



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ALÜMİNA SERAMİK PLAKALARIN ŞEKİLLENDİRİLMESİ VE
BALİSTİK İNCELENMESİ**

EMİNCAN ÖZBAĞDATLI

DANIŞMAN

DOÇ. DR. BİLAL KURŞUNCU

BARTIN-2023



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ALÜMİNA SERAMİK PLAKALARIN ŞEKİLLENDİRİLMESİ VE BALİSTİK
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emincan ÖZBAĞDATLI

BARTIN-2023

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Bilal KURŞUNCU danışmanlığında hazırlamış olduğum “ALÜMİNA SERAMİK PLAKALARIN ŞEKİLLENDİRİLMESİ VE BALİSTİK İNCELENMESİ ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

03/02/2023

Emincan ÖZBAĞDATLI

ÖNSÖZ

Tez dönemimin her aşamasında değerli bilgi ve fikirleriyle bana yön veren, her türlü desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Bilal KURŞUNCU 'ya sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım. Tez çalışmalarında bilgilerini aktaran değerli hocam Prof. Dr. M. Sabri GÖK'e teşekkür ve saygılarımı sunarım. Ayrıca tez deney çalışmalarında her türlü cihazın kullanımında yardımcı olan Arş. Gör. Dr. Yasin ÖZGÜRLÜK, Doç. Dr. Ertuğrul ERDOĞMUŞ' a teşekkürlerimi borç bilirim.

Öğretim dönemim boyunca her daim desteklerini esirgemeyen babam Adnan ÖZBAĞDATLI' ya, annem Ayşe ÇARDAK' a, kardeşlerim Sudenaz ÖZBAĞDATLI ve Emirhan ÖZBAĞDATLI' ya teşekkür ederim.

Bütün tez çalışmam boyunca bilgi alışverişi yaptığım, sürekli destek veren meslektaşım, yüksek lisans proje arkadaşım Büşra OKTAVGİL' e teşekkür ederim.

Bilgi ve deneyimlerini sürekli aktaran, her zorlukta destek veren değerli meslektaşlarım Sayın Bülent AYTEKİN ve Sayın Emre ŞAHİN' e teşekkürlerimi borç bilirim.

Ürün tedarik kısmında yardımlarından dolayı Weicon Bölge Müdürü Sayın Mehmet YILDIZ' a teşekkür ederim.

Emincan ÖZBAĞDATLI

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALÜMİNA SERAMİK PLAKALARIN ŞEKİLLENDİRİLMESİ VE BALİSTİK İNCELENMESİ

Emincan Özbağdatlı

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Bilal KURŞUNCU

Bartın-2023,sayfa:62

İnsanoğlu hayatı boyunca kendini dış etkilere korumaya çalışmış ve bu sebepten zırhlar ortaya çıkmıştır. Çelik kablolar ile başlayan zırh üretimi günümüze kadar farklı malzemeler ile denenmiştir ve hala da üzerinde çalışmalar yapıp en iyi sonuçlar aranmaktadır. Bu çalışmada alüminyum oksit(Al_2O_3) yani alümina tozu kullanılarak farklı geometriye sahip 2 farklı numune için presleme yöntemi ile zırh numuneleri üretilmektedir. Üretildikten sonra belirli bir sıcaklık ve zamanda uygulanan fırınlama işlemiyle zırha mukavemet katılmaya çalışmaktadır. Üretimi tamamlanan numunelere mekanik testler uygulanmıştır. Sem görüntülerinde içyapısı incelenmiştir. Ön ve arka yüzeyinde çelik plaka kullanılarak oluşturulan sandviç tipi zırh plakalarına balistik test uygulanmıştır. 7.62x51mm mühimmat tipi ile uygulanan balistik testte beklenildiği gibi sonuçlar elde edilmiştir. Balistik testte kullanılan mühimmatın yüksek çıkış hızı ve enerjisi olması, zırhların doğru üretim ve doğru tasarımın oluşturulduğu görülmüştür. Literatür incelenmesi yapıldığında sonuçların neredeyse aynı çıktığı görülmüştür. Yapılan çalışmalar sonucunda alümina seramik numunesinin hafifliği, maliyeti, yüksek performans

değerleri ve fiziksel testlerde gösterdiği performans ile seramik tozunun zırh üretimi için uygunluğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Alümina, Alüminyum Oksit, balistik test, konkav geometri, seramik vücut zırhı, seramik zırh



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

BALLISTIC INVESTIGATION OF DIFFERENT SHAPED ALUMINA CERAMIC PLATES

Emincan ÖZBAĞDATLI

Bartın University

Graduate School

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Bilal KURŞUNCU

Bartın-2023, pp: 62

Mankind has tried to protect himself from external influences throughout his life, and for this reason, armors have emerged. The production of armor, which started with steel cables, has been tried with different materials until today, and studies are still being carried out on it and the best results are sought. In this study, armor samples are produced by pressing method for 2 different samples with different geometries using aluminum oxide (Al_2O_3), that is, alumina powder. After it is produced, it tries to add strength to the armor with the firing process applied at a certain temperature and time. Mechanical tests were applied to the samples whose production was completed. Its internal structure was examined in Sem images. Ballistic tests were applied to sandwich-type armor samples created using steel plates on the front and back surfaces. As expected, results were obtained in the ballistic test applied with 7.62x51mm ammunition type. It has been observed that the ammunition used in the ballistic test has a high output velocity and

energy, and the correct production and design of the armors are created. When the literature was examined, it was seen that the results were almost the same. As a result of the studies, it has been seen that the lightness, cost, high performance values of the alumina ceramic sample and its performance in physical tests, and the suitability of the ceramic powder for armor production.

Keywords: Alumina, aluminum oxide, ballistic testing, concave geometry, ceramic body armor, ceramic armor



İÇİNDEKİLER

BEYANNAME	ii
ÖNSÖZ.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	4
2.1. Mühendislik Alanındaki Önemli Bazı İleri Teknoloji Seramikleri.....	9
2.1.1 Alüminyum Oksit (Alümina) (Al_2O_3).....	9
2.1.2 Bor Karbür (B_4C).....	9
2.1.3 Alüminyum Nitrür (AlN).....	10
2.1.4 Silisyum Karbür (SiC)	10
2.1.5 Magnezya (MgO).....	10
2.1.6 Zirkonya (ZrO_2)	11
2.2. Seramiklerin Özellikleri ve Çeşitleri.....	11
2.3. Alümina Seramiklerin Şekillendirilme Yöntemleri.....	14
2.3.1 Presleme Yöntemi ile Şekillendirme	15
2.3.1.1 Soğuk İzostatik Presleme (CIP)	18
2.3.1.2 Sıcak İzostatik Presleme (HIP)	18
2.3.2 Yaş Şekillendirme (Slip Döküm)	19
2.3.3 Enjeksiyon ile Şekillendirme.....	20
2.3.4 Enjeksiyon Kalıplama ile Şekillendirme	21
2.3.5 Şerit Döküm ile Şekillendirme	22
2.4. Balistik Test	22
2.4.1 İç Balistik.....	23
2.4.2 Dış Balistik.....	24
2.4.3 Termal Balistik.....	25
2.4.4 Orta Balistik	26
2.4.5 Adli Balistik.....	26
2.4.6 Yaralanma Balistiği.....	26

2.5. Standartlara Göre Kullanılan Mühimmat Tipleri ve Silahlar	26
3. MATERYAL VE METOT	31
3.1. Kalıp Tasarımı ve Üretimi.....	31
3.2. Toz Seçimi	36
3.3. Alümina Seramik Numunelerin Presle Şekillendirilmesi.....	37
3.4. Alümina Seramik Numunelerin Sinterlenmesi.....	37
3.5. Mekanik Testler	38
3.6. Sinterlenmiş ve Sinterlenmemiş Numuneye Tahribatsız Test	39
3.7. Alümina Seramik Epoksi Yardımıyla Birleştirilmesi.....	39
3.8. Alümina Zırh Numunesine Balistik Test Uygulanması.....	41
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	42
4.1. SEM Görüntü Testi	44
4.2. Mekanik Testler	46
4.3. Balistik Test	47
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	56
KAYNAKLAR	59

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
No	No
1.1: Bor karbürden üretilmiş seramik zırh örneği	2
1.2: Bor karbür(B ₄ C) seramik zırhı kullanılan Alman Leopard 2A7 tankları	3
2.1: İleri seramik malzemelere örnekler.....	14
2.2: Tek hareketli presleme yöntemiyle üretim aşamaları	16
2.3: Tek yönlü ve çift yönlü presleme işleminin farkı	17
2.4: Soğuk izostatik presleme yöntemiyle şekillendirme.....	18
2.5: Slip döküm yöntemiyle şekillendirme	20
2.6: Ekstrüzyon ile şekillendirme yöntemi.....	20
2.7: Enjeksiyonile şekillendirme yöntemi.....	20
2.8: Şerit döküm yöntemiyle şekillendirme	22
2.9: Ateşleme yapıldıktan sonraki zamanla basınç arasındaki değişim	23
2.10: Mermilerin uç şekilleri ve farklı kalibreler sahip mermi tipleri.....	27
3.1: Altıgen geometrilili alümina numunenin perspektif görünüşü	31
3.2: Altıgen geometrinin yandan görünüşü	31
3.3: Düz şekilli alümina numune	32
3.4: Seramik numunelerin üretileceği pres kalıpları ve montajı.....	32
3.5: Pres kalıbı montajının kesitinin detaylı görünümü	33
3.6: Altıgen geometrilili alümina seramiğin teknik resim görünümü	33
3.7: Düz geometrilili alümina seramiğin teknik resim görünümü	33
3.8: Altıgen kalıbın parlatma sonrasındaki görünüşü	34
3.9: Düz kalıbın parlatma sonrasındaki görünüşü	34
3.10: Kalıpların prese bağlanmış hali	35
3.11: Alümina seramik tozu	36
3.12: Seramiklerin sinterlendiği fırın	38
3.13: Seramik numuneye basma testi uygulanışı	38
3.14: Seramik numuneye sertlik testi uygulanma anı.....	39
3.15: Farklı geometrilerdeki seramik numunelerin çelik zırh plakasına yapıştırılması.....	40
3.16: Alümina seramik numunelerin tek çelik zırh plakasına yapıştırılmış hali	40

3.17: Zırh numunenin birleştirildikten sonraki hali	40
3.18: Alümina zırh numunelerinin balistik test sonrasındaki görünüşü	41
4.1: Presleme sonrası düz şekilli alümina numune	43
4.2: Sinterlenme öncesindeki SEM görüntüsü	44
4.3: Sinterlenme sonrasındaki SEM görüntüsü	44
4.4: Sinterleme sonrasındaki düz geometrili alüminanın ölçü görüntüleri	45
4.5: Sinterleme sonrasındaki altıgen geometrili alümina ölçü görüntüleri	46
4.6: Zırh numunelerinin balistik testten sonraki ön görünüşü	48
4.7: Zırh numunelerinin balistik testten sonraki arkadan görünüşü	49
4.8: Merminin düz geometrili zırha giriş görüntüsü	49
4.9: Merminin altıgen geometrili zırha giriş görüntüsü	50
4.10: Düz geometrili plakanın yan profili	51
4.11: Düz geometrinin balistik test sonrasındaki açılması	51
4.12: Altıgen geometrinin yan profilden görünüşü	51
4.13: Düz geometrili seramik zırhta merminin oluşturduğu yükseklik	52
4.14: Altıgen geometrili seramik zırhta merminin oluşturduğu yükseklik	53

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
2.1: Bor karbür tozun genel özellikleri	9
2.2: Silisyum karbürün tipik özellikleri	10
2.3: Seramiklerin özelliklerinin diğer malzemelerle karşılaştırılması	13
2.4: Balistik koruyucu standartları	27
2.5: NIJ-STD-0101.04 standardında belirtilen koruma seviyeleri	28
2.6: KNIJ-STD-0101.06 standardında belirtilen koruma seviyeleri.	29
4.1: Alümina seramik tozunun özellikleri.	42
4.2: Preslenme sonrası seramik numune özellikleri.	42

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

%	: yüzde
°C	: santigrat derece
°C ⁻¹	: ısı genleşme
Ωm ⁻¹	: elektrik iletkenliği
σ	: mukavemet
cm	: santimetre
E, E ₀	: elastisite modülleri
g/cm ³	: yoğunluk
kg	: kilogram
kgf/mm ²	: sertlik(vickers)
é _p	: yaklaşık gerinim hızı
V _p	: merminin plakaya çarpma hızı
D _m	: Merminin çapı
MPa	: megapascal
P	: gözenek oranı
GPa	: gigapascal
µm	: mikrometre

KISALTMALAR

atm	: Atmosfer basıncı
CIP	: Cold Isostatic Pressing
CNC	: Computer Numerical Control
HIP	: Hot Isostatic Pressing
NaO ₂	: Sodyum süperoksit
SiO ₂	: Silisyum dioksit, silika
BaTiO ₃	: Baryum Titanat
Si ₃ N ₄	: Silisyum Nitrür
NIJ	: Ulusal Adalet Enstitüsü
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu

1.GİRİŞ

Dünyada yaşanan teknolojik gelişmelerle beraber savunma sanayi alanında da büyük gelişmeler yaşanmıştır. Bu gelişmelerden birisi de zırhlar üzerinde olmuştur. Daha önceki dönemlere bakıldığında çelikler kullanılırken son zamanlarda gelişen teknoloji ile birlikte ileri teknoloji seramiklerinin kullanımı yaygınlaşmaya başlanmıştır. Zırhlar gelişiminde kullanım alanları ile birlikte kullanan kişinin hareketini kısıtlamadan ve ekstra ağırlıktan kurtarılması için seramik zırh üzerine çalışmalar ve kullanımlar yaygınlaşmıştır.

İleri teknoloji seramikleri olarak kullanılan Alüminyum Oksit (Al_2O_3) (Alümina), Silisyum Karbür (SiC) ve Bor Karbür (B_4C) en yaygın olarak kullanılan seramik türleridir. Alümina seramik çeşidi yüksek mukavemet, ısı direnç, sertlik, korozyon direnci ve kimyasal karalılık gibi özelliklerinin mükemmel olmasından dolayı en çok tercih edilen ileri teknoloji seramiğidir. Silisyum Karbür (SiC), yüksek sıcaklıklara çıkıldığı zaman özellikle iyi mekanik özelliklere, düşük termal iletkenliğe, yüksek termal şok dayanımına, düşük termal genleşme katsayısına sahip olup sert, yarı iletken ve refraktif indeks değeri elmaştan daha iyi olan bir seramik türü olduğu için ileri teknoloji seramikleri arasında yerini almaktadır. Bor Karbür(B_4C), Elmas (E) ve kübik Bor Nitrür (CBN) den sonra şekillendirilebilen en sert malzeme olup, yüksek ergime sıcaklığı, yüksek aşınma direnci, yüksek mukavemeti ve düşük yoğunluğu ile ileri teknoloji seramikleri arasında popüler bir konumdadır. Bor Karbür (B_4C), kırılmaya karşı güçsüzlüğü, yüksek ergime sıcaklığı güçlü kovalent bağından dolayı sinterlenmesindeki zorlukları Bor Karbür için olumsuz özellikler olarak bulunmaktadır. Seramiklerin en büyük avantajı çeliklere göre hafif olmasıdır ayrıca ileri teknoloji seramikleri mekaniksel ve elektriksel özellikleri dolayısıyla çok önemli ve stratejik malzemelerdir.

İleri teknoloji seramiklerinin kimyasal karalılığının yüksek olması, sert yapıda olmamaları, Yüksek sıcaklıklara yüksek dayanım göstermeleri gibi birçok teknik verimliliklerinden dolayı günümüzde kullanımına ilgi artmıştır ve hala üzerine çalışmalar devam etmektedir.

İleri teknoloji seramiklerinin kullanımı ve üretim aşaması geleneksel olarak üretilen seramiklerden mikroyapı, üretim yöntemleri olarak farklılıklar göstermektedir. Geleneksel olan seramikler doğal hammaddeden üretilip, ileri teknoloji seramikleri hammaddesi işlem görmüş olan doğal hammaddelerdir veya sentetiklerdir. Böyle bir üretimden geçse ileri teknoloji seramiklerinin içinde istenmeyen safsızlıklardan arındırılıp daha saf bir ürün elde etmek mümkündür. İleri teknoloji seramikleri ayrıca çok ince tozlardan üretilmektedir. Bu

ince tozların boyutları 1 µm ‘den daha küçük boyutlarda olmaktadır ve bu boyutlarda olduğu için daha yoğun bir seramik üretimi sağlanmaktadır. İleri teknoloji seramiklerinin hafif olmasının yanı sıra mekanik özellikleri çok iyi gelişmiştir. Yüksek sıcaklık kararlılığı, yüksek mukavemet, yüksek sertlik, aşınma dayanımı, korozyon dayanımı, düşük yoğunluğu ve yüksek elektrik direnci olan ileri teknoloji seramikleri günümüzde yaygın olarak kullanılmakta ve gün geçtikçe de üzerine yapılan çalışmalar artmaktadır.

İleri teknoloji seramiklerinin teknik özelliklerinden dolayı zırh üretiminden son yıllarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Seramik zırhları kullanım alanlarına göre 2 gruba ayrılıp incelenebilmektedir.

Bu gruplar:

- Kişisel Zırhlar (Kurşun geçirmez yelekler, Kasklar)
- Ağır Zırhlar (Tanklarda kullanılan)

Kişisel zırhlar yani kurşun geçirmez yelekler daha önceki zamanlarda çelikten yapılmaktaydı ancak kullanan kişiye büyük ağırlık sağlayıp zorluk çıkardığı için seramik olarak üretimi denenip uygulanmaya başlanıp kullanılmaktadır.



Şekil 1.1: Bor karbürden üretilmiş seramik zırh örneği (URL-1 2022)

Seramik olarak üretilen zırh kullanımı bir ağır araç zırhıdır ve 1.Dünya Savaşında Alman ordusu tarafından kullanılmıştır.



Şekil 1.2: Bor karbür(B_4C) seramik zırhı kullanılan Alman Leopard 2A7 tankları.(URL-1 2022)

Seramik zırhların kullanımı devamlı artmaktadır ve geliştirilmektedir. 1.Dünya savaşında kullanılan seramik kaplamalar günümüzde direk zırh olarak kullanılmaktadır.

2.LİTERATÜR ÖZETİ

İnsanoğlu hayatları boyunca kendilerini saldırılara karşı savunmaya çalışmışlardır. Roma döneminden itibaren askerler kendilerini savaş dönemlerinde korumak için vücut zırhları kullanmışlardır. Vücut zırhlarının görevi yüzyıllardır aynı kalmıştır. İnsan vücuduna zarar verecek silahların girişini engellemek amacıyla kullanılmıştır. Daha eski zamanlarda askerler vücutlarını korumak için çelik levha kablo demetleri ile sarmışlardır(David, Gao, and Zheng 2009).

Zamanın değişmesiyle teknolojinin gelişimi ile birlikte zırhların da kaliteleri artmıştır ve balistik bilimi ortaya çıkmıştır. Balistik bilimi silahtan çıkan merminin havada hedefe ulaşana kadar ki hareketlerini inceleyen bilim dalıdır. Balistik bilimi genel olarak iç balistik, dış balistik ve terminal balistik olarak üç bölüme ayrılmaktadır(Yumak and Aslantas 2013). Balistik bilimi kullanılarak zırhların gelişimi bugünde devam etmektedir.

Vücut zırhları olarak en çok çeliklerden yapıp kullanılmaktaydı. Ancak teknolojinin gelişmesiyle beraber zırhlarında gelişimi hızlanmıştır ve farklı arayışlara girilmiştir. Son yıllarda çelik yerine seramik malzeme kullanılarak vücut zırhlarının üretilip geliştirilmesi üzerine çalışmalara başlanılmıştır. 1.Dünya Savaşında çelik zırhlar kullanılmış, savaştan sonra çelik üstüne kaplama yapılarak mermiye karşı direnç arttırılmıştır. Fakat bu şekilde kullanılan zırhların ağırlığı daha da artmış, kullanım zorlukları ortaya çıkmıştır. Bu sayede seramikler, en önemli avantajı hafif malzeme olması ile son zamanlarda gelişen teknoloji sayesinde zırh malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır(Kaufmann et al. 2003).

Seramikleri son zamanlarda farklı dallarda farklı çalışmalarda araştırma konusu olarak görmekteyiz. Tekstil, endüstri, Savunma sanayi bu dalların başında gelmektedir. Seramik malzemesi rulman ve piston malzemesi olarak da kullanımı yaygınlaşmıştır. Ayrıca kesici uç olarak kullanılmaktadır. Seramiklerin araç kaplama olarak kullanımı yaygınlaşmıştır ve bu kaplama araçlara çizilmeye ve hasara karşı koruma sağlamaktadır. Özellikle savunma sanayinde seramiklerin araştırılıp geliştirilmesine çok zaman harcanmaktadır. Seramiklerden araç ve vücut zırhı yapılması ve geliştirilmesi yaygınlaşıp geliştirilmektedir.

