plakasının ¼ nümerik modeli

Kurşun malzemesinde Steinberg Guinan mukavemet modeli, pirinç ve st37 malzemelerinde Johnson-Cook mukavemet modeli kullanılmıştır. Kevlar®'da ortotropik durum denklemi (Equation of State - EOS) kullanırken, kurşun, pirinç, st37 malzemesinde şok (shock) durum denklemi seçilmiştir. Kurşun (Lead) ve Pirinç (Cartridge Brass) malzeme özellikleri AUTODYN programının malzeme kütüphanesinde bulunmaktadır [5]. St37 ve Kevlar® 129 için malzeme özellikleri literatürden bulunarak programa girilmiştir [6,7]. Kurşunun plakaya

çarptığı, deformasyonun yüksek olduğu alanındaki eleman sayıları diğer kısımlara göre arttırılarak daha hassas bir yapı elde edilmeye çalışılmıştır.

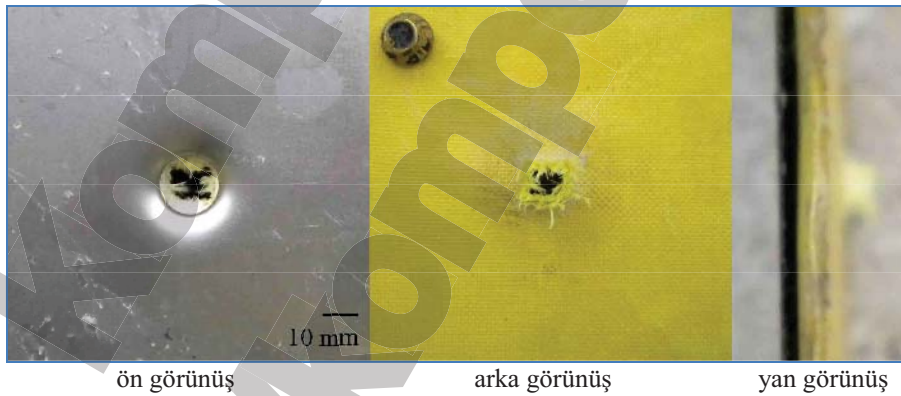
3. DENEYSEL VE SAYISAL SONUÇLAR

Zırh malzemesine giren kurşunun oluşturduğu arka yüz izi karşılaştırmaları çok güç olan birçok farklı test standartlarına izin vermektedir. Genel olarak İngiliz, Alman ve diğer Avrupa standartları **20-25 mm** “arka yüz izi” ne izin verirken, Amerikan-NIJ standartları **44 mm** ye kadar izin vermektedir (bknz şekil 5). Bu ölçü daha fazla olduğu takdirde darbe travması etkisi yapıp yaralanmaya ve ölümlere neden olacaktır [8].



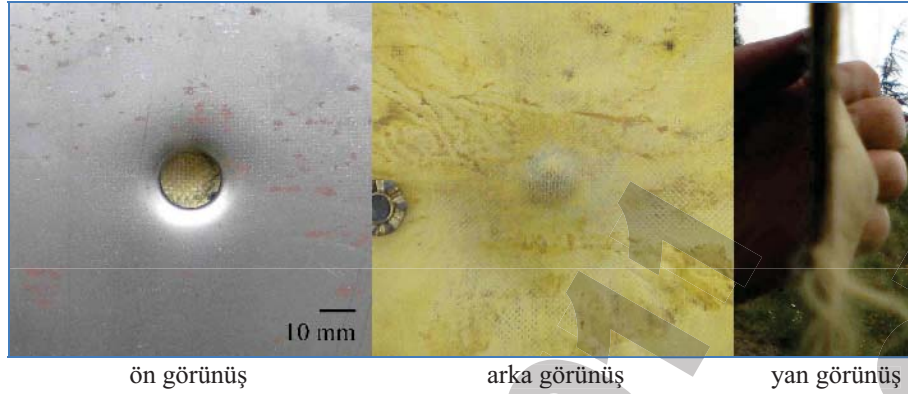
Şekil 5. Arka yüz izi oluşumu

Şekil 6’da beş kat Kevlar ve st 37 sac malzemeden oluşan zırh plakasının 430 m/s hızla atılan 9 mm lik kurşunun plakayı ön, arka ve yandan görünüşlerde nasıl deldiği görülmektedir. Zırh plakası dayanmamıştır.



