



Çok İşlevli Alümina-Zirkonya Kompozit Malzemelerinin Üretimi, Mekanik ve Balistik Özelliklerinin İncelenmesi

Burcu BÜYÜKDOĞAN¹ Gözde ÇELEBİ EFE^{2*}

¹ Nurol Teknoloji San ve Madencilik Tic. A.Ş., Türkiye. buyukdoganburcu@gmail.com
^{2*} Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü,
Türkiye. gcelebi@subu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada Alümina (Al_2O_3), Zirkonya (ZrO_2) malzemelerinin karışımından çeşitli kombinasyon ve sıralarda zırh malzemeleri üretilmiştir. Karşılaştırma yapabilmek amacıyla sadece saf alüminadan, sadece saf zirkonyadan, iki tozu aynı oranda homojen harmanlayarak ve yine iki tozu katmanlı olacak şekilde 4 ayrı numuneler üretilmiştir. 500 MPa'lık basınç altında preslenen numuneler 1630°C'de açık atmosfer fırınında kademeli olarak yaklaşık 30,3 saat sinterlenmiştir. Numunelerin sinter sonrası boyutsal değişimlerinin eninde %3,89, boyda %3,73 olduğu değerlendirilmiştir. Ürünlerin yoğunluklarının teknik spekt değerleri arasında olduğu bulunmuştur. Ürünlerin mikroyapı ve SEM analizlerinden bileşenlerin homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Hakim fazlar XRD analizi ile belirlenmiştir. Kopma mukavemeti en yüksek olan konfigürasyon-1, en düşük olan ise konfigürasyon-2'dir. Mekanik özellik olarak güçlü olan konfigürasyon-1'in kırılma tokluğu ortalama 4,04 MPam^{1/2}, konfigürasyon-2'nin 6,19 MPam^{1/2}, konfigürasyon-3'ün 5,73 MPam^{1/2} ve konfigürasyon-4'ün 5,42 MPam^{1/2}'dir. İlave edilen ZTA'nın ürünlerde sertlik açısından düşüşe yol açarken tokluk artışı sağladığı görülmektedir. Balistik sonuçları incelediğimiz zaman atış yapılırken hızlı kamera kaydı alınmış ve izlenmiştir. Seramiklerden beklenti mühimmatın seramikle buluştuğu an çekirdeği minimum oranda kırmasıdır. Yapılan çalışmaların tümü değerlendirildiği zaman ZTA ilavesinin yapılması sertlik bakımından konfigürasyonlarda kayda değer bir artış yapmamıştır. Fakat tokluk ve kopma değerlerinde istenilen artışın sağladığı görülmüştür. Seramiklerin kullanım alanlarına ve amaçlarına göre ZTA miktarının azaltılıp artırılması sağlanıp, hangi amaçla kullanılacaksa buna göre kompozisyonun değiştirilebileceği değerlendirilmektedir. Eğer seramikler mühimmata karşı kullanılacak ise farklı tabakalarda oluşturulup kullanımının uygun olacağı düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlar ve yorumlamaların ileride bu konuda yapılacak çalışmalara ışık tutacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Alümina seramikler, Toz metalurjisi, Zırh teknolojileri, Balistik test

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: gcelebi@subu.edu.tr

Production of Multifunctional Alumina- Zirconia Composite Materials, Investigation of Their Mechanical and Ballistic Properties

ABSTRACT

In this study, armor materials from the mixture of Alumina (Al_2O_3), Zirconia (ZrO_2) in various combinations and orders were produced. In order to make a comparison, 4 separate samples from only pure alumina, pure zirconia, homogeneously blending of the two powders at the same rate and with two powders layered were produced. Pressed under 500 MPa pressure, the specimens were gradually sintered in an open atmospheric furnace at $1630^\circ C$ for approximately 30.3 hours. The dimensional changes of the samples after sintering were evaluated to be 3.89% in width and 3.73% in length. The densities of the products were found to be between the technical specification values. Microstructure and SEM analysis of the products show that the components are homogeneously distributed. Dominant phases were determined by XRD analysis. Configuration-1 has the highest tensile strength and configuration-2 has the lowest. The average fracture toughness of configuration-1, which is strong in mechanical properties, is $4.04 \text{ Mpam}^{1/2}$, configuration-2 is $6.19 \text{ MPam}^{1/2}$, configuration-3 is $5.73 \text{ MPam}^{1/2}$ and configuration-4 is $5.42 \text{ MPam}^{1/2}$. It is seen that the added ZTA leads to a decrease in the hardness of the products while increasing the toughness. When we examine the ballistic results, rapid camera recording was taken and monitored during the firing. The expectation from ceramics is that the ammunition should break the core at a minimum rate when it meets the ceramic. When all the studies were evaluated, the addition of ZTA did not cause a significant increase in hardness in the configurations. However, it was observed that the desired increase in toughness and rupture values was achieved. It is evaluated that the amount of ZTA can be reduced or increased according to the usage areas and purposes of the ceramics and the composition can be changed according to the purpose for which it will be used. If the ceramics are to be used against ammunition, it is thought that it would be appropriate to use them in different layers. It is thought that the results and interpretations obtained will shed light on future studies on this subject.

Keywords: Alumina ceramics, Powder metallurgy, Armor technologies, Ballistic testing

1. Giriş

Darbeye ve delinmeye karşı dayanıklı malzemelerin geliştirilmesi alanında yapılan çalışmalar öncelikli olarak askeri alanlarda ortaya çıkmıştır. Son yıllarda bu alanlarda yapılan çalışmalar darbeye dayanıklı uçakların, araçların, binaların ve gemilerin tasarımı gibi sivil teknolojiye de uzanmıştır. Metaller ve seramikler gibi geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında, kompozit malzemeler yüksek özgül mukavemet ve sertliğe, düşük özgül ağırlığa ve mükemmel darbe direncine sahiptir, bu da onları uçaklarda, yüksek hızlı araçlarda ve kasklar ve kurşun geçirmez yelekler gibi askeri ekipmanlarda darbe koruması için popüler hale getirmiştir. Darbe ve penetrasyon sırasında fiber takviyeli kompozitlerinin enerji emiliminin kapsamlı bir şekilde anlaşılması ve balistik limitin (merminin kompozit hedefe nüfuz etme şansının % 50 olduğu) doğru bir şekilde tahmin edilmesi, gelişmiş kurşun geçirmez kompozitlerin optimizasyon tasarımı için önemlidir [1]. Fransızca “balistique” sözcüğünden gelen “balistik” merminin namludan çıkarak istenilen hedefe ulaşması, atışın yapıldığı çevresel koşullara bağlı olarak değişen hareketlerini, hedefe ulaştıktan sonra meydana gelen enerjinin absorblanması ve meydana gelen bozunma veya deformasyon davranışlarını araştıran bilim dalıdır. Zırhlar kullanım amaçlarına göre kişisel zırhlar, hafif zırhlar ve ağır zırhlar olmak üzere üçe ayrılır [2]. Hafif ve etkin zırh üretim araştırmalarında günümüz teknolojisinde; seramik, yüksek mukavemete sahip kumaş, köpük ve metal gibi malzemelerin farklı kombinasyonlar halinde kullanılmasıyla ortaya çıkmıştır. Balistik panel ve balistik koruyucu zırhların en önemli özelliği enerji absorblamalarıdır ve bu direkt olarak kullanılan malzeme tipi, yapısı ve sıklığı (dokuma, örgü vb.) mermi geometrisi, mermi hızı, ve kullanılan katmanlarının sayısı ile ilişkilidir.

