



BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FARKLI ŞEKLİ ALÜMİNA SERAMİK PLAKALARIN BALİSTİK
İNCELENMESİ**

BÜŞRA OKTAVGİL

DANIŞMAN

DOÇ.DR BİLAL KURŞUNCU

BARTIN-2022



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FARKLI ŞEKLİ ALÜMİNA SERAMİK PLAKALARIN BALİSTİK
İNCELENMESİ**

YÜKSEKLİSANS TEZİ

BÜŞRA OKTAVGİL

BARTIN-2022

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Bilal KURŞUNCU danışmanlığında hazırlamış olduğum “Farklı Şekilli Alümina Seramik Plakaların Balistik İncelenmesi” 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.

15.12.2022

Büşra OKTAVGİL

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmamın 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. Ayrıca tez deney çalışmalarında her türlü cihazın kullanımında yardımcı olan Arş. Gör. Dr. Yasin ÖZGÜRLÜK , Doç. Dr. Ertuğrul ERDOĞMUŞ'a teşekkürlerimi borç bilirim.

Yüksek lisansa başlamama vesile olan ve tez aşaması boyunca fikirlerini beyan eden, yardımcı olan babam Ayhan OKTAVGİL 'e teşekkür ederim.

1649B022011181 başvuru numaralı projem 2210-D Sanayiye Yönelik Yurt İçi Yüksek lisans Burs Programı'nda TÜBİTAK tarafından kabul edilip, bursiyer olma hakkını verdikleri için teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamda toz malzeme teminimi sağlayan ve araçlarını kullanmam için izin veren Hüseyin KAYAN'a teşekkür ederim.

Bütün tez çalışmam boyunca bilgi alışverişi yaptığım yüksek lisans proje arkadaşım Emincan ÖZBAĞDATLI'ya teşekkür ederim.

Beni bu süreçte sürekli destekleyen annem Ayla OKTAVGİL ve kız kardeşim Hilal OKTAVGİL'e teşekkür ederim.

ÖZET
YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI ŞEKLİ ALÜMİNA SERAMİK PLAKALARIN BALİSTİK
İNCELENMESİ

Büşra OKTAVGİL

Bartın Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Bilal KURŞUNCU

Bartın-2022,sayfa: 59

İnsanlar asırlar boyunca kendilerini dış etkilere karşı koruma ihtiyacı duymuştur. Zırhlar da bu ihtiyaç doğrultusunda çıkmış ve teknolojinin ilerlemesiyle birlikte zırhın yapımında kullanılan malzemeler de değişkenlik göstermiştir. Son teknolojiyle birlikte ileri teknoloji seramiklerinin zırh yapımında; hafif olmaları, mukavemet açısından iyi özellik göstermeleri ve merminin enerjisini sönümleyici özelliğinin bulunması gibi özellikleri sayesinde tercih edilmektedir. Bu çalışmada alümina(Al_2O_3) teknik seramiği kullanılarak zırh malzemesi eldesi amaçlanmaktadır. Alümina seramik tozunun üretilen kalıplarda presleme işlemiyle sıkıştırılması, daha sonra bu numunelerin belirli bir sıcaklıkta ve sürede sinterleme sonrası oluşan numunelerin birleştirilip zırh eldesi planlanmıştır. Yapılan bu işlemler sonucunda uygulanan bazı testler sonucunda literatürle yaklaşık aynı değerlerin çıktığı, bazı sonuçlarda ise literatüre göre daha iyi sonuçların çıktığı gözlemlenmiştir. Yapılan değerlendirmeler ve hesaplamalar sonucunda alümina seramik numunelerin hafifliği, yapılan fizikler testlerde ise mukavemet açısından iyiliği görülmüş ve böylece

savunma sanayiinde seramiklerin zırh malzemesi olarak kullanılmasının uygun olduğu bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Alümina, balistik, seramik vücut zırhı, seramik zırh



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

BALLISTIC INVESTIGATION OF DIFFERENT SHAPED ALUMINA CERAMIC PLATES

Büşra OKTAVGİL

Bartın University

Graduate School

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Bilal KURŞUNCU

Bartın-2022, pp: 59

People have felt the need to protect themselves against external influences for centuries. Armor also came out in line with this need, and with the advancement of technology, the materials used in the making of the armor also changed. With the latest technology, in the armor production of advanced technology ceramics; They are preferred due to their features such as being light, showing good properties in terms of strength and having the feature of absorbing the energy of the bullet. In this study, it is aimed to obtain armor material by using alumina(Al_2O_3) technical ceramics. It was planned to compress the alumina ceramic powder in the produced molds by pressing, and then combine the samples formed after sintering these samples at a certain temperature and time to obtain armor. As a result of these procedures, it was observed that, as a result of some tests applied, approximately the same values with the literature were obtained, and in some results, better results were obtained compared to the literature. As a result of the evaluations and calculations, the lightness of the alumina ceramic samples and the goodness in terms of

strength in the physics tests were seen, and thus it was found that the use of ceramics as armor material in the defense industry was appropriate.

Keywords: Alumina, ballistic, ceramic armor, ceramic body armor



İÇİNDEKİLER

BEYANNAME	ii
ÖNSÖZ	iii
ÖZET	iHata! Yer işareti tanımlanmamış.
ABSTRACT	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.i
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
TABLolar DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
KISALTMALAR	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
1. GİRİŞ	1
1.1. Balistik	1
1.1.1 İç Balistik	2
1.1.2 Dış Balistik.....	2
1.1.3 Termal Balistik	2
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
2.1. Seramiklerin Özellikleri ve Çeşitleri.....	5
2.2. Önemli Bazı İleri Teknoloji Seramikleri	8
2.2.1 Alümina(Al_2O_3).....	8
2.2.2 Bor Karbür(B_4C).....	8
2.2.3 Silisyum Karbür(SiC).....	9
2.2.4 Magnezya(MgO).....	9
2.2.5 Zirkonya(ZrO_2)	10
2.2.6 Alüminyum Nitrür(B_4C).....	10
2.3. Alümina Seramiklerin Kimyasal Yapısı	11
2.4. Alümina Tozunun Üretim Yöntemleri.....	13
2.4.1 Bayer Prosesi	13
2.4.2 Asidik Yöntemler	15
2.4.3 Elektrotermik Yöntemler	15
2.4.4 İndirgeme Yöntemleri.....	16
2.4.5 Kavurma Metodu	16
2.4.6 Bazik Yöntemler	16
2.5. Alüminanın Mekanik Özellikleri.....	16
2.6. Alüminanın Fiziksel Özellikleri	20

2.7. Alüminanın Elektriksel Özellikleri	22
2.8. Alümina Mineralleri	22
2.9. Alümina Seramiklerin Kullanım Alanları	23
2.10. Alümina Seramiklerin Şekillendirilme Yöntemleri	24
2.10.1 Kuru Şekillendirme	26
2.10.1.1 Kuru Presleme	26
2.10.1.2 Soğuk İzostatik Presleme (CIP)	26
2.10.1.3 Sıcak İzostatik Presleme (HIP)	27
2.10.2 Yaş Şekillendirme (Slip Döküm)	27
2.10.3 Yarı Yaş Şekillendirme	28
3. MATERYAL VE METOT	32
3.1. Toz Seçimi	32
3.2. Kalıp Tasarımı ve Üretimi	33
3.3. Alümina Seramik Numunelerin Presle Şekillendirilmesi	36
3.4. Alümina Seramik Numunelerin Sinterlenmesi	36
3.5. Mekanik Testler	37
3.6. Sinterlenmiş ve Sinterlenmemiş Numuneye Tahribatsız Test	38
3.7. Alümina Seramik Epoksi Yardımıyla Yapıştırılıp Birleştirilmesi	39
3.8. Alümina Zırh Numunesine Balistik Test Uygulanması	40
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	41
4.1. Mekanik Testler	45
4.2. Balistik Test	46
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	54
KAYNAKLAR	57

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
No	No
1.1: Balistik testlerde kullanılan mermiler	1
2.1: İleri seramik malzemelere örnekler	7
2.2: Gibsitten alfa alüminaya faz dönüşüm yolları.....	11
2.3: Böhmit kristal yapısı (Ortorombik).....	12
2.4: Gama alümina kristal yapısı	12
2.5: Alfa alümina kristal yapısı	13
2.6: Oksitli alüminyum minerallerinin çözünme koşulları.....	14
2.7: Bayer prosesi	15
2.8: Boksit cevherinden elde edilen alümina ürünleri	23
2.9: Kuru presleme yöntemiyle şekillendirme	26
2.10: Soğuk izostatik presleme yöntemiyle şekillendirme	27
2.11: Slip döküm yöntemiyle şekillendirme.....	28
2.12: Ekstrüzyon ile şekillendirme yöntemi.....	29
2.13: Enjeksiyon ile şekillendirme yöntemi	30
2.14: Şerit döküm yöntemiyle şekillendirme	30
3.1: Alümina seramik tozu	32
3.2: Yuvarlak şekilli alümina numuneler	33
3.3: Düz şekilli alümina numune.....	33
3.4: 2 farklı şekillerde üretilcek olan numenin pres kalıpları ve montajı	33
3.5: Pres kalıbı montajının kesit detaylı görünümü.....	34
3.6: Yuvarlak geometrili alümina seramik teknik resim görüntüsü	34
3.7: Düz geometrili alümina seramik teknik resim görüntüsü	35
3.8: Kalıpların prese bağlanması hali	36
3.9: Seramiklerin sinterlendiği fırın	37
3.10: Seramik numuneye basma testi uygulanışı	38
3.11: Seramik numuneye sertlik testi uygulanışı.....	38
3.12: Farklı alümina numunelerin saca yapıştırılması.....	39
3.13: Alümina numunelerin saca yapıştırılmış hali	39

3.14: Zırh numunenin son hali	40
3.15: Alümina zırh numunelerine balistik test uygulama sonrası	40
4.1: Presleme sonrası düz şekilli alümina numune.....	42
4.2: Sinterlenme öncesi SEM görüntüsü	43
4.3: Sinterlenme sonrası SEM görüntüsü	43
4.4: Sinterleme sonrası düz geometrili alümina ölçü görüntüleri	44
4.5: Sinterleme sonrası yuvarlak geometrili alümina ölçü görüntüleri	45
4.6: Zırh numunelerine ateş edildikten son ön görüntüsü	47
4.7: Zırh numunelerine ateş edildikten son arka görüntüsü	47
4.8: Merminin yuvarlak şekilli zırha giriş görüntüsü	48
4.9: Merminin düz şekilli zırha giriş görüntüsü	48
4.10: Düz şekilli plakanın yan profili	49
4.11: Düz geometrideki açıklık ölçüsü.....	49
4.12: Yuvarlak şekilli plakaların yan profili	49
4.13: Düz geometrili seramik zırhta merminin yaptığı bombe ölçümü	50
4.14: Yuvarlak geometrili seramik zırhta merminin yaptığı bombe ölçümü	50

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
2.1: Seramiklerin özelliklerinin diğer malzemelerle karşılaştırılması	7
2.2: Bor karbür tozun genel özellikleri	9
2.3: Silisyum karbürün tipik özellikleri	9
2.4: Çeşitli alüminyum mineralleri	13
2.5: Alüminanın kırılma tokluğu değerleri	18
2.6: Alümina oranlarına göre mekanik özellik değişim çizelgesi	19
2.7: Katkılı alüminaların sertlik değerleri.	20
2.8: Alümina faz yapıları ve yoğunlukları.....	21
4.1: Toz özellikleri.	41
4.2: Preslenme sonrası seramik özellikleri.....	41

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

%	: yüzde
°C	: santigrat derece
γ	: gama
κ	: kappa
δ	: sigma
χ	: hi
θ	: theta
°C ⁻¹	: ısı genleşme
Ωm^{-1}	: elektrik iletkenliği
σ	: mukavemet
a ve b	: malzeme sabitleri
cm	: santimetre
E, E ₀	: elastisite modülleri
g/cm ³	: yoğunluk
kg	: kilogram
kg	: malzeme sabitleri
kgf/mm ²	: sertlik(vickers)
K _I	: kırılma tokluğu indeksi
K _{IC}	: kritik gerilme şiddet faktörü veya kırılma tokluğu
K _X	: tane büyüklüğü faktörü
MPa	: megapascal
P	: gözenek oranı
r ₀	: atomlar arası mesafe (m)
GPa	: gigapascal
Γ	: yüzey enerjisi
μm	: mikrometre

KISALTMALAR

atm	: Atmosfer basıncı
CIP	: Cold Isostatic Pressing
CNC	: Computer Numerical Control
HIP	: Hot Isostatic Pressing
NAS	: Sodyum sülfür bataryaları
NIJ	: Ulusal Adalet Enstitüsü
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu



1.GİRİŞ

Günümüzde ileri teknoloji seramiklerin yüksek sıcaklıklara karşı dayanımları, sertliklerinin yüksek olması, aşınmaya karşı yüksek direnç göstermeleri gibi üstün özelliklerinden dolayı özellikle savunma sanayiinde kullanımı gittikçe artmaktadır.

