



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



B₄C/SiC/Al₂O₃ parçacık takviyelendirilmiş alüminyum sandviç köpük ile Ramor 500 zırh çeliğinin bir araya getirilmesi ve balistik performansının araştırılması

B₄C/SiC/Al₂O₃ particle reinforced aluminum sandwich foam and Ramor 500 armor steel to be combined and investigation of the ballistic performance

Yazar(lar) (Author(s)): Halil KARAKOÇ¹, Aytekin ULUTAŞ², Hanifi ÇİNİCİ³

ORCID¹: 0000-0002-2444-6037

ORCID²: 0000-0002-5230-7122

ORCID³: 0000-0002-2590-1118

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Karakoç H., Ulutaş A., ve Çinici H., “B₄C/SiC/Al₂O₃ parçacık takviyelendirilmiş alüminyum sandviç köpük ile Ramor 500 zırh çeliğinin bir araya getirilmesi ve balistik performansının araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 297-310, (2020).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.527770

B₄C/SiC/Al₂O₃ Parçacık Takviyelendirilmiş Alüminyum Sandviç Köpük ile Ramor 500 Zırh Çeliğinin bir Araya Getirilmesi ve Balistik Performansının Araştırılması

Araştırma Makalesi / Research Article

Halil KARAKOÇ^{1*}, Aytekin ULUTAŞ², Hanifi ÇİNİCİ³

¹Hacettepe ASO 1.OSB Meslek Yüksek Okulu, Makine Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Türkiye

²Edremit Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Balıkesir Üniversitesi, Türkiye

³Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 15.02.2019 ; Kabul/Accepted : 09.04.2019)

ÖZ

Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi ile hazırlanan SiC, B₄C ve Al₂O₃ içeren ve parçacık içermeyen Al sandviç köpüklerin (ASK) balistik performansları araştırılmıştır. Bu amaçla, karışım tozlar soğuk presleme işleminden sonra ekstrüze hadde işlemine tabi tutularak 690 °C köpürtme sıcaklığında 50x50x20 mm² ölçülerinde blok şeklinde sandviç köpükler üretilmiştir. Üretilen sandviç köpükler 50x50x7 mm² boyutlara sahip olan Ramor 500 zırh çeliği silikon esaslı reçine ile yapıştırılarak balistik test için zırh numuneleri hazırlanmıştır. Yapılan çalışmada sandviç köpüklerin önde olduğu tasarımlarda zırh çeliğinden kopan parçacık çapının daha az olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca balistik çarpma sonucunda sandviç köpüklerde lokalize yoğunlaşma ve taç yaprağı şeklinde hasar meydana geldiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Balistik, sandviç köpük, zırh.

B₄C/SiC/Al₂O₃ Particle Reinforced Aluminum Sandwich Foam and Ramor 500 Armor Steel to be Combined and Investigation of the Ballistic Performance

ABSTRACT

In this study, the ballistic performances of particle-free Al sandwich foams (ASK) containing SiC, B₄C and Al₂O₃ prepared by powder metallurgy were investigated. For this purpose, the mixture powders were subjected to extrusion milling after cold pressing and sandwich foams of 50x50x20 mm² were produced at 690 °C foaming temperature. Produced sandwich foams, 50x50x7 mm² dimensions of ramor 500 armor steel with silicon resin was glued and the armor samples were prepared for ballistic testing. In the study, it was determined that the particle diameter which is broken from the armor steel is less in the designs where the sandwich foams are leading. In addition, ballistic collisions resulted in localized condensation and petal damage in the sandwich foams.

Keywords: Ballistic, sandwich foam, armor.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Metalik köpükler, iyi enerji sönümleme özelliği, yüksek basma dayanımı, düşük özgül ağırlık ve yüksek rijitlik gibi mekanik ve fiziksel özellikleri ile bilinir [1]. Çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanım alanı bulabilen malzemeler olarak son yıllarda oldukça ilgi çekmektedir.

Özellikle alüminyum esaslı metalik köpükler, kapalı hücre yapısı ve çok hafif olması ile göze çarpmaktadır. Alüminyum köpükler, darbe enerjisini plastik enerjiye dönüştürebilir ve birçok metalden daha fazla enerji sönümleyebilir [2,3]. Alüminyum köpük malzemeler

otomotiv sanayinde, uzay sanayinde, demir yolu taşımacılığında, imalat makine gövdelerinde ve savunma sanayinde kullanılmaktadır [4-7].

Sandviç metalik köpükler iki metal levha arasında köpürtülmüş metal içeren yapılardır. Bu yapılar genelde köpürtülecek metal alüminyum, çelik ve titanyum gibi geleneksel metal levhalarının arasında haddelenerek veya yapıştırılarak elde edilebilir. Son işlem olarak uygulanan ısı ile sandviç yapılar meydana geldiğinde sadece merkezdeki köpürtülecek malzeme genişler ve yüzey levhalarının yoğunluğu değişmez [8]. Bir sistem yardımıyla fırlatılan cisimlerin (özellikle mermilerin) namlu içerisindeki hareketlerini, atmosferik koşullarda yerçekimi kuvvetinin etkisiyle yapmış olduğu

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : halil.karakoc@hacettepe.edu.tr

hareketleri ve hedef üzerindeki etkileri inceleyen bilim dalı olan balistik mekanik biliminin özel bir alanı olarak bilinmektedir [9,10].

Balistik zırhların geliştirilmesine yönelik yapılan çalışmalara Wilkins ve arkadaşlarının yaptığı seramik/metal zırhlar ile ilgili çalışmalar öncülük etmiştir [11]. Seramik/destek plakasından (metal veya kompozit) oluşan zırha merminin çarpması ile ara yüzeyde meydana gelen gerilme dalgasının etkisi destek plakasının dayanımına bağlıdır ve seramiğin kırılmasında önemli rol oynar [12,13]. Seramiğin kırılması ince seramik parçacıkları meydana getirir. Meydana gelen bu ince seramik parçacıkları yüksek iç sürtünmelere yol açarak merminin ilerleme hızının azalmasına neden olabilir [14]. Eğer seramik iyi desteklenir ve dalga hasarından korunursa yüksek dirençli geçirgenlik gösterir [15,16].

Bazle ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda [13] Al köpük içeren ve içermeyen balistik hedefler tasarlanmış ve alüminyum köpük içerisinde şok dalga yayılımı kıyaslanması için test edilmiştir. Al esaslı metalik köpüklerin dinamik deformasyonu çarpma yüzeyinde başlamış ve yoğunluk tamamlanıncaya kadar kalınlık içerisinde yayılmıştır. Alüminyum köpüğün gözenekli yapısı gerilme dalgalarını dağıtır ve ince dalgalar olarak hareket ettirir. Alüminyum köpük içerisinde gerilme dalgalarının dağılım etkisi sadece yoğunluk tamamlandıktan sonra meydana gelmektedir. Al bazlı metalik köpüğün kullanılmadığı bir tasarımda ilk başta görülmektedir [13]. Köpükte kısmi yoğunlaşma meydana geldiğinde gerilme dalgaları filtre edilerek hareket edebilir. Bu sayede alüminyum köpüğün arka plakaya iletilen gerilmenin etkisini azalttığı tespit edilmiştir. Son zamanlarda özellikle ABD de Al esaslı metalik köpüğün darbe emme özelliği sebebi ile integral zırh malzemesi üretiminde kullanılması konusunda yoğun çalışmalar yapılmaktadır [13].

Bu çalışmada, alüminyum alaşım (Al7Si0,6Mg0,8TiH₂) sandviç köpük malzemeler ve B₄C, SiC ve Al₂O₃ parçacık takviyeli kompozit sandviç köpük malzemeler üretilmiştir. Üretilen parçacık ilaveli Al esaslı sandviç köpükler Ramor 500 zırh çeliği ile bir araya getirilerek 7,62x51mm çelik çekirdek zırh delici mermiler karşısındaki balistik performansı araştırılmıştır. Balistik test sonrası malzeme yüzeyinde meydana gelen hasar mekanizmaları incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

ASK malzemelerin üretilmesinde Al, Si, Mg, TiH₂, B₄C, SiC ve Al₂O₃ tozları kullanılmıştır. Kullanılan tozların fiziksel özellikleri çizelge 1’de verilmiştir. ASK malzemelerin üretilmesinde ilk olarak tozların karışım oranları belirlenmiştir ve hassas mikro terazi yardımı ile tartılarak karışımlar hazırlanmıştır. Al, %7Si, %0,6 Mg, %0,8 TiH₂ tozları ve %5 oranında parçacıklardan (SiC, B₄C ve Al₂O₃) oluşan tozlar Turbola marka karıştırıcıda 30 dakika boyunca homojen olarak karıştırılmıştır. Çalışmada 4 farklı karışım oranına sahip tozlar

kullanılmıştır (Çizelge 2). Karışım tozlar soğuk presleme kalıbında 300 MPa basınç altında preslenerek sıkıştırılmış toz metal blok numuneler elde edilmiştir. Sıkıştırılmış toz metal blok numuneler yaklaşık olarak ortalama %75 yoğunluktadır. Elde edilen toz metal blok numuneler 500 °C sıcaklıkta 1/4 oranında ekstrüze edilmiştir. ekstrüze edilen köpürebilir preform numuneler 2 mm kalınlığındaki alüminyum levhalar arasına konularak sıcak olarak haddelenmiştir. Haddelene işleminden sonra 50x50x12 mm ölçülerinde getirilen preform numuneler 690 °C sıcaklıkta köpürtülerek sandviç metalik köpükler üretilmiştir. ASK malzemelerin üretim yöntemi Şekil 1’de gösterilmiştir.