Günümüzde hem yurt içi hem de global dünyada savunma sanayi sektöründe hem araç hem de personeller balistik koruma ürünleri ile korunmaktadır. Zırh teknolojilerinde araç ve personel koruma için düşük ağırlık yüksek koruma özelliklerinden dolayı çelik ve çelik türevi malzemelerin yerini artık kompozit malzemeler almıştır. Özellikle ağırlık avantajı yakalamak ve dayanım yükseltmek için istenmelerinden dolayı kompozitler arasında seramik esaslı kompozit malzemeler daha çok tercih edilmektedir. Bu tip mühimmatlar için geliştirilmiş olan çözümde seramik yüzeye çarpma esnasında merminin etkisini en aza indirgeyerek aşındırmaktadır. Kompozit yüzeyse yavaşlayan merminin enerjisini absorblayarak ayrıca seramik ve mermi parçalarını tutarak daha fazla hasarın oluşmasını engellemektedir [3] [4]. Jena [5], zırh tasarımında ağırlık kavramları ile ilgili çalışmalar gerçekleştirmiştir ve düşük ağırlıklı zırhlar, enerji korunum ve personel hareket kabiliyetinin artırılması için önemli olduğunu vurgulamıştır. Ayrıca askeri personellerin giydiği ağırlık olarak yüksek olan zırhların insan fizyolojisine etkilerini incelemiştir. Askerlerin kalp atış hızları ve nefes değerlerinin zırh plakalarının giyildiği durumda, giyilmediğine göre oldukça fazla yükseliş gösterdiğini tespit etmişlerdir. Günümüz teknolojisinde zırh imalatında çoğunlukla çelik kullanılmaktadır. Fakat personel giysileri veya zor hava koşulları gereken yerlerde çeliklerin yüksek ağırlığından dolayı uygun olmamaktadır. Seramik matrisli malzemelerde ise çeliklere göre daha kırılğan ve çoklu çarpışmalara karşı da dirençleri zayıftır. Fakat seramikleri düşük yoğunluk, yüksek rijitlik, yüksek sertlik ve yüksek basma mukavemetlerinden dolayı zırh uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Balistik çarpışmalarda, yüzeydeki yüklerde yüksek sertlik ve rijitlik önem kazanmaktadır. Bu sebeple seramikler genellikle zırh kombinasyonlarının ön yüzeylerinde kullanılmaktadırlar. Yüksek hıza sahip mermileri hasara uğratarak hızlarını düşürmekte, tabakalı kompozit malzemede personel veya araç korumayı sağlamaktadır.

Literatürde zırh çeliklerinin, İngiliz Chobman zırhının geliştirilmesinden itibaren tüm zırh çalışmalarının temel taşı olduğu dikkat çekmektedir. Backman ve Goldsmith (1978) tarafından yapılan çalışmalarda polimerik yapılara seramik veya çelik türevleri eklenerek kompozit zırh yapıları oluşturulmuştur [6].

Kompozit zırh malzemesi olarak Al₂O₃-ZrO₂ kompozitleri [7]–[11], Al matriksli SiC kompozitleri [12], tabakalı kompozitler [10], [11], [13] gibi bir çok çalışmalar yapılmıştır. Çalışmaların sonucunda kullanılan ara katman malzemelerinin, gerilme dalgalarının plaka içerisinde yayılmasına etki ettiğini ve ara yüzey malzemelerinin balistik performansında oldukça önemli olduğunu ortaya konulmuştur [10]. Katmanlar arasındaki arayüzde meydana gelen çekme dalgası azalmış ve çatlak ilerlemesini geciktirilerek daha yüksek bir balistik direnç kabiliyetine sahip yapı ile sonuçlanmasına sebep olmuştur [11]. Asemani ve arkadaşları [14] yüksek hızlı darbe altında Kevlar® takviyeli bir kompozitin hasar mekanizmasını incelemiş ve sonuçlar, fiber çekme kırılmasının, kırılma işlemi sırasında reçine ayrılmasının eşlik ettiği ana hasar şekli olduğunu göstermiştir. Ji ve arkadaşları [15] mermi şekillerinin etkisi altında aramid laminat kompozitin farklı deformasyon mekanizmalarını incelemiştir. Mermi küt ve yarım küre şeklinden oval şekle geçtikçe, balistik sınırlama hızı sürekli olarak azalmakta, hedef plaka deformasyon ve hasar alanı azalmakta ve delaminasyon oluşumu daha az belirgin hale gelmektedir. Liu ve arkadaşları [16] PE modifiye aramid kumaş kompozitlerin parça simüle mermilere (FSP) ve tam metal ceketli mermilere (FMJ) karşı direncini sunmuş ve PE'nin optimum uyumunun %10 olduğunu ortaya koymuştur.

Literatür araştırmalarından görünen o ki zırh malzemeleri üretmek ve geliştirmek son derecede önemlidir. Savunma personelini, aracı, yapıyı veya bir tesisi korumak bunları koruyabilecek yapıları tasarlamak tümüyle mümkün değildir. Bu sebeple üretilen koruyucu zırh ile istenilen seviyede koruma sağlamak, gelebilecek tehdit seviyeleri göz önünde bulundurularak en optimum çözümü ağırlık, maliyet, performans üçlemesiyle bulmak mümkündür. Zırh teknolojisinin gelişmesi gibi mühimmat güçlerinin de sürekli gelişmesi ile yeni malzeme veya var olan malzemeyi geliştirme çalışmaları tüm hızıyla devam edecektir.

Yapılan çalışmalarda farklı mekanik özelliklere sahip malzemelerin, bu malzemelerin farklı açılarla dizilimlerinin, kullanılan katman sayılarının, farklı bağlantı şekillerinin ve bu şekillerin mühimmat kaşısındaki enerjilerinin detaylıca ele alındığı ve bu noktaların zırh malzemesinde ait olan balistik performanslarındaki etkileri incelenmiştir. Balistik geçirmez malzemeler için hibrit kompozitte sandviç yapı, genellikle iki kat dış plaka ve ortada bir çekirdek malzemedan oluşan iyi bir yapıdır. Plakanın dış katmanı darbe kuvvetini etkili bir şekilde dağıtabilirken, ortadaki çekirdek malzeme tamponlama rolü oynayarak darbenin plakanın yapısına verdiği zararı daha da azaltır [15]. Zırh malzemesi oluşturulurken ara yüzey malzemelerinin ve katmanlı bir şekilde oluşturulan tabakaların çıkan son ürünün balistik performansını artırdığı görülmüştür. Bu konularla ilgili yapılan çalışmalar kısıtlı olup, elde edilen bulgular çalışmalar son derece kıymetlidir.

2 Metodoloji

2.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmalarda piyasa isimleri

- NM9916F olan % 99,5 saflıktaki alümina ve
- NMZTA12 olan ağırlıkça % 88,5 Al₂O₃ ve % 11,5 ZrO₂

içeren bileşenler kullanılmıştır. İki toza ait teknik özellikler aşağıdaki Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: NM9916F ve NMZTA12 tozlarının özellikleri

	NM9916F	NMZTA12
Yoğunluk	2,31 g/cm ³	1,11 g/cm ³
Sinterleme Yoğunluğu	3,88 g/cm ³	4,1 g/cm ³
Büzülme Oranı	% 17,6	% 18
Tozun Granül Büyüklüğü	2,2 nm	2,1 nm

2.2 Yöntem

Çok tabakalı zırhlar kullanılan malzemelere göre farklı yöntemlerle üretilebilir. Katmanlar ayrı ayrı üretilip yapışkanla yapıştırılabilir. Tüm yığın, basınçlı kalıplama işlemi kullanılarak yüksek sıcaklık altında preslenebilir. Entegre zırhlı büyük kompozit yapılar, vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM), reçine film infüzyon (RFI) işlemleri ve bunların varyantları kullanılarak ek yapıştırma olmadan tek parça olarak yapılabilir [4]. Bu yöntemler kullanılan malzemelere ve onlara uygun üretim yöntemlerine göre değişiklik göstermektedir. Mevcut çalışmada başlangıç malzemelerimiz seramik tozları önce preslenmiş sonra sinterlenerek tek parça plakalar elde edilmiştir.

