



XIX. ULUSAL MEKANİK KONGRESİ
24-28 Ağustos 2015, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ SANDVIÇ PLAKALARIN BALİSTİK DARBE YÜKÜ ALTINDAKİ DAVRANIŞI ÜZERİNDE FARKLI SERAMİK BİLEŞENLERİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Murat Aydın¹, M. Kemal Apalak², Recep Güneş³ ve J. N. Reddy⁴

¹Erciyes Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Kayseri

^{2,3}Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Kayseri

⁴Texas A&M Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, College Station, USA

ABSTRACT

Today, the development of high-performance and light armors has become a critical requirement against emerging threats. The research for new materials in this field has brought ceramic-faced composite armors to the forefront. Layered composite structures are widely used in ballistic systems due to their high strength and high stiffness. An abrupt change in their material properties across an interface between discrete materials introduces large interlaminar stresses that could cause delamination. One way to overcome this adverse effect is to use a functionally graded material (FGM). The purpose of this study is to determine damage and deformation mechanisms of functionally graded sandwich plates, which have different ceramic components, under ballistic impact loads.

ÖZET

Günümüzde de gelişen tehditler karşısında daha etkin balistik koruma sağlayacak hafif ve yüksek performanslı zırhların geliştirilmesi kritik bir ihtiyaç haline gelmiş ve bu sahadaki yeni malzeme arayışları seramik ön yüzü kompozit zırhları ön plana çıkarmıştır. Katmanlı yapıya sahip bu plakalar yüksek mukavemetleri ve yüksek rijitlikleri nedeniyle balistik sistemlerde yaygın olarak kullanılırlar. Ancak, katmanlardaki malzeme özelliklerinin ani olarak değişmesi nedeniyle ara yüzeylerde yüksek gerilmeler meydana gelir ve bu gerilmeler de katmanlar arasında ayrılmalara (delaminasyon) neden olur. Bu olumsuz etkiler fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler (FGM) kullanılarak azaltılabilir ya da ortadan kaldırılabilir. Bu çalışma ile farklı seramik bileşenlere sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalarda balistik darbe yükleme altında meydana gelen hasar mekanizmaları ve deformasyonları deneysel olarak incelenmiştir.

GİRİŞ

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler (Functionally Graded Materials=FGMs) belirli bir pozisyonda malzeme kompozisyonunun sürekli olarak değiştiği yapılar olarak tanımlanırlar (Şekil 1a). Genellikle seramik-metal bileşiminden oluşan bu malzemeler kötü çalışma şartlarına sahip uygulamalar için son derece uygun olmakla birlikte kompozisyonundaki sürekli değişimler bu malzemenin mekanik özellikleri üzerinde etkilidir [1].

İleri kompozit malzemeler sınıfında yer alan fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler, uzay nükleer ve otomobil endüstrileri gibi oldukça özellikli alanlarda kullanıldığı gibi zor çalışma

şartlarına sahip darbeleri ortamlarda veya balistik amaçlı olarak da kullanılabilirler. Bu nedenle bu malzemelerin darbe dayanımlarının da belirlenmesi oldukça önemlidir.

Mühendislik uygulamalarında dışarıdan gelebilecek darbelere karşı istenmeyen sonuçların ortaya çıkmaması için, malzemenin gerekli en uygun cevabı veya davranışı verebilmesi istenir. Kompozit malzemelerde bir darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde meydana gelebilir, içyapıda oluşan delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde başlayabilir. Metallerde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme sonucunda bir kopma şeklinde olmasına rağmen, kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler. Bu nedenle kompozit malzemede darbenin oluşturacağı hasarı tahmin etmek için darbe hızının belirlenmesi oldukça büyük bir öneme sahiptir [2].

Terminal balistik odaklı bu çalışma ile farklı seramik bileşenler (SiC, B₄C ve Al₂O₃) kullanılarak üretilen fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların (FKSP) balistik performansı, hasar mekanizmaları ve deformasyonları deneysel olarak incelenmiştir.