Elde edilen ASK malzemeler ile 50x50x7 mm² ölçülerine sahip olan Ramor 500 zırh çeliği 300 °C ısıya dayanıklı çekomastik 803 marka kırmızı silikon ile birleştirilmiştir. Ramor 500 zırh çeliğinin kimyasal analizi ve mekanik özellikleri Çizelge 3 ve Çizelge 4’de verilmiştir. Üretilen ASK malzemenin ve Ramor 500 zırh çeliğinin resimleri Şekil 2’de verilmiştir.

Çizelge 1. ASK malzemelerin üretiminde kullanılan tozların özellikleri (Properties of powders used in the production of ASF materials)

Kullanılan tozlar	Yoğunluk (g/cm ³)	Ortalama toz tane boyutu (µm)
Al	2,7	<160
Si	2,33	<10
Mg	1,74	<10
TiH ₂	3,91	<45
B ₄ C	2,52	<10
SiC	3,10	<8
Al ₂ O ₃	3,97	<12

Çizelge 2. ASK malzemelerin üretiminde kullanılan tozların karışım oranları (Mixing ratios of powder used in the production of ASF materials)

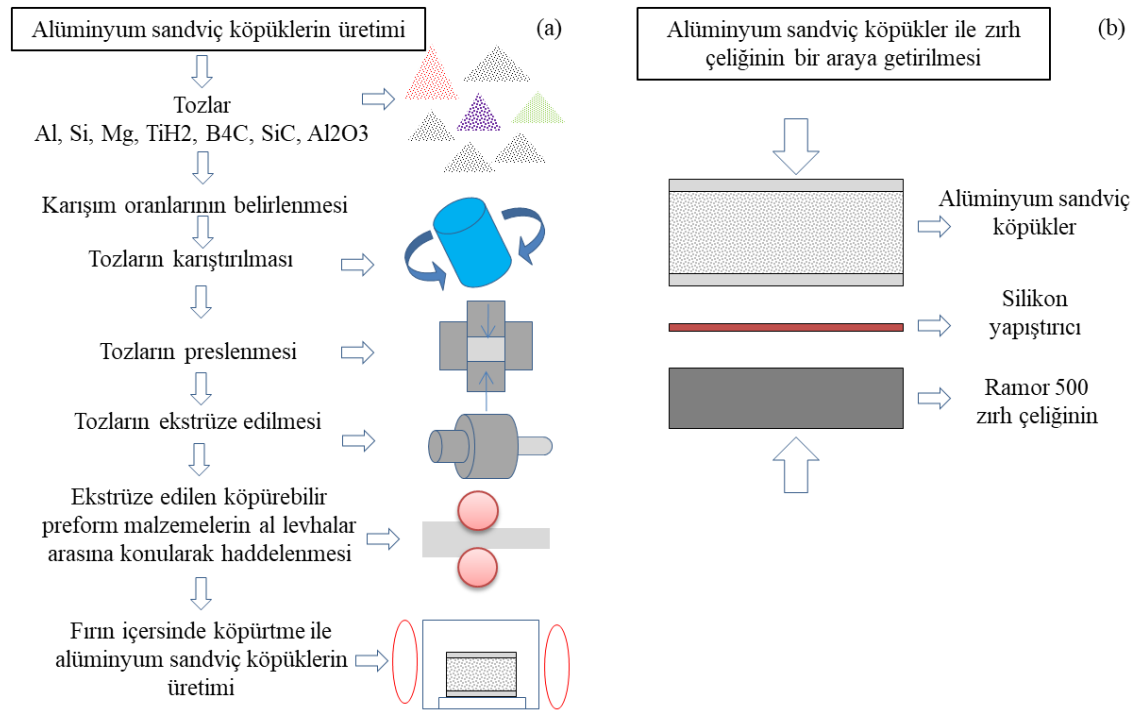
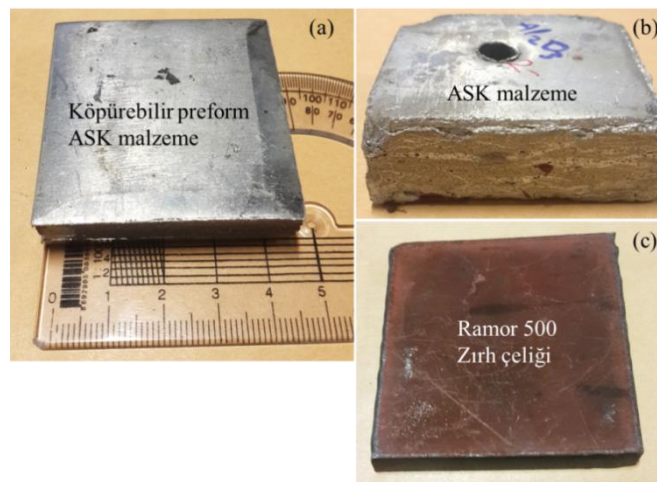
Karışım 1 (AlSi7Mg0,6) Ağırlıkça (%)	Karışım 2 (B ₄ C) Ağırlıkça (%)	Karışım 3 (SiC) Ağırlıkça (%)	Karışım 4 (Al ₂ O ₃) Ağırlıkça (%)
91,6	86,6	86,6	86,6
7	7	7	7
0,6	0,6	0,6	0,6
0,8	0,8	0,8	0,8
---	5	---	---
---	---	5	---
---	---	---	5

Çizelge 3. Ramor 500 zırh çeliğinin kimyasal kompozisyonu (Ramor 500 armor steel chemical composition) [17,18].

Kimyasal kompozisyon (% oran)										
Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B	Fe
Ramor 500	0.32	0.70	1.50	0.015	0.005	1.00	2.00	0.70	0.005	kalan

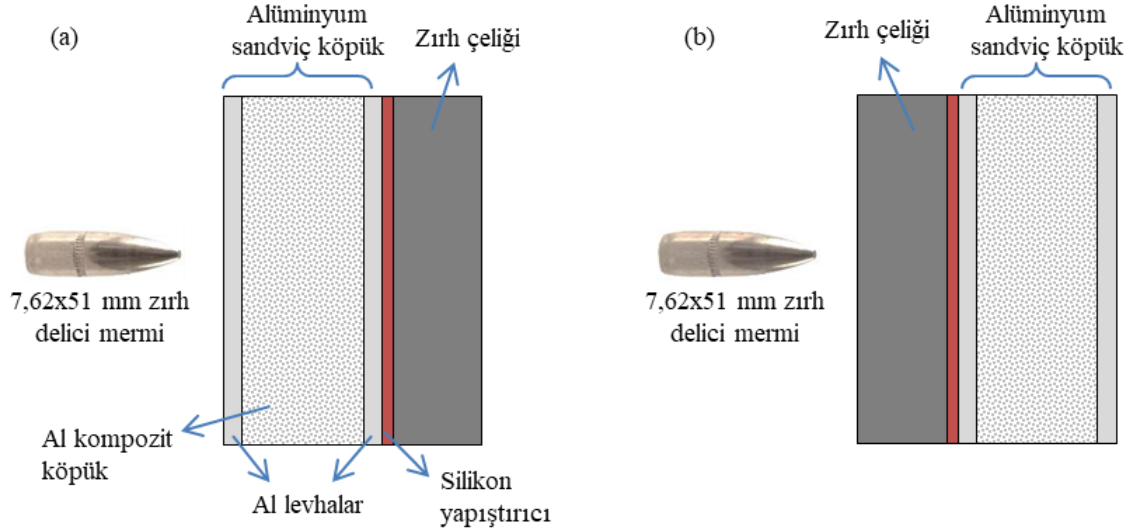
Çizelge 4. Ramor 500 zırh çeliğinin mekanik özellikleri (Mechanical properties of Ramor 500 armor steel) [17,18].

Mekanik özellikler				
Malzeme	Gerilme dayanımı Rm (MPa)	Esneklik %5	Sertlik (HB)	Tokluk Charpy (V J)
Ramor 500	1700	7	480-560	20

**Şekil 1.** (a) ASK malzemelerin üretim yolu, (b) ASK malzemeler ile zırh çeliğinin bir araya getirilmesi ((a) Production of ASK materials, (b) combining ASK materials and armor steel)**Şekil 2.** (a) köpürebilir ASK malzeme (b) köpürme sonrası ASK malzeme (c) Ramor 500 zırh çeliği ((a) foamable ASF material (b) after foaming ASK material (c) Ramor 500 armor steel)

Balistik testler için, mermi çekirdeğinin geliş yönüne göre alüminyum sandviç köpüklerin önde ve arkada olduğu iki farklı tasarım yapılmıştır (Şekil 2-a-b). Numunelerin her birine, aynı test parametrelerinde tek atış yapılmış ve zırh malzemesinde meydana gelen hasar

mekanizması incelenmiştir. ASK ve zırh çeliği kombinasyonu ile üretilen zırh malzemesinin balistik performansları piyade tüfeği ile yapılan ve 7.65x51 mm çelik mermilerin kullanıldığı atışlar ile ölçülmüştür. Balistik testlerin yapılacağı malzeme bileşimleri ve kalınlıkları Çizelge 5’de verilmiştir.