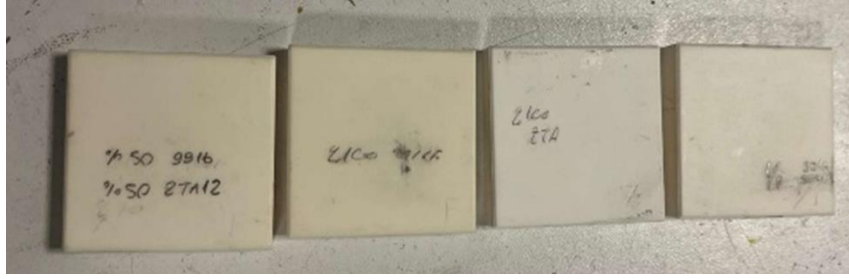
DeneySEL çalışmalarda aşağıda bileşimleri verilmiş 4 ayrı konfigürasyon kullanılmıştır. Saf Alümina, ağırlıkça % 88,5 Al₂O₃- % 11,5 ZrO₂ Zirkonya toz karışımı, her iki tozun homojen karışımı ve katmanlı olarak üst üste yığınları önce eksenel preste sıkıştırılarak sonrasında literatürle uyumlu olarak [17] belirlenen sinterleme sıcaklığında kademeli olarak sinterlenmiştir.

Tozlar 52,5x52,5x10 mm boyutlarındaki çelik kalıplarda, 500 tonluk preste cm²'ye 117 MPa altında eksenel olarak preslenmiş ve sonrasında açık atmosferli fırınında 1630°C'de kademeli olarak toplam 30.3 saat sinterlenmiştir. Sinter fırınında ürünler, 0°C'den 600°C'ye 20.3 saatte getirilmiş ve bu sıcaklıkta 1 saat bekletilmiştir. 600°C'den 1000°C'ye 1,5 saatte getirilmiş burada da 1 saat bekletilmiştir. 1000°C'den 1630°C'ye ise 1,5 saatte getirilmiş bu sıcaklıkta da 5 saat bekletilmiştir. Toplam 30,3 saat sonrasında ürünler kademeli olarak soğutulularak testler yapılmak üzere ayrılmıştır. Sinterleme sonrası numunelerin boyutları büzülme oranı nedeniyle yaklaşık 50x50x10 olarak ölçülmüştür. Farklı konfigürasyonda olan ürünlerden 5'er adet üretilmiş bunlar mekanik ve balistik testlere tabi tutulmuştur.

DeneySEL çalışmada kullanılan 4 ayrı konfigürasyon şu şekildedir;

- Konfigürasyon 1: Saf alümina tozu ile (NM9916F),
- Konfigürasyon 2: Saf ZTA12 tozu ile (NMZTA12),
- Konfigürasyon 3: İki tozu homojen olarak karıştırarak,
- Konfigürasyon 4: İki tozu 5'er mm olacak şekilde presleyerek.

4 ayrı konfigürasyon üretildikten sonra numunelere mekanik ve balistik testler yapılmıştır. Ürünlerin optik mikroskop ve SEM analizleri gerçekleştirilmiş, sertlik, kopma ve atış testleri yapılmıştır. Üretilen seramik kompozitlere ait görseller aşağıdaki Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1: Üretilen seramik kompozitlerin fotoğrafları.

3 Bulgular ve Tartışma

3.1 Sinterleme sonrası boyutsal ölçüm

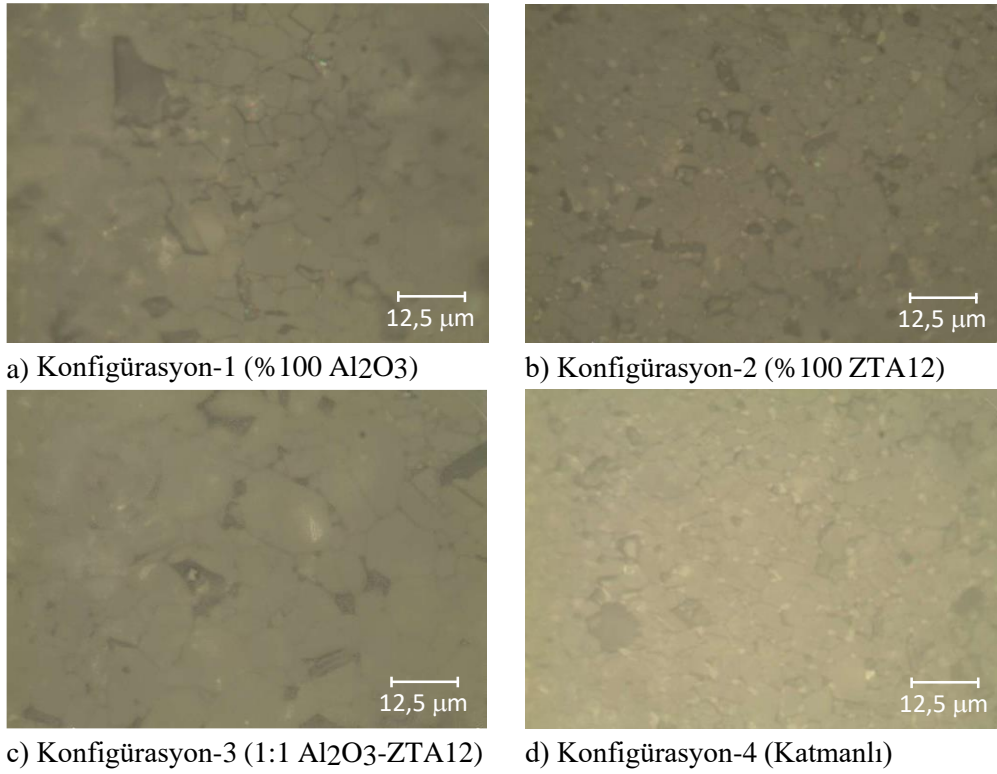
52,5x52,5mm çelik kalıbında preslenen 20 adet numune 500 tonluk güç altında 10 saniye süre ile işleme tabi tutulmuştur ve kumpasla boyutları ölçülmüştür. Pres sonrası sinter fırınında 30,3 saat 1630°C'de tutulan seramikler işlem sonrası aynı kumpas yöntemiyle ölçülmüştür. Her konfigürasyon için 5 adet numunenin boyutsal değişimleri ölçülerek ortalamaları alınmıştır. Ürünlerin boyutları incelendiğinde en ölçüsünde yaklaşık %3,89, boy ölçüsünde %3,73 çekme görülmüştür. Büzülme oranları beklenen tolerans aralığında gerçekleşmiştir. (Son ürün toleransı kabul kriteri $\pm 2,5$ mm olarak belirlenmiştir.

3.2 Sinterleme sonrası yoğunluk ölçümü

Ürünlerin yoğunlukları Arşimet yoğunluk ölçümüne göre yapılmıştır. Tüm deneysel çalışmalarda olduğu gibi yoğunluk ölçümlerinde de her konfigürasyon için 5 adet numunenin yoğunlukları ölçülerek ortalamaları alınmıştır. Konfigürasyon 1 için ortalama yoğunluk değeri $3,827 \text{ g/cm}^3$, konfigürasyon 2 için değer $4,106 \text{ g/cm}^3$, konfigürasyon 3 için $3,921 \text{ g/cm}^3$, konfigürasyon 4 için $4,228 \text{ g/cm}^3$ bulunmuştur. Ürünlerin yoğunlukları konfigürasyon 1 ve 2 için teknik spekt değerleri arasında olup konfigürasyon-2 ve 3 için beklenen değerlerde olmuştur.