Seramiklerin metallere göre daha hafif olması zırh uygulamalarında kullanılmaya başlanmasının çok büyük etkenidir. Böylece seramikler; çalışmalar sonucu geliştirilmiş, uygulama alanları genişletilmiştir.

Alümina(Al_2O_3); bir ileri teknoloji seramiği olup yüksek sertliğe, düşük yoğunluğa, ısısal kararlılığa, korozyon dayanımına sahiptir ve diğer seramik türlerinden daha ekonomiktir(Krishnan et al. 2021). Bu yüzden tercih edilme yüzdesi fazladır. Her ne kadar alümina en ekonomik ileri teknoloji seramik türü olsa da, bu alandaki araştırma ve geliştirme faaliyetleri oldukça pahalı ve biz de dâhil olmak üzere gelişmekte olan diğer ülkeler de yeterli yatırımı sağlayamamaktadır.

Alümina seramikleri çeliklerden daha yüksek mukavemetli olduğundan balistik dirençleri daha fazladır. Son yıllarda yapılan balistik testler sonucunda bunları açık ve net görmekteyiz.

1.1 Balistik

Balistik, fişegin ateşlenmesi ile mermi çekirdeğinin namludan çıkıp hedefe ulaşmasına kadar olan atmosferik koşullarda yerçekiminin de etkisiyle yapmış olduğu hareketlerini, hedef üzerindeki tahribatlarını ve mermi çekirdeğinin bu hareketine etki eden faktörleri inceleyen bilim dalıdır(Cerit 2004). İç balistik, dış balistik ve terminal balistiği olarak üçe ayrılmıştır.



Şekil 1.1: Balistik testlerde kullanılan mermiler (Tan and Khoo 2005)

1.1.1 İç Balistik

Silahlarda ateşlemenin başlangıcından, silah namlusundan merminin ayrılışına kadar merminin ayrılışına kadar meydana gelen olayların tümüne iç balistik denir. Çok kısa bir süre içerisinde gerçekleşen bu olay; ateşli silah, fişek, fişegin ateşlenmesi, barutun yapısı ve yanma hızı, ses seviyesi ve etkisi, namlu yapısı ve boyutları, namluda bulunan setlerin yapısı ve set sayısı ile ilgilenir (R. Güneş, J.N.Reddy , Aydın M., Arslan K. 2015).

1.1.2 Dış Balistik

Mermi çekirdeğinin namlıdan çıkıp hedefe çarpıncaya kadar geçen zaman içerisinde oluşan olaylarla, yani mermi çekirdeğinin yörüngesi ve bu yörünge üzerindeki hareketi ile ilgilenir. Yer çekimi etkisi, hava direnci, mermi çekirdeğinin düşüşü, dengesi ve sapması ile ilgilenir(Gündüzer 2011).

1.1.3 Termal Balistik

Mermilerin hedef üzerinde meydana getirdiğı etkileri inceler. Bu etkiler; zırhlı hedeflerin delinmesi ve parçalanması, hedefte parça tesiri, hedefte patlama etkisi, hedefte yangın tesiri, hedefin aydınlatılması, sis, zehirli gaz ve radyoaktif etkilerdir. Hedef balistiğı olarak da anılır(Gündüzer 2011).

2.LİTERATÜR ÖZETİ

İnsanoğlu, var olduğundan beri kendini dış etkilere ve olumsuzluklara karşı koruma ihtiyacı duymuş, bu sebeple de çeşitli önlemler almıştır. Bu önlemlerden biri de zırhtır. Zırhlar yüzyıllardır farklı türde kullanılmıştır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte zırhlarında gelişimi günümüze kadar devam etmektedir. Böylece tarihin değişik dönemlerinde insanlar kimi zaman zırhları deriler, kimi zaman da çelik kullanarak geliştirip güçlendirmeyi hedeflemişlerdir.

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).

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. Bu seramiklerde karbür seramikler, heterojen seramik malzemeleri ve homojen oksit bulundurmuş, kullanmış olduğu bu ileri teknoloji seramiklerinden mermiye dayanıklı zırh elde edileceğini görmüştür.

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 katmanı çift fazlı çeliğin balistik koruma seviyesine arttırdığı gözlemlenmiştir.

İleri teknoloji seramiklerin zırh sistemindeki rolü; yüksek sertliğe sahip oldukları için ön katmanda bulunup, merminin kinetik enerjisini sönümleyip mermiyi köreltmektir. Celal Evcı ve Müfit Gülgeç çalışmalarında, alümina seramiğinin; mermiyle teması sonucu, plastik deformasyonla birlikte merminin körelip deformasyona uğramasına yol açmıştır. Böylece mermideki kinetik enerjinin sönümlendiği görülmüştür(Evcı and Gülgeç 2014).

Monteiro ve arkadaşları, $Al_2O_3-Nb_2O_5$ seramik zırhına balistik test uygulamıştır. Bu testte 7.62mm zırh delici mermi kullanmıştır. Elde edilen verilere göre seramik katmanın mermideki yüksek darbe enerjisini dağıttığı ortaya çıkmıştır(Monteiro et al. 2016).

Zırhlarda seramiklerin kalınlıkları da balistik performansı etkilemektedir. Kalınlık arttıkça merminin yüzeye temas süresi artıp merminin enerji sönümlenmesi gerçekleşir ve mermideki körelme daha fazla olur. Baha Tepedüzü ve Ramazan Karakuzu çalışmasında, farklı kalınlıktaki seramiklere balistik test uygulayıp, kalınlığı daha fazla olan seramikte merminin daha fazla körelip, seramik yüzeyindeki hasarın daha az olduğunu gözlemlemişlerdir(Tepeduzu and Karakuzu 2019).

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 ağırlıkça %92, %96, %99 alüminalardan oluşan plakalardan elde edilen mukavemet değerlerini karşılaştırdığında ise en iyi ve en yüksek mukavemet değerlerinin %99 da olduğunu görmüştür(Silva et al. 2014).

Alümina ve diğer seramik tozlarının minimum boşluksuz bir şekilde birleşmesi önemlidir. Preslenmeden hemen sonra sinterleme olayı gerçekleşir ve sinterleme sıcaklıkları bu boşlukları etkileyerek seramiğin mukavemeti üzerinde değişikliklere sebebiyet verir. İleri teknoloji seramiklerin sinterleme sıcaklıkları çok yüksektir. Alüminaya baktığımızda yaklaşık 1500 ile 1600 °C arasında sinterlenmelidir. Yapılan bir çalışmada; ağırlıkça %2 MgO ve %2 TiO_2 katkılı alüminalar 1300 ve 1400 °C de sinterlenmiş fakat istenilen sonuçlar elde edilememiştir. Aynı alümina, 1500 °C de sinterlendiğinde ise iyi sonuçların 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. Böylece seramiklerin düz değil de konkav, yani dış bükey olmaları her zaman daha avantajlıdır. Yapılan araştırmalarda halen en ideal zırh şekline ulaşılammıştır fakat araştırmalar gittikçe yaklaşıldığını göstermektedir. M.A.Akdoğan ve O.S.Türkbaş yapmış oldukları çalışmada; konkav ve düz şekilli iki alümina zırha, zırh delici mermiyle balistik test uygulamışlardır. Varılan sonuçlarda; konkav seramik zırhın hasar dağılımı daha küçük olduğu, konkav seramik zırhın, düz yüzeyli seramik zırha göre zırh delici merminin kinetik enerjisini daha iyi ve daha kısa zamanda sönümlediği 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 sitemlerin 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 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 dayanıklıdırlar. 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.

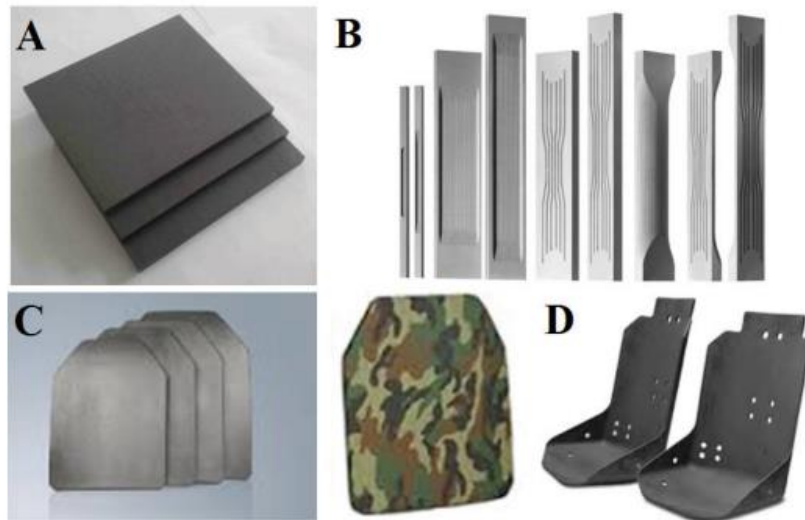
Seramikler metal ve ametal (metal olmayan) elementlerin birbirlerine birinci derece iyonik veya kovalent bağıyla bağlandığı inorganik, metal dışı malzemelerdir. Kimyasal bileşimi, basit bileşiklerden karmaşık fazlara kadar geniş bir aralıkta değişir. Bileşimlerinde doğada bol olarak bulunan metal oksitleri, 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 direnci yüksektir. İletim elektronları içermediğinden, elektrik ve ısıyı iyi yalıtır. Atomik bağ yapıları nedeniyle kimyasal olarak kararlıdır ve erime 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 2.1’ de verilmiştir.

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

Tablo 2.1: Seramiklerin özelliklerinin diğer malzemelerle karşılaştırılması (İlgar 2008)

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).(20)

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).

2.2 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.

2.2.1 Alümina (Al_2O_3)

Alümina, oksit esaslı seramik türüne girer ve alüminanın keşfi geçen yüzyıla dayansa da, üretimine 1907 yılında başlanmış olup yayılımı 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).(21)

2.2.2 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. Oldukça sert ve elmaştan daha ekonomik olması sayesinde parlatıcı ve aşındırıcı olarak da kullanılmaktadır. Oldukça fazla avantajının yanında gevrek kırılmaya karşı hassasiyeti gibi bir dezavantajı vardır. Düşük kırılma tokluğuna sahip malzeme üretilmesindeki sinterleme koşullarını sağlamak zordur.

Özellik	Birim	Değer
Yoğunluk	g/cm ³	2.52
Sertlik	Kgf/mm ²	2900-3580
Kristal Yapı		Rombohedral
Ergime Sıcaklığı	°C	2450
Isıl Genleşme	°C'	5x10 ⁶
Elektrik İletkenliği	□ ¹ m ¹	140

Tablo 2.2: Bor karbür tozun genel özellikleri(Ergün 2006)

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

2.2.3 Silisyum Karbür (SiC)

Silisyum karbür de karbür seramikleri türlerindendir. Yüksek aşınma direnci, düşük ısı genleşme katsayısı, ısı iletkenlik ve yüksek sertlik gibi özelliklere sahiptir.

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

Tablo 2.3: Silisyum karbürün tipik özellikleri (Ergün 2006)

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

2.2.4 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)

2.2.5 Zirkonya (ZrO₂)

Zirkonyum seramiğinin genel özellikleri;

1)Yüksek yoğunluk ($6.1 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$),

2) Düşük ısı iletkenliği - alümina seramiğin % 10' u kadar,

3) Yüksek kırılma tokluğu,

4) Çok yüksek eğilme dayanımı ve sertlik,

5) Yüksek maksimum hizmet sıcaklığı 2400 °C,

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)

2.2.6 Alüminyum Nitrür (AlN)

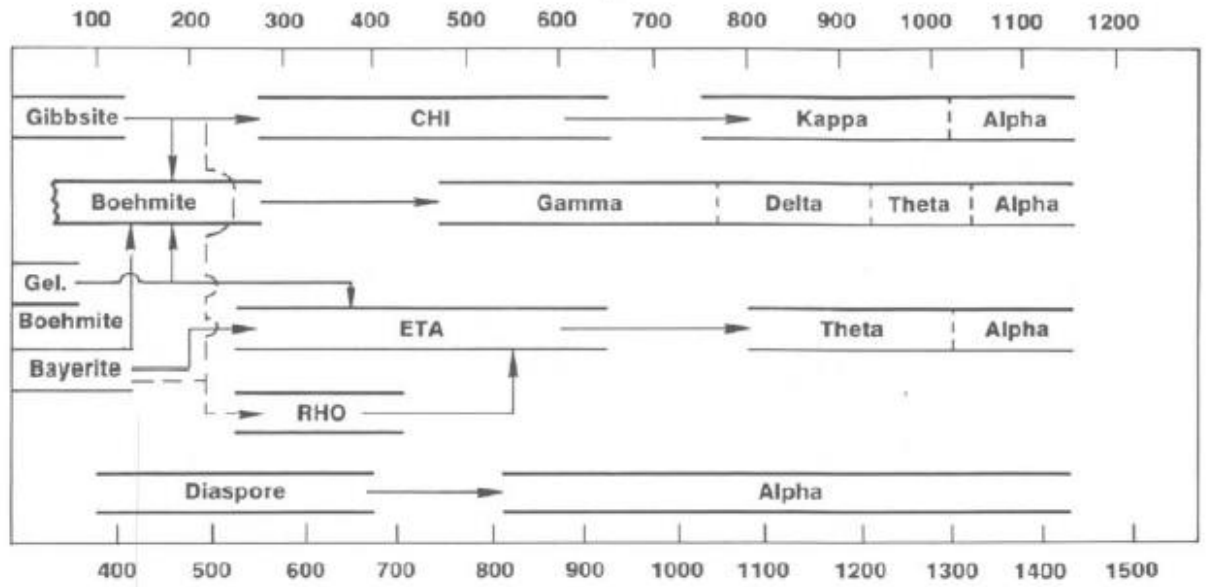
Alüminyum nitrür, yüksek güç elektronik modülleri için ana malzeme olarak kullanımı görülmektedir. Yüksek ısı iletkenlik ve yüksek elektrik direncine sahiptir.