Şekil 3. Mermi geliş yönüne göre ASK malzeme ile Zırh çeliğinin pozisyonu (Position of armor steel with ASF material according to the direction of the projectile)

Çizelge 5. Balistik test yapılan malzemeler ve kalınlıkları (Materials and thicknesses of ballistic testing)

Mlz. No	Alüminyum sandviç köpük malzeme (ön taraf)	Köpürme sonrası kalınlık (mm)	Ramor 500 zırh çeliği (arka taraf)	Ramor 500 zırh çeliği Kalınlık (mm)	Birleştirme	Toplam kalınlık (mm)	Mermi
1	AlSi7Mg0,6	23,1	Ramor 500	7	Çekomastik	30,1	7,62x51 mm çelik uçlu zırh delici
2	B ₄ C	16	Ramor 500	7	Çekomastik	23	
3	SiC	18	Ramor 500	7	Çekomastik	25	
4	Al ₂ O ₃	21	Ramor 500	7	Çekomastik	28	
Mlz. No	Ramor 500 zırh çeliği (ön taraf)	Ramor 500 zırh çeliği Kalınlık (mm)	Alüminyum sandviç köpük malzeme (arka taraf)	Köpürme sonrası kalınlık (mm)	Birleştirme	Toplam kalınlık (mm)	
5	Ramor 500	7	AlSi7Mg0,6	23,1	Çekomastik	30,1	
6	Ramor 500	7	B ₄ C	16	Çekomastik	23	
7	Ramor 500	7	SiC	18	Çekomastik	25	
8	Ramor 500	7	Al ₂ O ₃	21	Çekomastik	28	

ASK malzemelerin mikroyapı özelliklerini belirlemek amacı ile metalografik numuneler kesilmiştir. Kesilen numuneler sırası ile 240, 400, 800,1200 numaralı zımparalar ile zımparalanarak kabaca yüzeyler iyileştirilmiştir. Sonrasında ise 6-3 ve 1 mikronluk elmas parlatıcılarda parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen malzemelerin yüzeyi parlatılmış numunelerin makro resimleri alınarak gözenek boyutları

belirlenmiştir. Al levha ile köpük arasında oluşan arayüzey bağımlı görebilmek için Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nde bulunan JEOL JSM 6060LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.

Elde edilen alüminyum sandviç köpükler (ASK) 0,1 mg hassasiyetindeki Sartorius marka terazide kuru ve su içerisinde tartılmış ve Arşimet formülü yardımıyla

yoğunlukları hesaplanmıştır. Yoğunluk hesabı için kullanılan Arşimet prensibi Eşitlik 1’de verilen formüle göre yapılmıştır [18].

$$p^* = \frac{m^*}{m^* - m_s} \quad (1)$$

ρ = Köpüğün yoğunluğu (g/cm³),

m^* = Köpüğün havadaki ağırlığı (g),

m_s = Köpüğün su içerisindeki ağırlığı (g)

Gözeneklilik miktarı ise Eşitlik 2’ de verilen formüle göre yapılmıştır [19]. Bu formüle V^* köpüğün hacmini, V ise köpürtme öncesi numunenin ilk hacmini ifade etmektedir.

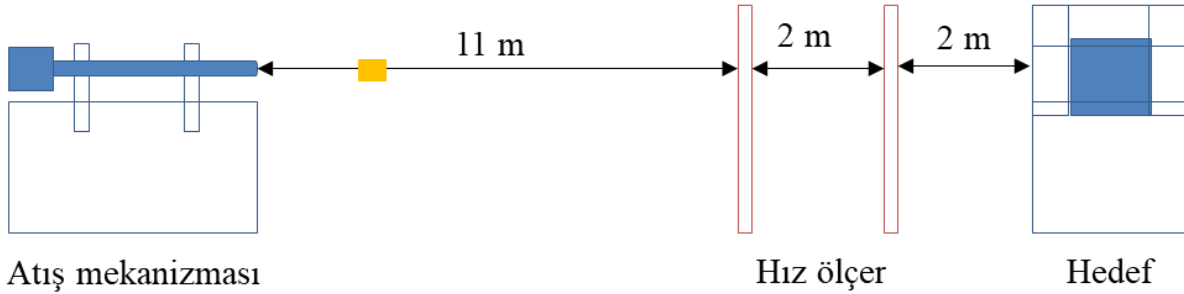
$$\text{Gözeneklilik} = \left(1 - \frac{v}{v^*}\right) \times 100 \quad (2)$$

Sandviç metalik köpüklerin lineer uzama oranları (Lu) literatürden [20] yararlanılarak aşağıdaki Eşitlik 3’e göre hesaplanmıştır. Bu eşitlikte, L_s köpüğün maksimum

yüksekliğini (mm) ve L_i köpürtme öncesi ön şekil numunenin yüksekliğini (mm) ifade etmektedir.

$$Lu = \frac{L_s - L_i}{L_i} \times 100 \quad (3)$$

Balistik testler Kırıkkale makine kimya sanayinde bulunan atış poligonunda gerçekleştirilmiştir. Balistik testler Şekil 4’de verilen şematik çizime göre yapılmıştır. Tüfek ile hedef arasında 15 metre mesafe bırakılmıştır. Hedefin 4 metre önünde ise hızölçer perdeler konularak merminin hedefe çarpmadan önceki hızları belirlenmektedir. Balistik testler 7,62x51 mm’lik zırh delici mermiler ile NIJ IV standardında yapılmıştır. Balistik test sonrası oluşan hasar çapı kumpas yardımı ile iç çap ölçülerek yapılmıştır. Ayrıca malzemelerin makro resimleri çekilerek resimler üzerinde hasar mekanizmaları tartışılmıştır. Metalik köpükte oluşan hasarlar makro boyutta incelenmiştir.

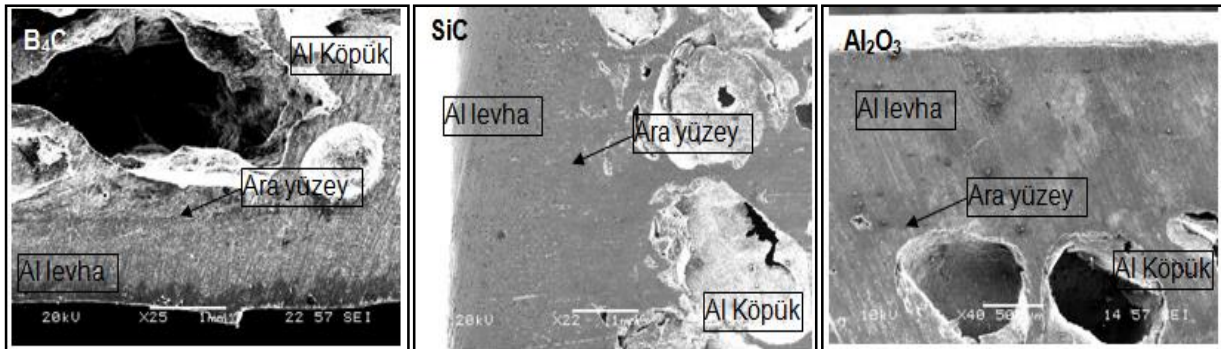


Şekil 4. Balistik test ünitesinin şematik görünümü (Schematic view of ballistic test)

3. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

%5 B₄C, %5 SiC ve %5 Al₂O₃ ilaveli kompozit ASK malzemelerin köpük ile Al levha arasında oluşan arayüzey durumunu gösteren resimler Şekil 5’de verilmiştir. B₄C ilaveli ASK’lerde levha-metal köpük arasında birleşmenin olduğu ancak belirgin bir çizgi şeklinde arayüzey oluşmuştur. SiC ilaveli ASK’lerde de