3.3 Mikroyapı ve faz analizi

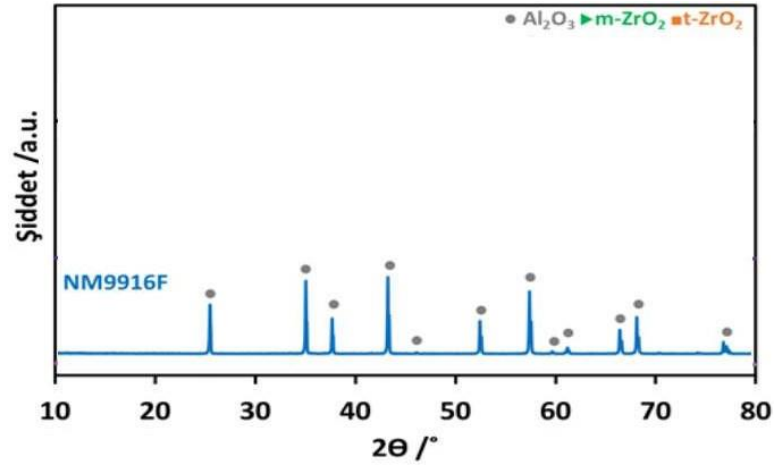
Sinterlenmiş seramiklerin mikroyapılarını incelemek için ilk önce tüm konfigürasyonlar termal dağlanmak üzere hazırlanmıştır. Bunun için ürünler önce kesme cihazı ile kesilmiş, bakalite alınmış, zımparalanmış ve parlatma işleminin ardından ürünlerin bakalitleri kırılmış sinterleme sıcaklığının 150°C altı olan 1480°C sıcaklıkta 10 dk süre ile sinter fırınına atarak termal dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Termal dağlanmış 4 konfigürasyon için rastgele numuneler seçilmiş ve her birinin optik mikroskop görüntüleri alınmıştır (Şekil 2a-d) Tüm numuneler incelendiğinde konfigürasyon 1 ve 2 için mikroyapı dağılımı başarılı olmuş, yapısal olarak kararlı olduğu gözlemlenmiştir. Konfigürasyon 3 ve 4'te ise tane boyutu açısından farklılıklar gözlemlenmiştir. Mikroyapıya bakıldığı zaman ürünlerin hiçbirinde çatlak ve laminasyon sorunları gözlemlenmemiştir. Konfigürasyon 1 ve 2 yapısal olarak homojen, konfigürasyon 3 ve 4'ün ise homojen olmadığı belirlenmiştir.



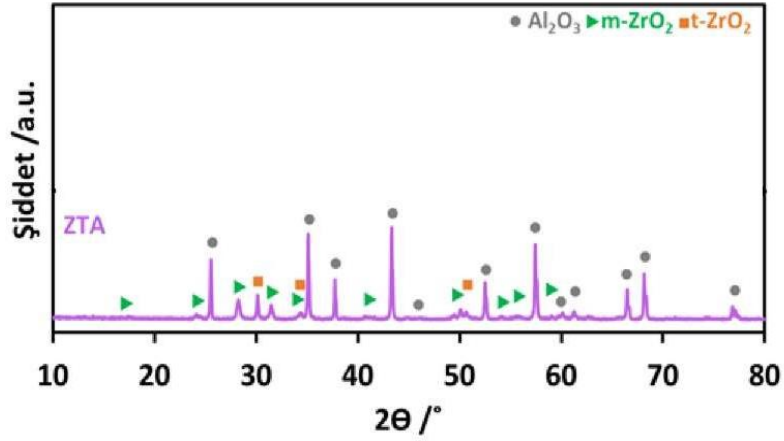
Şekil 2: a) Konfigürasyon-1 (% 100 Al₂O₃), b) Konfigürasyon-2 (% 100 ZTA12), c) Konfigürasyon-3 (1:1 Al₂O₃-ZTA12) ve d) Konfigürasyon-4 (Katmanlı) numunelerin sinter sonrası optik mikroskop görüntüleri.

Sinter sonrası numunelerin XRD analizleri yapılmış, bileşimleri belirlenmiş ve ürünlere ait teknik bilgiler doğrulanmıştır. Konfigürasyon-4, 5'er mm Al₂O₃ ve ZTA üst üste basıldığı için XRD analizine bakılmamıştır. XRD analizleri lisanslı uygulama olan Match-3-windows-x64-installer programına aktarılmış, içinde yer alan pikler renklendirilerek Şekil 3'te verilmiştir. Konfigürasyon 1 ve 2 için piklerde beklenen sonuçlar elde edilmiştir. Konfigürasyon 3'te ZTA12 ilavesi monoklinik yapıdan tetragonal yapıya doğru eğilim olduğu izlenmiş, beklenen polimorfik dönüşüm gerçekleşmiştir.

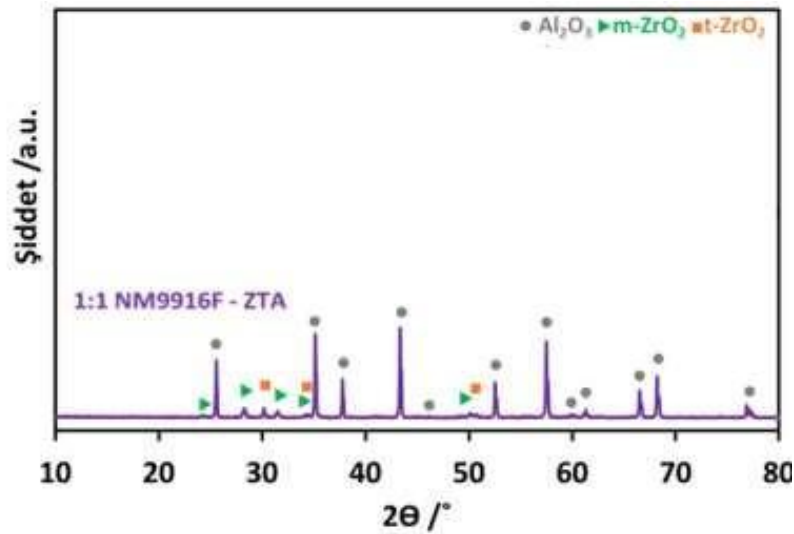
Üretilen seramiklerin 4 konfigürasyon için taramalı electron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 4'te verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiği zaman sinterleme işleminin başarıyla gerçekleştiği görülmektedir. Optik mikroskop fotoğraflarını destekleyip; detaylandırmaktadır. Şekil 4a' dan Alüminanın tane boyutunun yaklaşık 5µm olduğu görülmektedir. Şekil 4b,c ve d'de Zirkonya beyaz renkte gözükmemektedir ve nispeten homojen olarak dağılmıştır. Konfigürasyon 4 için iki farklı malzemenin birbiri içinde kaynaştığı değerlendirilmektedir. Konfigürasyon 3'te tozlar homojen olarak karıştırılmasına rağmen birbiri içinde dağılmadığı gözlemlenmektedir. İki ayrı malzemenin birbirleri içinde tabaka arayüzü oluşturduğu kompozisyonel olarak farklılık olduğu gözlemlenmektedir. Literatür çalışmalarında [5] da katmanlı basılan alaşımda iki katmanın homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Konfigürasyon-3'te ise iki tozun belli oranlarda homojen olarak karıştırma yapılmasına rağmen ürünün homojen olarak yayılmadığı tespit edilmiştir. Aynı konfigürasyon-4'teki gibi tabakalar oluşmuştur. Bu sebeple pres içinde yer alan karıştırma sisteminin daha uzun çalıştırılması homojen dağılmasında daha etkili olabileceği değerlendirilmektedir.