Fonksiyonel Kademelendirilmiş Sandviç Plakaların Üretimi

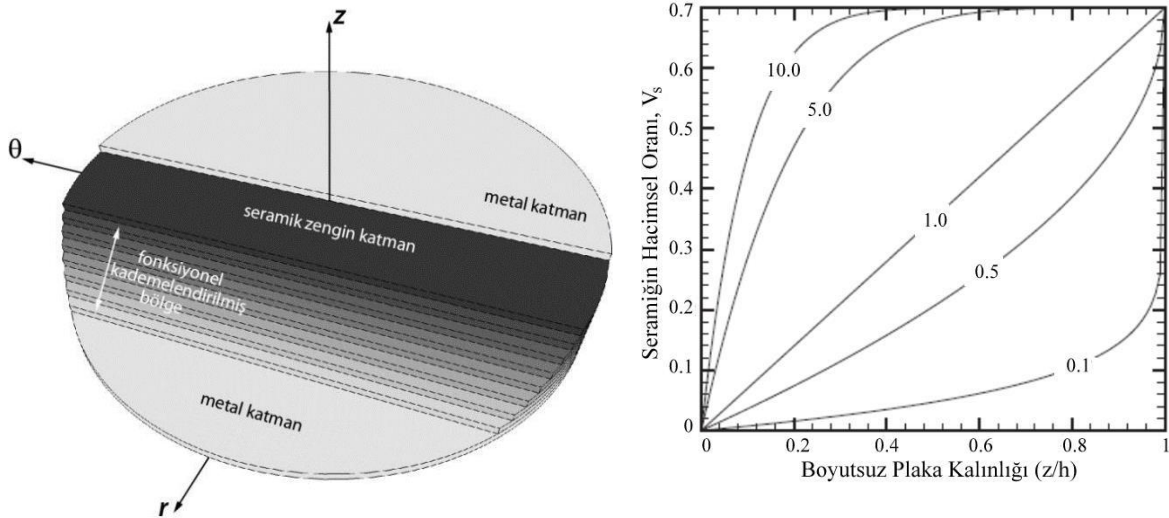
Seramik ve metal bileşenlerden oluşan fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların, alt ve üst yüzeyleri metal olup, bu metal yüzeyler arasında kalan bölgede seramik oranı, alt yüzeyden üst yüzeye doğru ilerledikçe, kademeli olarak değiştiği kabul edilmektedir. Seramik (c) ve metal (m) bileşenlerin hacimsel oranları arasındaki ilişki;

$$V_c + V_m = 1$$

eşitliği ile ifade edilir. Bileşimin oranı plaka kalınlığı (h) boyunca konumun fonksiyonu olarak

$$V_c(z) = \left(\frac{z}{h}\right)^n$$

şeklinde ifade edilir, burada $V_c(z)$ plakanın herhangi bir z mesafesindeki seramik bileşimin hacimsel oranı, h plakanın kalınlığı, n bileşimin değişimini lineer veya non-lineer olarak kontrol eden keyfi bir üstür. Çeşitli n değerleri için bileşimin hacimsel oranları Şekil 1b'de gösterilmiştir.



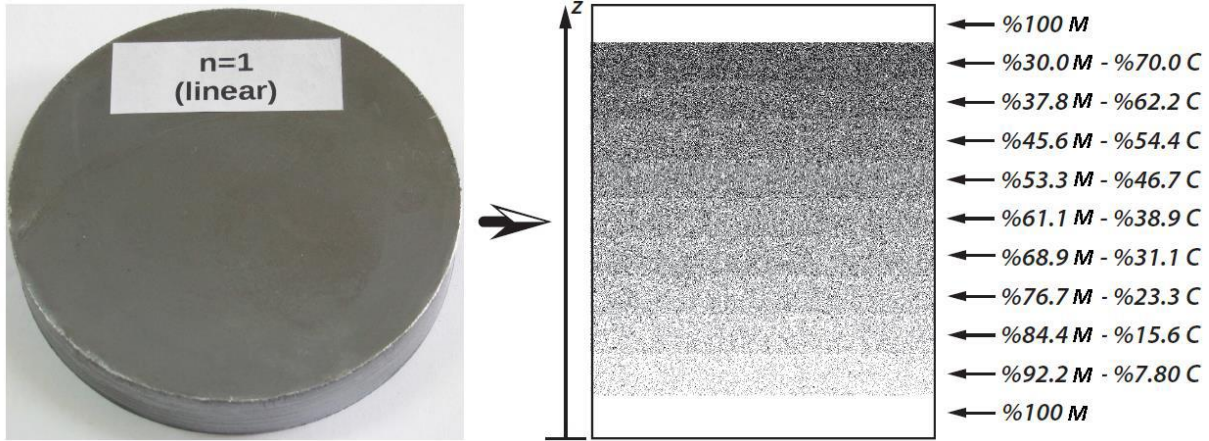
Şekil 1. a) Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka