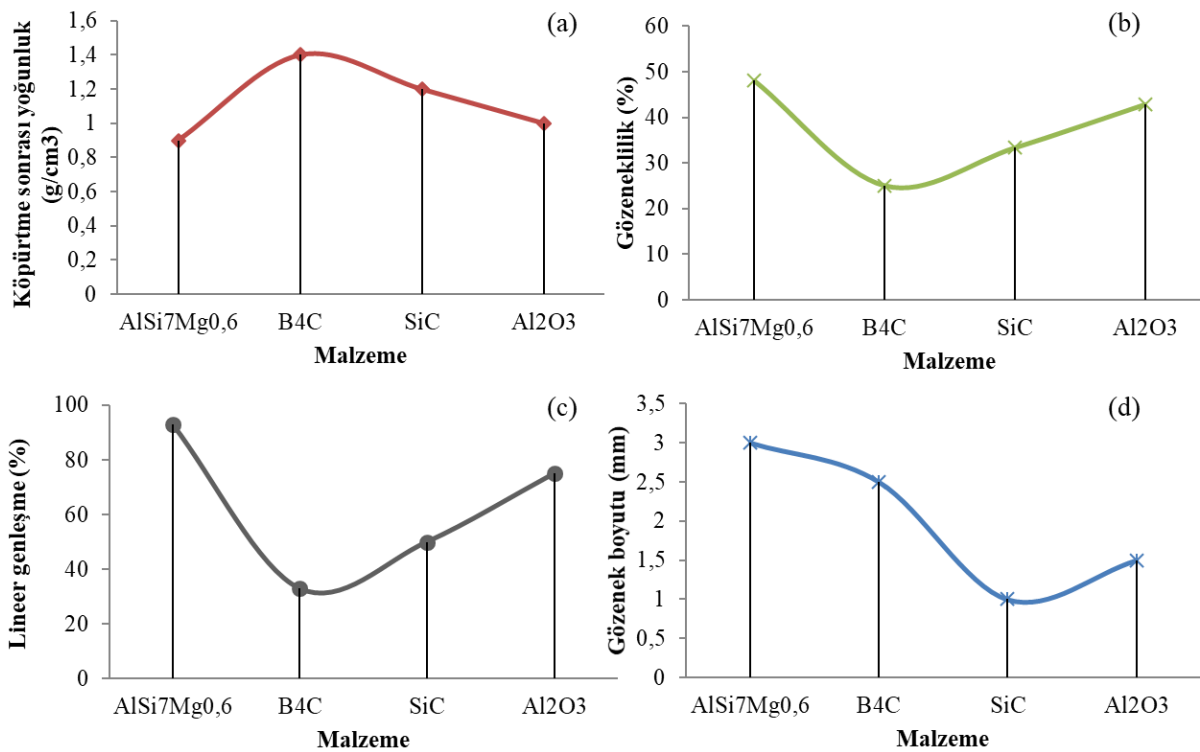
levha-metal köpük arasında birleşmenin olduğu ve bu birleşme bölgesinde arayüzey çizgisinin oluşmadığı görülmüştür. Al₂O₃ ilaveli ASK’lerde metalik köpük-levha arasında meydana gelen belirgin çizgi B₄C ilaveli ASK’lerde meydana gelen arayüzey çizgisine göre daha azdır.



Şekil 5. ASK malzemelerde al levha ile al köpük ara yüzeyinin SEM resmi (Image of al plate and al foam interface in ASF materials)

Parçacık ilaveli ASK'lerin köpürebilirlik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla preform numuneler 690 °C sıcaklıkta serbest köpürtülmüştür. Serbest köpürtme sonrası elde edilen köpürebilirlik özellikleri Şekil 6'da verilmiştir. Köpürtme sonrası yoğunluklar incelendiğinde en düşük yoğunluk parçacık takviyesiz olan AlSi7Mg0,6 ASK malzemesinde gerçekleşmiştir. En yüksek yoğunluk ise B₄C parçacık takviyeli ASK malzemesinde gerçekleşmiştir. Yoğunluklar sırası ile AlSi7Mg0,6, B₄C, SiC ve Al₂O₃ parçacık takviyeli ASK malzemelerde 0,9, 1,4, 1,2 ve 1 olarak bulunmuştur. Gözeneklilik oranına baktığımızda ise en yüksek gözeneklilik AlSi7Mg0,6 ASK malzemesinde olurken en düşük gözeneklilik B₄C parçacık takviyeli ASK malzemelerde olduğu gözlemlenmiştir. Metalik köpük malzemelerde köpürmenin karşılığı olan lineer genişleme oranlarına baktığımızda takviye elemanlarının lineer

genleşmeyi çok fazla etkilemediği Şekil 6-c'de görülmektedir. En iyi lineer genişleme yüzdesi takviyesiz olan AlSi7Mg0,6 ASK malzemesinde (%93) oluşmuştur. Al₂O₃ parçacık takviyeli ASK malzemesinde %75, SiC parçacık takviyeli %50 en düşük olan B₄C parçacık takviyeli ASK malzemesinde ise %33 lineer genişleme meydana gelmiştir. Yapılan çalışmada B₄C parçacık takviyeli ASK malzemelerin lineer genişleme oranını çok fazla miktarda artırmadığı gözlemlenmiştir. Gözenek boyutlarını incelediğimizde ise en büyük gözenek boyutu AlSi7Mg0,6 ASK malzemesinde görülürken en düşük gözenek boyutu ise SiC parçacık takviyeli ASK malzemesinde görülmüştür.



Şekil 6. ASK'lerin köpürebilirlik özellikleri (Foamability properties of ASFs)

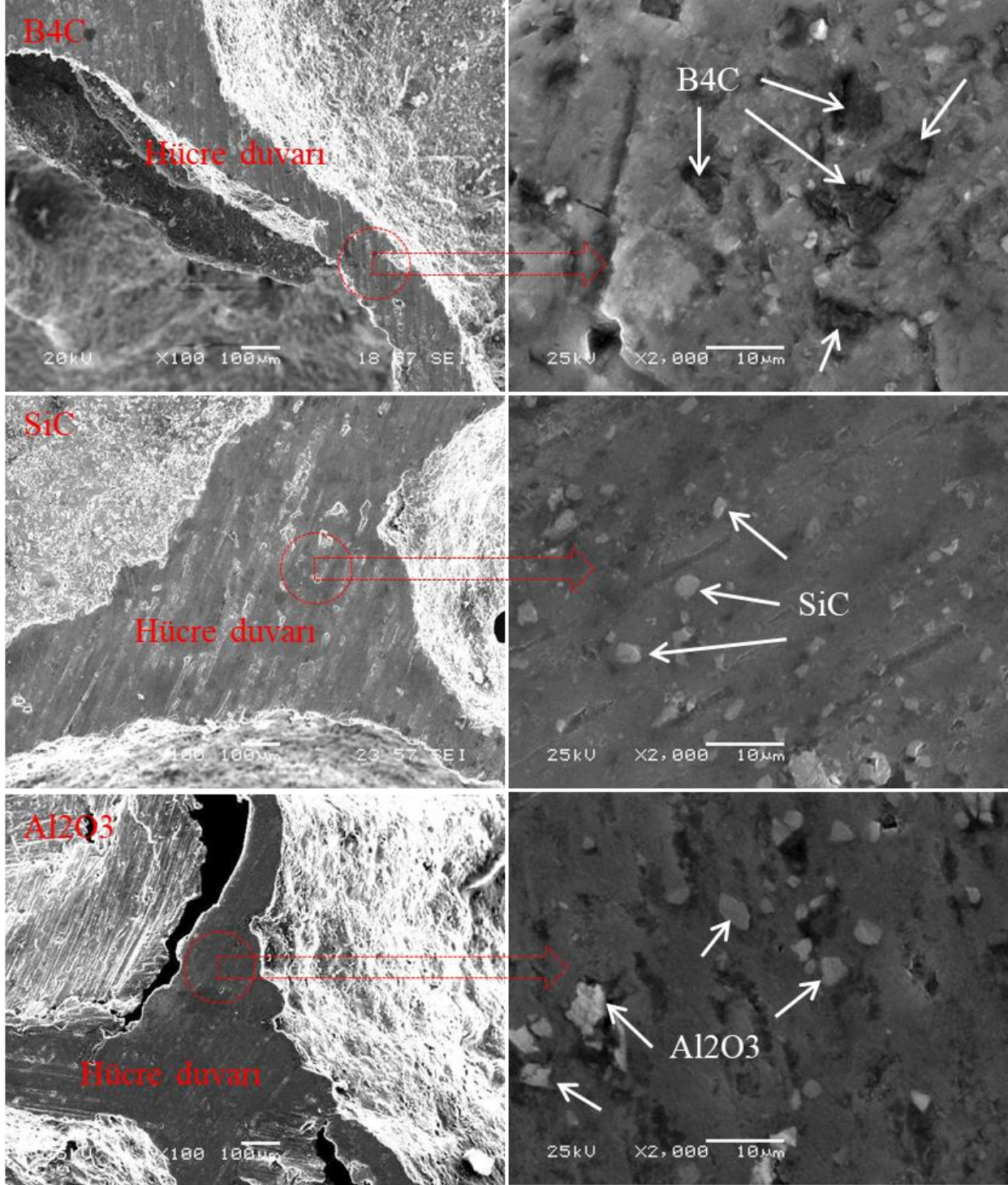
Şekil 7'de seramik parçacıklarının gözenek duvarı içerisindeki konumunu belirleyen SEM resimleri verilmiştir. B₄C takviyeli ASK malzemelerde B₄C parçacıklarının etrafında boşlukların oluştuğu görülmüştür. Bu durum B₄C parçacıklarının matris fazı ile iyi bir ıslatma özelliği sergilememesinden kaynaklanmaktadır. B₄C ile Alüminyum fazı arasında ıslatma probleminin olduğu bazı kaynaklarda verilmektedir [21]. B₄C parçacığı ile Alüminyum fazı arasında meydana gelen boşluklar malzemenin köpürme öncesi gözenekli olmasına neden olmaktadır. Metalik köpüklerde iyi bir köpürebilirlik sergilemenin şartlarından bir tanesi yüksek yoğunluklu köpürebilir

preform üretmektir [22]. Bu sebepten dolayı B₄C parçacık takviyeli ASK malzemelerde köpürme oranı (lineer genişleme) diğerlerine göre oldukça düşük olmuştur (Şekil 6-c). SiC Parçacıkları matris ile uyumlu ara yüzey oluşturmuş ve köpürebilirliği olumlu etkilemiştir. Al₂O₃ parçacıkları ise kısmen iyi bir ara yüzey bağı gerçekleştirmiştir. Al₂O₃ parçacık takviyeli Alüminyum köpüklerin üretilmesi ile ilgili yapılan çalışmada Al₂O₃ %b7'ye kadar köpürebilirliği olumlu yönde etkilediği bilinmektedir [23].