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

2.3 Alümina Seramiklerinin Kimyasal Yapısı

Alümina; yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci, kimyasal ve ısıl kararlılık ve ısıl kararlılık, düşük yoğunluk gibi mükemmel özellikleri sayesinde sıkça tercih edilen ve doğada bulunabilen korund diye adlandırılan bir mineraldir. Amfoterik bir malzemedir; γ , κ , δ , χ , θ - Al_2O_3 gibi geçiş fazları ve alfa alümina kararlı geçiş fazı bulunmaktadır(Güldoğan 2014). Geçiş fazları kararlı değildir.

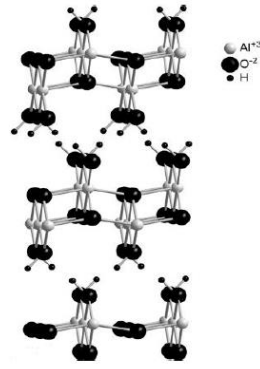
Kararlı alfa alümina fazı, alüminyum hidroksitin kararlı fazı olan gibsitin dehidrasyonu ile gerçekleşir. Bu süreç, $\text{Al}(\text{OH})_3$ ' in su moleküllerinin kaybederek gerçekleşir(Güldoğan 2014). Alfa alümina fazı ticari uygulamalarda tercih edilen alümina şeklidir.



Şekil 2.2: Gibsitten alfa alüminaya faz dönüşüm yolları (Güldoğan 2014).

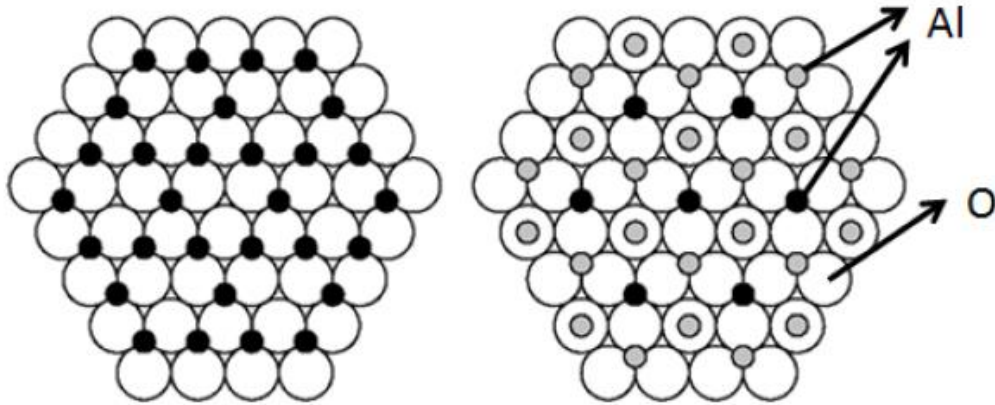
Şekilde 3'te görüldüğü gibi en son alfa alüminaya dönüşmekte, arada ara faz alüminalar görülmektedir.

Böhmit(AlOOH), gibsit tozunun kalsinasyon ile dehidrasyona uğratılıp üretilmesidir ve %85 alümina %15 sudan oluşmaktadır(Güldoğan 2014).



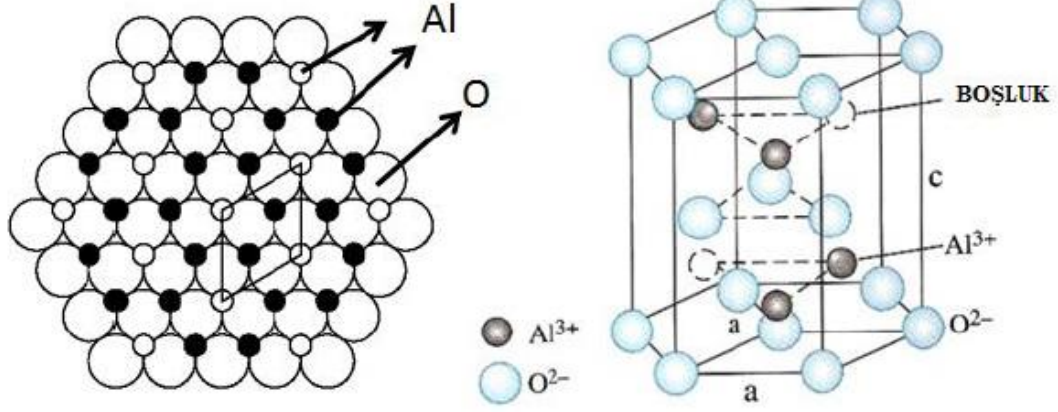
Şekil 2.3: Böhmit kristal yapısı (Ortorombik) (Güldoğan 2014).

Gama alüminanın üzerinde yoğun çalışmalar yapılmış olup genellikle rafinasyon sürecinde katalizör ya da desikant olarak kullanımı görülmektedir(Güldoğan 2014). Yapısında %52.9 alüminyum %47.1 oksijen vardır. Kristal yapısı FCC(yüzey merkezli kübik) dir. Şekilde ABCABC dizilmesiyle siyah renkli Al atomları oktahedral boşlukların 2/3'ünü, gri Al atomları tetrahedral boşlukları doldurduğu görülmektedir(Güldoğan 2014).



Şekil 2.4: Gama alümina kristal yapısı (Güldoğan 2014).

En son olarak ulaşılan alfa alümina fazı termodinamik olarak her sıcaklıkta kararlı olan alüminanın tek fazı olup, ticari uygulamalarda kullanılan alümina şeklidir. Şekilde gösterildiği gibi trigonal kristal yapısından hegzagonal sıkı paket yapıdır(Güldoğan 2014).



Şekil 2.5: Alfa alümina kristal yapısı(Güldoğan 2014) .

2.4 Alümina Tozunun Üretim Yöntemleri

Yerkabuğunda 200'den fazla çeşit alüminyum minerali bulunmaktadır. Bazı alüminyum mineral çeşitlerinin özellikleri Tablo 2.4'te gösterilmiştir(Kıran 2006).

MİNERAL	KİMYASAL FORMÜL	% Al	SERTLİK	ÖZGÜL AĞIRLIK
Boksit	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	34.9	1-3	2.6
Böhmit	AlOOH	45.6	2-3	2.5
Jipsit	$\text{Al}(\text{OH})_3$	34.6	2-3.5	2.4
Diaspor	$\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	47.0	6.5-7.0	3.4
Zımpara	Al_2O_3	52.9	9	3.9-4.4
Alunit	$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Al}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 4\text{Al}(\text{OH})_2$	19.6	3.8	2.7
Kriyolit	Na_3AlF_6	13	2.5	3.0
Kil ve Kaolen	$\text{H}_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_9$	20.0	2-2.5	2.6
Disten	Al_2SiO_2	33.3	4-7	3.6

Tablo 2.4: Çeşitli alüminyum mineralleri (Kıran 2006)

Alüminyum mineralleri içinde farklı alüminyum hidratlarının karışımından oluşan boksit kullanılarak Bayer prosesi ile üretilen alüminalar, dünyanın ticari anlamda alümina ihtiyacının çoğu karşılanmaktadır.

2.4.1 Bayer Prosesi

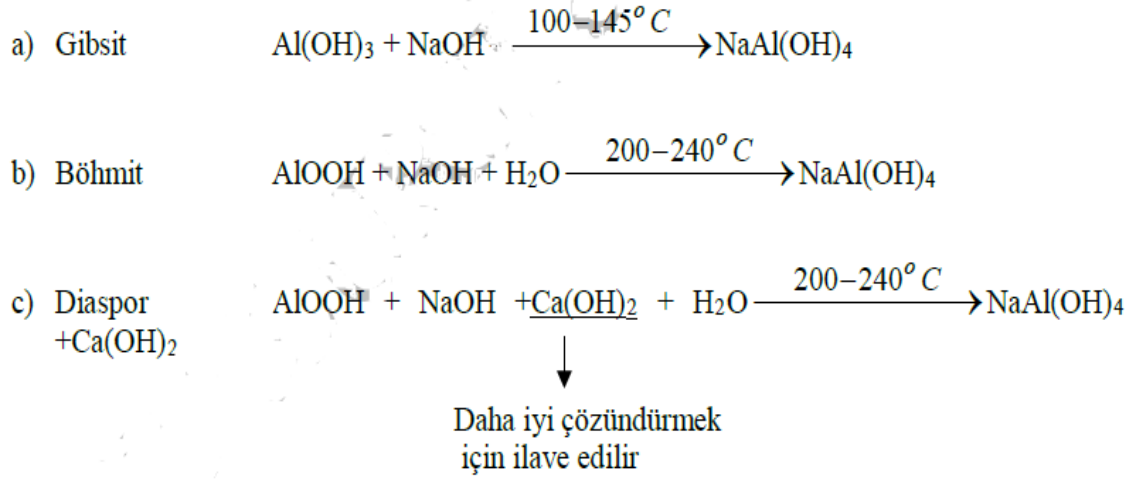
Bayer prosesi çok uzun zamandan beri kullanılan bir yöntem olup yerine farklı bir yöntem tam olarak bulunamamıştır ve alümina üretiminde bayer prosesi günümüzde %90'dan fazlasını karşılamaktadır ve gün geçtikçe gelişerek alümina üretiminde liderliğini sürdürmektedir. Bayer prosesinde hammadde olarak kullanılan boksit alüminyum oksit ve hidroksitlerin bir karışımıdır. Her boksit yatağı farklılık gösterebilir. Boksitler, diyasporit

(Al₂O₃, H₂O), böhmit (AlO(OH)), gibsit (hidrarjilit) (Al(OH)₃) minerallerinin bir karışımı olup genellikle silis, demir oksitler, TiO₂ içermektedirler.

Bayer süreci üç kademeli olarak gerçekleşen bir süreçtir;

1. Çözündürme
2. Çöktürme
3. Kalsinasyon

Çözündürme sürecinde boksit içindeki yaklaşık %55-60 Al₂O₃ ve 1mm' nin altında öğütülmüş boksitler, diğer maddelerden ayrılabilmek için 250 °C ve 4 N/mm² basınç altında kostik soda çözünme işlemi gerçekleşir. Bu işlem sonunda çözünemeyen maddeler filtrasyon ile dışarı atılır.

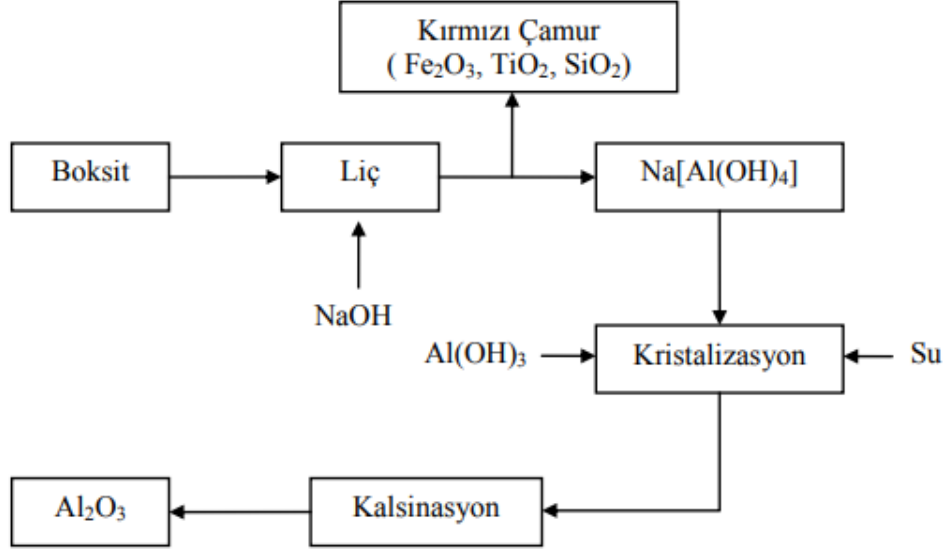


Şekil 2.6: Oksitli alüminyum minerallerinin çözünme koşulları(Cöcen n.d.)