Seramikten vücut zırhı üretiminin çelik vücut zırhına göre çok fazla avantajı bulunmaktadır. Seramik vücut zırhlarının en büyük avantajı, çelik vücut zırhlarına oranla çok hafif olmasıdır. Zırh üretiminde birden fazla farklı seramikten vücut zırhı üretimi

mümkündür. Seramik zırh üretiminde yaygın olarak Alümina (Al_2O_3), Silisyum Karbür (SiC) ve Bor karbür (B_4C) seramik türleri kullanılmaktadır (Akdoğan and Türkbaş 2016).

Zırh üretiminde seramikler arasında en çok Alümina tercih edilmektedir. Seramiklerin avantajları arasında yüksek basınç dayanımı ve sertliklerinin yüksek olması seramik malzemeleri zırh malzemeleri olarak kabul ettirmiştir. Seramik malzemelerin mermiyi parçalama ve hızını düşürmesi istendiği için malzemelerin elastik modülünün ve sertliğinin yüksek olması istenmektedir(Silva et al. 2014).

Seramiklerin yüksek sertliği ile kırılma tokluğu arasında zıtlık bulunmaktadır. Seramiğin sertliği zırh delici merminin ucunun körelmesini sağlar (Krishnan et al. 2010).

İleri teknoloji seramiklerinin daha yüksek enerji sönümleme kabiliyeti olması ve Alümina seramiğinin maliyet olarak diğer seramikler arasında daha düşük olmasından dolayı en çok tercih edilen seramik zırh malzemesi olmaktadır. Enerji sönümleme özelliği, seramik zırhlarında daha değerli olduğu görülüp zırh malzemesi olarak popülaritesinin artmasını sağlamıştır. Seramik zırhların balistik testleri sırasında yapılan gözlemlerden biri de seramik katmanın kalınlığının arttırılması ile zırhın dayanıklılığının artırıldığı ve merminin köreldiği gözlemlenmiştir(Woodward et al. 1994).

Seramik zırhlar başka malzemeler ile katman oluşturup kullanılırsa daha iyi sonuç elde edildiği gözlemlenmiştir. Seramik zırhlara katman olarak farklı malzemelerle desteklendiği görülmüştür. Bu malzemelerden bazıları Tungsten Karbür(WC)(Pach et al. 2017), çok yüksek moleküllü polietilen(W. Liu et al. 2016),ön katman olarak çift fazlı çelik(Übeyli et al. 2011),ara katman olarak hem fique kumaş hem de hizalanmış lifler kullanmışlardır(Pereira et al. 2019), kompozit metal köpükler kullanılarak da seramiği güçlendirmişlerdir(Garcia-Avila, Portanova, and Rabiei 2014). Kullanılan bu farklı malzemelerdeki katmanlar ile üretilen zırhların tek başına seramik kullanılan zırhlara göre daha iyi sonuç elde ettikleri gözlemlenmiştir. Katmanlı zırhların daha yüksek enerji sönümleme özelliği ile seramiğin tek kullanılmaması gerektiği düşünülmüştür. Ara katman olarak kullanılan malzemelerin de hafif olması sayesinde kullanacak asker, polis gibi güvenlik görevlisi için kolaylık sağlamaktadır. Seramik zırhların yapıştırılması için kullanılan malzemelerinde zırhların balistik testlerinde pozitif yönde katkılarının olduğu gözlemlenmiştir.

Zırhın özellikleri kadar merminin zırha temas ediş şekli de önemlidir. Araştırmalara göre eğik çarpan mermideki mermi erezyonunun daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Merminin zırha çarpma sırasındaki açısının artması zırhın balistik performansının olumlu yönde etkilediğı gözlemlenmiştir(Shokrieh and Javadpour 2008)(Marx, Portanova, and Rabiei 2019).

Seramiklerde saflık, seramiğin içindeki katkıların minimum düzeyde olmasıdır. Bu yüzden saflık arttıkça balistik performans iyileşir.

İleri teknoloji seramiklerin geometrik şekilleri zırh uygulamalarında oldukça stratejik öneme sahiptir. Seramikler, enerji sönümleme özelliklerinden dolayı ön katmanda tercih edilir ve yüzeylerinin dış bükey olmasında büyük yarar vardır. Böylece merminin enerjisini daha kısa sürede absorbe edip, mermi ucunun körelmesine sebebiyet verir (Akdoğan and Türkbaş 2016).

Zırh uygulamaların ileri teknoloji seramiklerin sinterleme sıcaklıkları çok yüksek olduğunda üretimde zorluk çıkarmaktadır. 1500 °C ve üstü iyi bir sinterleme sıcaklığı olarak görülmüş, daha düşük sıcaklıklarda performansın düştüğü gözlemlenmiştir (Çinaz 2012),

Seramiklerin hafif olmasının yanı sıra sertlik, mukavemet değerlerinin yüksek olması, aşınmaya karşı dirençli, yüksek ısıya karşı dayanıklı olmaları çeliklere göre daha fazla avantaj sahibi yapmıştır. Balistik açısından çok tercih edilmesinin bir önemli nedeni ise ileri teknoloji seramiklerinin mermi kinetik enerjisinin büyük bir kısmını absorbe etmesidir. İleri teknoloji seramiklerin tümüne bakıldığında bu özelliklerin hepsiyle karşılaşırız. Ayrıca zırhlı sistemlerde seramiklerin balistik performansını etkileyen çok fazla faktör vardır. Seramiklerin kalınlıkları, saflık oranları, sinterleme sıcaklıkları, tozların tane boyutları, geometrik şekilleri, seramiklere eklenen katkıları, seramiklerin içindeki yağlayıcı ve bağlayıcıların bulunup bulunmaması gibi örnekler verilebilir.

Literatüre bakıldığında; Medvedovski(Medvedovski 2010), çalışmasında tasarlanan seramik zırhları özetlemiş ve farklı seramiklerin balistik özelliklerinin sonuçlarını incelemiştir. Balistik testlerini zırh delici 7.62x 51 mm Nato mühimmatı ile gerçekleştirmiştir. Seramiklerde karbür seramikler, heterojen seramik malzemeleri ve homojen oksit bulundurmuş, kullanmış olduğu bu ileri teknoloji seramiklerinden mermiye

dayanıklı zırh elde edileceğini görmüştür. Balistik testlerini zırh delici 7.62x 51 mm Nato mühimmatı ile gerçekleştirmiştir.

Übeyli ve arkadaşları(Übeyli et al. 2011), lamine kompozitin alümina ve çift fazlı çelik ile destekleyip 7.62mm zırh delici mermiler kullanılarak balistik performansı incelemişlerdir. Sonuçlarda alümina katmanlı çift fazlı çeliğin balistik koruma seviyesine arttırdığı gözlemlenmiştir. Katman kalınlığı arttıkça seramik zırhın enerji sönümleme yeteneğinin daha da geliştiği anlaşılmıştır.

İleri teknoloji seramik zırhları eğer zırh sisteminde ön katman olarak kullanılırsa, seramik zırhın sahip olduğu yüksek sertlik özelliğinden dolayı merminin kinetik enerjisini sönümleyip mermiyi köreltebilmektedir. Celal Evci ve Müfit Gülgeç çalışmalarında, alümina seramiğinin mermi ile temasını sırasında oluşan plastik deformasyona uğrayıp merminin körelmesi incelemişlerdir. Seramiklerin yüksek sertlik özelliğinden dolayı, seramik katman ile temas eden merminin köreldiği gözlenmiştir ve seramik zırh katmanının merminin kinetik enerjisini absorbe ettiği görülmüştür.(Evcı and Gülgeç 2014).

İleri teknoloji seramiklerinde, zırhta kullanacak olan seramiğin saflığı da çok önemlidir. Bununla ilgili literatürde de araştırmalar yapılmıştır. Yapılan bir araştırmada, saflığın yükselmesi mukavemet, elektrik ve aşınma direncinde artışın görüldüğünü göstermektedir(Öztürk 2007).

M.V.Silva ve arkadaşları çalışmasında, ağırlıkça %92, %96, %99 alüminyum oksitten oluşan plakalardan elde edilen mukavemet değerlerini karşılaştırdığında ise en iyi ve en yüksek mukavemet değerlerinin %99 da olduğunu görmüştür. Saflığın arttıkça mukavemet değerlerine olumlu etkisi gözlemlenmiştir.(Silva et al. 2014).

Zırhlarda seramiklerin kalınlıkları da balistik performansı olumlu açıdan etkilemektedir. Kalınlık arttıkça merminin yüzeye temas süresi artacağından merminin enerji sönümlemesi daha fazla gerçekleşir ve mermideki körelme daha fazla olur. Baha Tepedüzü ve Ramazan Karakuzu çalışmasında, seramik balistik zırhlar oluşturup bunları farklı kalınlıklarda hazırlamışlardır. Seramiklere balistik test uyguladıklarında, kalınlığı daha fazla olan seramik zırhın mermiyi daha fazla körelttiği, seramik yüzeyindeki hasarın daha az olduğunu gözlemlemişlerdir(Tepeduzu and Karakuzu 2019).

Monteiro ve arkadaşları, $Al_2O_3-Nb_2O_5$ seramik katmanlı zırhına balistik test uygulamıştır. Konveks yapıdaki yani dışbükey seramik zırha, 7.62mm zırh delici mermi ile balistik test

uygulanmıştır. Elde edilen verilere göre seramik katmanın mermideki yüksek darbe enerjisini dağıttığı ortaya çıkmıştır(Monteiro et al. 2016).

Alümina ve diğer seramik tozlarının birleşmesi gerçekleşirken boşlukların en az seviyede olması mukavemet açısından oldukça önemlidir. Presleme işleminden sonra hemen yapılacak fırınlama işlemi ile preslemede oluşan boşlukların kaybolmasına sebep olacaktır. Bu işlemde seramik plakaların mukavemet özelliğini daha da yukarı seviyelere çekerek daha iyi balistik sonuç ve koruma yeteneği sağlamaktadır. Seramiklerin sinterleme sıcaklıkları oldukça yüksektir. Alümina seramiğine baktığımızda yaklaşık 1500 ile 1600 °C arasında sinterlenmelidir. Yapılan bir çalışmada; ağırlıkça %2 MgO ve %2 TiO₂ katkılı alüminalar 1300 ve 1400 °C de sinterlenmiş fakat istenilen sonuçlar elde edilememiştir ancak aynı katkılı alümina plakaları 1500 °C de sinterlendiğinde daha iyi sonuçların ortaya çıktığı gözlenmiştir(Çinaz 2012).

Balistik anlamda zırhların incelenmesinde, ön katmanın şekli merminin enerjisini değiştirmektedir. Zırhlarda ileri teknoloji seramikleri iyi enerji absorbe edebildikleri için ön katmanda tercih edilir. Ön katman olarak yapılan seramik plakaların düz değil de konkav, yani dış bükey olmaları her zaman daha avantajlıdır. Yapılan araştırmalarda halen en ideal zırh şekline ulaşamamıştır fakat araştırmalar gittikçe yaklaşıldığını göstermektedir. M.A.Akdoğan ve O.S.Türkbaş yapmış oldukları çalışmada; konkav geometrili ve düz geometrili iki alümina zırha, zırh delici merminle balistik test uygulamışlardır. Konkav seramik zırhın hasar dağılımı daha küçük olduğu, konkav seramik zırhın, düz yüzeyli seramik zırha göre zırh delici merminin kinetik enerjisini daha iyi absorbe ettiği ve daha kısa zamanda daha fazla enerji sönümlendiği görülmüştür(Akdoğan and Türkbaş 2016).

Zırh sistemleri, zaman geçtikçe araştırmalar sonucu tek bir malzeme ile değil de sandviç denilen çoklu malzemelerle imal edildiğinde balistik olarak çok daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.(Feli and Asgari 2011) Kompozit malzemelerle oluşan zırhlı sistemlerin balistik sonuçları araştırıldığında zırhlarda oldukça iyileşme söz konusu olmuştur. Kompozit malzemeler; iki ya da daha fazla, farklı veya aynı gruptaki malzemelerin birbiri içinde çözünmeyip farklı özellikler ortaya çıkararak bir araya gelmiş yapılardır.(Aboudi, Arnold, and Bednarczyk 2013)

2.1 Mühendislik Alanındaki Önemli Bazı İleri Teknoloji Seramikleri

Mühendislik alanlarında kullanılan birçok ileri teknoloji seramiği vardır. Zırh uygulamalarında, elektrik alanında, endüstri alanında farklı ileri teknoloji seramikleri tercih edilmektedir. Onların bazıları listelenmiştir.

2.1.1 Alüminyum Oksit (Alümina) (Al_2O_3)

Alüminyum oksit yaygın adıyla alümina, oksit esaslı seramik türüne girmektedir. Alüminanın keşfi geçtiğimiz yüzyıla dayansa da, üretimine 1907 yılında başlanmıştır ancak yaygınlaşması 1930'ları bulmuştur. Oksit seramikler içinde kimyasal ve ısı kararlılığı, yüksek sertliği, düşük yoğunluğu ve ekonomik olarak daha uygunluğu alüminayı daha çok tercih edilen ileri teknoloji seramiği yapmıştır.

Alüminalar, boksit cevherinde Bayer prosesi yöntemiyle üretilir ve yaklaşık %92'si alüminyum metali üretiminde kullanılır. Geriye kalan kısım ise kalsine alümina ve özel alümina kimyasalları için kullanılmaktadır(Güldoğan 2014).

2.1.2 Bor Karbür (B_4C)

Bor karbür, karbür seramikleri türüne girer. Yüksek ergime sıcaklığı, yüksek sertlik, düşük yoğunluk, korozyona ve ısıya karşı dayanım, aşınma direnci gibi üstün özelliklere sahiptir (B.R.Jones, A.R.Prunier 2002). Bu özellikleri sayesinde çok sık tercih edilmektedir.

Kimyasal yapısı kararlı olduğundan yüksek nötron absorbe edebilme kabiliyetine sahiptir. Bor karbür oldukça sert olduğundan ve elmaştan daha ekonomik olduğu için parlatici ve aşındırıcı olarak da kullanılmaktadır. Bor karbürün oldukça fazla avantajının yanında gevrek kırılmaya karşı hassasiyeti bor karbüre dezavantaj sağlamaktadır. Düşük kırılma tokluğuna sahip malzeme üretilmesindeki sinterleme koşullarını sağlamak zordur. Tablo 2.1'de bor karbür tozunun genel özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 2.1: Bor karbür tozunun genel özellikleri(Ergün 2006)

Özellik	Birim	Değer
Yoğunluk	g/cm^3	2.52
Sertlik	Kgf/mm^2	2900-3580
Kristal Yapı		Rombohedral
Ergime Sıcaklığı	$^{\circ}C$	2450
Isıl Genleşme	$^{\circ}C$	5×10^{-6}

Elektrik İletkenliği	$\Omega^{-1}m^{-1}$	140
----------------------	---------------------	-----

Bor karbür; aşındırıcı olarak, kesim için kullanılan su jetlerindeki çeşitli nozullar ve zırh malzemesi olarak kullanımı görülmektedir(Thévenot 1990).

2.1.3 Alüminyum Nitrür (AlN)

Alüminyum nitrür, yüksek ısı iletkenlik ve yüksek elektrik direncine sahip olduğundan yüksek güç elektronik modülleri için ana malzeme olarak kullanımı görülmektedir.

Alüminyum nitrür, alüminyumun doğrudan nitrülenmesi ya da alüminanın indirgenip daha sonra nitrülenmesi ile üretilmektedir.(Ünal 2007)

2.1.4 Silisyum Karbür (SiC)

Silisyum karbür de bor karbür gibi karbür seramikleri türlerindendir. Yüksek aşınma direnci, düşük ısı iletkenlik katsayısı, ısı iletkenlik ve yüksek sertlik gibi avantajlı özelliklere sahiptir. Tablo 2.2’de silisyum karbürün tipik özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 2.2: Silisyum karbürün tipik özellikleri (Ergün 2006)

ÖZELLİKLER	DEĞERLER
Yoğunluk, gr/cm ³	3.1-3.22
Silisyum karbür, %	97.8
Karbon içeriği, %	0.2-0.8
Renk	Siyah
Eğme mukavemeti, MPa: oda sıcaklığında 800 °C’de	400-140 400-410
Sertlik, kg/mm ² , Vickers	3100

Silisyum karbür; uzay teknolojisinde, kimyasal endüstride, havacılık sektörü gibi birçok mühendislik alanlarında kullanılmaktadır.

2.1.5 Magnezya (MgO)

Magnezyum oksit seramiklerinin genel özellikleri:

- 1) Yüksek termal kararlılık

- 2) Erimiş metaller (demir, çelik, alüminyum), cüruf ve yarı iletken bileşiklere yüksek direnç
- 3) Yüksek sıcaklıklarda bile iyi korozyon dayanımı
- 4) Elektriksel yalıtkanlık
- 5) İyi termal iletkenlik
- 6) Kızılötesi şeffaflık
- 7) Yüksek erime sıcaklığı (2800°C) (Dağaşan Bulucu 2020)

2.1.6 Zirkonya (ZrO₂)

Zirkonyum seramiğinin genel özellikleri;

1. Çok yüksek eğilme dayanımı ve sertlik,
2. Yüksek maksimum hizmet sıcaklığı 2400 °C,
3. Yüksek kırılma tokluğu,
4. Yüksek yoğunluk ($6.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$),
5. Düşük ısı iletkenliği- alümina seramiğin % 10' u kadar,
6. Dökme demir benzeri termal genleşme katsayısı,
7. Çelik benzeri elastiklik modülü,
8. Yüksek kimyasal direnç,
9. Erimiş metallere yüksek direnç,
10. İyi aşınma direnci,
11. Düşük sürtünme katsayısı,
12. Oksijen iyon iletkenliği (oksijen sensörleri ve yüksek sıcaklık yakıt hücreleri için kullanılır). (Dağaşan Bulucu 2020)

Kesici araçlar, motor parçaları, oksijen sensörleri, yüksek sıcaklık ısıtıcılar, elektrikli fırınlar, yataklar (örneğin, dalgıç pompaları için rulmanlar) gibi alanlarda kullanıldığı görülmektedir. (Dağaşan Bulucu 2020)

2.2 Seramiklerin Özellikleri ve Çeşitleri

Seramikler, bir veya birden fazla metalin, metal olmayan elementlerle bileşik oluşturması ortaya çıkan bileşiklerdir. Kimyasal yapısında kuvvetli olan kovalent veya iyonik bağlar

bulundurduğu için korozyona ve ısıya karşı dayanıklıdır. Geleneksel seramikler ve ileri teknoloji seramikleri olarak ikiye ayrılır(Akkurt 2019). Geleneksel seramikler; yalıtım malzemeleri, kilden gereçler, fayans, karo ve porselenler, çimento malzemeleri, camlardır. Geleneksel seramiklere bakıldığında günlük hayatımızda sık sık kullandığımız ve artık gereksinim olmuş malzemelerdir. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte seramiklerin özellikleri iyileştirilmiş ve ileri teknoloji seramikleri ortaya çıkmıştır. Bu malzemelere “mühendislik seramikleri”, “teknik seramikler”, “ince seramikler” ve “süper seramikler” denildiği de görülmektedir.

İleri teknoloji seramiklerin üstün özelliklerinden dolayı tercih edilme oranı günden güne artmaktadır ve bu şekilde sıralanabilir;

1. Pahalı ve stratejik metallere ihtiyaç göstermemesi,
2. Kimyasal kararlılığın yüksek olması,
3. Oksitlenmeye karşı dirençlerinin yüksek olması,
4. Basma kuvvetlerinin yüksek olması,
5. Hammadde kaynağının bol ve genellikle metallere kıyasla ucuz olması,
6. Yüksek sıcaklıklara dayanıklılık,
7. Erozyon ve aşınmaya karşı dayanıklı olmaları,
8. Çok sert olabilmeleri,
9. Metallerden hafif olmaları (%40 a varan hafiflik)(Reed 1995)

Bu üstün özelliklerin yanı sıra ileri teknolojik seramiklerinde birtakım dezavantajları vardır. Bunların en önemlisi kırılma olmalarıdır. Kırılma olmalarının nedeni ise yapılarında meydana gelen gözeneklerin olması ve katlanmalardan dolayıdır.