Balistik testlerin yapılmasında mermi çekirdeğin namludan çıktığı hız 838 ± 9,1 m/s'dir. Mermi mühimmatının sahip olduğu barut oranına göre

çekirdeğin namludan çıktığı hız $\pm 9,1$ m/s kadar değişebilmektedir. Bu sebeple mermi çekirdeğinin namludan çıkıp hedefe varıncaya kadar kaybettiği hızlar bir miktar değişebilmektedir. Yapılan çalışmada ASK malzemenin önde ve arkada olduğu iki farklı tasarımda

hedefe çarpan mermi çekirdeğinin hızları Çizelge 6'de verilmiştir. ASK'lerin balistik performansının belirlenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalarda zırh malzemesinin hasar analizi üzerinde durulmuştur.



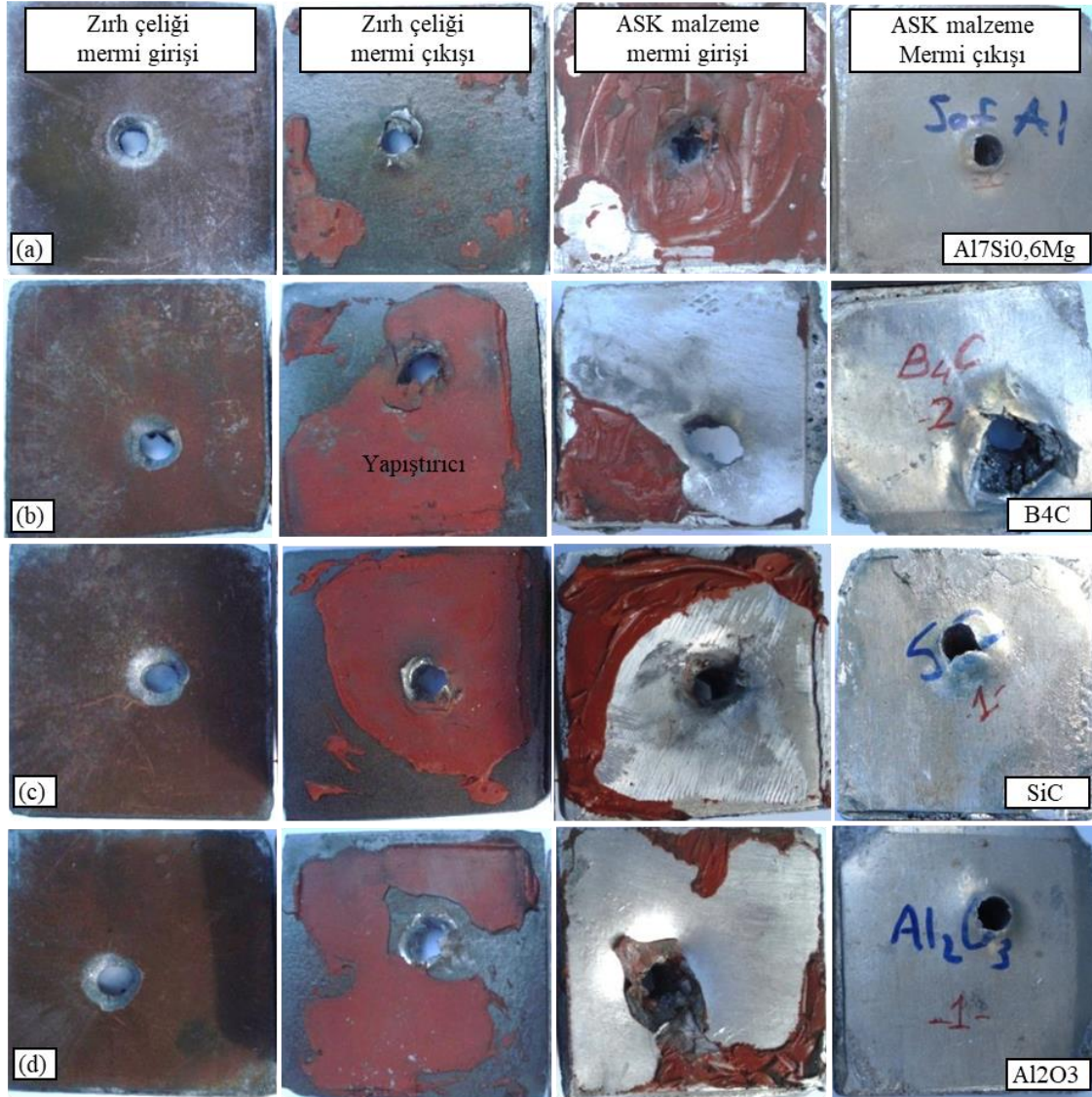
Şekil 7. ASK malzemelerin hücre içerisinden alınan SEM resim görüntüleri (Images of SEM images taken from the cell of the ASF materials)

Çizelge 6. Mermilerin hedefe çarpmadan önceki hızları (The velocity of bullets before impact)

ASK malzeme	Mermi çekirdeğinin hedefe çarpma hızı	
	Zırh çeliği+ASK	ASK+Zırh çeliği
AlSi7Mg0,6	800 m/sn.	794 m/sn.
SiC	787 m/sn.	800 m/sn.
Al ₂ O ₃	798 m/sn.	794 m/sn.
B ₄ C	792 m/sn.	796 m/sn.

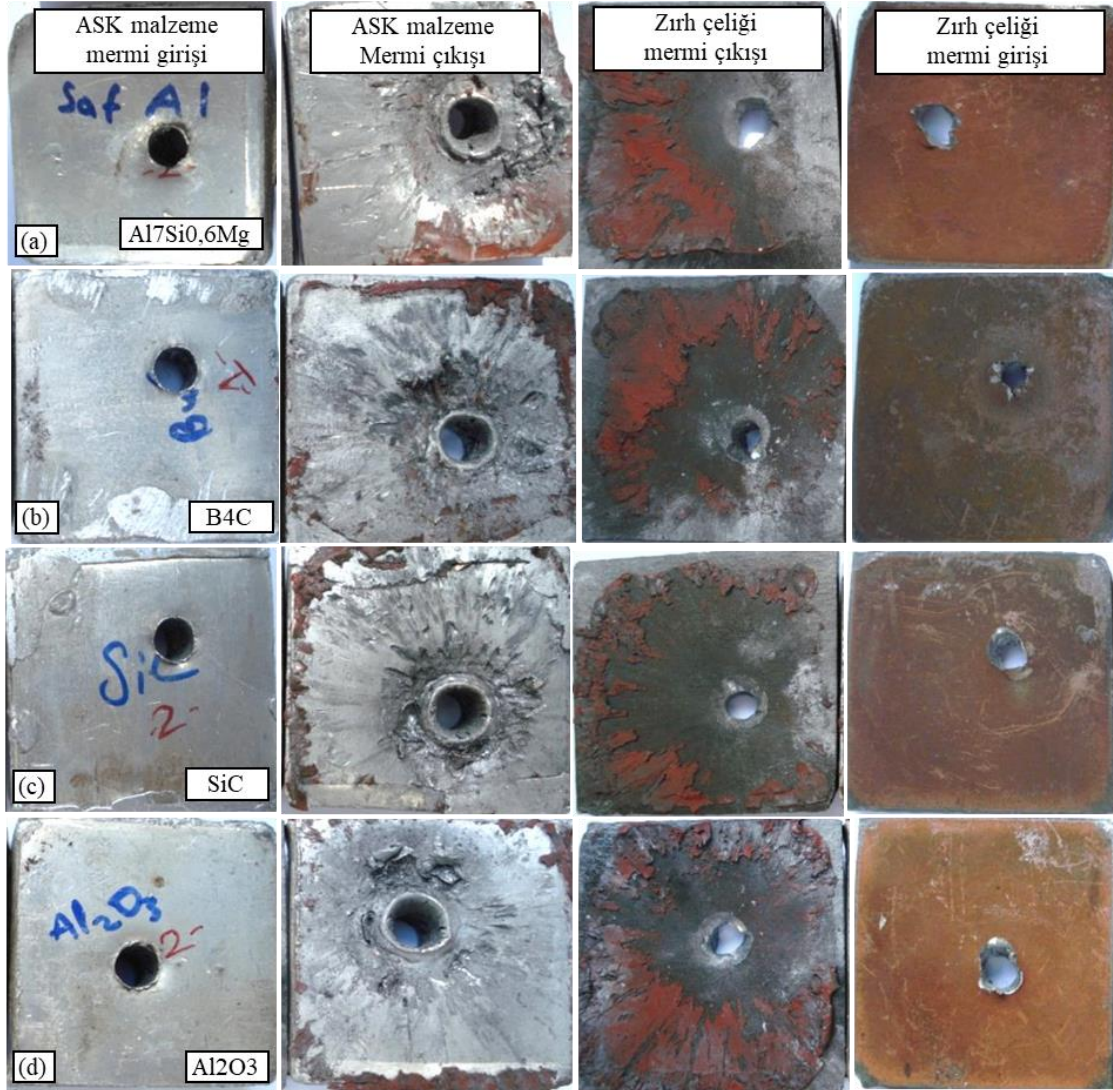
ASK malzemelerin ön tarafta ve arka tarafta yer aldığı iki farklı tasarım yapılar balistik atışlar gerçekleştirilmiştir. balistik test sonrası her iki tasarım içinde makro boyutta resimler alınmıştır (Şekil 8- Şekil 9). Şekil 8'de mermi çekirdeğinin hareket yönüne göre zırh çeliğinin (ZÇ) önde ASK'nin ise arkada yer aldığı