b) Plaka kalınlığı boyunca farklı kompozisyonel gradyanlarda seramik bileşimin hacimsel

oranı (Vc).

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin üretimi, genel olarak toz metalürjisi ile kademelendirilmiş yapının elde edilmesi ve daha sonra sinterlenmesi esasına dayanır. Literatürde, fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların üretim yöntemleri üzerine yapılmış birçok çalışma mevcut olup söz konusu tekniklerin birbirlerine göre üstün ve zayıf yönleri bulunmaktadır [4-8]. Bu çalışmada; 15 mm kalınlığa sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalar, toz istifleme sıcak presleme (powder stacking-hot pressing) tekniği kullanılarak Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kompozit Laboratuvarında üretilmiştir. Metal bileşen olarak ortalama 10 mikron Al 6061 ve seramik bileşen olarak ortalama 50 mikron SiC, Al₂O₃ ve B₄C tozlarının kullanıldığı lineer kompozisyona sahip plakaların, her bir katmanı için gerekli olan metal ve seramik miktarları, karışım teorisi kullanılarak, hesaplanmıştır (Şekil 2).

Balistik sistemlerde yüksek sertlik ve dayanım gerekliliği sebebiyle, seramik malzemeler tercih sebebi olmuştur, fakat yüksek kırılma hızına sahip olmaları sebebiyle, seramik malzemeler bu amaç için tek başına kullanılmazlar. Bu sebeple seramikler, balistik uygulamalarda ön yüz malzemesi ya da matris malzemesi olarak karşımıza çıkar. Balistik yük altında zırh sistemleri yapısında bulunan seramik katman, mermi enerjisinin sönmeler ve yüksek sertliğe sahip olması sebebiyle, mermi uçuşunu kalınlaştırarak merminin nüfuziyet kabiliyetini önemli ölçüde düşürür. Tablo 1’de yukarıda bahsi geçen seramiklere ait özellikler verilmiştir.



Şekil 2. Lineer kompozisyonda (n=1.0) üretilmiş Al-SiC fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka ve kalınlık boyunca hacimsel karışım oranları. (M: metal ve C: seramik)

Tablo 1. Zırh imalatında yaygın olarak kullanılan seramik malzemeler ve özellikleri [3].

Seramik	Yoğunluk (kg/m^3)	Elastisite Modülü (MPa)	Sertlik (VH)
Alüminyum Oksit (Al ₂ O ₃)	3900	350	2000
Silisyum Karbür (SiC)	3200	390	2600
Bor Karbür (B ₄ C)	2500	450	3700