Seramikler metal ve ametal (metal olmayan) elementlerin birbirlerine birinci derece iyonik veya kovalent bağıyla bağlandığı inorganik, metal dışı malzemelerdir. Kimyasal bileşimi, basit bileşiklerden karmaşık fazlara kadar geniş bir aralıkta değişir. Bileşimlerinde doğada bol olarak bulunan metal oksitleri, silikatlar, karbürler, nitrürler, borürler, camlar vb. bulunur. Bu nedenle kristal yapıları çok karmaşıktır. Amorf yapılar ya da amorf/kristalin karma yapılar da ortaya çıkabilir. Malzeme özellikleri bağ yapıları ile ilgilidir. Genel olarak, düşük tokluk ve süneklikte, sert ve kırılma eğilimindedirler. İletim elektronları içermediğinden, elektrik ve ısıyı iyi yalıtlarlar. Atomik bağ yapıları nedeniyle kimyasal olarak kararlıdır ve ergime sıcaklıkları yüksektir. Bu özellikleri nedeniyle kullanımları birçok halde vazgeçilmez olur (Übeyli et al. 2011). Genel olarak metal ve polimerlere göre

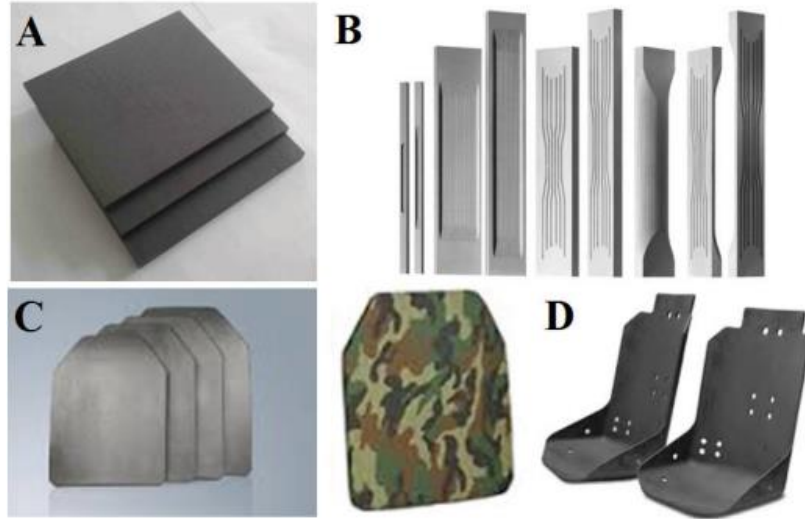
daha iyi mekanik özelliklere sahip olan seramiklerin diğer malzemelerle karşılaştırılması Tablo 2.3’ de verilmiştir.

Tablo 2.3: Seramiklerin özelliklerinin diğer malzemelerle karşılaştırılması (İlgar 2008)

	SERAMİK	METAL	POLİMER
Yoğunluk	↓	↑	↓↓↓
Elastisite Modülü	↑↑↑	↑	↓
Yüksek Sıcaklık Dayanımı	↑	↓	↓↓↓
Sertlik	↑↑↑	↓	↓↓↓
Termal Genleşme	↓	↑	↑
Yumuşama	↓	↑	↑
Korozyon Dayanımı	↑	↓	↓
Aşınma Dayanımı	↑	↓	↓
Elektriksel İletkenlik	↓	↑	↓
Termal İletkenlik	↓	↑	↓

İleri teknoloji seramikler, yapısal seramikler ve fonksiyonel seramikler olarak kendi içinde ikiye ayrılır. Yapısal seramikler; ısıl dayanım, sertlik, yüksek elastisite modülü, yoğunluk gibi özelliklerin tercih edildiği uygulamalarda kullanılır. Bu seramikler; Al_2O_3 , ZrO_3 , Si_3N_4 , SiC , B_4C , TiC , TiB_2 , TiN , AlN , gibi seramiklerdir (İnan 2005).

İleri teknoloji seramiklerin gittikçe kullanım alanları artmaktadır. Sertlik ve aşındırıcı özelliklerinden dolayı kesici uç malzemesi, tekstil alanında sentetik iplik kılavuzlarında, rulman malzemesi olarak, otomobillerde turbo yükleyici ve araç koruma kaplamalarında sık sık kullanıldığını görmekteyiz. Son zamanlarda ise yine yüksek sertlik ve hafif olma özelliğinden balistik vücut zırhları ve zırhlı araç uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır.



Şekil 2.1: İleri seramik malzemelere örnekler(Turan and Yücel 2016).

Fonksiyonel seramiklerse, elektriksel ve ısı yalıtkanlık, iletkenlik gibi malzemelerin elektronik özelliklerinin tercih edildiği uygulamalarda kullanılır. Bu seramikler; statik ve dinamik basınçların ölçülmesinde, fiber optik malzemesi olarak, otomobillerde yakıt yanma oranının ayarlanmasında kullanılmaktadır. Kuvars(SiO_2), Baryum titanat(BaTiO_3) bu seramikler türüne girmektedir(İnan 2005).

2.3 Alümina Seramiklerinin Şekillendirilmesi Yöntemleri

Uygun sıkıştırma yöntemi seçilip kullanılarak tozların seçilen yöntemle sıkıştırılıp, karar verilen veya tasarlanan ürüne uygun şekilde belirli mukavemet kazandırarak üretim tekniğine şekillendirme denir(Palacı 2001).

Seramik şekillendirme işlemine bakıldığında ise birden fazla metot olduğu görülmekte ve bu metotların seçilme sürecinde; seramiğin cinsi, kullanım amacı, toz boyutu veya tanecik boyutu, fiziksel özellikleri gibi etkenler oldukça etkilidir. İleri teknoloji seramiklerin geleneksel seramiklere göre şekillendirilmesi daha farklı ve zor olmaktadır.

İleri teknoloji seramiklerinde kil olmadığı için su yerine yağlayıcı, bağlayıcı ve plastikleştirici kimyasal katkı maddeleri kullanılarak şekillendirilme yöntemleri uygulanmaktadır. Geleneksel seramiklere göre şekillendirilmesinin en önemli farkı bu sebepten ötürüdür(Palacı 2001).

Kullanılan yağlayıcı, bağlayıcı ve plastikleştirici maddeler olarak;

- a) Bağlayıcılar, seramik tozlarının birbirine tutunmasını, bağlanmasını sağlar. Polivinil alkol, cam suyu, su, fenolik reçine, inorganikler bazı bağlayıcılardır.

- b) Plastikleştiriciler, kıvamlaştırıcılığı arttırarak şekillenmeyi kolaylaştırır. Polietilen glikol plastikleştiricilerdendir.
- c) Yağlayıcılar, seramik toz ve kalıp arasında yağlayıcı olur ve bu sayede seramiğin kalıptan kolay ayrılmasını sağlar. Alüminyum streat, talk, kil bazı yağlayıcılardandır.
- d) Deflokülanlar, çekmeyi azaltır.
- e) Sürfaktanlar, yüzey geriliminin ve topaklanmanın azalmasını sağlar. : Parafin örnek verilebilir(İlgar 2008).

Seramiklerin şekillendirilme işlemi sonrasında uygulanan ve takip edilen süreçler vardır. Bunlardan ilki toz hazırlama olup, seramik toz üretim yöntemlerinin kimyasal yöntemle üretilen tozların içine gerekli yağlayıcısı, bağlayıcısı ve/veya plastikleştiricisi katılarak tozlar üretim ve şekillendirilme için hazır hale getirilir. İkinci aşamada tozlar şekillendirilmek üzere seçilen herhangi bir şekillendirilme yöntemiyle istenilen şekle ve mukavemete bürünür. Daha sonra şekillendirilme işlemi bitiminde seramiklerin daha fazla mukavemetlenip, sertleşmesi için sinterleme uygulanır. İsteğe bağlı ön sinterlenme işlemi de uygulanabilmektedir.

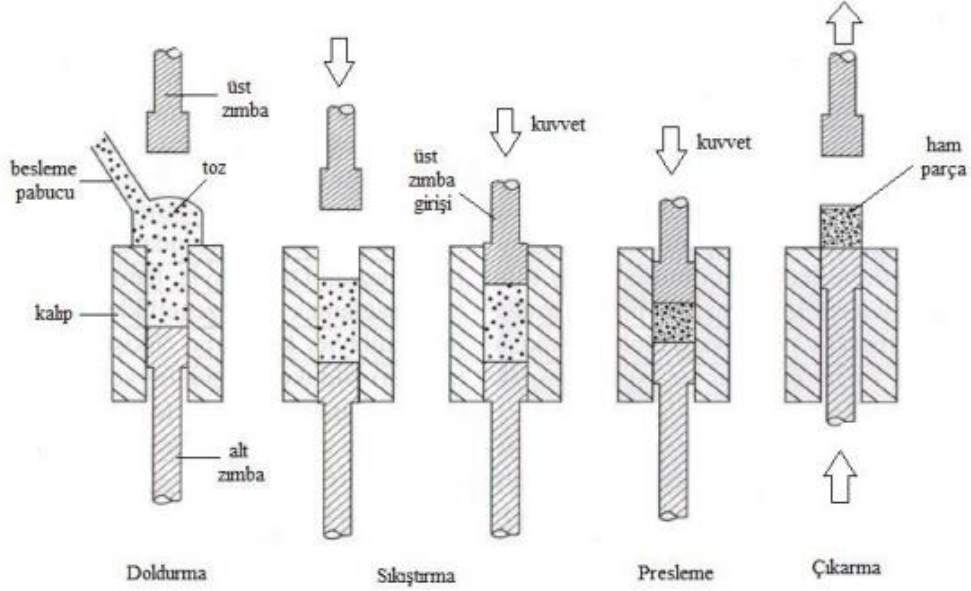
Seramiklerde şekillendirme esnasında malzeme içindeki yoğunlaşan gerilmelerde meydana gelen çatlaklar kırılma yaşanabilir. Bu olayın yaşanmaması için seramiklerde uygun bir şekillendirilme yöntemi seçmek çok önemlidir. Böylece şekillendirilecek olan ileri teknoloji seramiğin boyutu, fiziksel yapısı, kullanım amacıyla birlikte bir optimizasyon gerçekleştirip şekillendirme yöntemi seçmek en sağlıklıdır(Palacı 2001).

Günümüzde kullanılan seramik şekillendirme yöntemleri arasında; presle şekillendirilme yöntemleri, döküm yöntemiyle şekillendirilme, ekstrüzyon ile şekillendirilme, enjeksiyon kalıplama ile şekillendirilme gibi yöntemler yer almaktadır.

2.3.1 Presleme Yöntemiyle Şekillendirilme

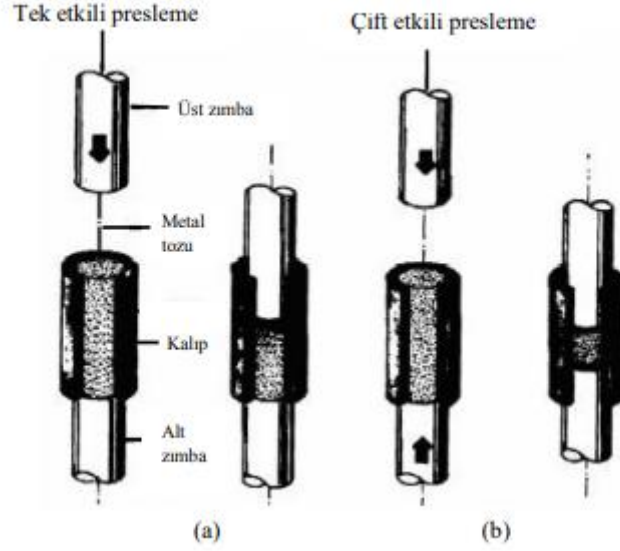
Presleme işleminde uygulanan basınç oranına göre tozların yoğunluğu ayarlanabilmekte, yapılan kalıplar sayesinde istenilen şekillerin seri bir şekilde üretimi mümkündür. Bu işlemde öncelikle hidrolik preslere dişi ve erkek kalıpları tasarlandıktan sonra, tozların kalıba yerleşimi sonrası, hidrolik sayesinde uygulanan basınçla birlikte tozların şekillendirilmesi sağlanmış olur. Bu işlem; tek hareketli, çift hareketli, çift yönlü dalgalanma ve üç eksenli olmak üzere dört sınıfa ayrılabilir.

Tek hareketli işlemde, tatbik yönü tek taraflı olup alt piston ve kalıplar sabit durumdadır. Bu yüzden oluşan numune içinde gerilmeler meydana gelebilir ve yoğunluk homojenliği minimum seviyesindedir. Bu yönteminin bu dezavantajından dolayı karmaşık ve zor şekilli parçaların üretimi için kullanımı çok tercih edilmemekle birlikte tek tatbikli presin görseli şekil 2.2’de gösterilmiştir(Palacı 2001).



Şekil 2.2: Tek hareketli presleme yöntemiyle üretim aşamaları(Ondokuz Mayıs Üniversitesi n.d.)

Çift hareketli preslemede; tek yönlü hareketliden farkı alt pistonun da hareketi sayesinde hem üst hem alttan aynı anda tatbik uygulanır. Böylece tek hareketli preslemeye göre daha homojen yoğunluklu yapı elde edilebilir(Palacı 2001).



Şekil 2.3: Tek yönlü ve çift yönlü presleme işleminin farkı(Vural n.d.)

a)Tek etkili presleme

b)Çift etkili presleme

Çift yönlü dalgalanma yönteminde, basınç tatbiği üst piston yoluyla iletilirken alt piston sabit durumdadır. Kalıp yüzeyinin toz haneleriyle olan teması sonucu sürtünmenin fazla olması halinde kalıp tozlarla birlikte aşağı yönlü bir hareketine başlar. Böylece alt piston yukarı yönlü basınç tatbiğinde bulunmuş duruma gelir. Alt pistonun hareketi sonucu kalıp, kalıp boşluğuna gelmiş olur.

Üç eksenel yöntemde, elde edilen parça üzerinde çevresel ve eksensel gerilmeler oluşur. Bu gerilmeler, ayrı ayrı kontrol edilebilmektedir. Bu yöntemde eksensel ve çevresel gerilmeler arasındaki fark, parçanın üstünde kayma gerilmelerine neden olmaktadır. Genel olarak bu yöntem kuru izostatik preslemeye benzemektedir. Bu yöntemle şekillendirme yapılan tozların mukavemet ve yoğunluk değerleri diğer yöntemlerle şekillendirilen toz numunelere göre çok daha yüksek çıkarak bu yöntemin avantajını oluşturmaktadır.

Çok hareketli şekillendirme yönteminde, çok elemanlı piston hareketleri sayesinde tek yönlü şekillendirmede yapılamayacak karmaşık ve zor şekillerin yapımında kullanılması mümkündür. Fakat bu yöntemde kalıpta yapılacak olan işlem, istenilen yoğunluğu vermeyebilir. Bu nedenle genellikle sıcak presleme uygulanır. Böylece ek bir sinterleme işlemine ihtiyaç duyulduğundan ekonomik açıdan kullanımı zorlaşmıştır(Palacı 2001).

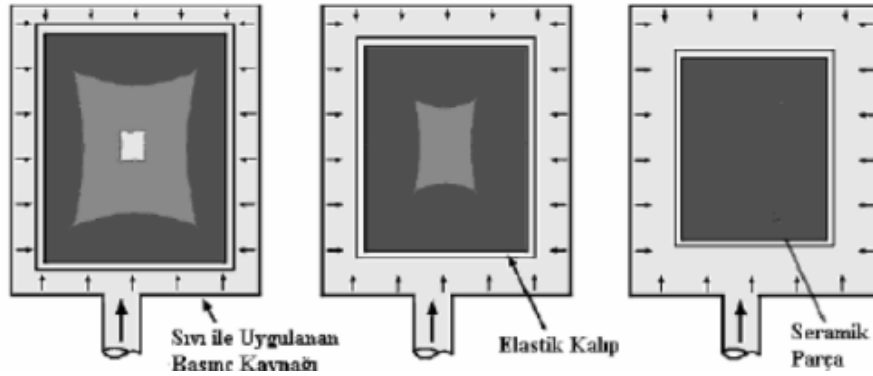
2.3.1.1 Soğuk İzostatik Presleme(CIP)

Bu yöntem, kalıplardaki toz kütlelerine yüksek sıvı basıncı uygulanarak birleştirme tekniğidir. Kullanılan bu basınçlar 480 MPa civarı olsa da 1380 MPa gibi çok yüksek basınçlarda da yapılabilmektedir. Sıvı olarak genellikle su veya yağ tercih edilmektedir. Bu yöntemle üretilen ürünler oyuklar, uzun ve karmaşık yapılar üretilebilir. Yüksek yoğunluklu malzemeler elde edimi için uygundur(Palacı 2001).

Soğuk izostatik yöntemi ıslak ve kuru olmak üzere ikiye ayrılır. Kuru preslemede elastomerik kalıp basınç kabına sabitlenmiş, ıslak presleme ise kalıp basınç kabından çıkarılabilir olduğu durumdur.

Sürtünmenin olmaması durumu söz konusudur ve böylece malzeme içerisinde kalıcı gerilme yoktur. Basıncın tüm yönlerde eşit olmasından dolayı da malzemenin yoğunluk homojenliği maksimum seviyelerinde görülmektedir.

Kuru presleme işlemine göre bazı avantajlar; çok daha yüksek yaş yoğunluk eldesi gerçekleştirilebilir, düşük sıkıştırılma faktörü neticesinde yüksek yoğunluk eldesi, bağlayıcı olarak kullanılan kimyasallara gerek kalmadan sadece yağlayıcılar ile istenilen form elde edilebilirliği sayılabilir.



Şekil 2.4: Soğuk izostatik presleme yöntemiyle şekillendirme(İlgar 2008)

2.3.1.2 Sıcak İzostatik Presleme(HIP)

Sıcak izostatik yöntemine bakıldığında soğuk izostatik yönteminin çalışma prensibiyle aynı şekilde çalışır fakat sıcak izostatik yönteminde yüksek sıcaklık ve basınç ortamı kullanılmaktadır. Basınç ortamında azot veya argon gazı kullanılmaktadır. Uygulanan

basınçlar genellikle 100 MPa ve 300 MPa arasında değişmekle birlikte yüksek sıcaklığın etkisiyle tozların birbirine kaynama ihtimali yükselir ve böylece bu kaynaşmanın fazlalığını arttırmak amacıyla uygulanan kuvvetlerin miktarı düşürülebilir. Böylece oluşan numunelerin daha az kuvvet uygulanarak daha iyi mukavemetli ve boşluk oranının daha az olması sağlanabilmektedir.

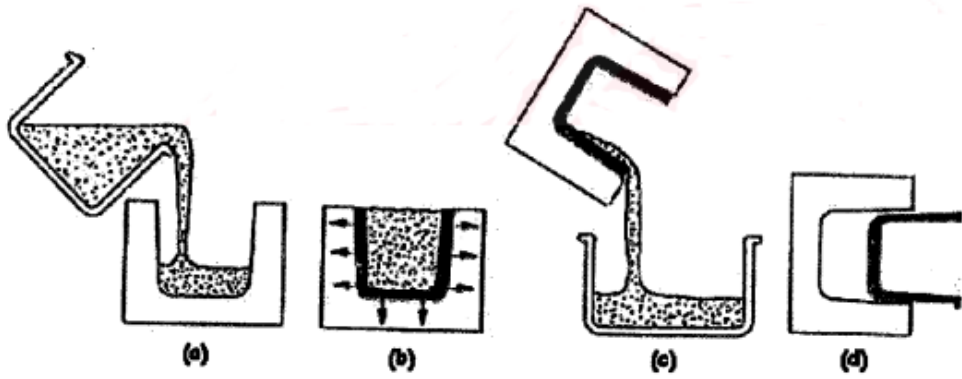
2.3.2 Yaş Şekillendirme(Slip Döküm)

Bu yöntemde toz malzemeler, işlem için uygun olan bir taşıyıcı sıvı içerisinde asıntı haline getirilir, asıntının emici özelliği sayesinde kalıp içerisine dökümüyle birlikte istenilen şekilde numunenin üretimi gerçekleşmiş olur. Bu işlemlerle, asıntıdaki taşıyıcı sıvı kalıpta var olan kılcal gözenekler yardımıyla emilir ve istenilen şekilde toz paketi oluşmuş olur. Bu işlem sonrası oluşan parça kalıptan çıkarılıp kurutulup pişirildikten sonra kullanıma uygun istenen nihai ürün ortaya çıkmış olur.

Bu yöntemin kullanımının önceden plastikleşen (kil,vb.) gibi malzemelerken günümüzde plastikleşmeyen saf oksit ve alüminaların şekillendirilmesinde kullanılmaktadır. Mukavemeti yüksek ürünlerin eldesi, karmaşık ürünlerin eldesi gerçekleşirken maliyetinin yüksek ve uygulamanın gerçekleşmesi için zor birkaç aşamadan geçerek yavaşlamayı sağlaması dezavantajlarındandır. Aynı zamanda ürün boyutunda %25-30 oranında küçülme gözlemlenmesi, son nihai ürünün boyutundaki toleranslandırmayı fazlaştırmaktadır.

Bu döküm metotlarında bazıları şu şekilde sıralanabilir; dondurma döküm, basınçlı döküm, santrifüj döküm, ultrasonik döküm ve şerit döküm.