tasarımın balistik test sonucu oluşan hasar mekanizmasını gösteren resimler verilmiştir. Zırh çeliğinin delinmesi sırasında çarpışma yüzeyinde çukur şeklinde darbe hasarı oluşmuş ve mermi zırh çeliğinden çıkarken belli bir miktar malzemeyi dışarı doğru sürüklemiştir. Metallerin yüzeyinde çarpma etkisine bağlı olarak darbe hasarı meydana gelmesi genellikle bir tehlike olarak kabul edilmez çünkü metaller plastik şekil değiştirme kabiliyetlerinden dolayı enerjinin büyük miktarını absorbe edebilir. Oluşacak kopmalar ani ve beklenmedik olmaz. Benzer durum ASK'lerde de görülmüştür. Özellikle SiC ve B₄C ilave edilerek üretilen ASK'lerde mermi, çarpma yüzeyinde daha derin ve çukur şeklinde hasar oluşturarak ASK'nin arka yüzeyinde taç yaprağı şeklinde bir yapı oluşturmuştur. ASK'lerin ön yüzeyinde çarpmanın etkisiyle kopmaların görülmemesi ise ASK'lerin enerji absorbe etme potansiyelinin yüksek olmasının göstergesidir.

**Şekil 8.** Zırh çeliğinin önde bulunduğu zırh malzemesinin hasar resimleri (Damage pictures of armor material with armor steel)

ASK'ların önde bulunduğu tasarımlarda, ASK'nin merminin çarptığı yüzeyinde oluşan hasarın çukur şeklinde değil zımba şeklinde olduğu görülmüştür. Bunun mermi çekirdeğinin daha yüksek hızda ASK'ye çarpmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Mermi çekirdeğinin ASK'yi terk ederken ASK ile zırh çeliği ara

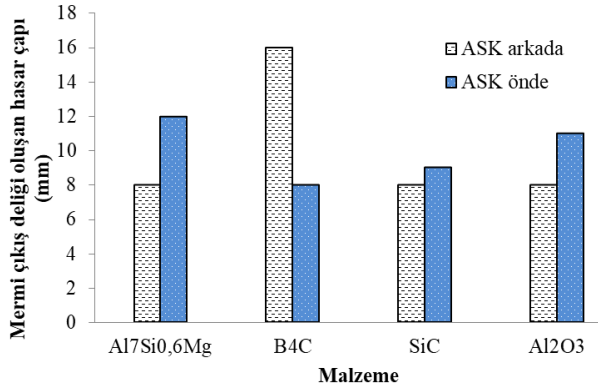
yüzeyinde basınç ve sıcaklık etkisi ASK'nin arka yüzeyinde çukur ve ergime oluştururken zırh çeliğinin çarpma bölgesinde çukur şeklinde hasarın oluşmasına neden olmuştur. Mermi çekirdeğinin zırh çeliğini terk ederken taç yaprağı şeklinde hasar oluşmasına neden olduğu görülmüştür (Şekil 9).



Şekil 9. ASK'lerin önde bulunduğu zırh malzemesinin hasar resimleri (Aluminum sandwich foams contained in the armor material damage pictures)

Mermi çekirdeğinin malzemeye çarptıktan sonra belirli bir çapta hasar oluşturarak çıkış yapmaktadır (Şekil 10). Çıkış deliği hasar çaplarına bakıldığında ASK arka tarafta yer aldığı durumda en yüksek hasar çapı B₄C parçacık takviyeli ASK malzeme gerçekleşmiştir. Diğerlerinde ise hasar çapları birbirine yakın çıkmıştır. ASK malzemelerin ön tarafta yer aldığı durumlarda ise

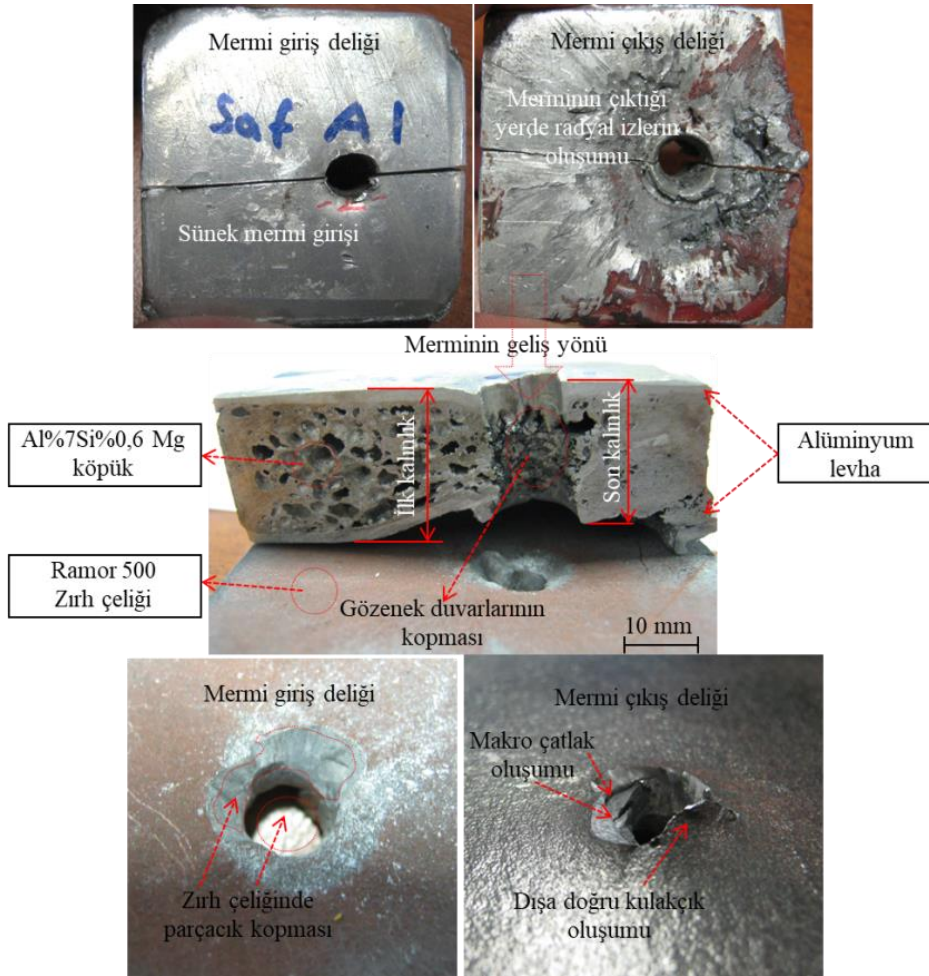
en yüksek mermi çıkış hasar çapı Al₇Si_{0,6}Mg ASK malzemelerde gözlemlenirken daha sonra sırasıyla Al₂O₃, SiC ve B₄C parçacık takviyeli ASK malzemelerde görülmüştür. Çelik plakada meydana gelen hasar çapı ön tarafta yer alan ASK malzemenin merminin uç enerjisini yavaşlatması ile ilgilidir. Hasar çapı ne kadar küçük olursa mermi o kadar kolaylıkla malzemeyi terk etmektedir.