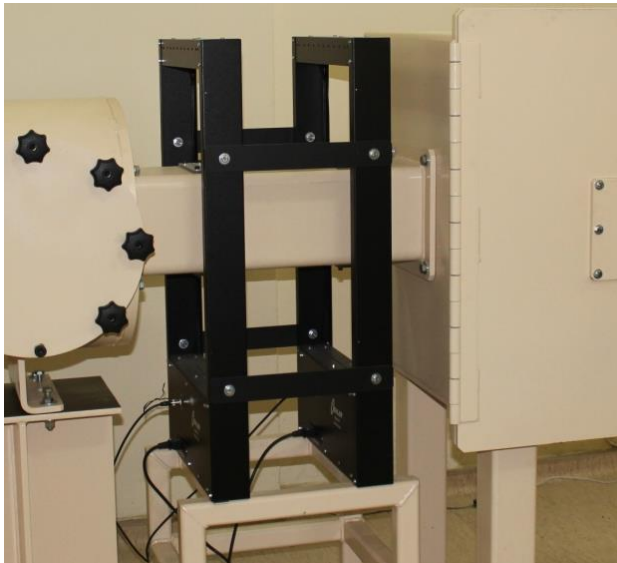
Balistik Testlerin Yapılması

Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların balistik performansının belirlenmesi amacıyla Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi bünyesindeki Mekanik Laboratuvarında bulunan gaz silah sistemi kullanılmıştır (Şekil 3). Mermi hızlarının ölçümü için Şekil 4a'da gösterilen, gaz silah sistemine entegre hız ölçüm sistemi kullanılmış olup sistem namludan

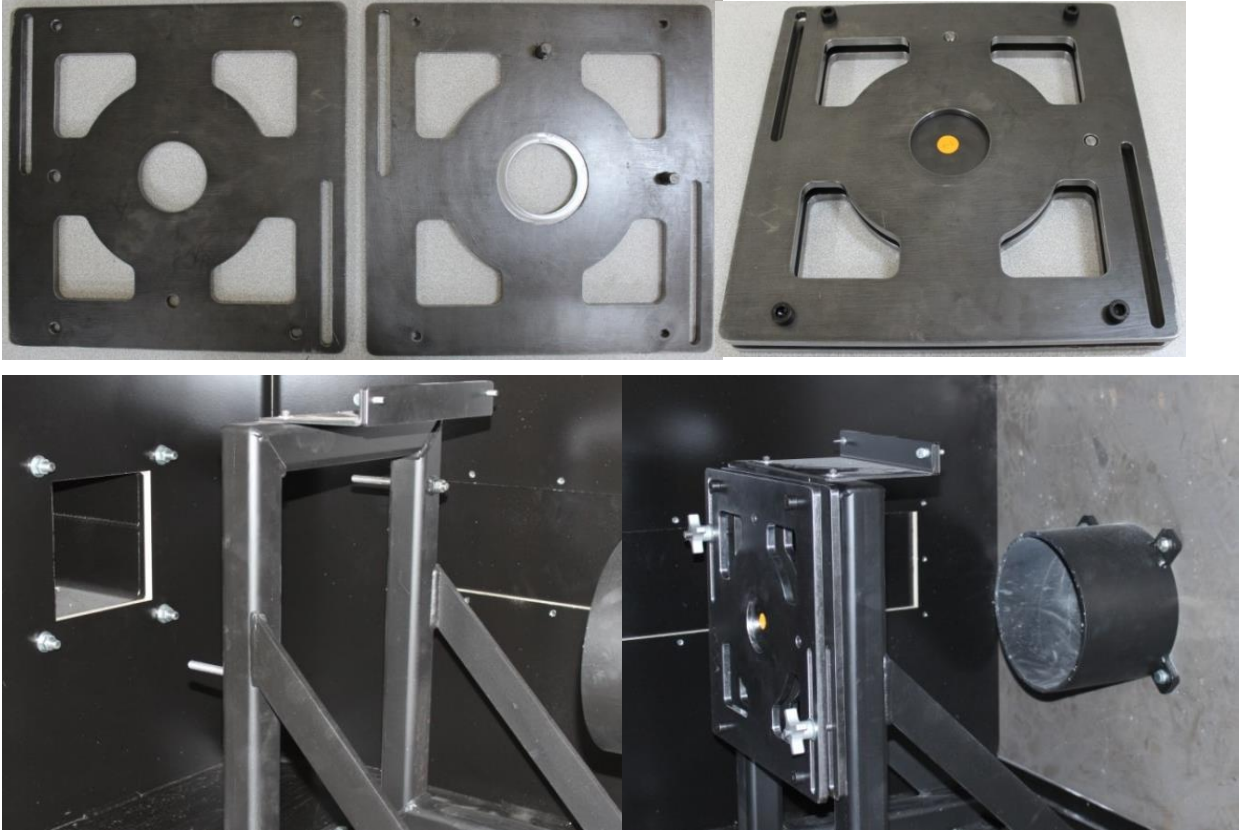


Şekil 3. Gaz silah sistemi

çıkan merminin, aralarında sabit bir mesafe bulunan iki ışık perdesini kesmesi için geçen süreyi hesaplayarak mermi hızının bulunması prensibi ile çalışır. Plakalar Şekil 5'te gösterilen sabitleme plakaları kullanılarak hedef tankı içerisine yerleştirilen plakaların balistik testleri ortalama 635 m/s mermi hızında gerçekleştirilmiş ve testlerde MIL-DTL-46593B standardında 0.3 kalibre mermi kullanılmıştır (Şekil 4b).