Çöktürme işleminde çözelti içindeki alüminyum hidroksit çöktürülür ardından yıkanıp kurutulur. Bu sırada kostik çözelti ayrılır ve tekrar kullanılmak için tekrar sisteme geri gönderilir.

Kalsinasyon işlemi yaklaşık 1200-1300 °C sıcaklığında fırınlarda gerçekleşir ve α-Al₂O₃ oluşuncaya kadar kalsine işlemi gerçekleşir. Alüminyum hidroksit çökeltisi kalsine edilerek ince ve beyaz renkli alüminalar elde edilir. Bu elde edilen ürünler öğütücülere verilir ve 3,5-5 atm basınç altında yaklaşık 160-170 °C altında NaOH ile reaksiyona sokulur. İşlem sonrasında çözünemeyen NaOH süzülür. Na-Al çözeltisi soğutulup çökeltme tanklarına alınır. Çökeltme tankında çözeltiye Al₂O₃.3H₂O katılarak Al₂O₃'ün

%75 i çöktürülür. Sonrasında çökelti çözeltiden ayrılır kurutuculara iletilir. Kurutucudan gelen Al_2O_3 kalsinasyon yöntemi ile %99,55 saflığında elde edilir(Cöcen n.d.)(Çınaz 2012).



Şekil 2.7: Bayer prosesi(Çınaz 2012)

2.4.2 Asidik Yöntemler

Bu yöntemde, bayer prosesinde silikasızlaştırılması zor olan düşük verimli silisli boksit cevherleri daha verimli kullanılabilmesi amacıyla asidik çözeltilerle çözündürme yöntemi kullanılmaktadır. Yüksek silisli boksit cevherine sahip ülkeler bu yöntemle boksit cevherini değerlendirmektedir(Kıran 2006)(İlgar 2008).

HCl, HNO₃ ve H₂SO₄ gibi çözeltiler kullanılarak kullanılan aside göre; AlCl₃, Al(NO₃)₃ veya Al₂(SO₄)₃ çözeltileri elde edilir. Daha sonra bu çözeltilerin buharlaştırılıp kalsinasyonu ile Al₂O₃ eldesi görülmektedir(İlgar 2008).

Bu yöntemin dezavantajları arasında; sistemin aside dayanıksızlığı yani asidin korozyona sebep olması, çıkan üründe yüksek miktarda demir bulunması ve asidin tekrar kullanımındaki azlık gösterilebilir(İlgar 2008)(Kıran 2006).

2.4.3 Elektrotermik Yöntemler

Bu proses, katkı maddesine bağlı olarak alüminatların (CaO. Al₂O₃ veya BaO. Al₂O₃) elektrolit metotlarla alüminaya çevrilmesi işlemidir. Bu proseste çok fazla enerji tüketimi

olduğu için pek tercih edilmemekle birlikte üretilen alüminyum da istenilen özellikleri karşılayamamaktadır.(Kıran 2006)(İlgar 2008)

2.4.4 İndirgeme Yöntemleri

Bu yöntemle endüstrideki yan ürünler değerlendirilebilmekte ve pedersen prosesi, baryum prosesi olarak çeşitli yöntemleri mevcuttur(İlgar 2008).

2.4.5 Kavurma Metodu

Bu yöntemde kireç-soda prosesi ya da sülfat-soda prosesi ile boksit; kireç taşı, sodyum sülfat, baryum karbonat gibi maddelerden herhangi biriyle karıştırılıp fırınlarda kavrulur. Daha sonra alkali alüminat oluşur, trihidroksit alümina çöktürülür(İlgar 2008).

2.4.6 Bazık Yöntemler

Bu yöntemdeki toz haldeki boksiti NaOH veya Na₂CO₂ çözeltilerinde çözülüp, CO₂ gazı çıkar, sodyum alüminat çözeltisi içinde titanyum, demir, kalsiyum oksitler kalıntı olarak kalırlar. Diğer bileşenlerden silis kısmen çözeltiye geçer ve bu aktif silistir. Çözünmeyen SiO₂ ‘ ye de serbest silis denilmektedir(İlgar 2008).

2.5 Alüminanın Mekanik Özellikleri

Alümina; oksit seramik malzemesi olup, diğer oksitli seramik malzemelere göre üstün mekaniksel özellikler sergiler. İleri teknoloji seramiklerine bakıldığında içlerinde en ekonomik olarak alümina bulunduğundan kullanım oranı da diğerlerine göre nispeten daha fazladır. Alüminanın değişik modifikasyonları olmasına rağmen, ticari kullanımda α -Al₂O₃ kullanılmaktadır.

Mekanik özellik denildiğinde; malzemelerin en temel mekanik özelliği olan, hataların, gözenekliliğin ve deformasyonların üzerinde büyük etkisi olan elastisite modülü(E) akla gelmektedir.

Seramik malzemelerde bu etki üretim esnasında oluşan boşluk ve gözenek gibi hatalara neden olmaktadır. Sinterlenme sırasında ani ve hızlı sıcaklık değişimleri ısıl gerilmelere sebep olur, böylece çatlaklar meydana gelmektedir. Çatlaklar, gevrek bir malzemenin yüklenmesi sonucu tanelerin elastik anizotropisinden veya tek bir kayma sisteminde kolay kaymanın gerçekleşmesiyle de meydana gelebilmektedir.

$E=E_0 \cdot e^{-b \cdot P}$ gözenegin elastik modüle etkisi ifadesidir(Palacı 2001). E_0 teorik elastisite modülü, $b=3.5$ (sabit), P ise gözenek oranını göstermektedir. Alümina faz oluşumlarında da elastisitenin rolü önemlidir. İkinci faz oluşum durumunda 1400°C 'ye kadar olan yüksek sıcaklıklarda elastisite sonuçları oldukça farklılık göstermiş olup, alüminanın safsızlığı da elastisiteyi etkilemektedir.

Teorik mukavemeti elastisite modülü(E) yardımıyla bulmak mümkündür;

$$\sigma = \sqrt{(E\Gamma)/r_0} \quad (\text{Palacı 2001})$$

σ = Mukavemet(N/m^2)

E = Elastisite Modülü(N/m^2)

Γ = Yüzey Enerjisi(N/mm) malzemeye göre değişiklik göstermektedir.

r_0 = Atomlar Arası Mesafe(m)

temsil etmektedir.

Bu formüle göre alüminanın teorik mukavemetini hesaplarsak;

$$E = 4.1 \times 10^{11} \text{ N/mm}^2$$

$$\Gamma = 1.2 \text{ N/m}$$

$$r_0 = 2.7 \times 10^{-6} \text{ m'den};$$

$$\sigma = 4.3 \times 10^{10} \text{ N/m}^2 \text{ olarak bulunur.}$$

Seramiklerde tane boyutunun büyümesi mukavemeti düşürmekte ve bu bağlantı Hall Petch bağıntısı ile açıklanabilmektedir.

$$\sigma = k\sqrt{\phi}^{-1/2} \quad (\text{Palacı 2001}) \quad \text{Burada};$$

k = Sabittir ve malzemeye göre değişebilir.

ϕ = Tane Boyutu

Seramiklerde gözenekliliğin ve tane büyüklüğünün mukavemet üzerindeki etkisi ise şu bağıntı ile çözülebilmektedir;

$$\sigma = K_x \phi^{-a} e^{-Bp} \quad (\text{Palacı 2001}) \quad \text{Burada};$$

σ = Mukavemet

ϕ = Tane Çapı

p = Gözenek Oranı

K_x = Tane Büyüklüğü Faktörü

a, b = Malzeme sabitleridir.

Seramikler gevrek, sert ve mukavemetleri yüksek malzemelerdir. Alümina içinde aynı özellikler geçerli olup, Al_2O_3 oranı arttıkça mukavemet, sertlik ve kırılma tokluğu da artış göstermektedir(Auerkari 1996).

Seramik malzemelere uygulanan gerilmeler, çatlak uçlarında gerilme yoğunlaşması meydana getirir ve bu bir enerjiye dönüşür. Böylece bu enerji çatlağın ilerlemesine ve büyümesine sebebiyet vermektedir. Buna K_I kırılma tokluğu indisi adı verilmiştir. Uygulanan gerilmeler arttırılmaya devam ederse malzeme bu yükse dayanamayıp kopmakta ve bu noktadaki gerilmeye kritik gerilme, kırılma indisine K_{IC} yani kırılma tokluğu denmektedir.

$$K_I = \sigma \sqrt{c} \quad (\text{Palacı 2001}) \quad \text{Burada;}$$

$$K_I = \text{Kırılma Tokluğu İndisi} (MN.m^{-3/2} = MPa.M^{-1/2})$$

$$\Theta = \text{Çatlak veya Numune Geometrisi Faktörü}$$

$$C = \text{Çatlak Boyu(m)}$$

$$\sigma = \text{Uygulanan Gerilme}(N/m^2)$$

Denklem yüzeydeki çatlaklar için tekrardan düzenlenirse, $\theta = \sqrt{\pi}$ ifadesi kullanılır. Böylece denklem;

$$K_{IC} = \sigma \sqrt{\pi c} \quad (\text{Palacı 2001}) \quad \text{denklemine dönüşür. Burada;}$$

$$K_{IC} = \text{Kritik gerilme şiddet faktörü veya kırılma tokluğu}$$

$$\sigma = \text{Gerilme}$$

Bu denklemde gerilme (σ) yerine denklemdeki $\sqrt{(E\Gamma)/r_0}$ ve r_0 yerine de $c\pi/2$ çatlak boyu koyularak tekrardan bağlantı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$K_{IC} = \sqrt{(2xE\Gamma)} \quad (\text{Palacı 2001})$$

Seramik malzemelerde, kırılma tokluğu metallerin yaklaşık ellide bir K_{IC} oranına sahiptir. Alüminalarda K_{IC} değeri kristallere, tane büyüklüğüne ve atomsal düzleme göre değişkenlik göstermektedir.

Malzeme	$K_{IC}(MN.m^{-3/2})$
Al_2O_3 -tek kristalli	2,38-4,54
Al_2O_3 -çoklu taneli	3,80-5,10

Tablo 2.5: Alüminanın kırılma tokluğu değerleri(Palacı 2001).

Alümina çift fazlı teknik seramiklerde, içeriğindeki alümina oranı mekanik özellikleri oldukça etkilemekte ve bu özellikler neticesinde alüminanın kullanım yerine göre alümina

miktarı en doğru olan alümina teknik seramiği seçilmelidir. Tablo 2.6.'da alümina oranına göre mekanik özellik değişim tablosu gösterilmiştir.

Alümina(%Ağırlık)	85	95	>99,5
Elastisite Modülü(GN/m ²)	210	400	400
Basma Mukavemeti(N/mm ²)	2000	3000	4000
Eğme Mukavemeti(N/mm ²)	250	300	400
Çekme Mukavemeti(N/mm ²)	120	240	360
Vickers Sertliği(N/mm ²)	1.5x10 ⁴	1.9x10 ⁴	2.3x10 ⁴

Tablo 2.6: Alümina oranlarına göre mekanik özellik değişim çizelgesi(Palacı 2001).

Tabloda görüldüğü üzere Al₂O₃ içeriği arttıkça mukavemet, sertlik, elastisite modülü gittikçe artmaktadır. Kırılma tokluğu da aynı şekilde artmaktadır.

Teknik seramiklerde mekanik özellikleri en çok etkileyen etken ise de alüminaların üretimi ve işlenmesidir. Yapılan araştırmalarda üretilen alüminanın yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için uygulanan taşlama işleminde kesici elmas taşların tane büyüklüğünün mukavemet üzerinde etki ettiği görülmüştür. Bu etki elmas taşların yüksek basma kuvvetiyle yüzeyde oluşan gerilme sayesinde mukavemette %10 azalma oranı olduğu bulunmuştur(Palacı 2001).

Alümina günümüzde çok tercih edilmekte ve birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Metallerle göre sertlik dereceleri daha yüksek olduğundan sertliğin önemli ve gerektiği yerlerde metallerini yerini almıştır. Fakat alüminaların sertlik değerlerini etkileyen parametreler de vardır. Alüminaya katılan katkı maddeler, yoğunluk, uygulanan yük, tane çapı, ikinci faz gibi değişkenler sertliği önemli derecede etkilemektedir. Yapılan çalışmalar sonucu çıkan sonuçlar Tablo 2.7'de verilmiştir.