Slip döküm yöntemiyle elde edilen ürünler arasında sağlık sektöründe kullanılan malzemeler, ileri teknoloji seramikleri, vazo kase, özel refrakterler gibi zor ve karmaşık şekilli malzemeler görülmektedir(Palacı 2001).



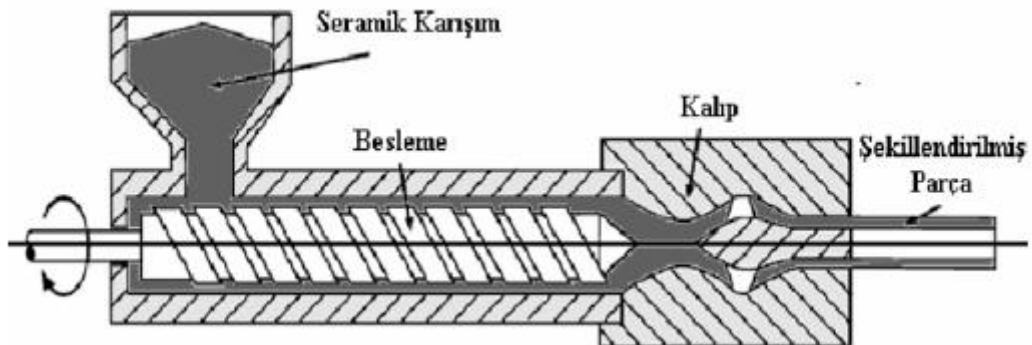
Şekil 2.5: Slip döküm yöntemiyle şekillendirme(Palacı 2001)

2.3.3 Ekstrüzyon ile Şekillendirme

Ekstrüzyon, uzun çubuk görünümlü seramiklerin şekillendirilmesinde kullanılan en eski yöntemlerden biridir. Bu yöntemin maliyetinin düşük olması sayesinde tercih edilebilirliğinin fazla olmasıyla birlikte günümüzde gelişimi sağlanıp değişmiştir.

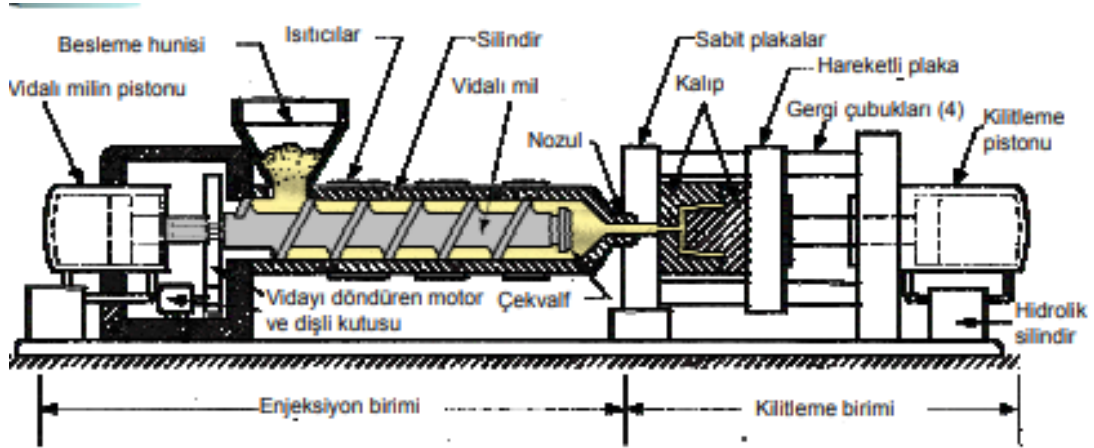
Ekstrüzyon, seramik tozları ve içine isteğe bağlı katkılarından oluşan yüksek viskoziteli plastik karışımının şekillendirilme prosesine dayanmaktadır. Bu proste seramik çamur silindire beslenir ve döner bir burguyla istenilen nihai şekil oluşumu için özel tasarlanan delikten dışarı atılır. Böylece istenilen özellikte şekil çıkmış olur. Sürekli üretim için uygundur.

Ekstrüzyon yöntemiyle son zamanlarda tuğla, izalatör, fırın tüpleri, kapasitör boruları, termokupi koruyucu tüpler, elektronik altlıklar üretilmektedir.



Şekil 2.6: Ekstrüzyon ile şekillendirme yöntemi(Ilgar 2008)

2.3.4 Enjeksiyon Kalıplama ile Şekillendirme



Şekil 2.7: Enjeksiyon ile şekillendirme yöntemi (İlgar 2008)

Enjeksiyon, bu proseste tane boyutu çok küçük tozlar kullanılır ve toza bağlayıcı eklenip karıştırılır. Aşınma direnci yüksek nozullar, ateşleme sistemlerindeki izolasyon parçaları, elektrostatik toz boya sistemlerinde kullanılan seramikler bu yöntemle üretilmektedir. Enjeksiyon ile şekil vermede karmaşık şekilli, farklı boyuttaki seramiklerin seri üretimi mümkündür. Elde edilen ürünlerin boyut hassasiyeti iyidir (İlgar 2008) (Ünal 2007).

Enjeksiyon kalıplama ile şekillendirme yöntemi en yeni şekillendirme yöntemlerinde biridir. Maliyetin düşük olması ve karmaşık, zor şekilli parçaların üretiminde etkili rol oynaması bu yöntemi avantajlı haline getirmiştir. Bu yöntemin temel prensibi, plastik şekillendirme için plastik malzemenin eritilip önceden şekillendirilme yapılmış kalıp içerisine enjekte edilerek kalıpta soğumaya bırakılmasıdır.

Plastik malzemeler dışında ileri teknoloji seramiklerinden; alümina, zirkonyum, silisyum nitrür gibi seramikler, porselen, çelik, bakır gibi metal parçalarda enjeksiyon kalıplama yöntemiyle şekillendirilmektedir.

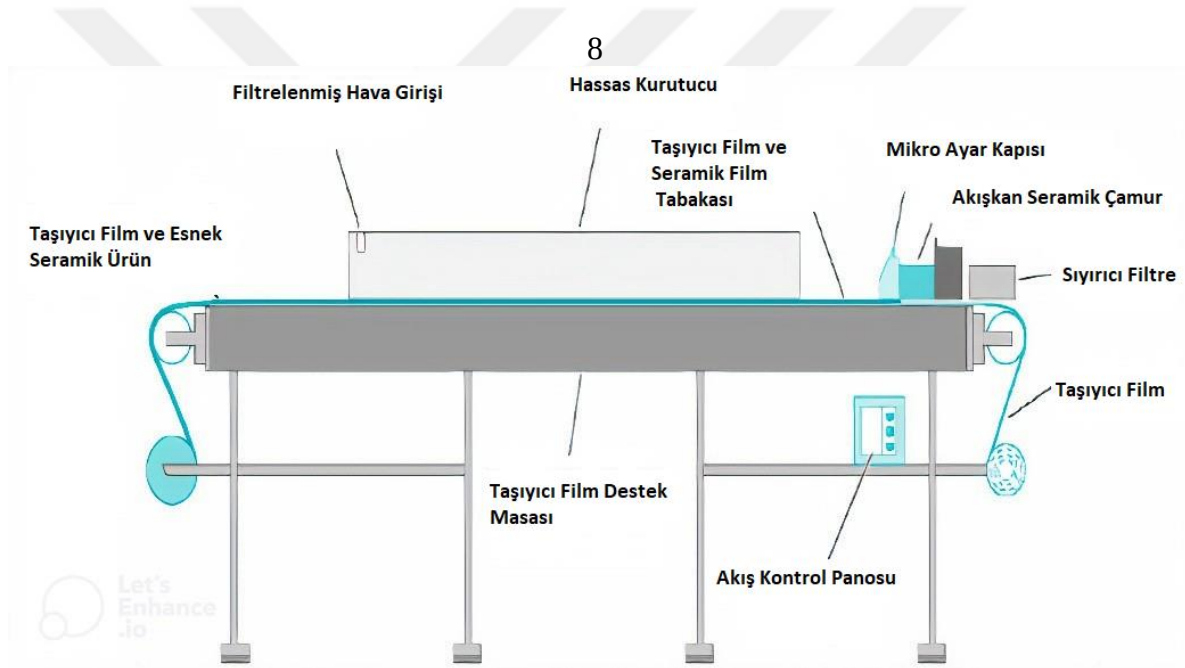
Tozların şekillendirilmesi işleminde enjeksiyon kalıplama yönteminde bazı safhalar vardır. Bunlar;

- Toz hazırlama ve bağlayıcı formülasyonu
- Karıştırma ve granülasyon
- Karışımı kaplama
- Bağlayıcı giderme
- Sinterleme (Palacı 2001)

2.3.5 Şerit Döküm ile Şekillendirme

Seramiklerin slip dökümü yöntemiyle şekillendirilmesi genellikle oda sıcaklığında yapılmaktadır. Bu işlem, sıvı halde bulunan seramik süspansiyonunun gözenekli bir kalıba dökülmesi ve sıvının kalıptan uzaklaştırılarak taneciklerin kalıp kenarlarında biriktirilmesi şeklinde gerçekleştirilmektedir.

Şerit döküm, bu yöntem inorganik seramik malzemenin sıvı içerisinde dağıldığı seramik çamurun hazırlanmasıyla başlar. Hazırlanan çamur, düz bir yüzeye yayılır ve solventin uçurularak uzaklaşması sağlanır, böylece seramik katılaşır. Bu yöntemle seramiğin sac haline dönüşmüş şekiller ortaya çıkar ince ve düzdür. Kullanılan ekipmanlar ise pahalı ve oldukça fazla yer kaplarlar(Ilgar 2008).



Şekil 2.8: Şerit döküm yöntemiyle şekillendirme(Ilgar 2008)

2.4 Balistik Test

Balistik bilimi, mermilerin veya füzelerin hareketlerini inceleyen bilim dalıdır. Balistik kelimesi Fransızca 'balistique' kelimesinden gelmektedir.

1800 yıllarda temeli atılan balistik bilimi, ilk başlarda basit prensiplerle sadece silahlara uygulanmıştır ancak teknoloji ve bilimin de gelişimi ile silah, mermi ve zırhı incelemektedir.

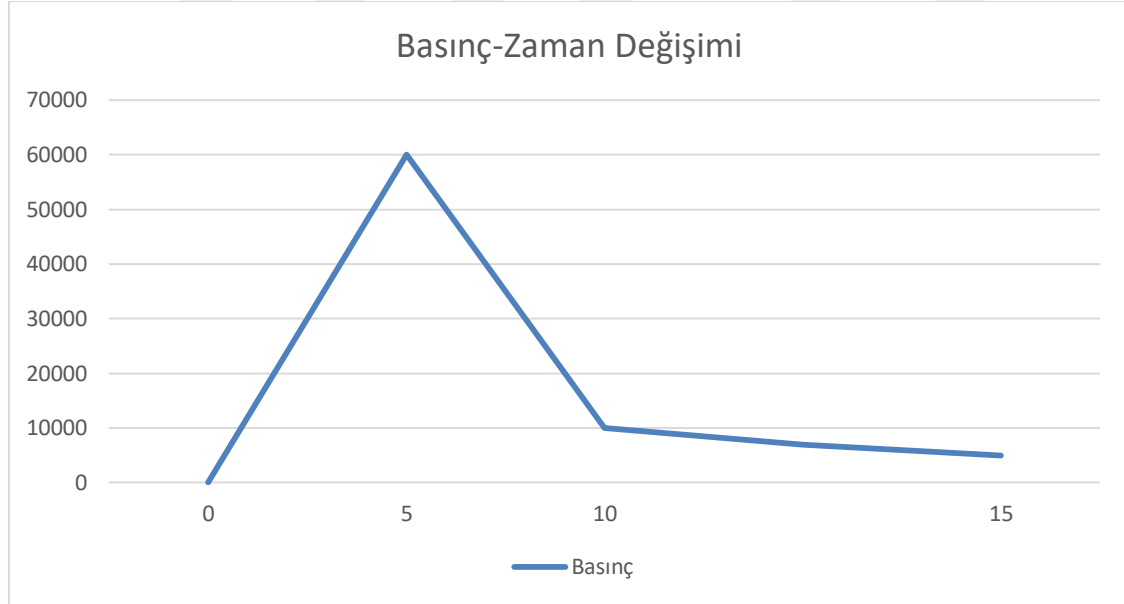
Balistik bilimi genel olarak merminin ateşleme anından itibaren havadaki hareketi ve çarptığı zırhtaki durumunu incelemektedir.

2.4.1 İç Balistik

İç balistik, namludan çıkan merminin kimyasal enerji kaynağını, silah içerisinde oluşan gazı ve ortaya çıkan enerjiyi ve hareketini gözlemektedir. Silahlar basın ve sıcaklık olarak çok yüksek değerlerde çalışmaktadır. Silah içerisindeki merminin hareketi, silah içerisindeki gazın mermi üzerindeki etkisi ile ilgilidir. Silah içerisindeki gaz çok yüksek sıcaklıklara ulaştığında namluda kimyasal reaksiyonlar gözlenebilmektedir(Özgültekin 2012).

İç balistik, silah ve mühimmat tasarımında ve mermi menzilin belirlenmesinde ve hedef üzerinde meydana getireceği tahribata yönelik çalışmalarından dolayı önemli bir yeri bulunmaktadır(Gezer and Engin 2016).

İç balistik kapsül, kapsülün ateşlenmesi, barutlar, yanma hızı, yivler, yiv sayıları ve dönüş dereceleri, fişek yatağı ve namlu boyutları, basınç ve mermi çekirdeği hızı ile ilgilenmektedir. Silahtan yapılan ateşleme sırasında kovanda oluşan sıcaklık yaklaşık olarak 2870°C 'ye kadar ulaşır ve mermi çekirdeğine 25 ton basınç uygulanmaktadır(Güngör 2021).



Şekil 2.9: Ateşleme yapıldıktan sonraki zamanla basınç değişimi.

Şekil 2.9'da silahtan ateşleme yapıldıktan sonra basıncın zamanla olan değişim ilişkisi gösterilmektedir. Silahtan ateşleme yapıldıktan sonra fişek yatağındaki mermi 60000 psi

maksimum basıncına ulaşmaktadır. Maksimum basınca çıkan mermi basıncı namlu ucuna kadar yaklaşık 15 saniye içinde 5000 psi düşmektedir.

Halil Işık çalışmasında, silahın içindeki iç balistiğini incelemek için namlu içerisinde oluşan yüksek basınç ile mermi hızı arasındaki bağıntı ile bir model oluşturup test etmiştir. Balistik test sırasında 7,62mm mermi kullanılıp testleri NATO standartlarına göre gerçekleştirmişlerdir. Yapılan testlerde mermi içinde kullanılan barut kütlesinin artması ile maksimum gaz basıncının arttığı yani barut kütlesi ile maksimum gaz basıncı arasında doğru orantı olduğu görülmüştür. Testlerden görülen bir diğer sonuçta ise barut kütlesinin artması maksimum mermi hızını azalttığı görülmüştür. Yani mermi hızı ile barut kütlesi arasında ters orantı olduğu gözlemlenmiştir. Namlu içerisinde bulunan gazların sıcaklığı ile namlu duvarı arasındaki sıcaklık arasında oluşan ısı taşınım katsayısını Noble-Abel denklemi ile hesaplamıştır(Işık 2016).

1860 yılında Andrew Noble doğru bir basınç ölçümleri alabilmek için mastarlar geliştirmiştir. Nobel-Abel denklemi basınç-yoğunluk arasındaki ilişkiyi ifade etmiştir ve namlu içerisindeki basıncın hesaplanmasında günümüzde halen kullanılmaktadır(Cranz 1926).

2.4.2 Dış Balistik

Dış balistik ilk örneği tarih öncesinde insanların taş fırlatmaları örnek olarak verilebilir. Dış balistik özellikle uzak mesafeden yapılan atışların, atıcının atış yaptığı yerin ve atışın nasıl yapıldığının anlaşılmasına yönelik çalışma alanıdır.

Tarih öncesindeki insanlar daha uzağa ve daha güçlü fırlatmak için sapan ve yaylar icat edilmiştir. Okun icat edilmesinde ve kurulmasında kullanılan yaya ‘ballista’ ismini kullanmışlardır. Ballista ismi Yunancada kullanılan fırlatma anlamındaki ‘ballein’ kelimesinden türemiştir(Güngör 2021).

Dış balistik, merminin namlu ağzından itibaren kazandığı hız, hava direnci ve yer çekimi etkilerini altındaki durumu incelemektedir. 1638 yılında Galileo yer çekiminin mermi üzerindeki etkisinin devamlı olarak olduğunu ve parabolik yörüngesini çizmeyi başarmıştır. Ancak Galileo’nun parabolik yörüngesinin çok uzun menzilli olmadığı ortaya çıkmıştır.

Isaac Newton sıvıların ve katı maddelerin hareketleri üzerine yaptığı çalışmalarda balistiği incelemiştir. Savaşlarda kullanılan top araçlarından ateşlenen ve yatayda hareket eden topların, mermilere yer çekiminin etkisini incelemiştir. Barut yanma hızının sürekli arttığını göstererek, namludan çıkmadan ve uçuşunu bitirinceye kadar olan hareketini hesaplamıştır(Gök 2006).

Leonhard Euler, Newton'un yaptığı çalışmalar üzerine yoğunlaşmıştır ve ilk analitik çalışmayı yapan bilim insanıdır. Top mermilerinin uçuş mesafelerini hesaplayabilmek için çeşitli mesafelerde çalışmalar gerçekleştirmiştir(Özer 2008).

Dış balistik, namludan çıkan çekirdeğin hedefe ilerlemesini sağlayan kinetik enerjiye sahiptir. Çekirdek ilerledikçe yer çekimi etkisi ile mermiyi aşağıya doğru çekmeye başlar ve hava direncinin de artması ile hızı azalmaya başlar(Çayiroğlu and Dizdar 2004).

2.4.3 Terminal Balistik

Terminal balistik, mermi ile hedef arasında oluşan etkileri incelemektedir. Terminal balistik; binalarda, tanklarda, zırhlı araçlar ve zırhlarda vb. meydana gelen darbeleri, kinetik enerjinin başka enerjilere dönüşümünü, oluşan kimyasal tepkimeleri ve patlayıcının etkisini araştıran bilim dalıdır. Balistik biliminin bir alt dalıdır.

Temel bilgilerin elde edilmesindeki zorluklardan dolayı terminal balistik, iç ve dış balistiğe göre geri durumdadır. Fakat teknolojinin de gelişimiyle terminal balistiğin gelişimi de hızlanmıştır.

Terminal balistik çalışmalarında, darbeye maruz kalan hedefteki plakanın sahip olduğu yaklaşık gerinim hızı $\dot{\epsilon}_p$ denklemi ile gösterilmektedir: (Cazamias and Bless 1997)

$$\dot{\epsilon}_p = \frac{v_p}{D_m}$$

Burada;

V_p : Merminin plakaya çarpma hızı,

D_m : Mermi Çapı,

Formülü ile hesaplanmaktadır.

Son yıllarda nükleer silahların yaygınlaşması ve ölümcül etkilerinin araştırılmaya başlanması ile terminal balistiğin gelişimi artmaktadır ve kapsama sınırı gelişmektedir.

Bomba, roket, harp başlığı, el bombası gibi silahlar kullanılarak, hedefi parçalama veya küçük parçalara ayırarak parçacıkların birbirinden farklı hareketleri sebebiyle fiziki tesire uğramaktadır(Özer 2008).

2.4.4 Orta Balistik

Orta balistik, iç balistik ile dış balistik arasındaki mermi sapmaları ile ilgilenmektedir. Merminin namludan çıktığı anda salınım hareketi yapar ve namlu ağzında gaz dinamiği ile karşılaşır. Mermi, yörüngesinden belli oranda sapma gerçekleştirir(Gök 2006).

2.4.5 Adli Balistik

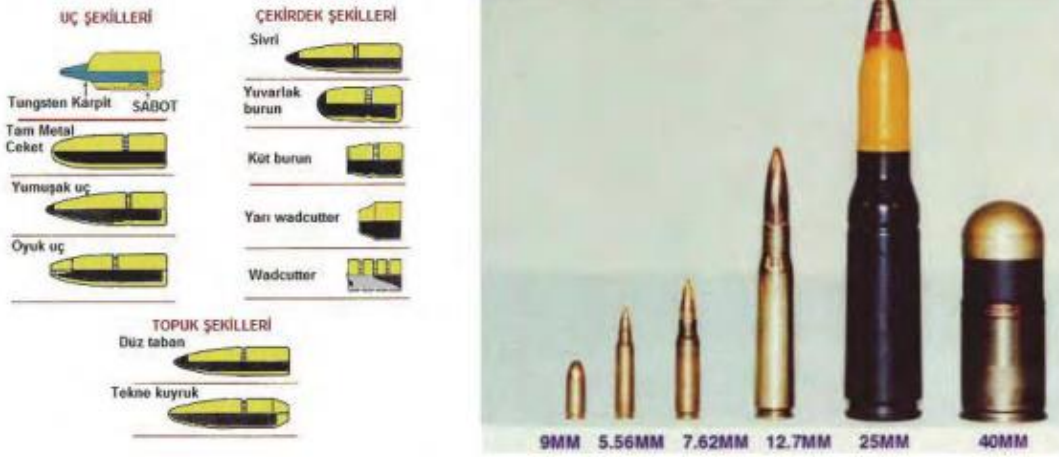
Adli balistik, ateşli silahlarda kullanılan mermi çekirdekleri ve kovanlarının inceleyerek hangi silahtan çıktığını tespit edip, diğer silahlardan ayrımını gerçekleştirmekle ilgilenir. Silahlardan çıkan mermilerin, saçmaların, barut kalıntılarından ve dağılış şekillerinden ateş mesafesini belirlemekle de uğraşmaktadır.