Şekil 4. Hız ölçüm sistemi ve 0.3 kalibre çelik mermi



Şekil 5. Fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların hedef noktasına sabitlenmesi.

SONUÇLAR

Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda, seramik yoğun tabakaların çarpma yüzeyine yakın olarak yerleştirilmesi sonucu merminin sahip olduğu enerjinin bir kısmı ön yüzeyde bulunan seramiği kırmak için harcanacak ve sert bir yüzeye karşılaşan mermi kalınlaşarak nüfuziyet gücünü kaybedecektir. Metal oranının arttığı plaka arka yüzeyi ise mermi enerjisinin büyük bir kısmını sönmüleyecektir. Bu mekanizma göz önünde bulunarak yapılan balistik testlerde %70 seramik %30 metal karışıma sahip katman, atış yönünde olacak şekilde konumlandırılmıştır.

Şekil 6'da mermi isabeti altında plaka ön ve arka yüzeylerinde meydana gelen deformasyon görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde mermi Al-B₄C fonksiyonel kademelendirilmiş plaka içerisine nüfuz etmiş ve plaka içerisinde kalmıştır. Plaka arka yüzeyinde ise şişme oluşmuştur.

Çarpma yüküne maruz plakalarda kalınlık boyunca bir şok dalgası oluşur. Bu şok dalgası plaka ön yüzeyinde basma gerilmesi oluştururken arka yüzeye ulaşan bu dalgalar çekme gerilmesine sebebiyet verirler. Eğer plaka arka yüzeyinde oluşan çekme gerilmeleri plakanın akma dayanımından daha yüksek değerlere ulaşırsa malzemenin kırılmasına sebep olurlar. Al-B₄C plaka arka yüzeyinde oluşan radyal çatlaklarda bu duruma örnektir. Al-Al₂O₃ ve Al-SiC fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda ise tam delinme oluşmuş olup Al-Al₂O₃ bileşenlere sahip plaka daha fazla deforme olmuştur. Balistik testler sonrası katmanlar arası yapıyı görmek amacıyla plakalar epoksi kalıba alınarak çarpma yüzeyine dik doğrultuda kesilmiştir. Şekil 7'de sırasıyla Al-Al₂O₃, Al-SiC be Al-B₄C plakalarda mermi çarpması sonrasında