a) Konfigürasyon-1 (%100 Al₂O₃)

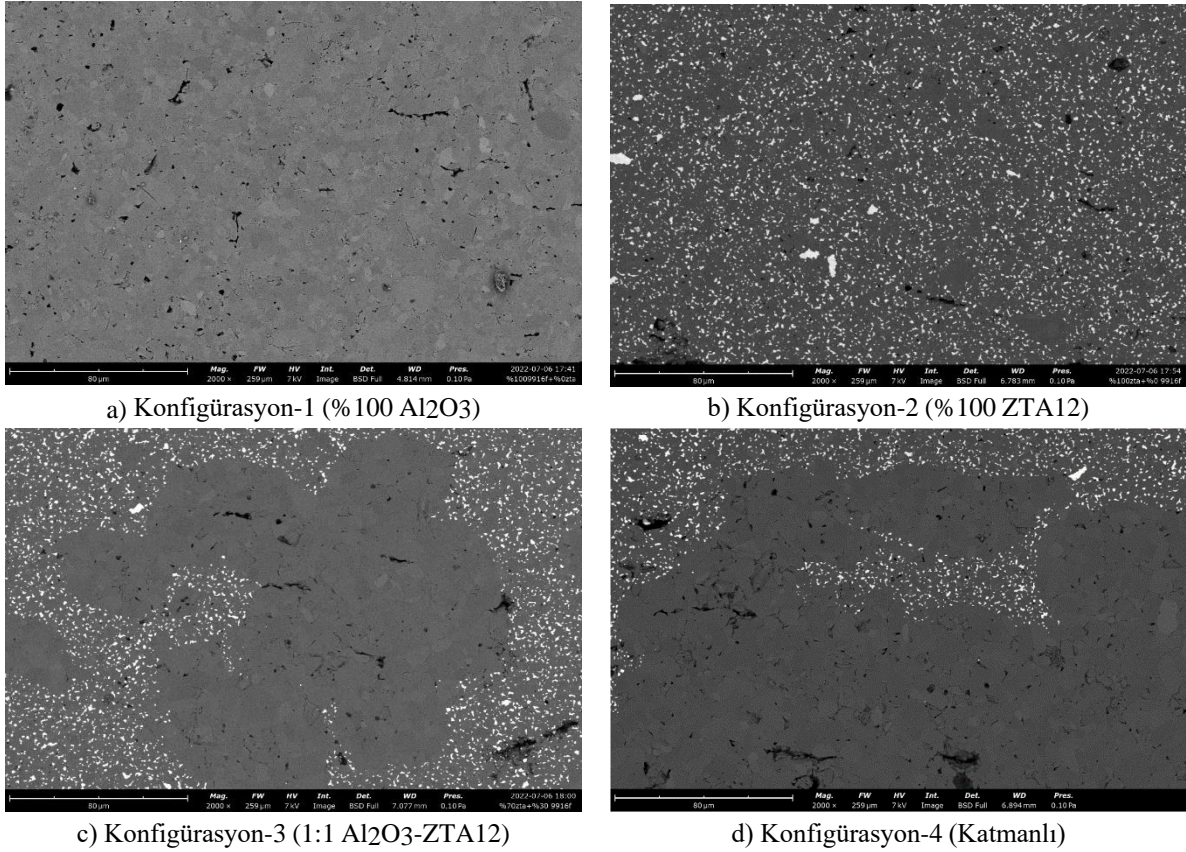


b) Konfigürasyon-2 (%100 ZTA12)



c) Konfigürasyon-3 (1:1 Al₂O₃-ZTA12)

Şekil 3: a) Konfigürasyon-1 (%100 Al₂O₃), b) Konfigürasyon-2 (%100 ZTA12) ve c) Konfigürasyon-3 (1:1 Al₂O₃-ZTA12) numunelerinin sinter sonrası XRD analizleri.



Şekil 4: a) Konfigürasyon-1 (% 100 Al₂O₃), b) Konfigürasyon-2 (% 100 ZTA12), c) Konfigürasyon-3 (1:1 Al₂O₃-ZTA12) ve d) Konfigürasyon-4 (Katmanlı) numunelerin sinter sonrası SEM görüntüleri.

3.4 Sertlik sonuçları

Numunelerin sinter sonrası sertlikleri Vickers indentasyon yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Her bir konfigürasyon için test 5 kez tekrarlanmıştır. Ayrıca Konfigürasyon 4 için 2 farklı noktadan 5 ayrı ölçüm gerçekleştirilmiş ve sonuçların ortalamaları standart sapma değerleri ile birlikte Tablo 2 ve 3'te verilmiştir.

Konfigürasyonların mekanik testlerinde konfigürasyon-1 ve 2'nin sertlik değerlerinin birbirinden farklı olduğu olduğu görülmektedir. 1 için ortalama değer 1746,6 HV iken konfigürasyon-2 için ortalama değer 1645,8 HV ölçülmüştür. Homojen karıştırılan konfigürasyon-3 için ortalama değer 1648,0 HV ölçülmüştür. Konfigürasyon-4'te katmanlı basıldığı için iki noktadan ölçüm alınmış olup ortalama değerler 1676,6 HV ve 1632,4 HV'dir. Tabakalı olan yapıda katmanlar arası sertlik farklılığı gözlemlenmiştir. ZTA ilavesinin olması Saf Al₂O₃'ten sertlik olarak düşük ama saf ZTA'dan da yüksek olduğu gözlemlenmiştir. İpek M. ve arkadaşlarının [9] yaptığı çalışmalar incelendiği zaman Zirkonya etkisinin alüminanın mekanik özelliklerini iyileştirdiği yönünde olmuş bu çalışma da bulunun sonuçla desteklenmiştir.

Tablo 2: Konfigrasyon 1,2 ve 3 numunelerinin Mikrosertlik değerleri

Numune	Sertlik (HV)
Konfigrasyon 1 (%100 Al ₂ O ₃)	1746 ± 39.5
Konfigrasyon 2 (%100 ZTA)	1645.8 ± 45.3
Konfigrasyon 3 (Homojen %100 Al ₂ O ₃ + %100 ZTA)	1648 ± 24.23

Tablo 3: Konfigrasyon 4 numunelerinin mikrosertlik değerleri.

Numune	Sertlik (HV)	Sertlik (HV)
Konfigrasyon 4 (Katmanlı %100 Al ₂ O ₃ + %100 ZTA)	1677 ± 48.6	1632.4 ± 33.5

3.5 3 nokta eğme analizleri/kırılma tokluğu analizi

Numunelerin eğme basma analizi için Zwick roell markalı test cihazı kullanılmıştır. Test TS EN ISO 7438 standardına göre gerçekleştirilmiştir. 2 noktadan sabitlenen numuneye orta noktasından uygulanan 100kN yük sayesinde meydana gelen deformasyon ve hasarın değerleri ölçülerek numunelerin eğilme karşısında direnci belirlenmiştir. Tüm numunelerin kopma mukavemetleri Tablo 4' te verilmiştir.