2.4.6 Yaralanma Balistiği

Yaralanma balistiği, silahtan çıkan çekirdek veya saçmaların insan ve hayvan vücudunda açtığı yaraları ile ilgilenmektedir. Yaralanma balistiği, terminal balistiğin bir parçasıdır.

2.5 Standartlara göre Kullanılan Mühimmat Tipleri ve Silahlar

Balistik testler, Dünyada zırhların balistik koruyuculuğunu test etmek amacıyla birçok yöntemi bulunan standartlara sahiptir. Her standartta, koruma seviyesine ve hazırlanan zırh plakasının kullanım yerine göre seviyeleri mevcuttur. Hazırlanan zırh plakaları; kullanım yerine göre, zırhları oluşturan malzemeye, dayanım gücüne, üretim metodu vb. kriterlere göre farklı koruma seviyelerinde olur. Koruma seviyesine göre farklı mühimmatlar ve mühimmatlara göre farklı silahlar kullanılmaktadır. Şekil 2.10' de farklı kalibre ve uç yapısına sahip mermiler gösterilmektedir. Gösterilen bu mermiler farklı silahlarda kullanılmaktadır.



Şekil 2.10: Mermilerin uç şekilleri ve farklı kalibrelere sahip mermi tipleri(Bozdoğan et al. 2015)

Balistik test standartlarından en yaygın olarak kabul edilen NIJ (The US National Institute Of justice) ve HOSDB (UK Home Office Scientific Development Branch) standartlarıdır. Bu standartlar dışında Türk Standartları Enstitüsü ve NATO standartları mevcuttur. Tablo 2.4’ de balistik koruyucu zırhlar için olan standartlar gösterilmektedir.

Tablo 2.4: Balistik koruyucu standartları

STANDART KISALTMASI	STANDART ADI
TS 11164	Balistik Koruyucu Vücut Zırhı
TS 13349	Askeri Zırhlar – V ₅₀ Balistik Hız Deneyi
MIL-A-46103 C	Light Weight, Ceramic Faced Composite Armor Procedure Requirements
MIL-B-44053 A	Fragmentation Protective Body Armor, Vest Ground Trops
MIL-STD-662 F	Balistic Test For Armor
NIJ-STD-0101.04	Balistic Resistance Of Personnel Body Armor
NIJ-STD-0101.06	Balistic Resistance Of Personnel Body Armor
NIJ-STD-0108.04	Balistic Resistance Of Protective Materials
STANAG 2920	Balistic Test Method For Personnel Armor
UK/SC/4697	The Balistic Testing Of Fragment Protective Personnel Armors
PPAA STD-1989-05	Personnel Protective Armor Assosiation Testing Standarts For Balistic Resistance Of Personnel Body Armors
UL 752	Balistic Resistance Equipment
MIL-P-46199	Aluminium Oxide Ceramic (For Use In Armor Composite)
Pr EN ISO 14876-2	Protective Clothing-Body Armor-Part-2: Bullet Resistance Requirements And Methods

Türk standartları Enstitüsünün standart olarak kabul ettiği TS 11164 ve TS 13349 standartları, ateşli silahlar için hazırlanan vücut zırhları için deneysel çalışmalar yapılabilmesi için balistik koruma deney yöntemlerini kapsamaktadır.

NIJ standartları yaygın olarak kullanılan standartların başında gelmekte olup standart içeriğinde, zırhların küçük kalibreli silahlara karşı balistik testleri için referans olarak alınmaktadır.

NIJ-STD-0101.04 ve NIJ-STD-0101.06 standartları en yaygın olarak kullanılan NIJ standartları olup, standartlarda hangi malzemenin hangi koruma seviyesi ile ve ne kadar koruma sağlayacağı hakkında bilgiler sunmaktadır. Tablo 2.5’de NIJ-STD-0101.04 standardı koruma seviyeleri ve kullanılan mühimmat hakkında bilgi vermektedir.

Tablo 2.5: NIJ-STD-0101.04 standardında belirtilen koruma seviyeleri(Reno et al. 2000)

KORUMA SEVİYESİ	MERMİ TİPİ	MERMİ AĞIRLIĞI(gr)	MERMİ HIZI (m/s)	MESAFE (m)
SEVİYE 1	.22, Kalibre Uzun tüfek Yuvarlak Uç Mermiler(LR LRN)	40	320	5
	380, ACP Tam Metal Kaplama Uç mermi (FMJ RN)	95	312	
SEVİYE 2A	9mm, Tam Metal Kaplama Uç mermi (FMJ RN)	124	332	5
	.40S&W, Tam Metal Kaplama Uç mermi (FMJ)	180	312	
SEVİYE 2	9mm, Tam Metal Kaplama Uç mermi (FMJ)	124	358	5
		158	427	

	RN) 357 Magnum, Metal Kaplı Yumuşak Uçlu Mermi(JSP)			
SEVİYE 3A	9mm, Tam Metal Kaplama Uç mermi (FMJ RN) 44 Magnum, Yarı Kaplamalı İçi Boş (Çukur) Mermi (SJHP)	124 240	427 427	5
SEVİYE 3	7.62mm, Tam Metal Kaplama Uç mermi (FMJ)	148	838	15
SEVİYE 4	.30 Kalibre Zırh Delici (AP) Mermi	166	869	15

NIJ-STD-0101.04 standardı 2000 yılında yayınlanmış olup sonrasında bazı bölümlerinde değişiklik yapılarak 2008 yılında NIJ-STD-0101.06 standardı olarak güncellenmiştir. NIJ-STD-0101.04 standardında numunelerin ısıya, neme, mekanik aşınmaya gibi parametrelere bakılmamaktaydı ancak NIJ-STD-0101.06 standardında bu parametreler test edilebilmektedir. Tablo 2.6’da NIJ-STD-0101.06 standardında belirtilen koruma seviyeleri gösterilmiştir.

Tablo 2.6: NIJ-STD-0101.06 standardında belirtilen koruma seviyeleri(NIJ Standard-0101.06 2008)

KORUMA SEVİYESİ	MERMİ TİPİ	MERMİ AĞIRLIĞI(gr)	MERMİ HIZI (m/s)	MESAFE (m)
SEVİYE 2A	9mm, Tam Metal Kaplama Uç mermi .40S&W, Tam Metal Kaplama Uç mermi (FMJ)	124 180	373± 9.1 352± 9.1	5

SEVİYE 2	9mm, Tam Metal Kaplama Uç mermi (FMJ RN) 357 Magnum, Metal Kaplı Yumuşak Uçlu Mermi(JSP)	124 158	398± 9.1 436± 9.1	5
SEVİYE 3A	.357 SIG, Tam Metal Kaplama Uç mermi (FMJ RN) 0.44 Magnum, Yarı Kaplmalı İçi Boş (Çukur) Mermi (SJHP)	125 240	448 ± 9.1 436± 9.1	5
SEVİYE 3	7.62mm, Tam Metal Kaplama Uç mermi (FMJ)	147	847± 9.1	15
SEVİYE 4	.30 Kalibre Zırh Delici (AP) Mermi	166	878± 9.1	15

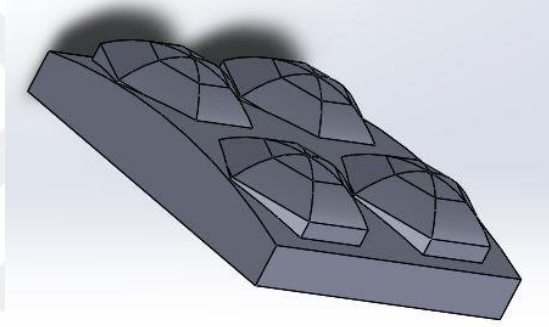
Tablo 2.6’ da gösterilen NIJ-STD-0101.06 standardı, 2008 yılında güncellendikten sonra koruma seviyeleri 5 gruba ayrılmıştır. NIJ-STD-0101.06 standardında her zırh plakası için 24 atış yapılması gerekmektedir.

3. MATERYAL VE METOT

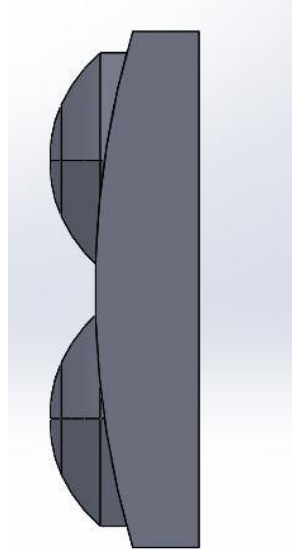
3.1 Kalıp Tasarımı ve Üretimi

Bu tez çalışmasında seramik alümina tozunun şekillendirilip zırh plakası elde edilmesi amaçlanmıştır. Seramik zırh numuneleri elde edildikten sonra balistik test uygulanıp zırh numunelerinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

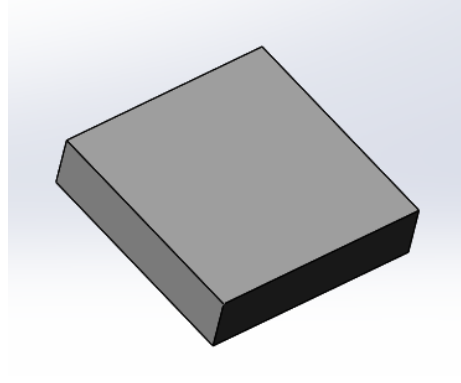
Çalışmanın ilk aşamasında alümina seramiklerin nasıl üretilceğine karar verilip sonrasında tasarımlarına başlanmıştır. Tasarımlar için karar verilen geometriler, bilgisayar ortamında 3 boyutlu olarak çizilmiştir. Karar verilen bu geometriler, altıgen konkav ve düz geometri olarak karar verilip tasarlanmıştır. Tasarlanan geometriler Solidworks programında çizilmiştir.



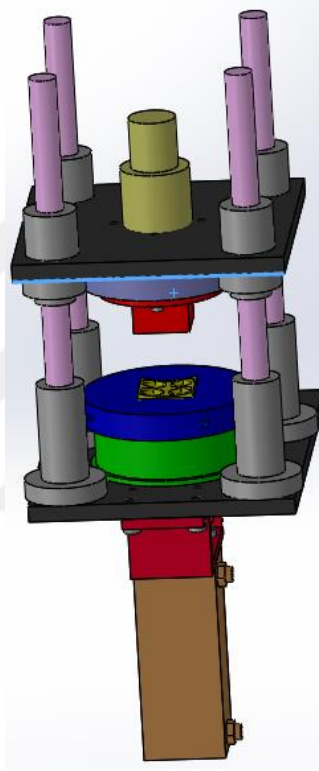
Şekil 3.1: Altıgen geometrili alümina numunenin perspektif görünüşü



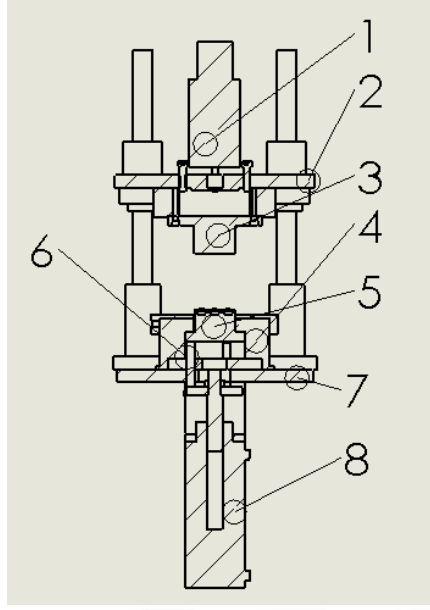
Şekil 3.2: Altıgen geometrinin yandan görünüşü



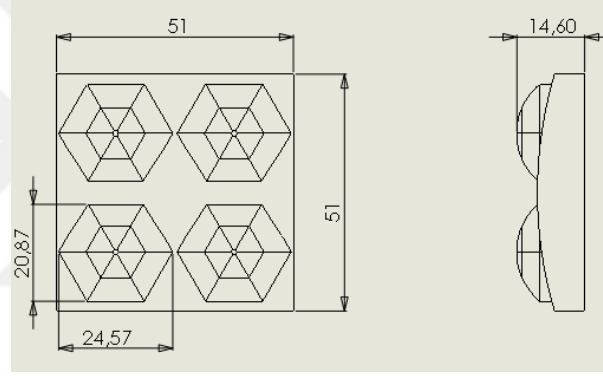
Şekil 3.3: Düz şekilli alümina numune



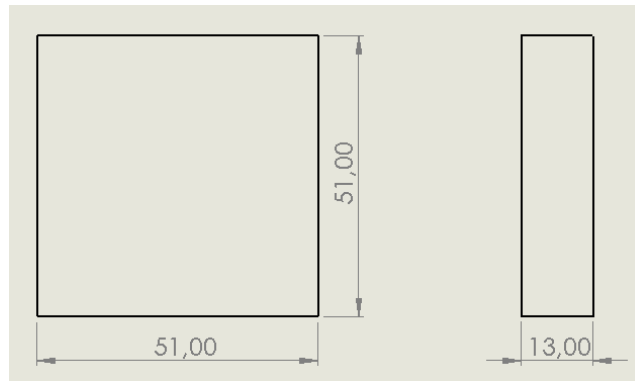
Şekil 3.4: Seramik numunelerin üretileceği pres kalıpları ve montajı



Şekil 3.5: Pres kalıbı montajının kesitinin detaylı görünümü



Şekil 3.6: Altıgen geometrili alümina seramiğin teknik resim görüntüsü



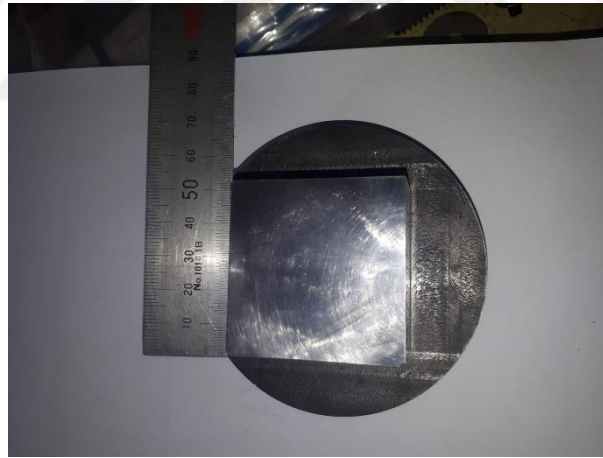
Şekil 3.7: Düz geometrili alümina seramiğin teknik resim görüntüsü

Tasarımları tamamlanan kalıpların üretimi için malzeme seçimi yapılmıştır. Kalıpların uzun kullanım ömrü olması gerektiği için kalıp malzemesi olarak 4140 ıslah çeliği tercih edildi. Kalıp malzemesi olarak seçilen 4140 çeliğinin seçilmesinin en önemli nedeni 4140

ıslah çeliği çok iyi su almaktadır. Su alma ezelliği ısıl işlem sırasından sertleşmesinin daha kolay ve daha iyi olmasını sağlamaktadır. 4140 ıslah çeliği temin edildikten sonra kalıpların etimi için CNC dik işleme tezgahına alınmıştır. şekil 3.1, şekil 3.2 ve şekil 3.3 cnc dik işleme tezgahında işlenmiştir. Montajlı hali bulunan şekil3.4’deki bazı parçalar unıversal ve cnc torna tezgahında işlenmiştir.



şekil 3.8: Altıgen kalıbın parlatma sonrasındaki görünüşü



şekil 3.9: Düz kalıbın parlatma sonrasındaki görünüşü

Alümina seramik plakalarının esas şeklini sağlayacak kalıplar cnc dik işleme tezgahından çıktıktan sonra, presleme sırasında yüzeyine tozların yapışmaması için macun yardımıyla parlatılmıştır. Yüzeyleri parlatılan kalıplar şekil 3.8 ve şekil3.9’da gösterilmiştir. Parlatma işlemi sayesinde preslenen tozlar hem yapışmıyor hem de kalıptan çıkarma işlemi daha kolay gerçekleşmiştir. Parlatma işlemi bittikten sonra parçalara ısıl işlem uygulanması için başka bir firmaya gönderilmiştir. Isıl işlem uygulanıp tekrardan gelen kalıplara, tekrardan parlatma işlemi uygulanıp presleme işlemine hazır hale gelmiştir. Kalıpların retim işlemi

sona erdikten sonra, montaj işlemi gerçekleştirilerek şekil 3.4'teki son halini aldı ve pres işlemine hazır hale gelmiştir.

Şekil 3.4' teki montajlı haline geldikten sonra kalıpların prese bağlanması için bağlantı aparatları yapılmıştır. Bağlantı aparatları yapıldıktan sonra hidrolik prese bağlanmıştır ve son bağlantısı gerçekleştirildikten sonra seramik tozunu şekillendirme işlemi için hazır hale gelmiştir.

Şekil 3.5'te prese bağlanan kalıp montajının kesit görüntüsü görülmektedir. Montaj halinde gösterilen şekilde 4 numaralı kalıp, sistemin dışı kalıbı olup tozların konulduğu yerdir. Tozlar bu hazneye doldurulduktan sonra, 1 numaralı parçanın hidrolik prese bağlanmasıyla aşağı doğru 2 numaralı üst plakayla birlikte ona bağlı olan 3 numaralı erkek kalıbı ittirir. Kalıbı ittirmesi ile 3 numaralı kalıp, numaraları dışı kalıba basınç uygulayarak tozların tozların sıkışmasını sağlar. Pres işlemi uygulandıktan sonra Bu şekilde bir basınç uygulama işleminden sonra pres yukarı doğru ittirilerek 2 numaralı plaka ve ona bağlı olan 3 numaralı erkek kalıp sıkışan tozların üstünden çekilir. 8 numarada gösterilen hidrolik pres sayesinde 6 numaradaki pimler yukarı doğru çıkarılarak 5 numaralı kalıpla birlikte seramik numuneler yukarı doğru çıkar. İkinci basım sırasında yukarı doğru kalkan 5 numaralı kalıp temizlendikten sonra aşağıya doğru itilerek tekrardan toz seramik ile doldurulur ve böylece tekrardan uygulanarak seramik tozlar şekillendirilmiş olur. 7 numaralı plaka sabittir ve ona bağlı olan 4 numaralı kalıp da sabittir.



Şekil 3.10: Kalıpların prese bağlanmış hali

3.2 Toz Seçimi

Seramik tozu olarak alüminanın seçilmesi öncelik olarak maliyettir. Alümina seramik tozu, diğer teknik seramik tozlarına göre maliyet açısından daha uygundur. Zırh çalışmalarında genellikle alümina veya bor karbür tercih edilmektedir. Bor karbür özellik açısından alümina tozundan daha iyi olsa da maliyet göz önüne alındığında alümina tozu tercih edilmektedir. Bu nedenle bu tez çalışmasında alümina teknik seramik tozu kullanılmıştır.

Alümina teknik seramiği seçimi gerçekleştikten sonra, alümina tozunun yoğunluğu ve içindeki maddelerle alakalı bir seçim gerçekleşmiştir. Seramik toz seçiminde en iyi sonuçları alabilmek için yüksek saflıkta toz seçimi yapılmalıdır bu yüzden %99,7 saflıkta toz seçimi gerçekleştirdik ve zırh üretiminde kullanılacağı için içerisinde yağlayıcı ve bağlayıcı olan toz seçiminde bulunulmuştur.

Seçtiğimiz seramik tozun tanecik boyutu $190\ \mu\text{m}$ 'dir.



Şekil 3.11: Alümina seramik tozu

Temin edilen tozun tane boyutu zırh üretimde önemli bir rolü vardır. Alüminada presleme ve pişme işlemlerinde iyi sonuçlar alabilmek için tanecik boyutlarının küçük olması gerekmektedir. Küçük tanecikler sayesinde tozlar, presleme ve fırınlama işlemlerinde birbirlerine daha iyi yapışır ve boşluklu yani gözenekli yap oluşmasını ne aza indirir. Böylece tanecik boyutu seçimini olabildiğince küçük boyutta seçim yapılmıştır.