Katkı(%)	Yoğunluk(%)	Tane Çapı(μm)	Yük(kg)	Vickers Sertlik(kg/mm ²)
Beyaz	-	Mak.200	1	1346-1468
Pembe	-	2.3-10	1	907-1529
Kahverengi	-	10	1	1315-1458
-	100	2	1	1885±129
-	96-97	Orta	1	1202±253
-	93.2-95.6	0.5-5	0.3	2077-2264
TiO ₂ (3)	95-97	7	0.3	2219-2388
MnO ₂ (3)+TiO ₂ (0.5)	98.2-98.5	10-30	0.3	1858-2350
MnO ₂ (0.5-1.5)	88.2-98.1	0.5-50	0.3	1567-2238
Cr ₂ O ₃ (0.5-1.5)	74.1-96.9	0.5-3	0.3	1360-2597
Cr ₂ O ₃ (2-5)	>98	5	0.2	1653-1738

Tablo 2.7: Katkılı alüminaların sertlik değerleri(Palacı 2001)

2.6 Alüminanın Fiziksel Özellikleri

Tamamiyle amorf yapıda olan rho alümina gibsittin vakumla ısıtılmasıyla elde edilir.

Chi alümina, gibsittin nitrojen veya havada en yavaş geçiş fazıdır ve kübik yapılıdır. Aynı şekilde yine gibsitten elde edilen gamma alümina, yavaş dehidrasyon tetragonal yapıda olurken, hızlı bir şekilde gerçekleşen ısıtım işlemi kübik yapıya neden olmaktadır(Tambaş 1998).

Tablo 2.8’de diğer alümina yapılarının yapısı gösterilmiştir.

Faz	Formül	Yoğunluk(g/cm ³)	Kristal Sistem	Hücre Parametresi		
				a	b	c
Geçiş Alüminalleri						
Chi		3.0	Kübik	7.95		
Eta		2.5	Kübik	7.90		
Gamma		3.2	Tetragonal	7.95	7.95	7.79
Delta		3.2	Tetragonal	7.96 7	7.96	23.47
Teta		3.5	Monoklinik	5.63	2.95	11.86
Kappa		3.3	Ortorombik	8.49	12.7	13.39
Korund	α -Al ₂ O ₃	3.98	Hekzagonal	4.75 8		12.991
Beta Alüminalleri	Na ₂ O·11Al ₂ O ₃	3.25	Hekzagonal	5.58		22.45
	K ₂ O·11Al ₂ O ₃	3.33	Hekzagonal	5.58		22.67
	MgO·11Al ₂ O ₃	3.7	Hekzagonal	5.56		22.55
	CaO·6Al ₂ O ₃	3.73	Hekzagonal	5.54		21.83
	BaO·6Al ₂ O ₃	3.69	Hekzagonal	5.58		22.67
Zeta Alümina	Li ₂ O·5Al ₂ O ₃	3.61	Kübik	7.90		

Tablo 2.8: Alümina faz yapıları ve yoğunlukları(Tambaş 1998)

Mühendislik alanında kullanılan alfa alüminanın(korund), oksijen iyonları sıkı paket hegzagonal yapıdadır(Tambaş 1998). Görüntü olarak beyaz bir toz olarak görülmektedir. Ergime sıcaklığı 2050°C, kaynama sıcaklığı ise 2080°C'dir

Alüminanın oluşum serbest enerjisi -1582,4 kJ/mol'ken reaktif indeksi 1.765'dir. Molekül ağırlığı ise 101,96g/mol'dür.

Alümina, HF'ye karşı dayanıklıdır. Aynı zamanda 1700-1800°C sıcaklıklarda flor gazı hariç diğer gazlara karşı direnç göstermektedir. Suda iyi kalsine edilmiş alümina baz ve asitlerde de çözülmezler(Yürüyen 2011).(T05286)

2.7 Alüminanın Elektriksel Özellikleri

Alümina, 35Kv/mm gibi yüksek bir dielektrik direncine sahip yalıtkan bir malzemedir. Sıcaklık arttıkça elektrik direnci de düşmektedir. Sıcaklığın yanında alkali içeriği, faz dağılımı ve ana fazlardan da elektrik direnci etkilenmektedir. Alüminanın bu özelliğinden dolayı düşük ve yüksek gerilim ızalatörleri olarak kullanımı sıklıkla rastlanan bir durumdur. Dielektrik, doğrusal elektrik akımının iletilmediği malzemelerdir. 12'nin altındaki dielektrik sabitleri ızalatör, 12'nin üstünde ise kapasitör olarak adlandırılmaktadır. Alümina 8.8 ile ızalatör konumunda yer almaktadır(Tambaş 1998).

Dielektrik mukavemet, uygulanan elektrik alanı altındaki ızalatörün dielektrik bozunumudur. %90 alüminalı teknik seramiklerin dielektrik mukavemetlerini normal olgunlaşma sıcaklığından yeniden ısıtıldığında ve hızlı soğumayla %32 oranında artırılması sağlanabilir. Aynı şekilde bu tip artış fiziksel mukavemette de görülmektedir. Isıtma sonrası ani soğutma işlemi cam fazını arttırarak tane sınırlarındaki gerilimi minimum seviyede tutar ve böylece çok kristalli alüminalarda dielektrik mukavemeti cam fazını arttırma yoluyla da arttırılmış olduğu görülür(Tambaş 1998).

2.8 Alümina Minarelleri

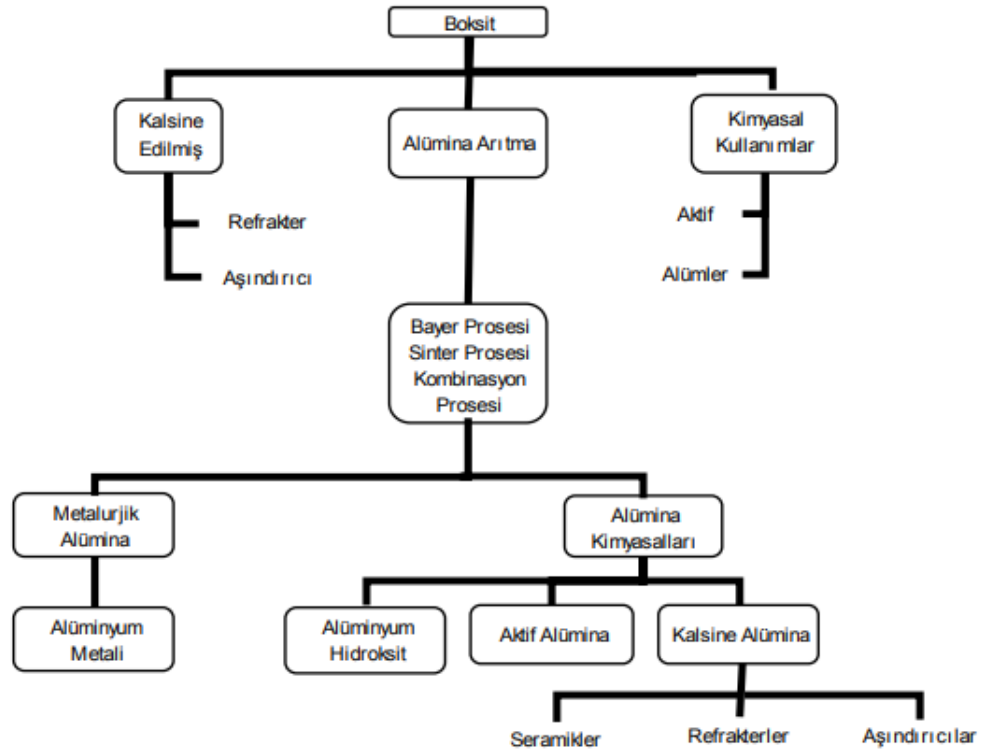
Şu ana kadar tabiatta 250 farklı cinste alüminyum minerali olduğu keşfedilmiş, bunların %40'ı alüminyum silikatlardır. Alümina, genellikle hidroksitlerin karışımından oluşan, boksit denilen-gibsit, böhmit, ve diaspor gibi hidroksit minerallerinin karışımıyla elde edilen mineralden oluşur. Silikat mineralleri silikat ve oksit karışımları halinde ortaya çıkar ve korund ile birlikte çok sağlam yapılı bileşikler olduğundan alüminyum üretiminde kullanılması tercih edilmez. Bunun yerine, birincil oluşumlar olarak bilinen silikat

bileşimli kayaçları meydana getiren ve belirli değişimler geçirerek oluşan ikincil mineraller alüminyum üretiminde kullanılmaktadır(Yürüyen 2011). Daha önceden Tablo2.4'te alüminyum mineralleri ve özellikleri gösterilmiştir.

2.9 Alümina Seramiklerinin Kullanım Alanları

Alümina, dünyada çok kullanım yeri olan oksit maddeler arasındadır. Boksit cevherinden Bayer prosesi yöntemiyle üretilen alüminanın %93'ünden alüminyum metali elde ediminde geriye kalan yüzdelik diliminde ise alümina üretimi için kullanılmaktadır.

Boksit cevherinden üretilen alüminalar çeşitli işlemlerden geçerek alüminyum metali ya da alüminyum kimyasalları denilen kimyasallar üretilmektedir. Şekil boksit cevherinden üretilen alüminalar gösterilmektedir.



Şekil 2.8: Boksit cevherinden elde edilen alümina ürünleri(Sarıdede and Birol 2005)

Teknik seramiklerin birçok sektörde yeri vardır. Alüminanın doğasındaki çeşitlilik, üstün mekanik ve fiziksel özellikleri kullanım alanlarını gittikçe genişletmektedir. Saf alümina seramikler; yüksek sertlik, yüksek aşınma mukavemeti, düşük sürtünme katsayısı, termodinamik kararlılık gibi üstün özelliklere sahiptir.

İzolator olarak kullanımı görülen alüminalar aynı zamanda iletken olarak kullanılmaktadır. Sodyum sülfür bataryalarında (NAS) kullanılmaktadır. Ayrıca elektrik sektöründe buji seramiği, yüksek frekans tüpü bağlantı parçaları yapımında ve sodyum buharlı lambaların flamanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Japonya'daki hızlı trenlerin yalıtkan malzemeleri olarak da karşımıza çıkmaktadır(Sōmiya 1989)(Tambaş 1998).

Alümina diğer teknik seramiklere göre çok daha ekonomik olduğu için tercih eden bir başka sektör de madencilik endüstrisidir. Aşınmaya karşı dirençli olması bu sektörde 500 milyar dolarlık madencilik ve mineral işleme endüstrisinde katkıda bulunmuştur. Bu sektörde malzeme ekipmanı için destekleyici malzeme olarak görev almıştır(Anonymous n.d.).

Alüminanın aşınmaya karşı dirençli olmasının nedeni sertliğinin ve mekanik dayanımının yüksek olmasıdır. Bu özelliğinden dolayı öğütücü değirmenlerin bilyelerinde, metallerin ve seramiklerin parlatılmasında kullanıldı görülmektedir. Günümüzde makine ve imalat sektöründe kesici takım olarak da çok sık karşımıza çıkmaktadır. Tekstil ve kâğıt endüstrisinde de aşındırıcı ve yüksek sertlik özelliği nedeniyle kullanılan makinelerin çeşitli aksanlarında çok sık kullanılmaktadır.

Alümina, insan hayatını etkileyen ve kolaylaştıran en önemli sektör olan tıp alanında da önemli bir yer edinmiştir. Ortopedik aksan yapımlarında, kalça eklemi, suni kalp kapakçıklarındaki pirolitik karbon uygulaması gibi insan sağlığını ciddi derecede etkileyen mekanizmalarda başrol olmuştur(Tambaş 1998).

Genel olarak bütün teknik seramiklerin ergime sıcaklığı çok yüksektir. Bu sayede seramikler, yüksek sıcaklık istenilen uygulamalarda metallerin yerini almıştır. Bu uygulamalar havacılık sektöründe türbin bıçakları ve jet itici aksesuarlarındaki seramiklerdir. Roket parçalarında da sıklıkla alüminaya rastlanmaktadır(Tambaş 1998).

Son zamanlarda yapılan araştırmalarla birlikte alümina teknik seramiği savunma sanayiinde sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Bu sektörde alüminaların ekonomik olarak daha ucuz olması, sertliğinin yüksek, dayanımının iyi, en önemlisi de hafif olması özellikleriyle kullanımı gerçekleşmektedir. Hafif zırhlar olarak kullanılan alüminaların 1965'te ilk kullanımı gerçekleşmiştir ve uzun yıllar savunma sanayiinde sonuçlar gizlenmiştir. Bu günlere gelindiğinde artık alümina ve diğer teknik seramiklerin vücut zırhı hatta araba zırhları için de uygunluğu tespit edilmiş ve kanıtlanmıştır(Anonymous n.d.).

2.10 Alümina Seramiklerinin Şekillendirilmesi Yöntemleri

Seramik malzemelerin kullanımında şekillendirme işlemi çok önemlidir. Şekillendirme işlemi için uygulanan birçok farklı metot uygulanmaktadır. Bu metotların seçiminde seramiğin cinsi, fiziksel özellikler kullanılan seramiğin hangi amaçla kullanacağı, tozların boyutları, gibi özellikler etki etmektedir.