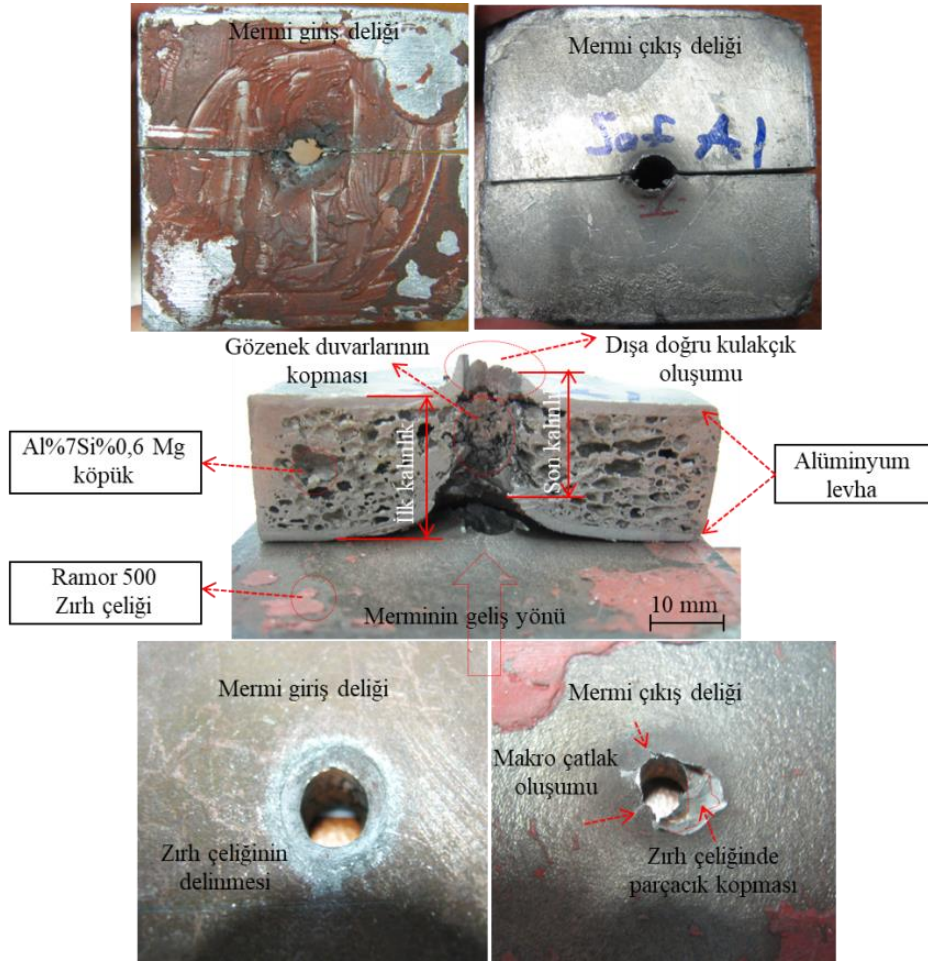
Şekil 10. Farklı tasarımlardaki ASK'lerde mermi çarpmasıyla zırh sisteminde meydana gelen hasar çapı (The diameter of the damage in the armor system due to the impact of the nozzle in the ASFs of different designs)

Al7Si0,6Mg ASK malzemenin ön tarafta ve arka tarafta yer aldığı iki farklı tasarım için balistik test sonrası kesit

resimler Şekil 11 ve Şekil 12'de verilmiştir. Şekil 11'de Al7Si0,6Mg ASK malzemenin ön tarafta yer aldığı görülmektedir. Şekil incelendiğinde mermi çekirdeğinin ilk çarptığı yerde sünek bir delik geçişi olduğu görülmüştür. ASK malzemenin çıkarken ise radyal bası dalgalarının oluştuğu görülmüştür. Ayrıca bu bası dalgaları ASK malzemenin gözeneklerinin birbirine geçmesine neden olmuştur. Bu esnada mermi çekirdeğinden bir miktar enerjiyi absorbe etmiştir. Ramor 500 zırh çeliğinin giriş kısmında kopmaların meydana geldiği görülmüştür. Çıkış kısmında ise makro çatlaklar ve dışa doğru kulakçık oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekil 12'de yer alan ASK malzemenin arka tarafta yer aldığı durumda ise mermi çekirdeği zırh çeliğini delip geçerken çelikten parçacık koparmıştır. Çeliğin çıkış kısmında ise radyal çatlaklar oluştuğu ve kısmen parçacık kopması gerçekleştiği görülmüştür. ASK malzeme içerisinden hareket eden mermi çekirdeği ASK malzemeyi ileri doğru hareket ettirmiştir. Bu hareket esnasında metalik köpükte gözeneklerin çöktüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca ASK malzeme çıkışında dışa doğru kulakçık oluştuğu görülmüştür.



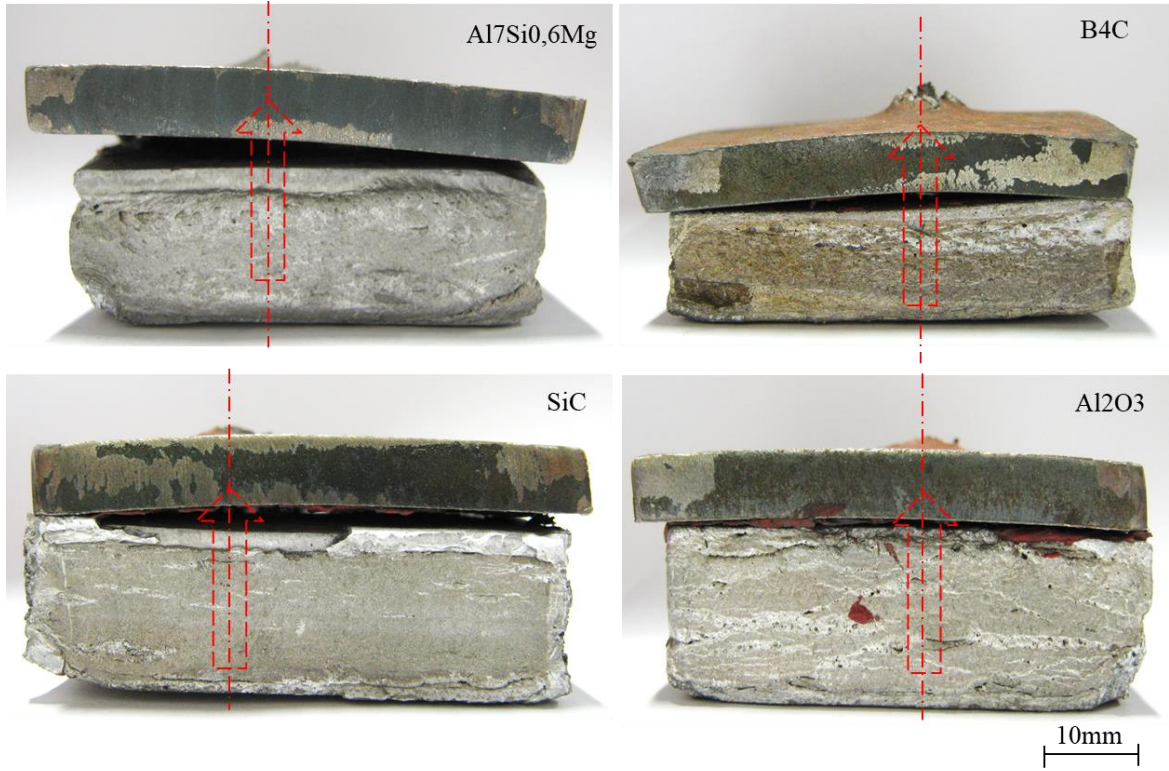
Şekil 11. Ön tarafta yer alan ASK malzemenin mermi çarpma sonrası kesit görünümü (Cross-sectional views of the ASF material on the front after the projectile)



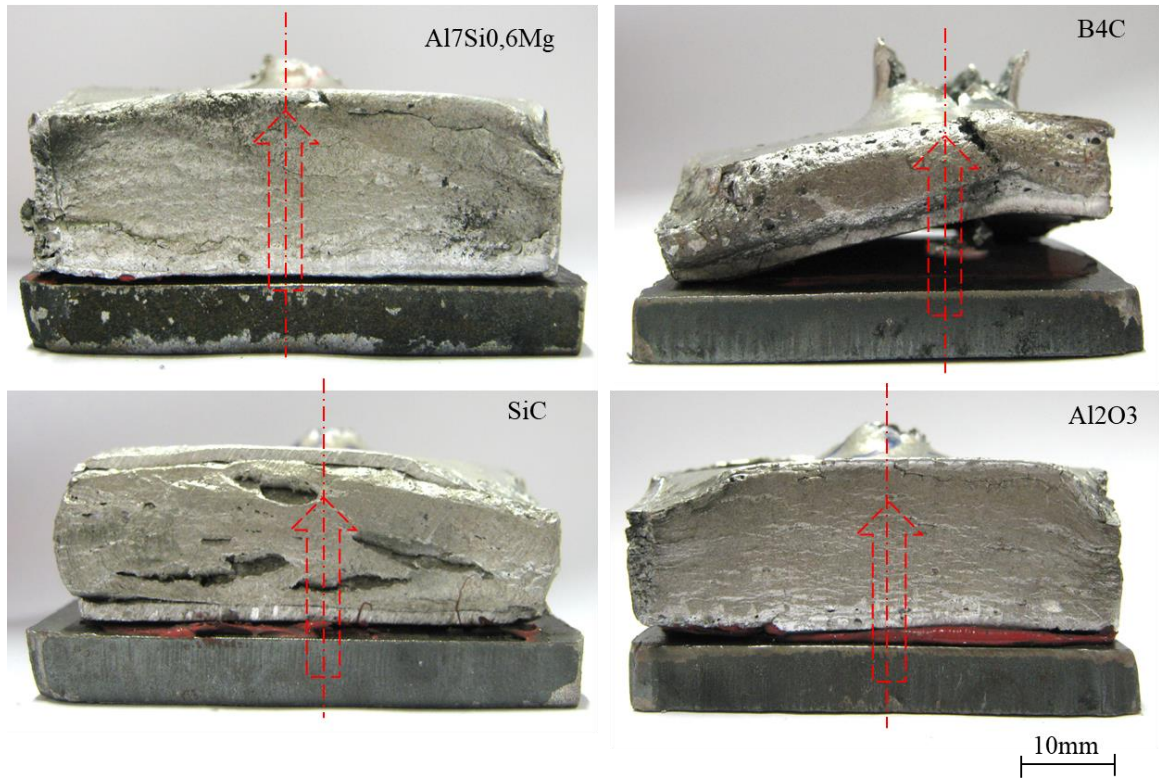
Şekil 12. Arka tarafta yer alan ASK malzemenin mermi çarpma sonrası kesit görüntüleri (Cross-sectional view of the ASK material at the rear after the projectile)