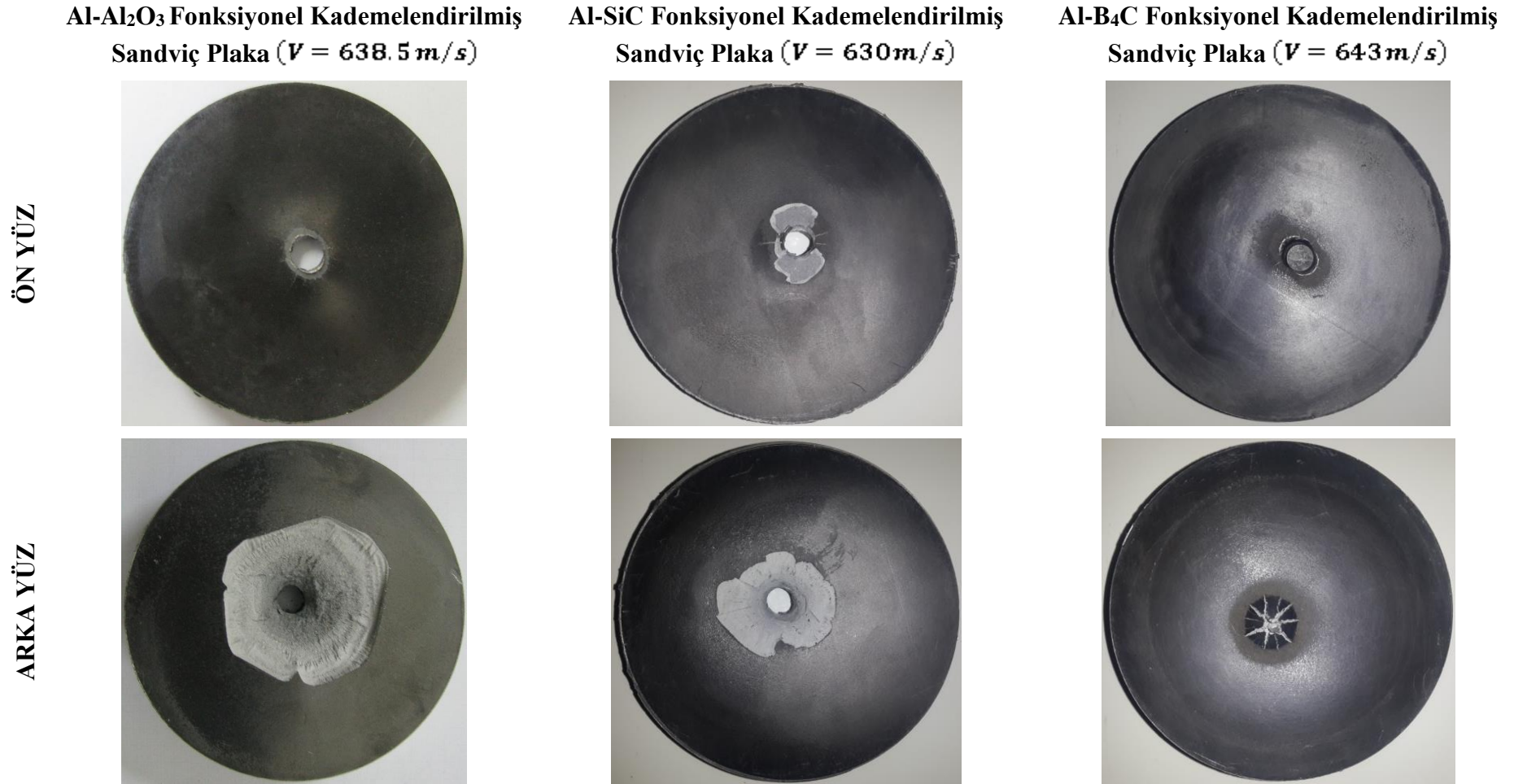
oluşan deformasyon kesit resimleri verilmiştir. Kesit görüntüleri incelendiğinde özellikle seramik bileşenin hacimsel oranının yüksek olduğu tabakaların birbirine bağlanmadığı ve ara yüzeyden ayrıldığı görülmektedir bu durum Al-Al₂O₃ ve Al-B₄C fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalarda daha belirgin olup %70 seramik %30 metal karışıma sahip katmanlar, plakadan tamamen ayrılmış olup Al-SiC plakada ise bu ayrılma daha az olmuştur.

Sonuç olarak alüminyum ile seramik tozları arasındaki reaktivite açısından SiC tozunun diğer seramik tozlara kıyasla daha başarılı olduğu anlaşılmaktadır.

MIL-STD-662F standardında tam nüfuziyet, merminin hedefe çarpma sonrasında, merminin, mermiye ait bir parçacığın veya hedef malzemesine ait bir parçacığın şahit plakayı delmesi olarak tanımlanır. Balistik testlerde Al-Al₂O₃ ve Al-SiC bileşenlere sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalarda delinme gerçekleşmiştir. Yine aynı standartta, adyabatik kayma şeklinde meydana gelen hasar sonucunda, merminin yaklaşık olarak kendi çapına yakın bir hedef parçasını hedeften kopararak ayırması "plug oluşumu" olarak tanımlanır. Şekil 7a ve Şekil 7b den anlaşıldığı üzere plakalarda mermi plaka üzerinden plaka arka yüzeyine doğru genişleyen konik bir parçayı koparmıştır. Al-Al₂O₃ fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakada, Al-SiC fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaya göre katmanlar arası delaminasyonun daha fazla olduğu ve arka yüz deformasyon çapının arttığı görülmektedir.