Seramiklerin şekillendirilmesi işlemi geleneksel yöntemlerden daha farklı ve biraz daha zordur. Şekillendirme işlemi uygulanacak seramik tozların içeriğindeki katkı maddeleri, şekillendirmeyi kolaylaştırmaktadır. Bu katkı maddeleri;

- 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(Ilgar 2008).

Seramik şekillendirme yöntemleri;

1)Kuru Şekillendirme

- a) Kuru presleme
- b) Soğuk izostatik presleme [CIP (Cold Isostatic Pressing)]
- c) Sıcak izostatik presleme [HIP (Hot Isostatic Pressing)]

2) Yaş şekillendirme (slip döküm)

3) Yarı yaş şekillendirme

- a) Serbest şekillendirme
- b) El tornasında çevirme

- c) Yarı otomatik tornalar
- d) Otomatik tornalar
- e) Ekstrüzyon
- f) Enjeksiyon
- g) Şerit döküm (Doktor Blade)
- h) Presleme

4) Deri sertliğinde şekillendirme

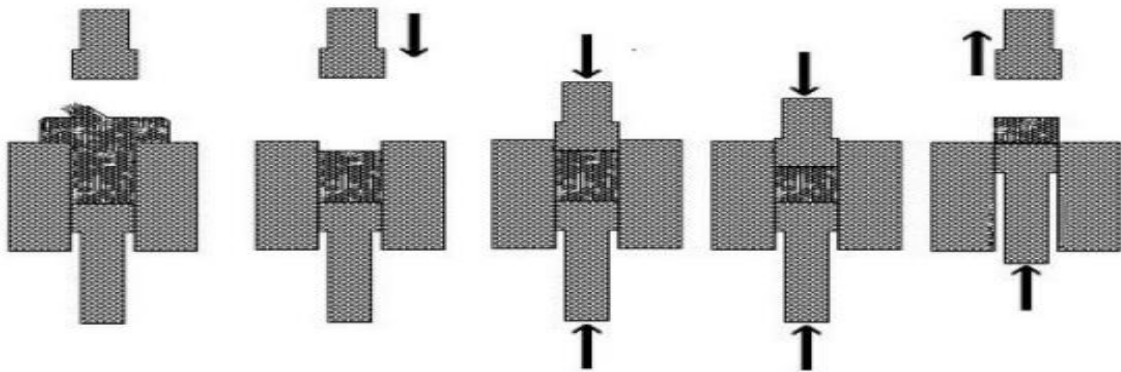
5) Plazma sprej kaplama ile şekillendirme (İlgar 2008)

2.10.1 Kuru Şekillendirme

Kuru presleme, soğuk izostatik presleme ve sıcak izostatik presleme olarak üçe ayrılabilir.

2.10.1.1 Kuru Presleme

Bu yöntemde seramik tozların içine uygun bağlayıcı ve yağlayıcı ilave edilerek karıştırılır. Bu karışımı metal kalıp içerisine yerleştirerek tek veya çift eksenli yük altında kuru bir şekilde sıkıştırılır. Toz boyutunun dağılımı bu yöntem için oldukça önemlidir. Bu yöntemle geleneksel seramiklerin ve ileri teknoloji seramiklerin plaka biçimindeki şekilleri için uygundur. Şekil kuru presleme yöntemi gösterilmiştir. İlk aşamada bağlayıcı ilavesi yapılmış seramik toz, metal kalıp içerisine yerleştirilir, ikinci aşamada üst piston hareket edecek şekilde üçüncü aşamada sıkıştırılır. Daha sonra üst piston kaldırılıp alt piston sıkışan seramik numuneyi ittirerek kalıp dışına çıkarır ve böylece şekil verme işlemi tamamlanmış olur(Avcıoğlu 2014).



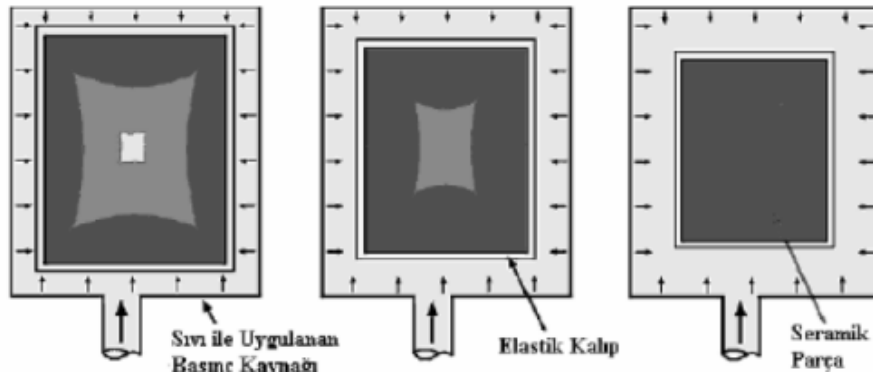
Şekil 2.9: Kuru presleme yöntemiyle şekillendirme(Avcıoğlu 2014)

2.10.1.2 Soğuk İzostatik Presleme(CIP)

Bu yöntemle oyuklar veya büyük uzunlukta, çapta karmaşık şekiller için kullanılabilir. Yüksek yoğunluk istenilen yerler içinde uygun bir yöntemdir. Soğuk preslemede kullanılan kalıp malzemeleri dayanıklı esnek kauçuk veya sentetik malzemelerden yapılması tercih edilir, uygulanan basınç sıvıların pascal prensibine göre içindeki akışkandan homojen bir şekilde numuneye iletilmektedir. Oda sıcaklığında yapılmaktadır.

Soğuk izostatik yöntemi, ıslak ve kuru torba olarak iki yöneme kendi içinde ayrılır. Büyük ve karmaşık şekiller için genellikle ıslak torba yöntemi seçilir. Bu yöntemde kalıp her basınç uygulamasında uzaklaştırılıp tekrardan doldurulmaktadır. Daha küçük ve çok da karmaşık şekiller istenmeyen yerler içinde kuru torba yöntemi tercih edilebilir. Bu yöntem de ise kalıp basınç ünitesinin sabit bir parçasıdır.

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 2.10: Soğuk izostatik presleme yöntemiyle şekillendirme(İlgar 2008)

2.10.1.3 Sıcak İzostatik Presleme(HIP)

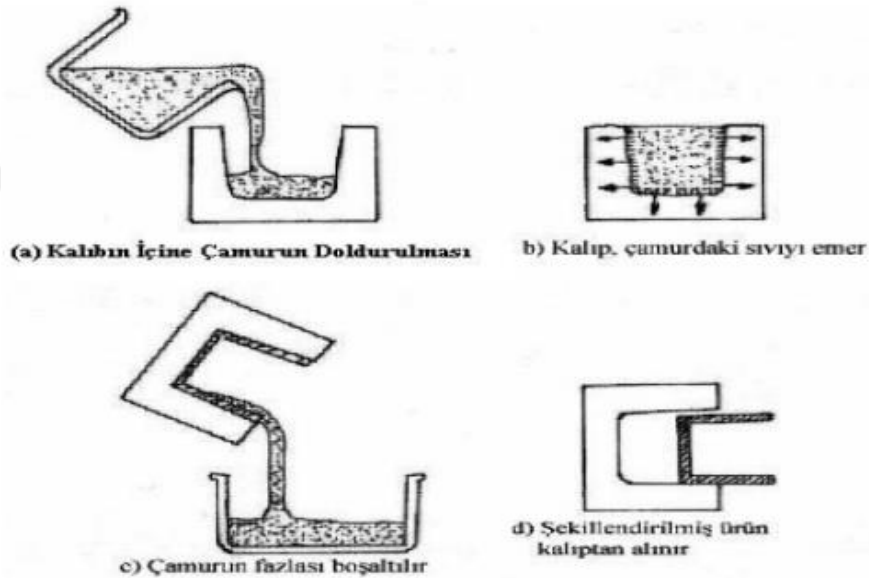
Bu yöntem, soğuk izostatik presleme yöntemiyle aynı prensipte çalışır fakat sıcak izostatikte yüksek sıcaklık ve basınç ortamında ise azot veya argon gazı vardır. Çalışma basınçları 100MPa ve 300MPa arasında değişmektedir. Yüksek sıcaklıklarda presleme işlemi gerçekleştiğinden tozların birbirine tutunması daha düşük kuvvetlerde de mümkündür, bu sayede daha az kuvvet kullanılıp istenilen formun daha az boşluklu ve yüksek yoğunluklu olması sağlanabilir.

2.10.2 Yaş Şekillendirme(Slip Döküm)

Genellikle karmaşık ve büyük hacimli şekil gereken yerlerin üretiminde tercih edilir. Bu yöntemde kullanılacak olan seramik tozu belli bir oranda suyla birlikte veya başka bir çözücüyle bilyalı değirmende slip, yani sulu çamur haline getirilir. Sulu çamur genellikle alçıdan yapılmış bir kap içerisine doldurulur, belli bir süre sonunda alçı kalıptaki suyu emer, fazla slip boşaltılır, en son olarak şekillenmiş numune kalıptan çıkarılır.

Slip döküm karmaşık şekiller için uygun bir yöntem olsa da birkaç işlemten geçmesi bu uygulamayı yavaşlatmakta ve pişme esnasında parçanın çekme oranı %25-30 civarında olması ürünün son boyutu üzerinde oldukça fazla değişikliğe sebebiyet vermektedir.

Sağlık sektöründe kullanılan malzemeler, özel refrakterler, ileri teknoloji seramikleri, biblo, vazo, kâse, süs eşyaları gibi karmaşık şekilli parçalar slip döküm yöntemiyle üretilmektedir(Ilgar 2008)(Ünal 2007).



Şekil 2.11: Slip döküm yöntemiyle şekillendirme(Ilgar 2008)

2.10.3 Yarı Yaş Şekillendirme

Bu yöntem serbest şekillendirme, el tornasında çevirme, yarı otomatik tornalar, otomatik tornalar ve ekstrüzyon olarak karşımıza çıkmaktadır.

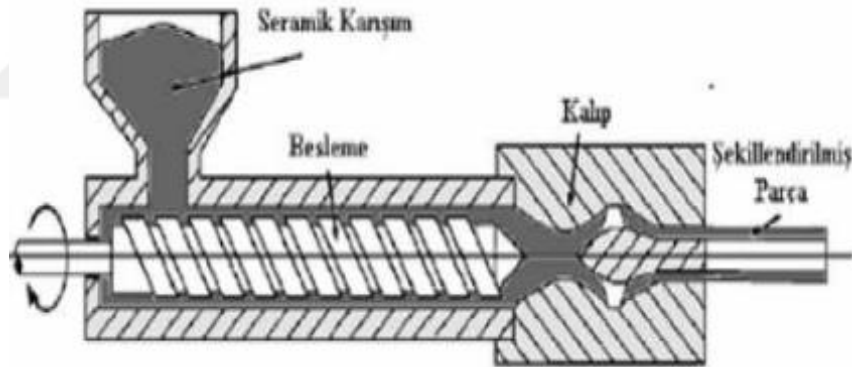
Serbest şekillendirme, plastik çamur şeklinde plakalar hazırlanır ve bu parçalara eklemeyle şekil verilir. Genellikle sanatsal çalışmalarda kullanılan yöntemdir(Ilgar 2008).

El tornasında çevirme, havası alınan çamurun tornanın aynasına bağlanarak el ile şekil verme yöntemidir ve genelde çanak, çömlek gibi seramik parçaların şekillendirilmesinde kullanılır(Ilgar 2008).

Yarı otomatik tornalar, yarı otomasyon sağlanmış torna tezgahları kullanılır. Alçı kalıp içerisine veya üzerine istenilen formlara göre hazırlanmış masterlar ezilerek üretim gerçekleşir. Fincan, kase, tabak gibi mutfak eşyaları bu şekilde şekillendirilebilir(Ilgar 2008).

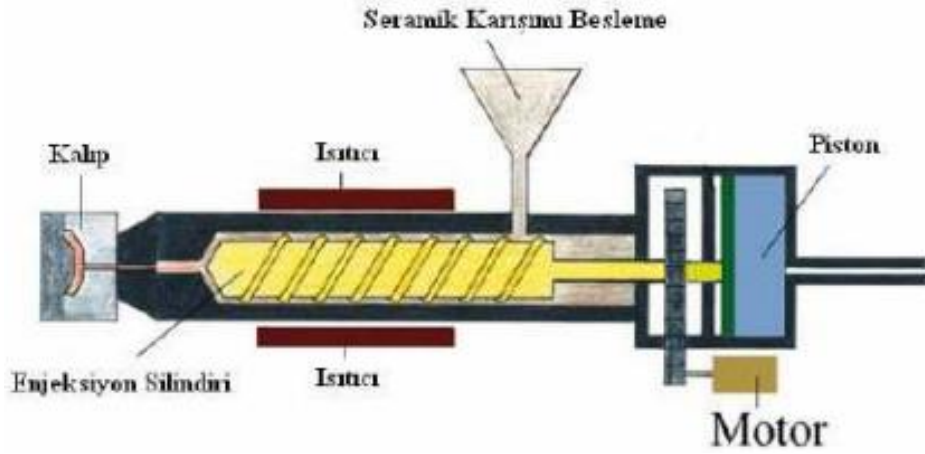
Otomatik tornalar ise tamamen otomatik olan bu tezgâhlarda masterlar hazır ve seri üretim için oldukça uygundur(Ilgar 2008).