Alümina tanecik boyutu ile alümina fiyatları ters orantılıdır. Yani alümina tozunun tanecik boyutu küçüldükçe fiyatında oldukça bir artış bulunmaktadır. Bu yüzden ekonomik açıdan

ve gözeneklilik açısından 190 µm tanecik boyutlu alümina seramiği uygun bulunup seçilmiştir.

3.3 Alümina Seramik Numunelerin Presle Şekillendirilmesi

Montajlama işlemi tamamlanan pres tezgahı, seramik toz kalıba doldurulduktan sonra hidrolik pres basım için çalıştırıldı. Seramik tozlara yaklaşık 150 bar basınç uygulanarak presleme işlemi uygulandı. İlk geometri için presleme işlemi uygulandıktan sonra, diğer geometrinin üretimi için kalıp değiştirilerek devam edildi. Altıgen geometrilili numuneler için kalıba basılan seramikler daha kolay çıkabilsin diye kalıp ayırıcı sürülüp, o şekilde preslendi. İki geometri içinde basım işlemi tamamlandıktan sonra yaş numuneler sinterlenmek için fırına hale getirilmiştir.

3.4 Alümina Seramik Numunelerin Sinterlenmesi

Seramiklerin sinterlenmesi ile teknolojik seramiklerin sinterlenmesi farklıdır. İleri teknoloji seramiklerin sinterlenme sıcaklığı en düşük 1250-1300°C olmalı iken, normal seramiklerin 1000-1200°C’de yapılmaktadır. İleri teknoloji seramiklerin böyle yüksek sıcaklıklarda sinterlenmesi de sinterleme maliyetini arttırmaktadır.

Sinterleme sıcaklığı ve sinterleme işleminin önemi zırh uygulamalarında oldukça önemlidir. İleri teknoloji seramiklerine yavaş şekilde ön ısıtma uygulanması gerekmektedir ve böylece daha iyi sonuç sağlamaktadır. Ön ısıtma işlemi ile içinde bulunan yağlayıcı ve bağlayıcılar seramik numunelerden uzaklaştırılmış olmaktadır.

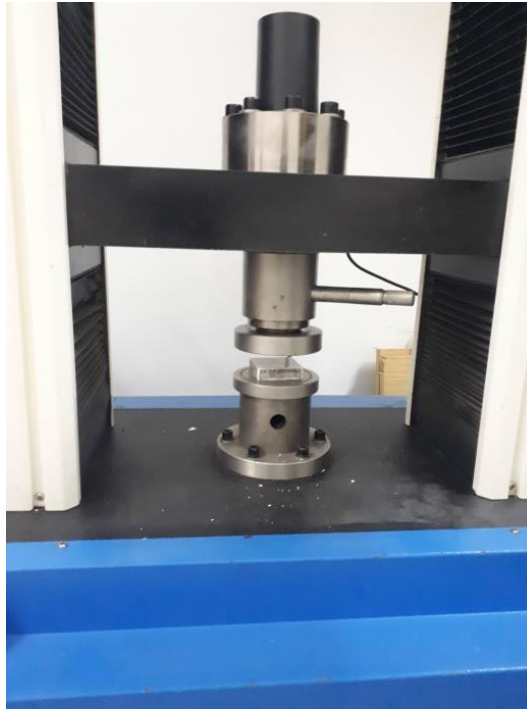
Çalışmamızda üretimini gerçekleştirdiğimiz yaş seramik numuneleri, şekil 3.10’da gösterilen sinterleme yapılacak fırına düzgün bir şekilde dizilip, yaklaşık 15 saat boyunca 1650°C’ye kadar sinterlenmiştir. Sinterlenme işlemi gerçekleştikten sonra numuneler oda sıcaklığına gelebilmesi için 1 gün boyunca bekletildi. 1 gün sonunda fırından çıkarılan numunelerde çatlak, kırık gibi durum olup olmadığı göz ile kontrol edilmiştir. Numunelerin kontrolleri gerçekleştirildikten sonra balistik testler için numuneler zırh hali getirilmek için hazır hale gelmiştir.



Şekil 3.12: Seramiklerin sinterlendiği fırın

3.5 Mekanik Testler

Sinterlenen numuneler, soğumaya bırakıldıktan sonra fırından alınarak numunelere mekanik testler uygulandı. Numuneler üzerinde vickers sertlik testi ve basma testi uygulanmıştır.



Şekil 3.13: Seramik numuneye basma testi uygulaması



Şekil 3.14: Seramik numuneye sertlik testi uygulanma anı

3.6 Sinterlenmiş ve Sinterlenmemiş Numuneye Tahribatsız Test

Seramik numunelerin sinterlenmiş ve sinterlenmemiş örneklerine, SEM görüntü cihazından görüntü alabilmek için kaplama yapılmıştır ve sonrasında kaplanan kalıplar SEM cihazına yerleştirildikten sonra görüntüler incelenmek üzere alınmıştır.

3.7 Alümina Seramiklerin Epoksi Yardımıyla Birleştirilmesi

Sinterleme işleminin ardından alümina seramik zırh numunelerin epoksi yardımı ile zırh oluşturmak için yapıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde, üretimi tamamlanıp sinterleme işlemi tamamlanan seramik numuneleri zırh çeliği plakaları ile yapıştırılmaktadır. Zırh çeliği plakaları 5mm kalınlığında ve 200x200 mm boyutlarındadır. Şekil 3.15 ve şekil 3.16’da gösterildiği gibi çelik plakalara 25 adet seramik numune epoksi yardımıyla yapıştırılmıştır. Zırh çeliği üzerine yapıştırılan seramikler kuruduktan sonra üzerine son katmanı olan zırh çeliği tekrardan yapıştırılmıştır. Yapıştırma işleminden sonra sandviç yapısında zırh elde edilmiş ve kuruması için 24 saat beklenmiştir. 2 farklı numune için aynı işlemler gerçekleştirilmiş olup, toplamda 2 adet farklı geometriden oluşan sandviç yapılı zırh elde edilmiştir. Kuruma işlemlerinden sonra seramik zırh numuneleri balistik test için hazır hale gelmiştir. Şekil 3.17’de balistik test için hazır olan numune gösterilmiştir.



Şekil 3.15: Farklı geometrilerdeki seramik numunelerin çelik zırh plakasına yapıştırılması



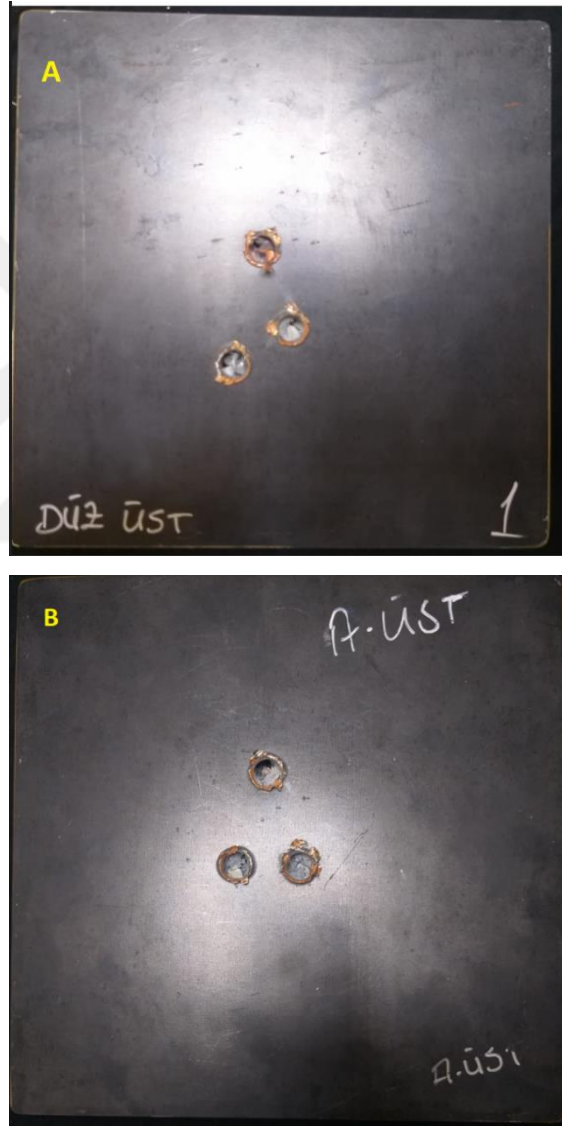
Şekil 3.16: Alümina seramik numunelerin tek çelik zırh plakasına yapıştırılmış hali



Şekil 3.17: Zırh numunenin birleştirildikten sonraki hali

3.8 Alümina Zırh Numunesine Balistik Test Uygulanması

Üretimi tamamlanıp sinterlenen seramik numuneler epoksi yardımıyla yapıştırıldıktan sonra, toplam kalınlığı 21mm olmuştur. 2 adet 5mm'lik zırh çeliği plakası ve 11 mm seramik numune kalınlıklarından oluşmaktadır. Balistik test için hazır olan numunelere 7.62x51mm mühimmat keskin nişancı tüfeği ile 25 metre mesafeden balistik test için atış yapılmıştır ve şekil 3.18'de görüldüğü gibi her numune için 3'er atış gerçekleştirilmiştir. Atış sonrası sonuçların değerlendirilmesi için zırh numuneleri incelemeye alınmıştır.



Şekil 3.18: Alümina zırh numunelerinin balistik test sonrasındaki görünüşü

- A) Düz geometrili alümina seramik plaka
- B) Altıgen geometrili alümina seramik plaka

4.BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında ,alümina seramiği kullanılarak şekillendirme işlemi uygulanıp, şekillendirme sonrasında balistik test gerçekleştirilip sonuçları incelenmiştir. Alümina seramik tozu tablo 4.1’de verilen özelliklerde temin edilmiştir.

Tablo 4.1: Alümina seramik tozunun özellikleri

	Toz Analizi(%)	Fiziksel Analiz
Al ₂ O ₃	99,7	
Na ₂ O(max)	0,1	
Granül Boyutu		190 µm

Tasarımı gerçekleştirilen seramik numunelerin, üretimi için kalıp tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kalıp tasarımı tamamlandıktan sonra cnc ve universal tezgahlarda kalıp çeliği olan 4140 ıslah çeliği ile kalıpların üretimine başlanmıştır. Kalıp üretimi 5 gün sürmüştür. Üretimi tamamlanan kalıplara sonrasında parlatma işlemi uygulanmıştır. Parlatma işleminden sonra ısıl işleme gönderilip sertleştirildi. Isıl işlemde 820-825°C’de su verme işlemi ile sertleştirme işlemi uygulanmıştır. Isıl işlem sonrasında gelen kalıplara tekrardan parlatma işlemi uygulanıp, montajlama işlemi için hazır hale gelmiştir. Montajlama işlemi yaklaşık olarak 2 gün sürmüştür. Montajlanan parçaların prese montajlanma işlemi de yaklaşık yarım gün zaman almıştır. Montajlama işlemi tamamlandıktan sonra seramik tozları hazneye yerleştirilerek 150 bar basınç ile presleme işlemine başlanılmıştır. İlk numune için üretim tamamlandıktan sonra diğer geometri için kalıp değiştirilip sonrasında tekrardan presleme işlemine devam edilmiştir. Tüm presleme işlemi yaklaşık 5 gün sürmüştür. Numunelerin üretimi tamamlandıktan sonra yaş olan alümina zırh numunelerin boyut ve yoğunluk özellikleri ölçülüp tablo 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.2: Preslenme sonrası seramik numune özellikleri

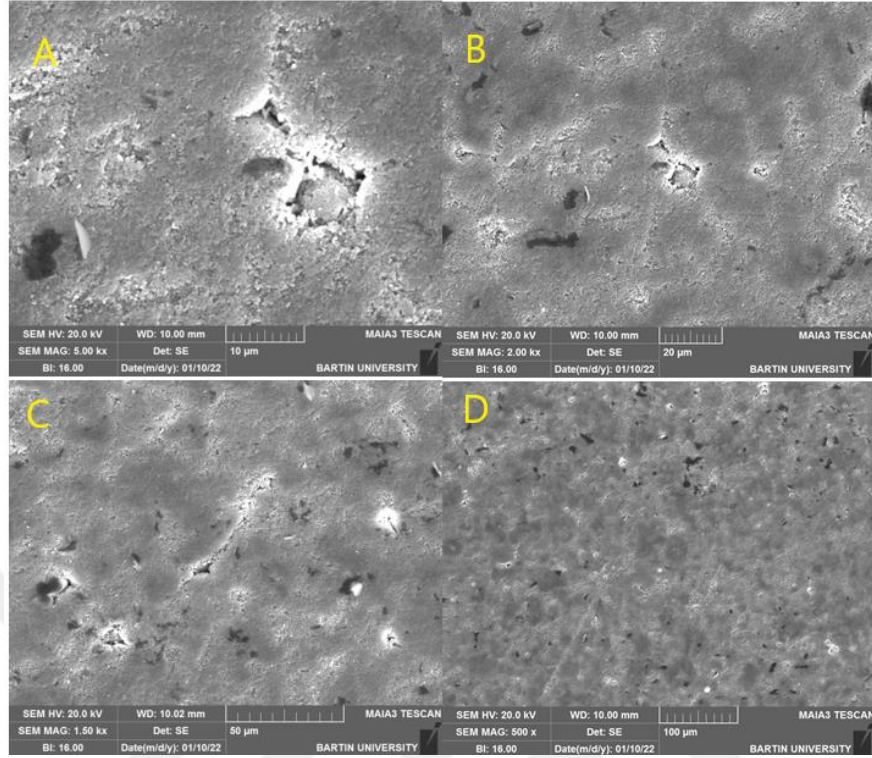
Pres Sonrası Numune	Birim	
Boyut	mm	51,2x51,2x13
Yaş Yoğunluk	g/cm ³	2,33



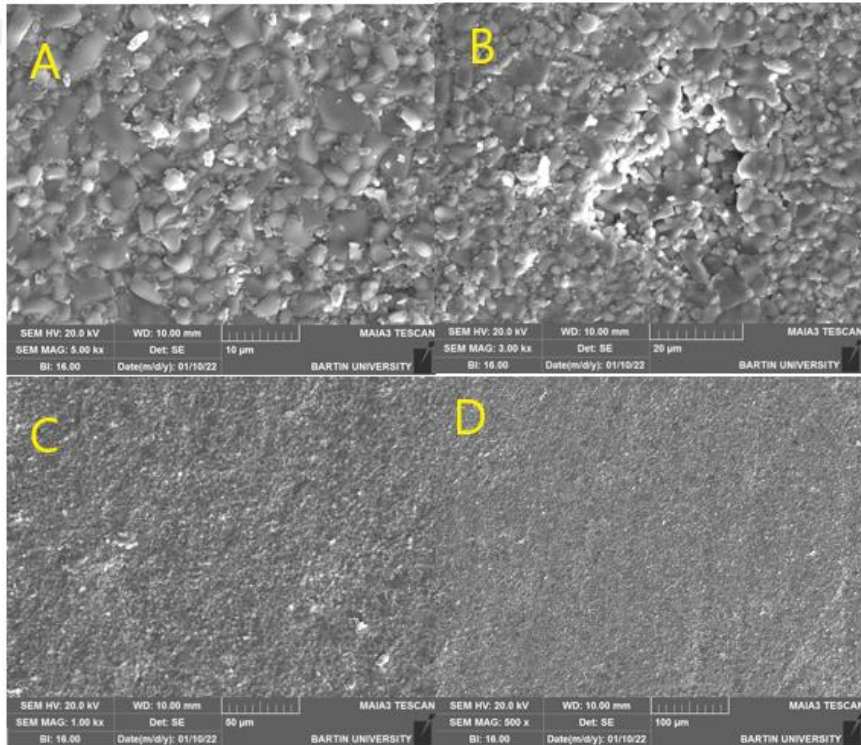
Şekil 4.1: Presleme sonrası düz şekilli alümina numune

Tozların presleme ile istenilen şekillere getirilen 2 farklı şekilli seramik numuneleri, mukavemetlenme ve sertleşme işlemlerinin oluşması için sinterlenmek üzere fırına yerleştirildi. Sinterlenme işlemi sırasında ilk 500°C 'ye kontrollü çıkması için $1\text{dk}/1^{\circ}\text{C}$ olacak şekilde çıkmıştır. Bu işlemin amacı seramik içindeki yağlayıcı ve bağlayıcı maddelerin uzaklaştırılmasını sağlamaktır. İlk 500°C 'yi atlattıktan sonra 1650°C 'ye kadar yaklaşık $1\text{dk}/5^{\circ}\text{C}$ olacak şekilde sıcaklık artışı gerçekleştirildi. 15 saat sonunda 1650°C 'ye gelen sıcaklık, bu sıcaklıkta 1 saat boyunca bekletildi. Daha sonra sinterlenen numuneler, fırının kapağı açılmadan oda sıcaklığında soğumaya bırakıldı. 2 günün sonunda fırının kapağı açılarak numunelere gözle muayene yapıp herhangi bir çatlak, kırık olup olmadığı kontrol edildi. Gözle muayenede herhangi bir çatlama, kırılma olmadığı görülen numunelere tahribatsız test olan SEM görüntü cihazında mikro yapı testi ve daha sonra tahribatlı testler olan basma ve sertlik testleri yapıldı.

4.1 SEM Görüntü Testi

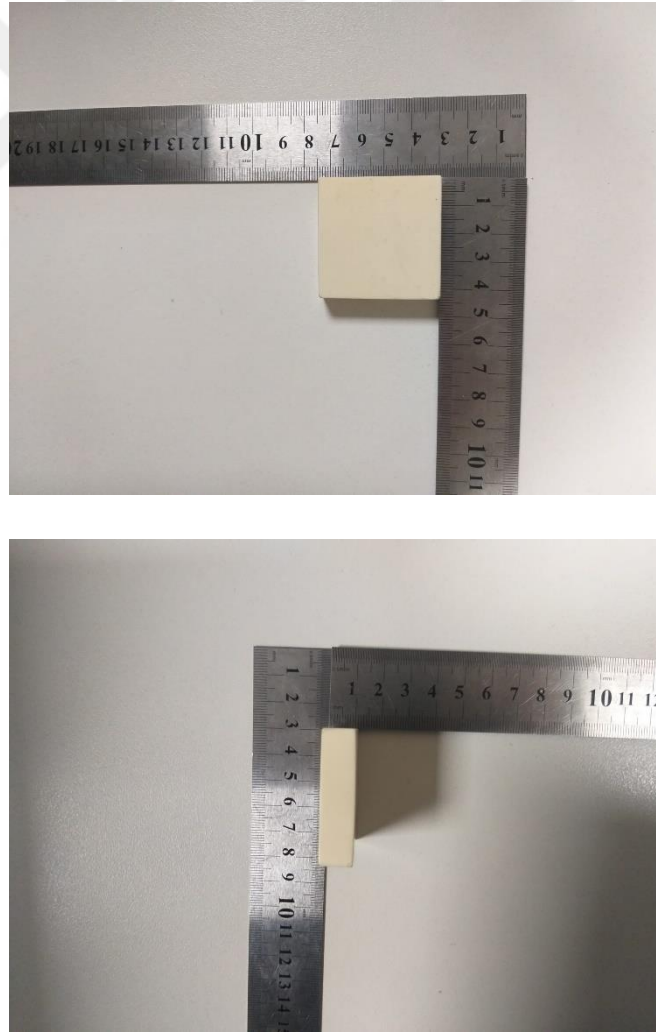


Şekil 4.2: Sinterlenme öncesindeki SEM görüntüsü



Şekil 4.3: Sinterlenme sonrasındaki SEM görüntüsü

Bu işlemde; seramik numunelerde önce sinterlenmemiş, daha sonra sinterlenmiş numuneye ayrı ayrı SEM görüntü testi uygulanmıştır. Şekil 4.2’de görülen görselde sinterlenmemiş numunenin mikro yapısında boşlukların olduğu görülmektedir. Şekil 4.3’te ise numune sinterlendikten sonra SEM görüntü testi uygulanmış, mikro yapısında görülen boşlukların kapandığı taneciklerin birbirine kaynaşmış biçimde olduğu görülmektedir. Sinterlenme öncesi tanecik boyutu 190 μm iken sinterlenme sonrası tanecik boyutu ortalama 2.93 μm ‘ye kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Böylece uygulanan sinterlenme sürecinde uygulanan sıcaklık değerinin uygunluğu görülmüştür. Sıcaklığın çok düşük olması tanecik boyutlarını yeterli derecede küçültmeyip, kaynaşmayı fazla sağlamayarak boşlukların kapanmasını yeterli düzeyde sağlayamayacaktı. Böylece zırh için gerekli olan mukavemet sağlanamayıp zırh uygulamalarında kullanımı uygulanamayacaktı. Uygulanan sıcaklığın mukavemet değerine etkisi görülmüş olup, literatürdeki sonuçlarla benzer bulguların olduğu görülmüştür. (Palacı 2001)(D. Liu et al. 2021).