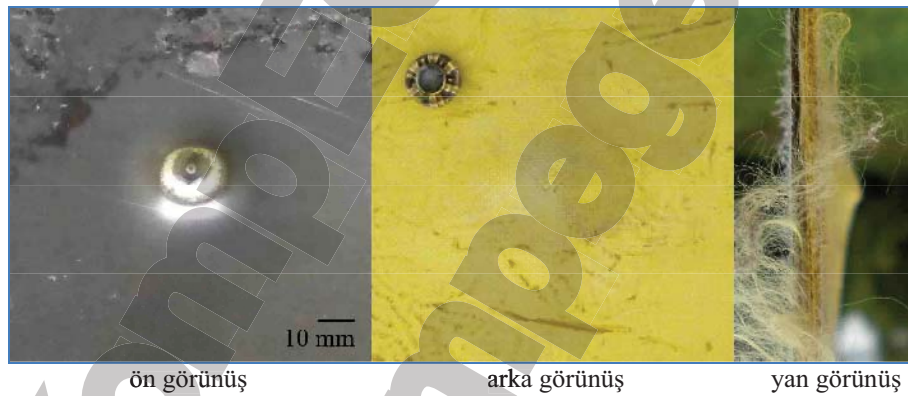
Şekil 6. Beş Kat Kevlar® ve st 37

Şekil 7’de sekiz kat Kevlar® ve st 37 sac malzemeden oluşan zırh plakasının 430 m/s hızla atılan 9 mm lik kurşunun plakayı ön, arka ve yandan görünüşlerde delemeyeceği görülmektedir. Arka yüz izi derinliğini bulmak için, zırh plakasının arkasına insan vücudunu temsilen cam macunu konulmuştur. Macunda oluşan çöküntü miktarı 29,40 mm olarak ölçülmüştür.