Saf alüminanın kopma değerleri diğer numuneler arasında en yüksek değere sahiptir. ZrO₂'ye ait değerler ise alümina karşısında oldukça düşüktür. Al₂O₃'e ZrO₂ ilavesi kopma mukavemeti açısından oldukça başarılı olduğu değerlendirilmiştir. Kırılma tokluğu testi ISO 28079:2009 standardı referans alınarak gerçekleştirilmiştir. 3 noktadan eğme testi gerçekleştirilirken oluşan çatlak boyutu test cihazı tarafından hesaplanarak tokluk değerleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5'de verilmiştir. Kırılma toklukları ise bize en önemli sonucu vermektedir. Mekanik özellik olarak güçlü olan konfigürasyon-1'in kırılma tokluğu ortalama 4,04 Mpam^{1/2}, konfigürasyon-2'nin 6,19 Mpam^{1/2}, konfigürasyon-3'ün 5,93 Mpam^{1/2} ve konfigürasyon-4'ün 5,40 Mpam^{1/2}'dir. İlave edilen ZTA'nın ürünlerde sertlik açısından düşüşe yol açarken tokluk artışı sağladığı görülmektedir. Taşdemirci V.D'nin yaptığı çalışma da katmanların arayüzeylerde toplanarak tokluk artışı sağladığını gözlemlemiştir [10]. Bulunan sonuçta çalışmayı destekler pozisyonadadır.

Tablo 4: Konfigrasyon 1, 2, 3 ve 4 numunelerinin Kopma mukavemeti değerleri.

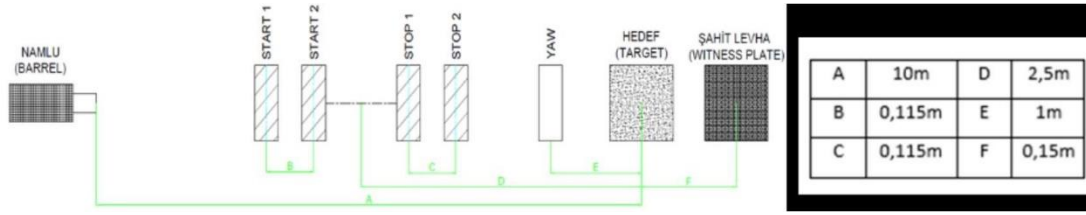
Numune No	Kopma Mukavemeti (MPa)
Numune 1 (%100 Al ₂ O ₃)	50380 ± 1826
Numune 6 (%100 ZTA)	44180 ± 1907
Numune 11 (Homojen %100 Al ₂ O ₃ + %100 ZTA)	49598 ± 1384
Numune 16 (Katmanlı %100 Al ₂ O ₃ + %100 ZTA)	50326 ± 1311

Tablo 5: Konfigrasyon 1, 2, 3 ve 4 numunelerinin Kırılma tokluğu sonuçları.

Numune No	Kırılma Tokluğu (M _{pam} ^{1/2})
Konfigrasyon 1 (%100 Al ₂ O ₃)	4,0488 ± 0.035
Konfigrasyon 2 (%100 ZTA)	6,198 ± 0.176
Konfigrasyon 3 (Homojen %100 Al ₂ O ₃ + %100 ZTA)	5,9382 ± 0.61
Konfigrasyon 4 (Katmanlı %100 Al ₂ O ₃ + %100 ZTA)	5,40 ± 0.32

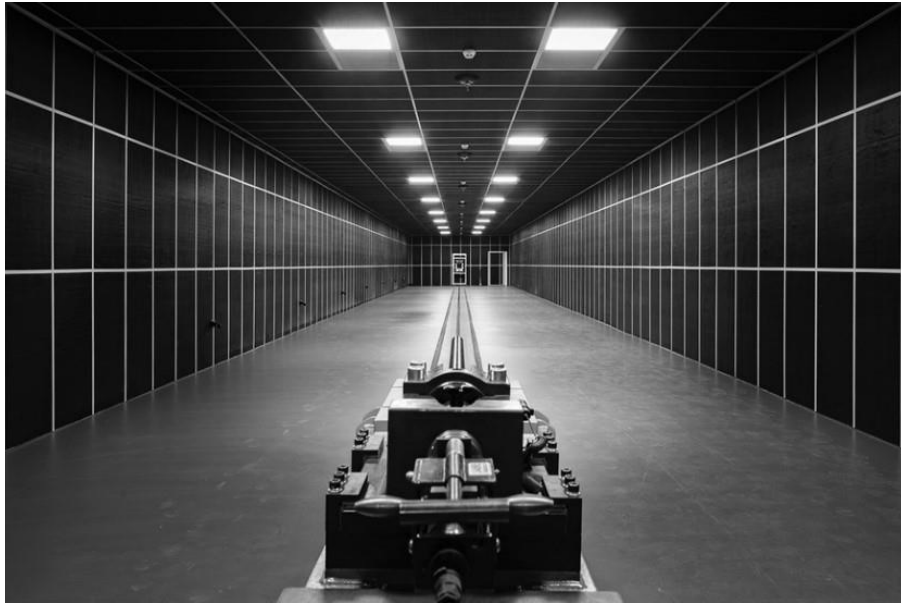
3.6 Balistik sonuçlar

Bu çalışmada TS EN 1522 ve NIJ 0101.06 test standartları referans alınarak atış numuneleri hazırlanmıştır. TS EN 1522'ye göre FB7 ve NIJ 0101.06'ya göre seviye III balistik koruma seviyesine göre numuneler hazırlanarak test gerçekleştirilmiştir. Test düzeneği görseli Şekil 5'de gösterilmektedir. Chu ve arkadaşları CFRP/AFB Sandviç Plakanın Balistik Performanslarını gerçekleştirdikleri deney düzeneği de bizim çalışmamıza benzer olarak üç kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım bir mermi fırlatıcı, ikinci kısım bir hız ölçüm cihazı ve üçüncü kısımda bir balistik geri kazanım cihazıdır [15].



Şekil 5: Balistik atış test düzeneği

Balistik testte atış silahı olan namlu 50 m ye kadar uzaklaşıp yaklaşabilen bir yapıdadır. Namlu 9,19 kalibreden 14,5x114 kalibre olan mühimmatları atma kapasitesine sahiptir. Test yapılan laboratuvar gerekli tüm standartlarda akreditedir. Laboratuvara ait görsel aşağıdaki Şekil 6’da verilmektedir.



Şekil 6: Balistik test laboratuvarı görseli.

Laboratuvarda yer alan hız kamerası sahip olduğu ışık bariyeri sayesinde merminin hız ölçümünü yapabilmektedir. Kullanılan mühimmat Makine Kimya Endüstri’si tarafından tedarik edilmiş, 60 HRC çekirdek sertliğine sahip 9,7 gr’dır. Kullanılan mühimmatın ucu kurşun kaplamalı, sertleştirilmiş çelik çekirdekli, pirinç kasa içerisinde bakır kılıflı zırh delici mermiye sahip bir mühimmat türüdür. 20 mm boyuna sahiptir. Atış numunesi düzeneğe bağlandıktan sonra TS EN 1522 FB7 koruma seviyesine göre 10 metrelik mesafeden uzaktan kumanda ile atış gerçekleştirilmiştir.

Atış sırasında test düzeneğinde yer alan hız okuma sensörlerinden 2 metre mesafeden hız değerleri okunmuş ve tüm atış hızlı kamera ile kayıt edilmiştir. Atışlara ait hız sonuçları aşağıdaki Tablo 6’ da verilmiştir.

Tablo 6: Balistik atış sonuçları

No	Test No	Seri No	Mühimmat	Numune Adı	Kompozit			Barut Miktarı (g)	Mermi Ağırlığı (g)	Hız (m/sn)
					En (mm)	Boy (mm)	Ağırlık (g)			
1	NTG-22-0245-1	1	7,62x63M2AP	Çıkış Hızı Ölçümü	50	50	91	49,15	10,544	881,88
2	NTG-22-0245-1	2	7,62x63M2AP	Çıkış Hızı Ölçümü	50	50	92	49,15	10,524	891,51
3	NTG-22-0245-1	3	7,62x63M2AP	Çıkış Hızı Ölçümü	50	50	95,1	49,15	10,631	881,84
4	NTG-22-0245-1	4	7,62x63M2AP	Çıkış Hızı Ölçümü	50	50	94,5	49,15	10,626	879,8

Atış yapılırken hızlı kamera kaydı alınmış ve izlenmiştir. Seramiklerden beklenti mühimmatın seramikle buluştuğu an çekirdeği minimum oranda kırmasıdır.