Ekstrüzyon, seramik tozlara yaklaşık %20 oranında bağlayıcı eklenerek karıştırılır. Daha sonra seramik çamur silindire beslenir ve döner bir burguyla istenen şekli oluşturmak için tasarlanmış delikten dışarı basılır. Böylece istenilen şekil ortaya çıkmış olur. Bu yöntemde uzun borular, çubuklar, şeritler gibi ürünler üretilebilmektedir. Sürekli üretim için uygundur(Ilgar 2008).



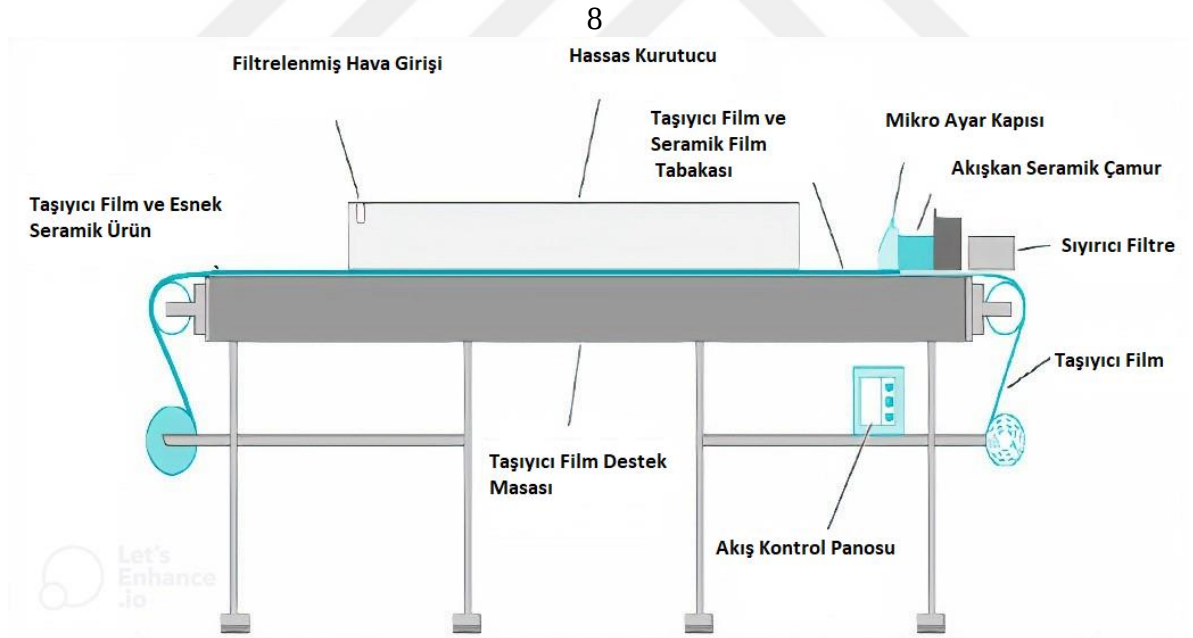
Şekil 2.12: Ekstrüzyon ile şekillendirme yöntemi(Ilgar 2008)

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 üretilebilmektedir. Enjeksiyon ile şekil vermede karmaşık şekilli, farklı boyuttaki seramiklerin seri üretimi mümkündür. Elde edilen ürünlerin boyut hassasiyeti iyidir(Ilgar 2008)(Ünal 2007).



Şekil 2.13: Enjeksiyon ile şekillendirme yöntemi(İlgar 2008)

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(İlgar 2008).



Şekil 2.14: Şerit döküm yöntemiyle şekillendirme(İlgar 2008)

Presleme, basit vakum presi ile çamur, yine basit kalıplarla şekillendirilmesi gerçekleşir. Tuğla, kiremit, yer plakası gibi ürünler bu yöntemle şekillendirilebilmektedir.

Deri sertliğinde şekillendirme, havası alınmış ve çeşitli ölçülerde bloklara ayrılan çamur, döner bir tabla üzerinde kesici bıçaklarla dıştan şekillendirilir. Alçak ve yüksek gerilim izolatörleri bu şekilde üretilir(İlgar 2008).

Plazma sprej kaplama ile şekillendirme, plazma sprej kaplama; kaplama malzemesinin plazma gazı içerisinde geçirilerek ergimiş bir şekilde malzeme üzerine püskürtülmesi işlemidir. Bu işlemde argon, azot, hidrojen gibi soy gazlar kullanılır. Bunun nedeni ise kaplanacak malzemelerin oksitlenmesini en aza indirmektir. Bu teknikteki en önemli avantaj; yüksek plazma sıcaklığı sayesinde ergime sıcaklığı yüksek malzemelerin kaplamada kullanılmasını sağlamaktır(İlgar 2008).



3. MATERYAL VE METOT

3.1 Toz Seçimi

Bu çalışmada alümina teknik seramiğinin şekillendirilip zırh eldesi ve en sonunda balistik olarak incelenmesi ele alınmıştır. İlk aşama olarak seramik tozu seçimi gerçekleştirilmiştir. Zırh uygulamaları için genellikle alümina, bor karbür kullanılmaktadır. Bor karbür alüminaya göre teknik özellik bakımında biraz daha iyidir fakat bor karbür maliyet açısından uygun olmadığı için genellikle zırh uygulamalarında alümina teknik seramiği tercih edilmektedir. Bu sebepten dolayı bu çalışma için de alümina seramiği seçilmiştir.

Toz cinsine karar aşamasından sonra tozun yoğunluğu ve içindeki maddelerin seçimi yapılmıştır. Yüksek saflıktaki tozlar çok daha iyi sonuçlar verdiği için %99,7 saflığındaki alümina tozu seçilmiş ve zırh uygulamasında kullanıldığı için toz içerisinde yağlayıcı ve bağlayıcısı bulunan toz tercih edilmiştir.

Temin edilen seramik tozunun tanecik boyutu 190 μm 'dir.

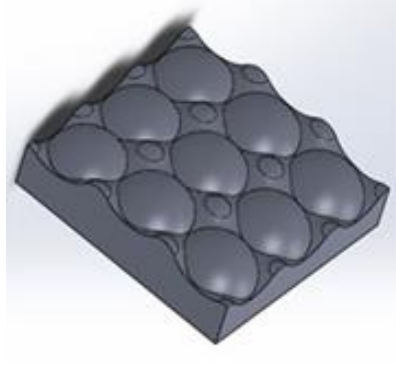


Şekil 3.1: Alümina seramik tozu

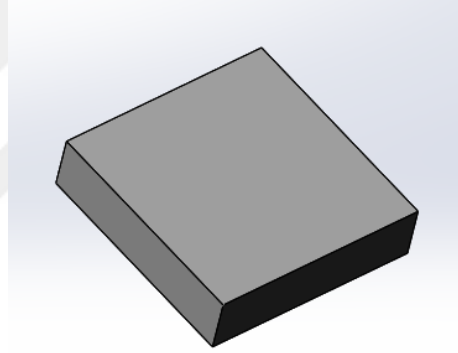
Toz seçiminde tanecik boyutunun da önemli bir rolü vardır. Tanecik boyutu ne kadar küçük olursa presleme ve pişme işlemlerinde tanecikler birbirlerine daha iyi tutunarak gözeneklilik oluşumunu minimize eder. Böylece tanecik boyutu seçimini olabildiğince küçük boyutta seçim yapılmıştır. Olumsuzluk olarak ise tanecik boyutu küçüldükçe toz fiyatında artış gerçekleşmektedir. Bu yüzden ekonomik açıdan ve gözeneklilik açısından 190 μm tanecik boyutlu alümina seramiği uygun bulunup seçilmiştir.

3.2 Kalıp Tasarımı ve Üretimi

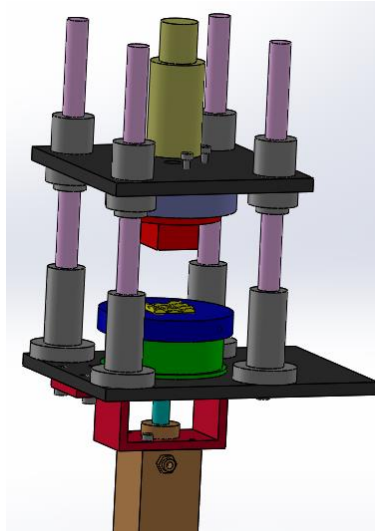
Öncelikle alümina seramiklerin nasıl şekilli üretilceği belirlendi ve bu tasarımlar üç boyutlu olarak bilgisayarda çizildi. Tasarlanan iki şekil(yuvarlak ve düz) için iki ayrı kalıp dizayn edilerek üç boyutlu bir şekilde aynı programda çizildi.



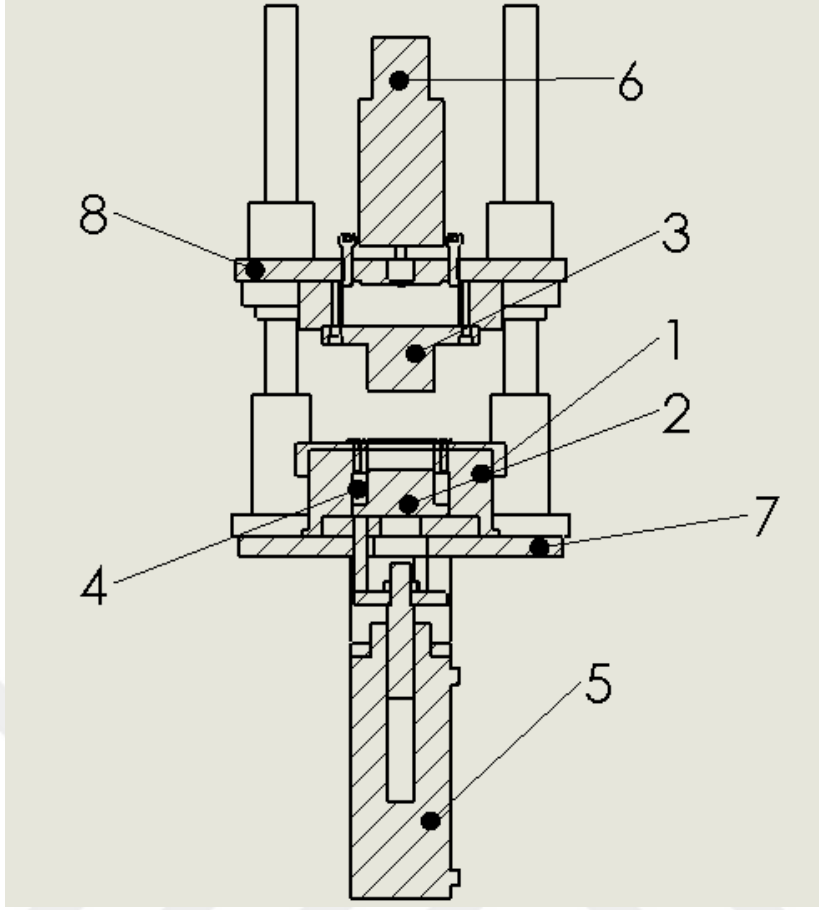
Şekil 3.2: Yuvarlak şekilli alümina numuneler



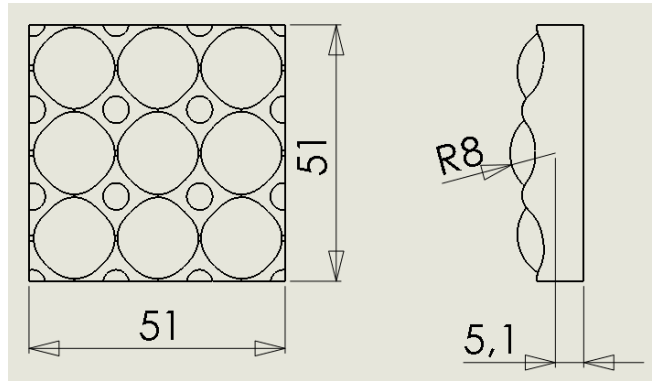
Şekil 3.3: Düz şekilli alümina numune



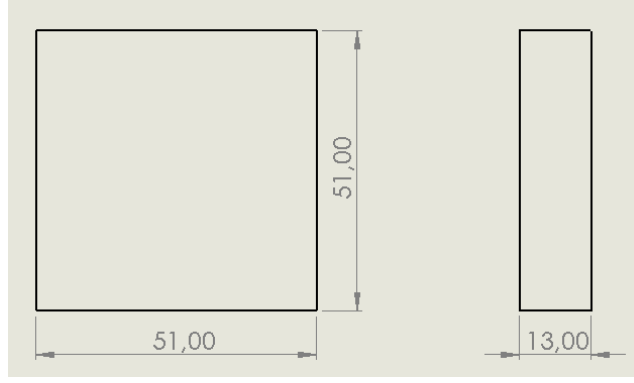
Şekil 3.4: 2 farklı şekillerde üretilecek olan numenin pres kalıpları ve montajı



Şekil 3.5: Pres kalıbı montajının kesit detaylı görünümü



Şekil 3.6: Yuvarlak geometrili alümina seramik teknik resim görüntüsü



Şekil 3.7: Düz geometrilili alümina seramik teknik resim görüntüsü

Kalıp tasarımları bittikten sonra üretim için kalıp malzemeleri seçildi. Kalıp malzemesi olarak 410 ıslah çeliği tercih edildi. Bunun nedeni 4140 ıslah çeliğinin çok iyi su almasıdır. Isıl işlem kısmında sertleşmesinin daha iyi ve kolay olması için 4140 çeliği seçildi. Temin edilen malzemeler cnc dik işlemde işlendi. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3 cnc frezede işlendi, Şekil 3.4'teki bazı parçalar universal torna ve cnc tornada işlendi.