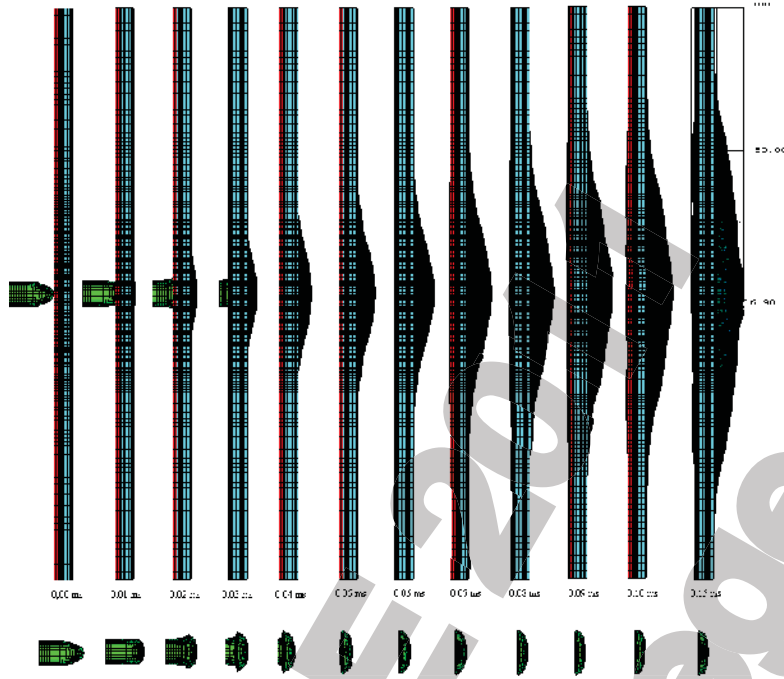


Şekil 7. Sekiz Kat Kevlar® ve st 37

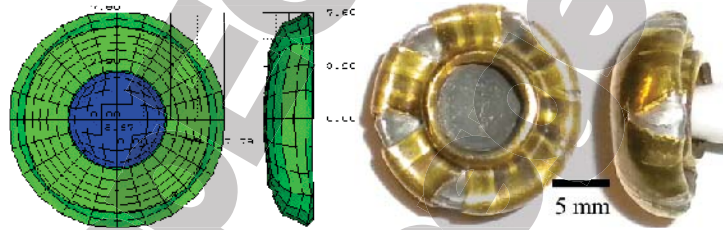
Şekil 8a'da onbir kat Kevlar® ve st 37 saç malzemedan oluşan zırh plakasının 430 m/s hızla atılan 9 mm lik kurşunun plakayı ön, arka ve yandan görünüşlerde delemediği görülmektedir. Deney sonucu oluşan çöküntü miktarı 17,40 mm ve deforme olmuş kurşunun çapı yaklaşık 15.65 mm olarak ölçülmüştür. Şekil 8 b ve Şekil 8 c' de görüldüğü gibi sayısal çözümde 0.15 ms de ise bu çöküntü miktarı 16.98 mm ve deforme olmuş kurşunun çapı 15.60 mm olarak bulunmuştur. Onbir katlı zırh plakası için de mükemmel bir uyum yakalanmıştır. Şekil 8d'de sayısal analizde kurşun ve üzerindeki piriç gömleğin st 37 saç ve Kevlar® malzemelerinin x yönündeki ortalama hız - zaman grafiği görülmektedir.



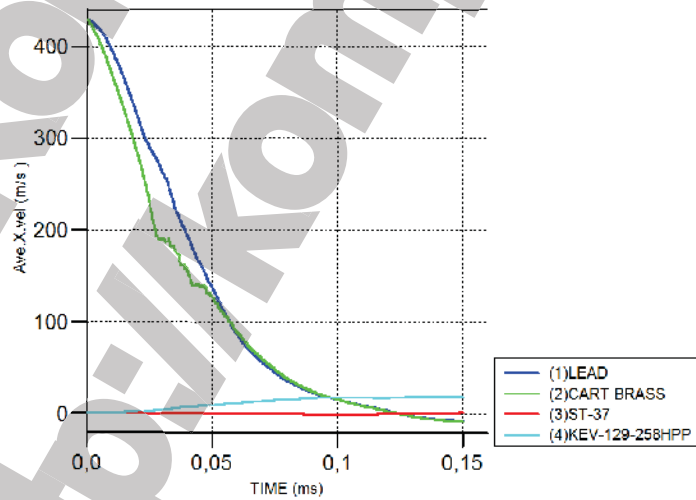
Şekil 8a. Onbir Kat Kevlar® ve st 37



Şekil 8b. Sayısal Analizde, onbir Kat Kevlar® ve st 37 malzemelerinde 0 ms den 0,15 ms zamana kadarki deformasyon

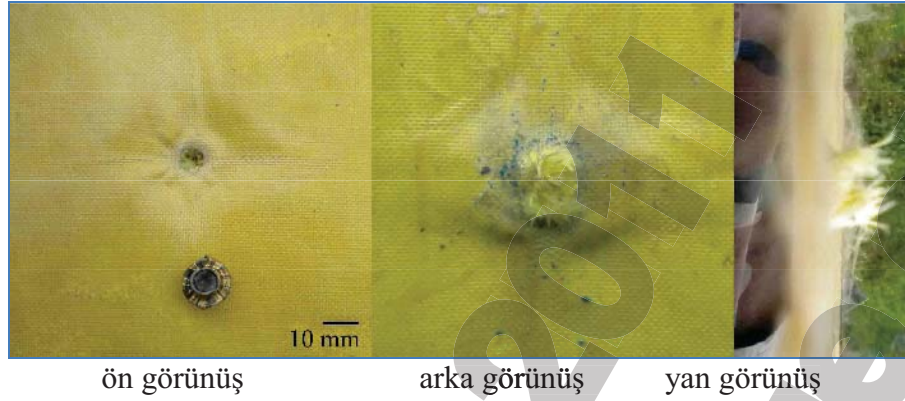


Şekil 8c. Analizde 0,15 ms deki kurşunun ve deneydeki kurşunun son boyutlarının karşılaştırılması



Şekil 8d. Onbir Kat Kevlar®, st 37 saç, kurşun ve pirinç malzemelerinin x yönündeki ortalama hız-zaman grafikleri

Şekil 9’da sadece on kat Kevlar®’dan oluşan zırh plakasının 430 m/s hızla atılan 9 mm lik kurşunun plakayı ön, arka ve yandan görünüşlerde nasıl deldiği görülmektedir. Zırh plakası dayanmamıştır.