Hız testleri incelendiği zaman Konfigürasyon-1’de 20 mm olan çekirdek boyu seramiğe çarptıktan sonra arkada tarafa geçen mesafesi 12 mm ölçülmüştür. Konfigürasyon-2’de 20 mm olan çekirdek boyu seramiğe çarptıktan sonra 15 mm, Konfigürasyon-3’te 20 mm olan çekirdek boyu seramiğe çarptıktan sonra 6 mm ve Konfigürasyon-4’te 20 mm olan çekirdek boyu seramiğe çarptıktan sonra 8 mm olarak ölçülmüştür. Seramikler atış testlerinde beklenen performansları göstermiştir. Seramikler yüksek sertlikleri ile merminin ucunu aşındırıp deforme ederek; hızını ve etkinliğini azaltmaktadır [18]. Mevcut çalışmada benzer olarak alümina’nın sertliğinin yüksek ve tokluğun düşük olması çekirdeği deforme etmiş ve boyunu çok kısaltmıştır. Bu sebeple seramiğin arkasına konabilecek polietilen plakanın daha kalın olması gerektiği veya seramiğin daha kalın bir şekilde basılması gerektiği düşünülmektedir. Akdoğan ve arkadaşları [19] gerçekleştirdikleri çalışmada Alümina önyüzlü polietilen destekli kompozit zırhın balistik davranışlarını incelemişlerdir. Zırh malzemesi olarak tek katmanlı kompozit malzemelerden önce ön yüzeyi seramik katmandan oluşan tabakalı kompozitlerin daha başarılı sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Ön yüzeydeki seramik katman merminin uç kısmı deforme etmekte ve buda kinetik enerjisini azaltmaktadır.

Konfigürasyon-2 için çekirdek boyu atış sonrası 15 mm’e düşmektedir. ZTA malzemesi tok bir malzeme olduğundan dolayı mermi deformasyonu beklenildiği gibi Konfigürasyon-1’ e kıyasla daha az olmuştur. Fakat ZTA yoğunluğu yüksek bir malzeme olduğu için ağırlık dezavantajı yaratmaktadır.

Konfigürasyon-3 incelendiği zaman 20 mm olan çekirdek boyu 14 mm’e düşmüştür. 1:1 oranında karışım olan malzemede mühimmat, hem alümina hem ZTA ile karşılaştığı için iki konfigürasyonun ortasında bir değer gelmesi beklenmekteydi. Beklenti 14 mm olarak gerçekleşmiştir.

Konfigürasyon-4’te ise atış yönü önde alümina arkada ZTA olacak şekilde seramik yerleştirilmiş ve atış yapılmıştır. 20 mm olan çekirdek boyu 12 mm olarak ölçülmüş mühimmatın ilk sert malzeme olan alümina ile karşılaşması sağlanmıştır. Bu sebeple çekirdek boyu 20 mm’den 12 mm’e düşmüş, konfigürasyon-1’den iyi konfigürasyon- 2’den daha az başarılı olduğu gözlemlenmektedir. Bu da bir önceki madde de belirtildiği gibi ilave edilen ZTA ürünlerde sertlik açısından düşüşe yol açarken tokluk artışı sağladığı görülmektedir. Huang, C.Y ve arkadaşının [11] yaptığı çalışmada alüminaya zirkonya katkısının balistik test sonucunda katmanlı seramikte çatlak ilerlemesini geciktirmiş balistik direncini artırmıştır. Bu çalışma sonucu da homojen 1:1 oranı ve katmanlı seramiğin balistik performansı ile örtüşmüştür.

4 Sonuçlar

Bu deneysel çalışmada çeşitli amaçlarla kullanılan seramiklerin farklı konfigürasyonları incelenmiş, 4 ayrı konfigürasyon oluşturulup (Konfigürasyon- 1: Saf Al₂O₃, Konfigürasyon-2: Saf ZTA12, Konfigürasyon-3: Al₂O₃ ve ZTA12 homojen karışım, Konfigürasyon-4: Katmanlı basılan Al₂O₃-ZTA12) mekanik ve balistik testler yapılarak farklılıkları ortaya konmuştur.

Boyutsal değişim ende %3,89, boyda %3,73 olduğu değerlendirilmiştir. Büzülme oranları beklenen tolerans aralığında gerçekleşmiştir. Ürünlerin yoğunlukları ortalama değerler konfigürasyon-1 için 3,82 g/cm³, konfigürasyon-2 için 4,10 g/cm³ konfigürasyon-3 için 3,92 g/cm³ ve konfigürasyon-4 için 4,22 g/cm³ olarak ölçülmüştür. Konfigürasyonların mekanik testlerinde konfigürasyon-1 ve 2'nin sertlik değerlerinin birbirinden farklı olduğu görülmektedir. 1 için ortalama değer 1746,6 HV iken konfigürasyon-2 için ortalama değer 1645,8 HV ölçülmüştür. Homojen karıştırılan konfigürasyon-3 için ortalama değer 1648,0 HV ölçülmüştür. Konfigürasyon-4'te katmanlı basıldığı için iki noktadan ölçüm alınmış olup ortalama değerler 1676,6 HV ve 1632,4 HV'dir. Numunelerin kopma mukavemetleri incelendiği zaman kopma mukavemeti en yüksek olan konfigürasyon-1, en düşük olan ise konfigürasyon-2'dir. Homojen ve tabakalı ilave edilen konfigürasyon-3 ve konfigürasyon-4'te elde edilen veriler iki konfigürasyonun arasında bulunmuştur. Kırılma toklukları ise bize en önemli sonucu vermektedir. Mekanik özellik olarak güçlü olan konfigürasyon-1'in kırılma tokluğu ortalama 4,04 Mpam^{1/2}, konfigürasyon-2'nin 6,19 Mpam^{1/2}, konfigürasyon-3'ün 5,73 Mpam^{1/2} ve konfigürasyon-4'ün 5,42 Mpam^{1/2}'dir. İlave edilen ZTA'nın ürünlerde sertlik açısından düşüşe yol açarken tokluk artışı sağladığı görülmektedir.

Balistik sonuçları incelediğimiz zaman atış yapılırken hızlı kamera kaydı alınmış ve izlenmiştir. Seramiklerden beklenti mühimmatın seramikle buluştuğu an çekirdeği minimum oranda kırmasıdır. Konfigürasyon-1'in hız kamerası incelendiği zaman 20 mm olan çekirdek boyunu 8 mm'e düşürdüğü gözlemlenmiştir. Bu da Alümina'nın sert bir malzeme olmasından kaynaklı tokluğun düşük olması çekirdek boyunu çok kısaltmış bu sebeple arkasına konabilecek polietilen plakanın daha kalın olması gerektiği veya seramiğin daha kalın bir şekilde basılması gerektiği düşünülmektedir.

Konfigürasyon-2 için çekirdek boyu atış sonrası 15 mm'e düşmektedir. ZTA malzemesi tok bir malzeme olduğundan dolayı beklenen çekirdek kırma boyutu başarılı olmuş fakat ZTA yoğunluğu yüksek bir malzeme olduğu için ağırlık dezavantajı yaratmaktadır.