Al-B₄C plakada mermi yaklaşık olarak plaka kalınlığının yarısına kadar nüfuz etmiş ve plaka arka yüzeyinde radyal çatlaklar oluşmuştur. Ayrıca plakada seramik %70 bor karbür %30 alüminyum karışıma sahip katman ile altındaki katman arasında delaminasyon oluştuğu görülmektedir.

Bu çalışma ile değişen seramik bileşen ile plakaların balistik darbe yüküne karşı vermiş oldukları cevap ve hasar mekanizmalarının değişti açık olarak gösterilmiş olup doğru fonksiyonel yapının tasarlanması fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların balistik amaçlar için kullanılabilirliği açısından önemlidir.



Şekil 6. Mermi isabeti sonrasında plaka ön ve arka yüzeylerinde meydana gelen deformasyonlar.

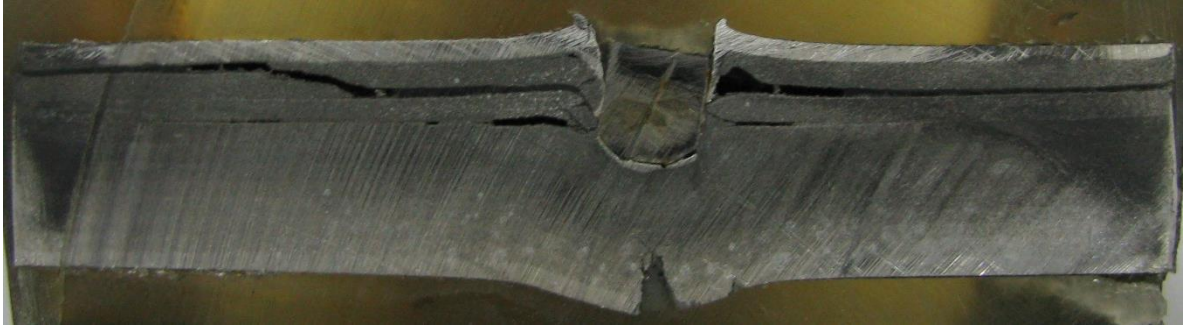
a) Al-Al₂O₃ FKSP



b) Al-SiC FKSP



c) Al-B₄C FKSP



Şekil 7. Balistik test sonrası fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plaka kesit görüntüleri.

KAYNAKLAR

- [1] Suresh, S. and Mortensen, A., 1998. Fundamentals of functionally graded materials: processing and thermomechanical behaviour of graded metals and metal-ceramic composites, Matsci Series, IOM Communications Ltd.
- [2] Ceyhun, V. and Turan, M., 2003. Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı, Mühendis ve Makina, 516:1–11.
- [3] Evcı, C., Seramik kompozit zırh sistemlerinin darbe ve balistik özelliklerinin belirlenmesi, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, 2009
- [4] Kieback, B., Neubrand, A., and Riedel, H., 2003. Processing techniques for functionally graded materials, Materials Science and Engineering: A, 362(1–2):81 – 106.
- [5] Wu, A., Cao, W., Ge, C., Li, J., and Kawasaki, A., 2005. Fabrication and characteristics of plasma facing SiC/C functionally graded composite material, Materials Chemistry and Physics, 91(2–3):545 – 550.
- [6] Zhou, M., Xi, J., and Yan, J., 2004. Modeling and processing of functionally graded materials for rapid prototyping, Journal of Materials Processing Technology, 146(3):396 – 402.

- [7] Muller, P., Mognol, P., and Hascoet, J.Y., 2013. Modeling and control of a direct laser powder deposition process for functionally graded materials (FGM) parts manufacturing, *Journal of Materials Processing Technology*, 213(5):685 – 692.
- [8] El-Desouky, A., Kassegne, S.K., Moon, K.S., McKittrick, J., and Morsi, K., 2013. Rapid processing; characterization of micro-scale functionally graded porous materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 213(8):1251 – 1257.