Şekil 4.4: Sinterleme sonrasındaki düz geometrili alüminanın ölçü görüntüleri



Şekil 4.5: Sinterleme sonrası altıgen geometrili alümina ölçü görüntüleri

4.2 Mekanik Testler

Seramik zırh numunelerinde sinterleme sonrasında %16 küçülme gözlemlenmiştir. Sinterleme ile küçülen numunelerde, seramik tozların arasındaki boşlukların kapandığı ve birbirlerine daha iyi tutunduklarını göstermektedir. %16'lık küçülme ile seramik zırh numunelerin boyutları 43x43x11mm olarak ölçülmüştür.

Zırh numunelerine daha sonrasında sertlik ölçüm cihazı ile Vickers sertlik testi uygulanmıştır. Vickers sertlik testinde numuneden 5 farklı noktadan ölçüm alınarak

ortalaması alınmıştır. Sonuçlarda ortalama 27 GPa değeri ölçülmüştür. Literatür araştırması yapıldığında, R. Lue ve arkadaşları bor karbür seramiğini 3D yazıcıdan ürettikleri kalıp ile üretmişlerdir. %96 saflığa sahip seramiklerini 2290°C’de sinterleme işlemi uygulamışlardır. Sinterleme işleminin ardından sertlik testi uygulamışlardır. Vickers sertlik testinde 23 GPa değerini bulmuşlardır. Sinterleme sıcaklığı çok yüksek olmasına rağmen üretim metodundan dolayı iyi sonuç elde edememişlerdir. Balistik test için üretilen seramiklerde, presle üretilen seramiklerde daha iyi sonuçların alındığı gözlemlenmiştir. Basınç uygulanarak üretilen seramik zırhlarda sertlik değerlerinde daha iyi sonuçlar elde edilmektedir(Lu et al. 2018).

Seramik zırh numunelerine mekanik test olarak basma testi uygulanmıştır. Basma dayanımı ölçüm cihazında uygulanan basma testinde yaklaşık 9MPa dayanım değerleri ölçülmüştür. Mekanik test işlemlerinden sonra sonuçların uygun çıkması durumunda alümina seramik zırh numuneleri, balistik test için epoksi yardımıyla yapıştırılıp bir araya getirildi. Birbirine ve 5er mm’ lik iki zırh çeliğine yapıştırılan seramik numuneler 2 gün boyunca kuruması için bekletildi. Oluşan zırh boyutu, kalınlığı 22mm ve eni boyu 200x200mm olarak hazırlandı. Seramikleri metaller ile birleştirilmesi çok önemli olup, zırh uygulamalarında daha çok dikkat edilmesi gereken konulardan birisidir. Epoksi de bu işlem için uygun olup zırh uygulamalarında zırha ayrı bir mukavemet ve esneklik katarak literatürde oldukça tercih edilmektedir(Gao et al. 2018).

Sertlik testinden sonrasında Şekil4.4’de fotoğraflanan Basma Dayanımı testi ölçüm cihazı ile Basma testi yapılmıştır ve sonuçlarda 9MPa dayanım çıktığı görülmüştür. Literatüre bakıldığında; sertlik test sonucunda yaklaşık 22GPa bulunurken, 27GPa değeriyle merminin kinetik enerji sönmemesinin çok daha iyi olacağı öngörülmüştür(İnan 2005). Basma dayanımı sonuçlarında yine literatür değerlerine yakın değerler bulunduğu görülmüştür(İnan 2005).

4.3 Balistik Test

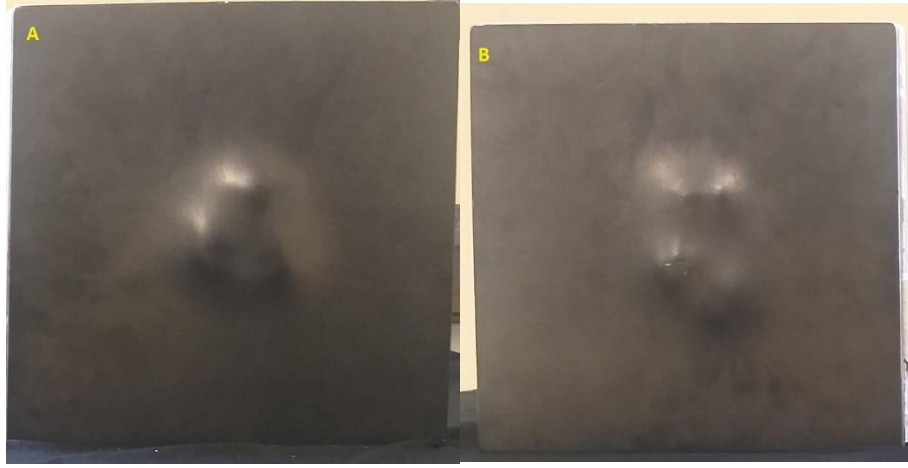
Seramik numunelerin yapıştırılması sonrasında zırh plakaları elde edilmiştir. Balistik test için uygun hale gelen seramik numuneler için balistik test sırasında kullanılacak mühimmat seçimi gerçekleşmiştir. Mühimmat seçimi 7.62x51mm ve keskin nişancı tüfeği olarak seçilmiştir. 7.62x51mm mühimmat seçiminin nedeni, mühimmatın tüfekten ilk çıkış hızı ve temas ettiği yüzeyde oluşturduğu tahribattan dolayı seçilmiştir. 838m/s ilk hız ile çıkış yapan mühimmat çok etkili tahribat yeteneğine sahiptir. Balistik test için mühimmat

ve silah seçimi gerçekleştikten sonra balistik test için hazır duruma gelinmiştir. Balistik test 25 metre mesafeden gerçekleşmiş olup, her numuneye 3'er atış yapılmıştır. Atışlar sonrasında yapılan ilk kontrollerde altıgen geometrili zırhın daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Seramik numunelerin kendi arasında ve çelik zırh plakası ile yapıştırıldıktan sonra numuneler elde edilmiştir ve balistik test için uygun hale gelmişlerdir. Balistik testler için mühimmat seçimi 7.62x51mm ve keskin nişancı tüfeği olarak tercih edilmiştir. 7.62x51mm mühimmatının ilk çıkış hızı ve verdiği tahribattan dolayı tercih edilmiştir. Mühimmat seçiminden sonra 25 metre mesafeden keskin nişancı tüfeği ile her numuneye 3'er kez atış gerçekleşmiştir. Atışlardan yapılan ilk gözlemlerde yuvarlak şeklinde konkav olan alümina plakanın daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiş olup, literatür araştırması yapıldığında F. Braga ve arkadaşları düz ve konkav yapıdaki alümina seramiğinden zırh üretimi gerçekleştirip sonrasında balistik test uygulamıştır. Uygulanan balistik test NIJ standartlarına göre yapılmıştır. Uygulanan testler sonucunda konkav yapıdaki zırhların balistik dayanımının, düz geometriye göre daha iyi olduğu görülmüştür. (Braga et al. 2018)



Şekil 4.6: Zırh numunelerine ateş edildikten sonra ön görüntüsü

- a) Altıgen geometrili seramik zırh
- b) Düz geometrili seramik zırh



Şekil 4.7: Zırh numunelerine ateş edildikten sonra arka görüntüsü

- a) Altıgen geometrilili seramik zırh
- b) Düz geometrilili seramik zırh

Yapılan balistik test ardından seramik-zırh çeliği zırh numunelerine arka görüntüsünden bakıldığında mermilerin dışarı çıkmadan içerden sadece yükseklik yaptığı görülmüştür. Böylece mermilerin zırhı delip geçemediği anlaşılmaktadır. 2 farklı geometrideki zırh çeliklerine yan profilden baktığımızda ise, düz geometrilili seramik zırh numunesinde açıklık, ayırım söz konusu olduğu görülmektedir. Böylece düz seramik numunenin altıgen konkav yapılı seramik numuneye göre daha çok zarara, kırılmaya uğradığı görülmüştür. Altıgen seramik zırh numunesinde ise, sadece merminin yapmış olduğu yükseklik görülmekte ve zırh çeliğinin seramikten herhangi bir şekilde ayrılması söz konusu olmamıştır.

Merminin altıgen zırhta yapmış olduğu yükseklik ölçülmüş olup, çıkan değerin 8.55 mm olduğu görülmüştür. Düz seramikte ise yükseklik değeri ölçülmeyip, zırh çeliğinden ayırım mesafesi ölçülmüştür. Bu değer ise yaklaşık 8 mm'dir.



Şekil 4.8: Merminin düz geometrilili zırha giriş görüntüsü



Şekil 4.9: Merminin altıgen geometrili zırha giriş görüntüsü

Mermi girişlerinin görselleri her iki farklı geometri içinde; şekil 4.8’de düz geometri, şekil4.9’da altıgen geometri olarak gösterilmiştir. Bu görüntüler iki geometri için ayrı ayrı incelenmiş ve tartışılmıştır.

Şekil 4.8 ve şekil 4.9 ‘da görüldüğü gibi zırh çeliği üzerindeki talaşların yönü aşağı yönlü değil, yukarı yönlü olduğu görülmektedir. Burada mermi zırh çeliğine ilk temasında talaşları aşağı yönde bükmesi gerekirken seramik yüzeye geldiğinde, seramiğin sertliğinden ve mukavemetinden dolayı talaşlar yukarı yönlü bükülme göstermiştir. Yani seramikler; merminin talaşla birlikte geçmesine izin vermemiş, talaşları yukarı yönlü bükümüştür. İki geometri içinde bakıldığında hem altıgen geometri hem de düz geometri aynı tepkiyi göstermiş, gözle görülebilir bir farklılık görülmemiştir. Sertlik değerlerinin aynı olması bu durumu desteklemektedir.



Şekil 4.10: Düz geometrili plakanın yan profili



Şekil 4.11: Düz geometrinin balistik test sonrasında açılması

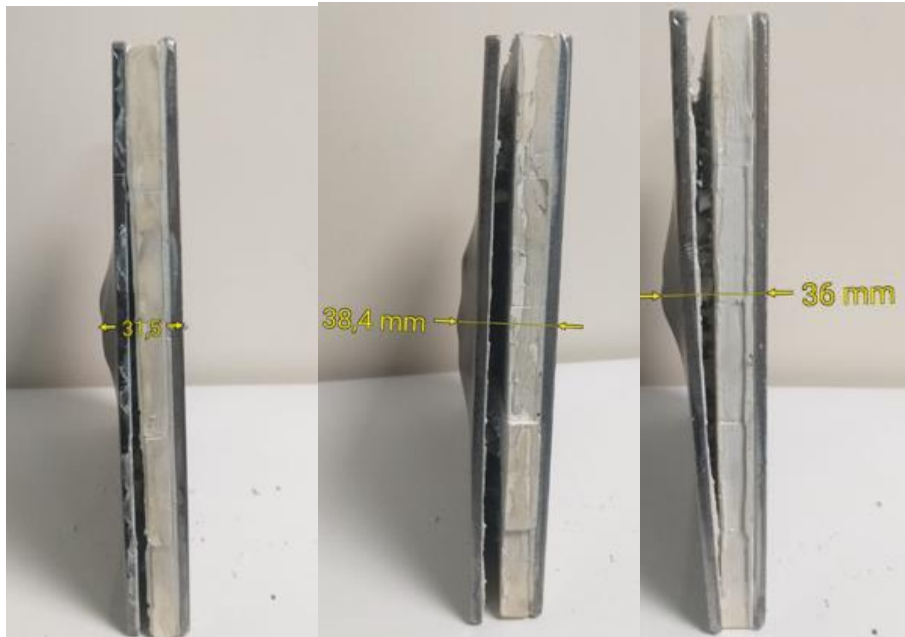


Şekil 4.12: Altıgen şekilli plakanın yan profilden görünüşü

Literatür çalışması yapıldığında üretilen seramik zırhların geometrileri balistik performansına etkilerinin pozitif olduğu görülmüştür (Bracamonte et al. 2016). Alümina seramik plakaların konkav geometrilere yapılan balistik testlerinde elde edilen sonuçlarda, konkav geometrilerin balistik testi önemli derecede etki ettiği görülmüş olup, literatüre bakıldığında, bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlarla eşdeğer sonuçlar elde edilmiştir. Balistik testlere bir diğer katkı ise epoksi malzemeden gelmektedir. Epoksi kullanılarak oluşturulan seramik zırhlar, balistik testlere olumlu açıdan etkisi olmaktadır. Epoksi, zırhlara kazandırdığı esneklik ile zırhların darbe sonrasında dağılmamasını sağlayarak etkisini göstermektedir. (Tepeduzu and Karakuzu 2019)

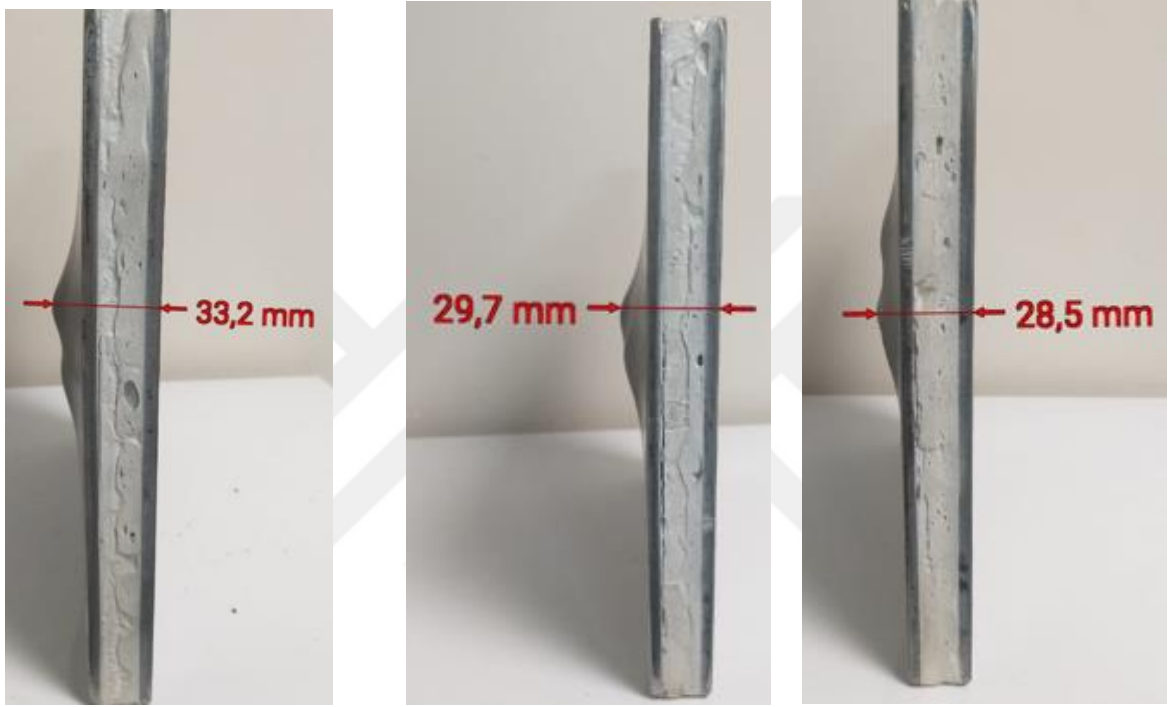
P.Hu çalışmasında, oluşturduğu zırhta orta katman olarak seramik numune kullanmıştır. Oluşturulan metal-seramik zırhta kullanılmıştır. Fakat bazı çalışmalarda seramik katman ön yüz olarak kullanılmakta, sonuçlar yine seramiklerin mermiye karşı dayanıklı ve enerji sönümleyici etkisini göstererek mermi hızını kesip arka katmana daha yavaş geçişini göstermektedir (Hu et al. 2021).

Übeyli ve arkadaşları uyguladıkları balistik testte elde ettikleri bulgulara, zırh numunelerinde kullanılan metal sac plakaların balistik performansa olumlu etkileri olduğu gözlemlenmiş ve bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlarla paralel olarak sonuçlar gözlemlenmiştir.(Übeyli et al. 2011)



Şekil 4.13: Düz geometrili seramik zırhta merminin yaptığı yükseklik ölçümü

Düz geometrik şekilli alümina seramik numunelerin yan profilden yükseklik değerinin ölçüldüğü görsel şekil 4.13'te görülmüştür. Bu görselde merminin düz geometride yaptığı yükseklik ölçümleri 3 farklı noktadan gösterilmiştir. Bu kalınlıklara bakıldığında ilkinde 31.5mm, ikincisinde 38.4mm ve sonuncusunda da 36mm olarak ölçü değerleri bulunmuştur. Balistik test öncesi toplam zırh kalınlığının 22mm olduğu bilindiğine göre bu bulgulara göre mermi; zırh üzerinde yaklaşık 15mm'lik bir açıklık gerçekleştirmiş olup, düz geometriyi biraz tahribata uğratmıştır.



Şekil 4.14: Altıgen geometrili seramik zırhta merminin yaptığı yükseklik ölçümü

Altıgen konkav şekilli alümina seramik numunelerin yan profilden yükseklik değerlerinin ölçümünü gösteren görsel şekil 4.14'te gösterilmiştir. Altıgen şekilli numune içinde değerler ölçüldüğünde ise sonuçların daha farklı çıktığı görülmüştür. Yine aynı şekilde 3 farklı noktadan ölçüm alındığında ilk ölçünün 33.2mm, ikinci ölçünün 29.7mm ve sonuncu ölçünün 28.5mm olduğu görülmüştür. Balistik test öncesi kalınlığın 22mm olduğu bilindiğine göre yaklaşık merminin yapmış olduğu yükseklik değeri 10mm çıkmıştır. Altıgen zırhta herhangi bir tahribata rastlanmamıştır.

Balistik test sonrası düz geometrili seramik-zırh çeliği plakası ve altıgen konkav yapılı seramik zırh-çeliği plakası incelenip üzerinde tartışılmıştır. Yapılan gözlemler ve sayısal verilere göre; 7.62x51mm zırh delici mühimmatın keskin nişancı tüfeğiyle 3 kez atış sonrası düz geometride görülen açıklık yaklaşık 8mm'lik zırh çeliğinin seramikten ayrımı,

konkav yapılı altıgen şekilli zırha göre farklıdır. Böylece altıgen şekillideki konkav yüzeyler hava boşluğu fazla olup merminin kinetik enerjisini çok daha iyi sönümlediği görülmüştür. Her 2 geometri için de zırhlar merminin içinde kalıp arka yüzeyi delememiştir. Böylece daha sonraki çalışmalarda hava boşluğunun artmasıyla merminin kinetik enerjisinin sönümlenmesinin artacağı öngörülür ve merminin 2 geometri içinde zırhları parçalayıp arka yüzeyden çıkmaması seramiklerin daha sonraki zırh uygulamalarında kullanımı için yer hazırlamıştır.

Literatürde görülen bir çalışmada; 7.62x51 mm zırh delici mermisi kullanılarak balistik test için zırh kalınlığının etkisi incelenmiştir. Çalışmada 5mm alümina ve 6.2 mm bor karbür seramiği kullanılarak 600m/sn hızla balistik test gerçekleştirildiğinde oluşan sonuçlarda bor karbür seramiğinin diferansiyel etki faktörünün ve etki verimliliğinin daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.(Savio and Madhu 2018)

Yapılan çalışmaya göre balistik testlerde kalınlığın artması sonuçların iyileşmesi yönünde olup bu çalışmada kullanılan seramik kalınlığının 11 mm olması ve merminin plakanın ön yüzünden girip arkasından çıkmayıp, plakaları kırıp dağıtmaması kalınlığın uygun olduğunu göstermiştir.

Literatürdeki başka bir çalışmada seramik çeşitlerinin balistik performansa etkisi araştırılmıştır ve bu çalışmada 50x50x10mm boyutlarında %99.2 saflıktaki alümina plaka kullanılmıştır. Diğer plaka ise saflığı belirlenememiş bor karbür seramiğinden elde edilmiştir. Bu iki plakaya 7.62x51 mm mermisiyle 15 metre mesafeden 838m/sn hızla atış yapılmıştır. Bu atışların sonucunda balistik testte bor karbürün daha sert olmasından dolayı bor karbür seramik plakanın balistik test sonuçlarının daha iyi çıkacağı düşünülmüş fakat sonuçlarda alümina seramik plakanın balistik sonucu daha iyi çıkmıştır(Koç and Akçay 2022).

Bu tezde kullanılan alümina ileri teknoloji seramiğinin zırh uygulamaları için uygunluğu araştırmalarda da görülmüştür. Çıkan sonuçların literatüre eş değer çıkması alümina seramiğinin zırh uygulamaları için uygunluğunu göstermiştir.