Şekil 13 ve Şekil 14’de balistik test sonrası (ASK malzemelerin önde ve arkada olduğu durumda) resimleri verilmiştir. Al7Si0,6Mg ASK malzemesinin önde ve arkada olduğu duruma bakılırsa zırh çeliğinin önde olduğu durumda çelikte herhangi bir eğilme oluşmadığı gözlemlenirken çeliğin arkada olduğu durumda ise çelikte eğilme olduğu görülmüştür. Bu durum ASK malzemenin önde olmasından kaynaklı mermi çekirdeğinin hızını yavaşlatmasından

kaynaklanmaktadır. Mermi çekirdeği çelik plakaya hızlı çarparsa herhangi bir eğilme olmaksızın çeliği delip geçerken çelik plaka arka tarafta olduğunda öndeki ASK malzeme hızını yavaşlatarak merminin çelik levhayı deforme etmesini sağlamaktadır. Dolayısı ile ön tarafta bulunan ASK malzemeler mermi çekirdeğinin hızını yavaşlatmada önemli bir etkiye sahiptir. Diğer seramik parçacık takviyeli ASK malzemelerde de arka tarafta bulunan çelik levhanın deformasyonla eğildiği görülmüştür.



Şekil 13. ASK malzemelerin ön tarafta yer aldığı durumda merminin hareketi (Motion of the projectile when the ASF materials are in the front)



Şekil 14. ASK malzemelerin arka tarafta yer aldığı durumda merminin hareketi (Motion of the projectile in the case of ASF materials)

4. SONUÇ CONCLUSION)

Bu çalışmada toz metalürjisi yöntemi ile takviyeli ve takviyesiz ASK malzemeler üretilmiştir. Üretilen ASK malzemeler ile Ramor 500 zırh çeliği bir araya getirilerek zırh istemi oluşturulmuştur. Deneysel çalışmalar sonucunda;

- B₄C parçacık takviyeli ASK malzemede Al levha ile köpük arasında birleşme ara yüzey çizgisinin belirgin olduğu görülmüştür. SiC parçacık takviyeli ASK malzemede ise Al levha ile köpük arasındaki ara yüzey bağının olduğu ve herhangi bir sınır çizgisinin oluşmadığı tespit edilmiştir. Al₂O₃ parçacık takviyeli ASK malzemede ise B₄C'ye göre daha az belirgin bir ara yüzey çizgisi oluşmuştur.
- Köpürme sonrası yoğunluklar incelendiğinde en düşük yoğunluk parçacık takviyesiz olan AlSi7Mg0,6 ASK malzemede gerçekleşmiştir. En yüksek yoğunluk ise B₄C parçacık takviyeli ASK malzemede gerçekleşmiştir.
- En yüksek gözeneklilik AlSi7Mg0,6 ASK malzemede olurken en düşük gözeneklilik B₄C parçacık takviyeli ASK malzemelerde olduğu gözlemlenmiştir.
- En iyi lineer genleşme yüzdesi takviyesiz olan AlSi7Mg0,6 ASK malzemede (%93) oluşmuştur. Al₂O₃ parçacık takviyeli ASK malzemede %75, SiC parçacık takviyelide %50 en düşük olan B₄C parçacık takviyeli ASK malzemede ise %33 lineer genleşme meydana gelmiştir.
- Yapılan çalışmada B₄C parçacık takviyeli ASK malzemelerin lineer genleşme oranını çok fazla miktarda artırmadığı gözlemlenmiştir.
- Gözenek boyutlarını incelediğimizde ise en büyük gözenek boyutu AlSi7Mg0,6 ASK malzemede görülürken en düşük gözenek boyutu ise SiC parçacık takviyeli ASK malzemede görülmüştür.
- B₄C takviyeli ASK malzemelerde B₄C parçacıklarının etrafında boşlukların olduğu görülmüştür. SiC Parçacıkları matris ile uyumlu ara yüzey oluşturmuş ve köpürebilirliği olumlu etkilemiştir. Al₂O₃ parçacıkları ise kısmen iyi bir ara yüzey bağı gerçekleştirmiştir.
- Çıkış deliği hasar çaplarına bakıldığında ASK arka tarafta yer aldığı durumda en yüksek hasar çapı B₄C parçacık takviyeli ASK malzemede gerçekleşmiştir. Diğerlerinde ise hasar çapları birbirine yakın çıkmıştır. ASK malzemelerin ön tarafta yer aldığı durumlarda ise en yüksek mermi çıkış hasar çapı Al7Si0,6Mg ASK malzemelerde gözlemlenirken daha sonra sırasıyla Al₂O₃, SiC ve B₄C parçacık takviyeli ASK malzemelerde görülmüştür.
- Al7Si0,6Mg ASK malzemesinin önde ve arkada olduğu duruma bakılırsa zırh çeliğinin önde olduğu durumda çelikte herhangi bir eğilme oluşmadığı gözlemlenirken çeliğin arkada olduğu durumda ise çelikte eğilme olduğu görülmüştür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Balistik testlerin yapılmasında sağladığı imkânlardan dolayı Makine ve Kimya Endüstrisi Kurumuna teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Seitzberger, M., Rammerstorger, F.G., Degischer, H.P., "Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminium foam", *Acta Mechanica*, 125: 95-103, (1997).
- [2] Hanssen, A.G., Langseth, M., Hopperstad, O.S., "Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler", *Int. J. of Impact Eng.*, 24 (5): 475-507, (2000).
- [3] Elbir, S., Yılmaz, S., Güden, M., "Kapalı hücre alüminyum köpük metallerin üretim metodları ve mekanik özellikleri", *TMMOB Metalurji Dergisi*, 23 (120): 35-42, (1999).
- [4] Banhart, J., & Seeliger, H. W. (2008). Aluminium foam sandwich panels: Manufacture, metallurgy and applications. *Advanced Engineering Materials*, 10(9): 793-802.
- [5] Davies, G. J., & Zhen, S. (1983). Metallic foams: their production, properties and applications. *Journal of Materials science*, 18(7): 1899-1911.
- [6] Banhart, J. (2001). Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in materials science*, 46(6): 559-632.
- [7] Experimental study of ballistic resistance of sandwich targets with aluminum face-sheet and graded foam core. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 1099636218757669.
- [8] Kuang, K.S.C., Zhang, L., Cantwell, W.J., Bennion, I., "Process monitoring of aluminum-foam sandwich structures based on thermoplastic fibre-metal laminates using fibre Bragg gratings" *Composites Science and Technology*, 65: 669-676 (2005).
- [9] Thomas J.H., "Elements of Ordnance", John Wiley & Sons, Inc., New York, (1938).
- [10] Lowry E.D., "Interior Ballistics", New York, Doubleday & Company, (1968).
- [11] Wilkins, M. L. (1978). Mechanics of penetration and perforation. *International Journal of Engineering Science*, 16(11): 793-807.
- [12] Cortes, R., Navarro, C., Martinez, M. A., Rodriguez, J., & Sanchez-Galvez, V. (1992). Numerical modelling of normal impact on ceramic composite armours. *International journal of impact engineering*, 12(4): 639-650.
- [13] Gama, B. A., Bogetti, T. A., Fink, B. K., Yu, C. J., Claar, T. D., Eifert, H. H., & Gillespie Jr, J. W.. Aluminum foam integral armor: a new dimension in armor design. *Composite Structures*, 52(3-4): 381-395, (2001).
- [14] Navarro, C., Martinez, M. A., Cortes, R., & Sanchez-Galvez, V. (1993). Some observations on the normal impact on ceramic faced armours backed by composite plates. *International journal of impact engineering*, 13(1): 145-156.
- [15] Shockey, D. A., Marchand, A. H., Skaggs, S. R., Cort, G. E., Burkett, M. W., & Parker, R. (1990). Failure phenomenology of confined ceramic targets and

- impacting rods. *International Journal of Impact Engineering*, 9(3), 263-275.
- [16] Gur, A. K., Orhan, A., & Taskaya, S. (2019). Joining of Ramor 500 Steel by Submerged Welding and its Examination of Thermal Analysis in Ansys Package Program. *Thermal Science and Engineering Progress*.
- [17] N. Yigittürk, Ramor Armor Steels of AISI 304 Stainless Steel With Double Transfer of Plasma Arc Welding Method And Investigation In Joining, Firat University, Science and Technology Institute, Metallurgy and Materials Engineering, Elazig, Turkey, 2016.
- [18] Stöbener, K., Lehnhus, D., Avasse, M., Peroni, L., Buse, M., “Aluminum foampolymerhybrid structures (APM aluminum foam) in compression testing”, *International Journal of Solids and Structures*, 45: 5627-5641 (2008).