Şekil 9 . On Kat Kevlar®

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma sonunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

1. Kevlar® ve st 37 saç tan oluşan zırh malzemesi, Kevlar® 5 kat yapıldığı takdirde 5 m mesafeden 9 mm’lik kurşun atıldığında delinmektedir. Kevlar® 8 kat ve 11 kat yapıldığında zırh malzemesi bu darbeye dayanmaktadır. Kevlar® malzemesi sadece 10 kat kullanıldığında 9 mm’lik kurşuna dayanmamıştır.
2. Sekiz kat Kevlar® ve st37 saçtan oluşan zırh malzemesine 9 mm kurşun atıldığında oluşan arka yüzeydeki çöküntü miktarı 29,40 mm ölçülmüştür (bkz tablo 2). 44 mm den küçük olduğu için zarar vermeyecek nispette olduğu görüldü.
3. Onbir kat Kevlar® ve st37 saçtan oluşan zırh malzemesine 9 mm kurşun atıldığında oluşan arka yüzeydeki çöküntü miktarı 17,40 mm ölçüldü (bkz tablo 2). Bu miktar sayısal analizde 16,98 mm bulunarak uyum içinde olduğu görülmüştür. Ayrıca deneyde deforme olmuş kurşunun çapı yaklaşık 15.65 mm iken analiz sonucu bu değer 15.60 mm olarak bulunmuştur.
4. Sayısal analiz sonucu onbir kat Kevlar® ve st 37 saçtan oluşan zırh malzemesine kurşun ve pirinç 430 m/s ile girip sonuçta 0,15 milisaniye deki hızları sıfıra düşmüştür. Bu esnada saçtaki ve Kevlar® malzemedeki hız çok az değişmiştir.

Tablo 2. Yapılan Deneyler

Yapılan Deneyler	Kevlar® Plakasının Kalınlığı (mm)	Kurşunun Deformasyon Sonrası Çapı (mm)	Kurşunun Deformasyon Sonrası Yüksekliği (mm)	Kevlar® Plakanın Arka Yüz İz Durumu (mm)
5 Kat Kevlar®+ St37 Saç	0,45*5=2,25	13,10-13,50	10,10-10,65	Delindi
8 Kat Kevlar®+ St37 Saç	0,45*8=3,6	16,00-16,10	7,30-7,65	29,40
11 Kat Kevlar®+ St37 Saç	0,45*11=4,95	15,50-15,80	6,80-7,00	17,40
10 Kat Kevlar®	0,45*10=4,5	14,45-15,10	9,10-9,40	Delindi



Teşekkür

Deneysel çalışmalar Balıkesir 6'ncı Ana Bakım Merkezi Komutanlığı fabrikası tesislerindeki imkânlardan faydalanılarak yapılmıştır. Fabrika yetkililerine teşekkür ederiz.

5. KAYNAKLAR

1. Şenel, F., Balya, B., Parlas, L., İleri kompozit zırh malzemelerinin balistik analizi, *SAVTEK*, ODTÜ, Ankara, 2004, 1-10.
2. Akdemir, A., Candan, C., Şahin, Ö. S., Effects of production parameters and conditioning upon ballistic characteristics of para aramid light armors, *Journal of Composite Materials*, 2008, Vol. 42, 2051.
3. NIJ Standard-0101.04 Revision A, *Ballistic Resistance of Personnel Body Armor*, June 2001.
4. Tham, C.Y., Tan, V.B.C., Lee, H.P., Balistic impact of a KEVLAR® helmet: experiment and simulations, *International Journal of Impact Engineering*, 2008, Vol.35, 304-318.
5. Johnson, G.R., Cook, W.H., A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures., *Seventh international symposium on ballistics*, Hague, Netherlands, 1983.
6. Majzoobi, G.H., Hosseini, A., Shahvarpour, A., An Investigation into ductile fracture of St37 and pure copper at high strain rates:part II: simulations, *Special Edition Metal Forming Conference*, 2008, Vol. 2, 712-718.
7. Justo, J. M. C. F., Estudo do comportamento ao impacto de alta velocidade de estruturas em materiais compósitos, Universidade do Porto (Porto Üniversitesi), Junho 2005.
8. Wilhelm, M., Bir, C., Injuries to law enforcement officers: the backface signature injury, *Forensic Sci Int.*, 2007, Vol. 174(1), 6-11.