Konfigürasyon-3 incelendiği zaman 20 mm olan çekirdek boyu 14 mm'e düşmüş 1:1 oranında karışım olan malzemede mühimmat hem alümina hem ZTA ile karşılaştığı için iki konfigürasyonun ortasında bir değer gelmesi beklenmekteydi. Beklenti 14 mm olarak gerçekleşmiştir.

Konfigürasyon-4'te ise atış yönü önde alümina arkada ZTA olacak şekilde seramik yerleştirilmiş ve atış yapılmıştır. 20 mm olan çekirdek boyu 12 mm olarak ölçülmüş mühimmatın ilk sert malzeme olan alümina ile karşılaşması sağlanmıştır. Bu sebeple çekirdek boyu 20 mm'den 12 mm'e düşmüş, konfigürasyon-1'den iyi konfigürasyon-2'den daha az başarılı olduğu gözlemlenmektedir. İlave edilen ZTA ürünlerde sertlik açısından düşüşe yol açarken tokluk artışı sağladığı görülmektedir.

Yapılan çalışmaların tümü değerlendirildiği zaman ZTA ilavesinin yapılması sertlik bakımından konfigürasyonlarda kayda değer bir artış yapmamıştır. Fakat tokluk ve kopma değerlerinde istenilen artışın sağladığı görülmüştür. Seramiklerin kullanım alanlarına ve amaçlarına göre ZTA miktarının azaltılıp artırılması sağlanıp, hangi amaçla kullanılacaksa buna göre kompozisyonun değiştirilebileceği değerlendirilmektedir. Eğer seramikler mühimmata karşı kullanılacak ise farklı tabakalarda oluşturulup

kullanımının uygun olacağı düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlar ve yorumlamaların ileride bu konuda yapılacak çalışmalara ışık tutacağı düşünülmektedir.

5 Beyanname

5.1 Teşekkür

Yazarlar deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği Nurol Teknoloji San ve Madencilik Tic. A.Ş.' ye teşekkür eder.

5.2 Rakip Çıkarlar

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

5.3 Yazarların Katkıları

Burcu BÜYÜKDOĞAN: Makaleye katkısı. (Araştırma ve/veya makale için fikir ya da hipotezin oluşturulması, deneysel çalışma sonuçlarının yorumlanması, makalenin düzenlenmesi ve makalenin gönderilmesi.)

Gözde ÇELEBI EFE: Makaleye katkısı. (Araştırma ve/veya makale için fikir ya da hipotezin oluşturulması, Sonuçlara ulaşmak için gereç ve yöntemlerin planlanması, deneylerin yapılması, verilerin düzenlenmesi ve bildirilmesi için sorumluluk almak, bulguların mantıklı açıklanması ve sunumu için sorumluluk almak, araştırma sırasında literatür taraması ile ilgili sorumluluk almak, yazının tümü veya asıl bölümün oluşturulması için sorumluluk almak, makaleyi teslim etmeden önce sadece imla ve dil bilgisi açısından değil aynı zamanda entelektüel içerik açısından yeniden çalışma yapmak.)

KAYNAKLAR

- [1] C. Cong, W. Zhu, J. Liu, and X. Wei, "A review on the analytical and numerical models for ballistic limit of fiber-reinforced composites," *Compos. Struct.*, vol. 345, no. April, p. 118392, 2024, doi: 10.1016/j.compstruct.2024.118392.
- [2] H. S. I. Uygur, "Alüminyum Esaslı Metal Matris Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri," *Sak. Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, vol. 1, no. Mart, pp. 167–174, 2004.
- [3] Kamil Özdin, "Alüminyum Esaslı SiC Takviyeli Kompozitlerin Üretimi ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması," Gazi Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [4] K. Akella, *Handbook of Advanced Ceramics and Composites*, no. June. 2020. doi: 10.1007/978-3-319-73255-8.
- [5] P. K. Jena, K. Ramanjeneyulu, K. Siva Kumar, and T. Balakrishna Bhat, "Ballistic studies on layered structures," *Mater. Des.*, vol. 30, no. 6, pp. 1922–1929, 2009, doi: 10.1016/j.matdes.2008.09.008.
- [6] M. E. Backman and W. Goldsmith, "The mechanics of penetration of projectiles into targets," *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 16, no. 1, pp. 1–99, 1978, doi: 10.1016/0020-7225(78)90002-2.
- [7] S. Yin, Y. Fujishiro, S. Uchida, and T. Sato, "Characterization of ceria and yttria co-doped zirconia/alumina composites crystallized in supercritical methanol," *J. Supercrit. Fluids*, vol. 13, no. 1–3, pp. 363–368, 1998, doi: 10.1016/S0896-8446(98)00073-4.
- [8] D. Jayaseelan, D., Nishikawa, T., Awaji, H., Gnanam, F., "Pressurless sintering of sol-gel derived alumina-zirconia composites," *Mater. Sci. Eng.*, vol. 256, pp. 265–270, 1998.
- [9] M. Ipek, S. Zeytin, and C. Bindal, "An evaluation of Al₂O₃-ZrO₂ composites produced by coprecipitation method," *J. Alloys Compd.*, vol. 509, no. 2, pp. 486–489, 2011, doi: 10.1016/j.jallcom.2010.09.073.
- [10] A. Tasdemirci, G. Tunusoglu, and M. Güden, "The effect of the interlayer on the ballistic performance of ceramic/composite armors: Experimental and numerical study," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 44, pp. 1–9, 2012, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2011.12.005.
- [11] C. Y. Huang and Y. L. Chen, "Design and impact resistant analysis of functionally graded Al₂O₃-ZrO₂ ceramic composite," *Mater. Des.*, vol. 91, pp. 294–305, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2015.11.091.
- [12] E. S. C. Chin, "Army focused research team on functionally graded armor composites," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 259 A259, no. 2, pp. 155–161, 1999, doi: 10.1016/S0921-5093(98)00883-1.
- [13] M. Übeyli, R. O. Yildirim, and B. Ögel, "On the drop-weight testing of alumina/aluminum laminated composites,"

- Sadhana - Acad. Proc. Eng. Sci.*, vol. 30, no. 5, pp. 673–686, 2005, doi: 10.1007/BF02703514.
- [14] S. S. Asemani, G. Liaghat, H. Ahmadi, Y. Anani, A. Khodadadi, and S. C. Charandabi, “The experimental and numerical analysis of the ballistic performance of elastomer matrix Kevlar composites,” *Polym. Test.*, vol. 102, p. 107311, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.POLYMERTESTING.2021.107311.
- [15] Y. Chu *et al.*, “Experimental Study on the Ballistic Performance of CFRP/AFB Sandwich Plate,” *J. Mater. Res. Technol.*, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.JMRT.2024.09.163.
- [16] P. Liu, Y. Liu, Z. Wang, J. Chen, H. Zhang, and G. Huang, “A design model of multi-layer modified aramid fabrics against fragment simulating projectiles and full metal jacketed bullets,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 191, p. 104989, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.IJIMPENG.2024.104989.
- [17] M. V. Silva, D. Stainer, H. A. Al-Qureshi, O. R. K. Montedo, and D. Hotza, “Alumina-Based Ceramics for Armor Application: Mechanical Characterization and Ballistic Testing,” *J. Ceram.*, vol. 2014, pp. 1–6, 2014, doi: 10.1155/2014/618154.
- [18] S M Walley, “Historical review of high strain rate and shock properties of ceramics relevant to their application in armour,” *Adv. Appl. Ceram.*, vol. 109, no. 8, pp. 446–466, 2010.
- [19] M. A. Akdoğan and O. S. Türkbaş, “Ballistic behavior of alumina ceramic faced and polyethylene reinforced armor material: Experimental analysis,” *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, vol. 39, no. 4, pp. 2091–2102, 2024, doi: 10.17341/gazimmfd.1252226.



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).