Başka bir çalışmada 7.62x51 mm zırh delici mermisiyle NIJ standartları uygulanarak alümina mineraline balistik test uygulandığı görülmüş, 28 mm olan zırh kalınlığının delinmeyip arkasında yükseklik olduğu gözlenip, veriler elde edilmiştir. Bu verilere göre

seramikteki minerallerin yüksek enerji sönümleme, dağıtma gibi sonuçları ortaya çıkmıştır.(Medvedovski 2010)

M. Akdoğan ve arkadaşları çalışmalarında alümina seramiklere şekil verip, balistik testi bu şekilde gerçekleştirmişlerdir. M. Akdoğan ve arkadaşları alümina seramikleri konkav ve düz olacak şekilde şekillendirilip sayısal modellemesini yapmışlardır. Alümina seramik plakaları desteklemek için her 2 farklı şekilli numune için öne 8 mm kalınlıkta alüminyum arkaya da 15 mm kalınlığında alümina seramik yerleştirilip bu şekilde sayısal modelleme ve balistik test yapılmıştır. 7.62x51 mm mühimmatıyla gerçekleştirilen balistik testte 2 farklı geometri için incelenmiştir. Verilere göre bakıldığında merminin deformasyonu her iki plaka için görülmüştür. Kinetik enerji grafiğine bakıldığında ise konkav yapıli alümina-alüminyum plakaların enerji grafiğı düz şekilli alümina-alüminyum plakaya göre daha fazla düşüş yaşandığı görülmüştür. Böylece konkav yapıların merminin kinetik enerjisini düşürdüğü desteklemekle birlikte, her iki geometri için de mermide deformasyon gözlenerek ileri teknoloji seramiklerin zırh uygulamaları için uygunluğu görülmüştür. (Akdoğan and Türkbaş 2016)

Literatüre bakıldığında genel olarak ileri teknoloji seramiklerin zırhlarda kullanımı deneysel olarak kanıtlanmış ve hafifliğı, mukavemeti gibi üstün özellikleri sayesinde araştırmaları gittikçe artmaktadır.

5.SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, üretimi tamamlanıp testlere tabi tutulan alümina seramik zırh numuneleri, literatürdeki çalışmalarda elde edilen sonuçlara yakın değerlerin elde edildiği görülmüştür. Seramiklerin, vücut zırhı çalışmalarında kullanılabilirliği yapılan testler ile uygun olduğu görülmüştür. Seramiklerin ağırlık olarak avantajından dolayı zırh çalışmalarında kullanılması büyük avantaj sağlamaktadır.

Seramikler yüksek mukavemet ve yüksek enerji sönümleme özellikleri sayesinde, vücut zırhı kullanan personelleri daha iyi koruyacağı görülmüştür. Koruma sağlamanın yanı sıra seramik katmanının sağladığı hafiflik ile de kolay kullanımı mümkündür.

Seramik zırh numunelerinin kalınlıkları yaklaşık 21mm olması, mermilerin zırhı delip geçmesini engellemiş olup, yapılan zırh numunelerinde kalınlığın uygunluğu görülmüştür. Kalınlığın artması ile zırha gelen merminin delip geçme yeteneğinin azalacağı gözlemlenmiştir. Kalınlığın artması ile mukavemetin olumlu yönde artması, kullanan personelin güvenliğini daha da arttırmaktadır. Kalınlığı arttırmanın tek olumsuz noktası, kalınlıkla oluşan toplam ağırlığın artmasıdır. Toplam ağırlığın artması kullanacak personeli zor duruma düşürecektir. Toplam ağırlık ve mukavemet değerlerinin optimum seviyelerde kalabilmesi için ileriki çalışmalarda araştırılması gerekmektedir.

Epoksi maddesi ile birbirlerine yapıştırılan zırh katmanlarında, epoksi maddesinin ekstradan mukavemet ile zırhların dayanımının arttığı görülmüş ve balistik testler için bir avantaj sağlamıştır. Epoksi maddesinin mukavemete katkısıyla beraber sağladığı esneklik ile zırha uygulanan atışlarda seramik katmanın dağılmaması, epoksi maddenin bir diğer avantajını göstermiştir. Epoksi maddenin dezavantajı maliyetidir. İleriki çalışmalarda epoksi madde yerine daha ucuz bir malzeme veya epoksi malzemeler arasında daha iyi sonucu verebilecek epoksi araştırması yapılmalıdır.

Oluşturulan düz ve konkav geometrili zırhlara uygulanan balistik testte, konkav geometrinin dağılmadığı düz geometrinin açılmış olması, konkav yapıyla oluşturulan zırhların çalışmalarda daha başarılı olduğunu göstermiştir. Konkav zırhın ön yüzeyindeki zırh çeliği ile arasında boşluklu yapı ile merminin enerjisini daha fazla sönümlendiği görülmüştür. Aynı sonuçları literatürdeki diğer çalışmalarda da görüldüğü için konkav yapıli zırhların kullanımı düz geometrili zırhlara göre daha avantajlı görülmektedir.

Balistik testte kullanılan 7.62x51mm mühimmatın çok güçlü bir mühimmat tipi olmasına rağmen, oluşturulan seramik plakalar bu mühimmata dayanımı oldukça iyi olmuştur. Balistik testlerde gerçekleştirilen 3 atış ile zırhların kırılmadan, dağılmadan kalabilmesi, seramik katmanın zırh uygulamaları için uygunluğunu göstermiştir.

Balistik testte, altıgen geometrinin dağılmadan kalması, düz geometrinin dağılmadan ancak kenarlarından açılması, altıgen zırhın geometrisinden ötürü içinde zırh plakasında oluşan hava katmanı sayesinde, daha fazla enerji sönümleyip daha dayanıklı kaldığı görülmüştür. Düz geometride oluşmayan hava katmanı enerji sönümleme yeteneğini geliştiremediği için kenarlarında bir açıklık oluşmasına sebep vermiştir. Sonraki çalışmalarda altıgen geometrili zırhlar geliştirilip, farklı geometrilerde yapılar oluşturulup balistik test ile değerlendirilmelidir.

Seramik numunelere uygulanan sinterleme işlemi ile tanecikler arasındaki boşlukların kaybolması sağlanıp, mukavemet bakımından numunelerin daha iyi sonuçlar almasına etki göstermiştir. Sinterleme sonrasında taneciklerin küçülmesi ile birbirlerine daha iyi tutunması sağlanmıştır.

Balistik testte mühimmatın yapmış olduğu çıkıntıların yükseklikleri incelendiğinde, konkav yapılı olan altıgen seramik zırh numunesi düz geometrili zırh plakasına göre daha az olduğu görülmüştür. Altıgen geometrili konkav zırhın içindeki hava katmanları sayesinde ve mühimmatın seramik katman ile dik açıyla karşılaşmamasından dolayı, mühimmatın kinetik enerjisini düz geometriye göre daha iyi sönümlediği görülmüştür.

Üretimi gerçekleşen seramik numunelere fırınlama işleminde ilk 500°C'ye kadar 1dakika/1°C şeklinde ilerlenmiştir. 500°C'den sonra 1650°C'ye kadar 1dakika/5°C şeklinde ilerleme gerçekleşmiştir. Sinterleme işlemi sırasında 1650°C'ye varıldığında 1 saat bu sıcaklıkta beklenilmiştir. Sonrasında numuneler soğumaya bırakılmıştır. Oda sıcaklığına gelen ürünlere göz ile kontroller yapılarak çatlama kırılma olup olmadığı kontrol edilmiştir. Kontrollerde bir aksilik yaşanmadığı için uygulanan sıcaklığın doğru olduğu görülmüştür. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda numunelerin sinterleme sıcaklığının maksimum kaç derece optimum değer olduğuna bakılmalıdır.

Balistik testte mühimmatın zırh ile yaptığı temasta oluşan deformasyon incelendiğinde, mühimmatın talaş kaldırması içeriye doğru değil dışarıya doğru olmuştur. Bunun nedeni seramik yüzeyin sert olması ve mukavemet değerinin yüksek olması sayesinde talaşları

içeriye değil de dışarıya doğru itirmiştir. İki geometride de aynı durum söz konusu olup geometri farklılığının bu etkide bir farkı olmadığı görülmüştür.

Balistik testte kullanılan 7.62x51mm keskin nişancı mühimmatının tüfekten çıkış hızı 816m/s olduğu bilinmektedir. Merminin enerjisi de 3643 jouldür. Kullanılan bu güçlü mühimmatın zırh plakalarını delmemesi, mermi çekirdeklerinin içeride kalması zırhların kullanımını desteklemektedir. Bu sonuçla üretilen zırhların başarılı olduğu görülmüştür. Ancak ileriki çalışmalarda daha farklı kalibredeki mühimmatlar ile denenerek hangi kalibreye kadar kullanımının uygun olacağı araştırılmalıdır.

Oluşturulan zırh numunelerinde kullanılan zırh çeliği plakaları testlerde iyi sonuçlar sağlamasına rağmen oldukça ağır olmasından dolayı tüm avantajını kaybettirmektedir. İleriki çalışmalar için çelik malzeme yerine, daha fazla esneklik yeteneği sağlayabilecek ve daha hafif malzemeler kullanılmalıdır.

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen testler sonucunda kullanılan seramik tozunun vücut zırhları için yeterliliği ortaya çıkarılmıştır. Ancak ileriki çalışmalarda kullanılacak seramik tozunun daha yüksek saflıkta olması, daha iyi sonuçların alınacağını göstermektedir. Alümina seramik toz yerine daha iyi özellikleri bulunan bor karbür kullanılarak daha yüksek mukavemet değerlerini almak mümkündür. Alınacak daha yüksek mukavemet, balistik test sonuçlarında daha iyi değerler alınmasını sağlayacaktır. Sonraki çalışmalarda seramik toz için daha yüksek maliyet payı ayrılarak daha iyi seramik toz alınarak denenmelidir.

KAYNAKLAR

- Aboudi, Jacob, Steven Arnold, and Brett Bednarczyk. 2013. Micromechanics of Composite Materials *Micromechanics of Composite Materials*.
- Akdoğan, Mehmet Akif, and Osman Selim Türkbaş. 2016. 'Konkav ve Düz Yüzey Şekilli Zırhların Balistik Performansının Sayısal Modellenmesi'. : 91–106.
- AKKURT, Fatih. 2019. 'Üstün Özelliklere Sahilileri Teknoloji Seramiği: Titanyum Diborür'. *Journal of Boron* 4(4): 203–8.
- B.R.Jones, A.R.Prunier, A.J.Pyzik. 2002. 'Brake Or Clutch Components Having A Ceramic-Metal Composite Friction Material'. : 7.
- Bozdoğan, Faruk, Sacide Üngün, Emrah Temel, and Gamze Süpüren Mengüç. 2015. 'Balistik Koruma Amaçlı Kullanılan Tekstil Materyalleri, Özellikleri ve Balistik Performans Testleri'. *Tekstil ve Muhendis* 22(98): 84–103.
- Bracamonte, L., R. Loutfy, I. K. Yilmazcoban, and S. D. Rajan. 2016. Lightweight Ballistic Composites: Military and Law-Enforcement Applications: Second Edition *Design, Manufacture, and Analysis of Ceramic-Composite Armor*. Elsevier Ltd.
- Braga, Fábio De Oliveira, Fernanda Santos Da Luz, Sergio Neves Monteiro, and Édio Pereira Lima. 2018. 'Effect of the Impact Geometry in the Ballistic Trauma Absorption of a Ceramic Multilayered Armor System'. *Journal of Materials Research and Technology* 7(4): 554–60. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.06.019>.
- Çayiroğlu, İbrahim, and Ercüment N. Dizdar. 2004. 'Kapsülsüz ve Barutsuz Mermi Atan Hafif Silah Tasarımı'. *Teknoloji* 2: 339–44.
- Cazamias, J. U., and S. J. Bless. 1997. 'Scaling Effects in Penetration: A Taylor Test Approach'. *Journal De Physique. IV : JP* 7(3): 115–20.
- Çinaz, Ender. 2012. 'Ağırlıkça %2 MgO VE %2 TiO₂ Katkılı Alümina Seramiğinin Farklı Sıcaklıklarda Sinterlenme ve Karakterizasyonu'. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Cranz, C. 1926. 'Lehrbuch Der Ballistik'. *The Mathematical Gazette* 21(245): 454.
- Dağışan Bulucu, Esen. 2020. 'MBM 301 Seramikler Ders Notları'.
- David, N. V., X. L. Gao, and J. Q. Zheng. 2009. 'Ballistic Resistant Body Armor: Contemporary and Prospective Materials and Related Protection Mechanisms'. *Applied Mechanics Reviews* 62(5): 1–20.
- Ergün, Nüket. 2006. 'Bor Karbür-Silisyum Karbür Kompozitlerinin Reaktif Sıcak Presleme İle Üretilmesi'. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Evcı, Celal, and Müfit Gülgeç. 2014. 'Effective Damage Mechanisms and Performance Evaluation of Ceramic Composite Armors Subjected to Impact Loading'. *Journal of Composite Materials* 48(26): 3215–36.
- Feli, S., and M. R. Asgari. 2011. 'Finite Element Simulation of Ceramic/Composite Armor under Ballistic Impact'. *Composites Part B: Engineering* 42(4): 771–80.

- Gao, Yubo et al. 2018. 'Influence of Epoxy Adhesive Layer on Impact Performance of TiB₂-B₄C Composites Armor Backed by Aluminum Plate'. *International Journal of Impact Engineering* 122: 60–72.
- Garcia-Avila, Matias, Marc Portanova, and Afsaneh Rabiei. 2014. 'Ballistic Performance of a Composite Metal Foam-Ceramic Armor System'. *Procedia Materials Science* 4(2010): 151–56. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.571>.
- Gezer, Hasan Ali, and Tahsin Engin. 2016. 'Barut Tane Geometrisinin Silah İç Balistiğine Etkisinin İncelenmesi'. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 20(2): 251.
- Gök, Şevket. 2006. 'Dış Balistik Analizi'.
- Güldoğan, Yasemen. 2014. 'Bayer Gibsiti ve Alüminyum Tuzlarından Yüksek Safılıkta Alüminyum Hidroksit ve Alümina Üretimi'. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi.
- Güngör, Duran. 2021. 'İç Balistik Hesaplama ve Namlu Tasarım Programı Geliştirilmesi'.
- Hu, Pengcheng et al. 2021. 'A Metal / UHMWPE / SiC Multi-Layered Composite Armor against Ballistic Impact of Flat-Nosed Projectile'. *Ceramics International* (January).
- İlgar, Ferit. 2008. 'TiO₂ Katkısının Alüminanın Sinterlenme Davranışına Etkisinin İncelenmesi'. Yüksek Lisans Tezi Sakarya Üniversitesi.
- İnan, Utku. 2005. 'Farklı Sinterleme Sıcaklıklarının Ağırlıkça %2 MnO ve %2 TiO₂ Katkılı Alümina Seramiğinin Mikroyapısal ve Fiziksel Özelliklerine Olan Etkileri'. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- İşık, Halil. 2016. 'Namlu İçerisindeki Balistik Parametrelerin Modellenmesi'. *Savunma Bilimleri Dergisi The Journal of Defense Sciences Kasım* 15(2): 157–77.
- Kaufmann, Christian et al. 2003. 'Influence of Material Properties on the Ballistic Performance of Ceramics for Personal Body Armour'. *Shock and Vibration* 10(1): 51–58.
- Koç, Serap, and Beytullah Akçay. 2022. 'B₄C ve Al₂O₃ Seramik Plakaların Mekanik ve Balistik Özelliklerinin İncelenmesi'. *Journal of Polytechnic* 0900(3): 991–96.
- Krishnan, K., S. Sockalingam, S. Bansal, and S. D. Rajan. 2010. 'Numerical Simulation of Ceramic Composite Armor Subjected to Ballistic Impact'. *Composites Part B: Engineering* 41(8): 583–93. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.10.001>.
- Liu, Dianguang et al. 2021. 'Sintering Behavior and Mechanical Properties of Alumina Ceramics Exposed to Oscillatory Pressure at Different Sintering Stages'. *Ceramics International* 47(16): 23682–85.
- Liu, Weilan et al. 2016. 'Design and Ballistic Penetration of the Ceramic Composite Armor'. *Composites Part B: Engineering* 84: 33–40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.08.071>.
- Lu, Ryan et al. 2018. 'Complex Shaped Boron Carbides from Negative Additive Manufacturing'. *Materials & Design* 148: 8–16.
- Marx, Jacob, Marc Portanova, and Afsaneh Rabiei. 2019. 'Ballistic Performance of

- Composite Metal Foam against Large Caliber Threats'. *Composite Structures* 225(April): 111032. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111032>.
- Medvedovski, Eugene. 2010. 'Ballistic Performance of Armour Ceramics: Influence of Design and Structure. Part 1'. *Ceramics International* 36(7): 2103–15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.05.021>.
- Monteiro, Sergio Neves et al. 2016. 'How Effective Is a Convex Al₂O₃-Nb₂O₅ Ceramic Armor?' *Ceramics International* 42(6): 7844–47. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.12.147>.
- NIJ Standard-0101.06. 2008. 'Ballistic Resistance of Personal Body Armor'. *NIJ Standards*: 89.
- Ondokuz Mayıs Üniversitesi. 'Toz Metalurjisi Ile Parça Üretimi'. In Ondokuz Mayıs Üniversitesi, 9.
- Özer, Gürsel. 2008. Ph.D. thesis, Central-South University of Technology, China 'Dış Balistik Analizinde İzdüşüm Alanı Etkilerinin Araştırılması'.
- Özgültekin, Sefa Emin. 2012. 'Balistik Zırhlarda Kullanılan Kompozit Malzeme Kombinasyonlarının İncelenmesi'.
- Öztürk, Muhammet. 2007. 'SiC İlaveli Alümina Seramik Kompozitler'. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi. <https://acikerisim.sakarya.edu.tr/bitstream/handle/20.500.12619/81325/T03080.pdf?sequence=1>.
- Pach, Joanna, Dariusz Pyka, Krzysztof Jamrozak, and Paulina Mayer. 2017. 'The Experimental and Numerical Analysis of the Ballistic Resistance of Polymer Composites'. *Composites Part B: Engineering* 113: 24–30. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.01.006>.
- Palacı, Yüksel. 2001. 'Alüminanın Özelliklerini, Şekillendirme Yönteminin, Katkılarının ve Sinterleme Sıcaklığının Etkisi'. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Pereira, Artur Camposo et al. 2019. 'Ballistic Performance of Multilayered Armor with Intermediate Polyester Composite Reinforced with Figue Natural Fabric and Fibers'. *Journal of Materials Research and Technology* 8(5): 4221–26. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.07.031>.
- Reed, J.S. 1995. *Principles of Ceramics Processing*. New York: John Wiley & Sons, Inc. (US).
- Reno, Janet, Daniel Marcus, Mary Lou Leary, and Julie E. Samuels. 2000. 'Ballistic Resistance of Personal Body Armor NIJ Standard-0101.04'. 50: 2369–80.
- Savio, S. G., and V. Madhu. 2018. 'Ballistic Performance Evaluation of Ceramic Tiles with Respect to Projectile Velocity against Hard Steel Projectile Using DOP Test'. *International Journal of Impact Engineering* 113(November 2017): 161–67.
- Shokrieh, M. M., and G. H. Javadpour. 2008. 'Penetration Analysis of a Projectile in Ceramic Composite Armor'. *Composite Structures* 82(2): 269–76.

- Silva, M. V. et al. 2014. 'Alumina-Based Ceramics for Armor Application: Mechanical Characterization and Ballistic Testing'. *Journal of Ceramics* 2014: 1–6.
- Tepeduzu, Baha, and Ramazan Karakuzu. 2019. 'Ballistic Performance of Ceramic/Composite Structures'. *Ceramics International* 45(2): 1651–60. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.042>.
- Thévenot, Francois. 1990. 'Boron Carbide-A Comprehensive Review'. *Journal of the European Ceramic Society* 6(4): 205–25.
- Turan, Ahmet, and Onuralp Yücel. 2016. 'SERAMİĞE Değer Katmak'. *Metalurji* (181): 26–29. https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi181/d181_2629.pdf.
- Übeyli, Mustafa et al. 2011. 'Ballistic Impact Performance of an Armor Material Consisting of Alumina and Dual Phase Steel Layers'. *Materials and Design* 32(3): 1565–70.
- Ünal, İbrahim. 2007. 'Seramik-Metal Soğuk Birleştirmeler ve Performanslarının İncelenmesi'. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- URL-1. 2022. 'Seramik Zırh'. https://tr.wikipedia.org/wiki/Seramik_zırh.
- Vural, Murat. *Plastik Şekillendirme Yöntemleri*. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Woodward, R. L. et al. 1994. 'A Study of Fragmentation in the Ballistic Impact of Ceramics'. *International Journal of Impact Engineering* 15(5): 605–18.
- Yumak, Nihal, and Kubilay Aslantas. 2013. 'Zırh Tasarımında Kullanılan Kompozit Malzemelerin Deformasyon Karakteristiğinin Araştırılması'. (October 2019).