Alüminanın şeklini sağlayacak esas kalıplar freze işleminden sonra yüzeyleri, tozun presleme esnasında yüzeye yapışmaması için macunlar yardımıyla parlatıldı. Yüzey parlatma işlemi biten numuneler, ısıl işlem uygulanmak üzere özel bir firmaya gönderildi. Isıl işlem uygulanan kalıplara tekrardan parlatma işlemi uygulandı. Bütün kalıp üretimleri bittikten sonra kalıp, montaj yapılarak Şekil 3.4'teki halini aldı.

Montaj işlemini bitirdikten sonra kalıpların prese bağlanma aparatları yapıldı. Daha sonra bu aparatlarla birlikte kalıp hidrolik prese bağlandı. Böylece alümina seramik tozu şekillendirilme işlemi için hazır hale geldi.

Şekil 3.5'te prese bağlanan kalıp montajının kesit görüntüsü görülmektedir. Öncelikle 1 numaralı kalıp, dişi kalıp olup toz haznesi görevindedir. Tozlar bu hazneye doldurularak, 6 numaralı parçanın hidrolik prese bağlanmasıyla aşağı doğru 8 numaralı üst plakayla birlikte ona bağlı olan 3 numaralı erkek kalıbı ittirir. Bu şekilde bir basınç uygulama işleminden sonra pres yukarı doğru ittirilerek 8 numaralı plaka ve ona bağlı olan 3 numaralı erkek kalıp sıkışan tozların üstünden çekilir. 5 numaralı hidrolik pres sayesinde 4 numaralı pimler yukarı doğru ittirilerek 2 numaralı kalıpla birlikte seramik yukarı doğru çıkar. Böylece sıkışarak meydana gelen toz seramikler 2 numaralı kalıbın üstünden hazır bir şekilde alınır. İkinci basım için; yukarı doğru kalkan 2 numaralı kalıp iyice silinip temizlendikten sonra aşağı doğru itilerek toz haznesi tekrar seramik tozuyla doldurulur.

Böylece aynı işlemler tekrardan uygulanarak seramik tozlar şekillendirilmiş olur. 7 numaralı plaka sabittir ve ona bağlı olan 1 numaralı kalıp da sabittir.



Şekil 3.8: Kalıpların prese bağlanması hali

3.3 Alümina Seramik Numunelerin Presle Şekillendirilmesi

Kalıplar prese montajlanınca, seramik toz hazneye dolduruldu ve hidrolik pres basım için çalıştırıldı. Yaklaşık 150 bar basınçta seramik numuneler basıldı. İki ayrı şekil için kalıp değiştirilerek presleme işlemi devam etti. Yuvarlak şekilli numuneler için kalıba kalıp ayırıcı sürülüp, o şekilde preslendi. Böylece yaş numuneler sinterlenmek üzere fırına hazır hale getirildi.

3.4 Alümina Seramik Numunelerin Sinterlenmesi

İleri teknoloji seramiklerin sinterlenmesi normal seramiklere göre biraz daha farklıdır. Normal seramikler 1100-1200°C’de pişerken, ileri teknoloji seramiklerin pişme sıcaklığı en az 1300-1400°C olmalıdır. Bu yüzden maliyet artışı da oluşmaktadır.

Zırh uygulamaları için sinterleme sıcaklığının ve sinterleme işleminin nasıl yapıldığının önemi oldukça fazladır. İleri teknoloji seramiklerinde önceden, yavaş bir şekilde ön ısıtma yapılması gerekir. Bunun amacı tozun içindeki yağlayıcı ve bağlayıcının seramikten uzaklaştırılmasıdır.

Bu çalışmada, yaş alümina seramikler fırına dikkatli bir şekilde dizilerek, 1650 °C’de yaklaşık 15 saat boyunca sinterlendi. Sinterleme işlemi sonrası seramik numuneler bir gün

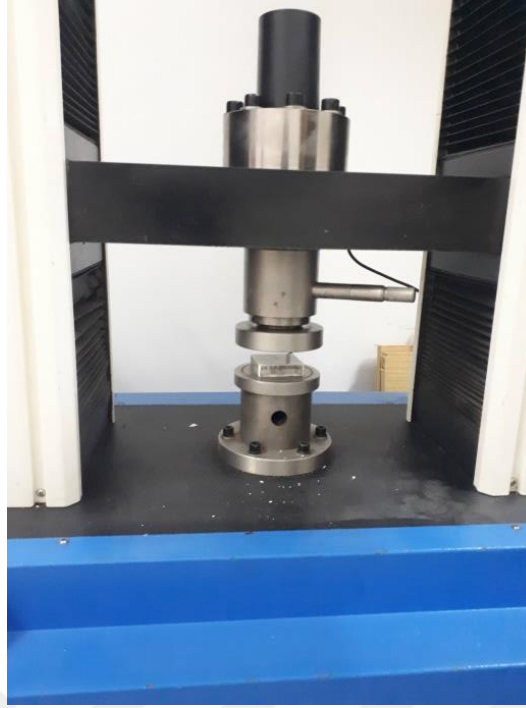
boyunca oda sıcaklığında soğuması için bekletildi. Soğuma işlemi sonrası seramikler çıkartılıp çatlak olup olmadığı gözle kontrol edildi. En sonunda parçalar birleştirilme işlemi için hazır hale getirildi.



Şekil 3.9: 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 3.10: Seramik numuneye basma testi uygulanışı



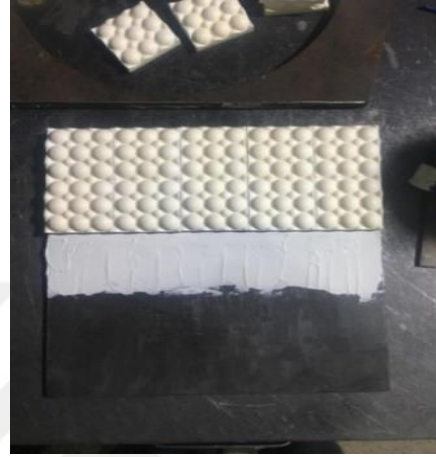
Şekil 3.11: Seramik numuneye sertlik testi uygulanışı

3.6 Sinterlenmiş ve Sinterlenmemiş Numuneye Tahribatsız Test

Sinterlenmiş ve sinterlenmemiş numuneler, SEM görüntü cihazı için üzerlerine kaplama yapılarak görüntü almaya hazır hale getirildi. Kaplanan numuneler SEM cihazına yerleştirildikten sonra görüntü resimleri çıktı ve resimler incelenmek üzere alındı.

3.7 Alümina Seramiklerin Epoksi Yardımıyla Yapıştırılıp Birleştirilmesi

Sinterleme işleminden sonra soğuyan alümina seramikleri 5 mm kalınlığında 200x200 mm boyutunda saca 25 adet gelecek şekilde epoksi yardımıyla yapıştırıldı, daha sonra üst kısmına da aynı şekilde 5 mm'lik sac yapıştırıldı. 2 farklı alümina şekilleri için bu işlemler tekrar edildi ve böylece balistik teste tabi tutulacak 2 adet zırh plakası oluştu.



Şekil 3.12: 2 Farklı alümina numunelerin saca yapıştırılması



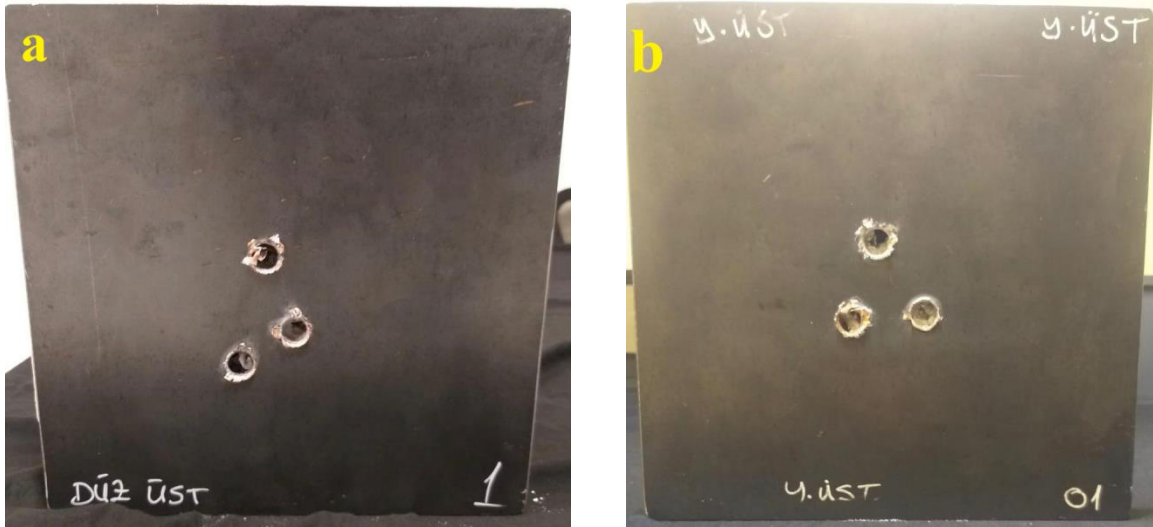
Şekil 3.13: Alümina numunelerin tek saca yapıştırılmış hali



Şekil 3.14: Zırh numunenin son hali

3.8 Alümina Zırh Numunesine Balistik Test Uygulanması

Epoksi yardımıyla birleştirilip hazırlanan; 2 adet 5mm'lik sac ve 11mm'lik alümina seramikten oluşan toplam kalınlığı 21mm olan seramik zırh numunelerine 25 metre uzaklıktan 7.62x51 mm keskin nişancı tüfeği ile her bir numuneye 3 adet olacak şekilde ateş edilmiştir. Daha sonra üzerlerine ateş edilen zırhlar, sonuçların değerlendirilmesi için incelemeye alınmıştır.



Şekil 3.15 Alümina zırh numunelerine balistik test uygulama sonrası

- a) Düz şekilli alümina seramik plaka
- b) Yuvarlak şekilli alümina seramik plaka

4.BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, alümina teknik seramiğinin şekillendirilip balistik test sonucu zırh uygulamaları için uygun olup olmadığı araştırılmıştır. İlk önce alüminyum oksit seramik tozu,Tablo 4.1’de belirtilen özelliklere göre temin edilmiştir.

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

Tablo 4.1: Toz özellikleri

Üretimi yapılacak seramik numunelerin tasarımları gerçekleştirildikten sonra üretime uygun kalıp tasarımı yapılmıştır. Kalıp tasarım prosesi tamamlandıktan sonra Cnc ve universal tezgâhlarda 4140 ıslah çeliği kalıp üretimi için 5 gün boyunca üretim için işlenmiştir. İşlenen kalıplar, daha sonra el motoru ile parlatma işlemine tabii tutulup, ısıtma işlemi gönderildi. Isıtma işlemde 820-850°’de su verme işlemi gerçekleştirilip sertleştirme işlemi yapılmıştır. Isıtma işlem sonrası sertleşen kalıplara tekrardan el motoru ile parlatma işlemi uygulanmıştır. Parlatma işleminden sonra kalıplar hazır hale gelmiştir ve kalıp parçalarının montajı 2 gün boyunca yapıp, prese montajlamak için hazır hale getirilmiştir. Prese montajlama işlemi yaklaşık yarım gün sürmüştür. Montajlama işlemi tamamlandıktan sonra seramik tozları gerekli ölçülerde doldurularak 150 bar basınçta basılmıştır. İki numunenin presleme işlemi 5 gün boyunca devam etmiştir. Numunelerin presleme işlemi gerçekleştirildikten sonra yaş alümina zırh numunelerinin boyut ve yoğunluk özellikleri Tablo 4.2.’de verilmiştir.

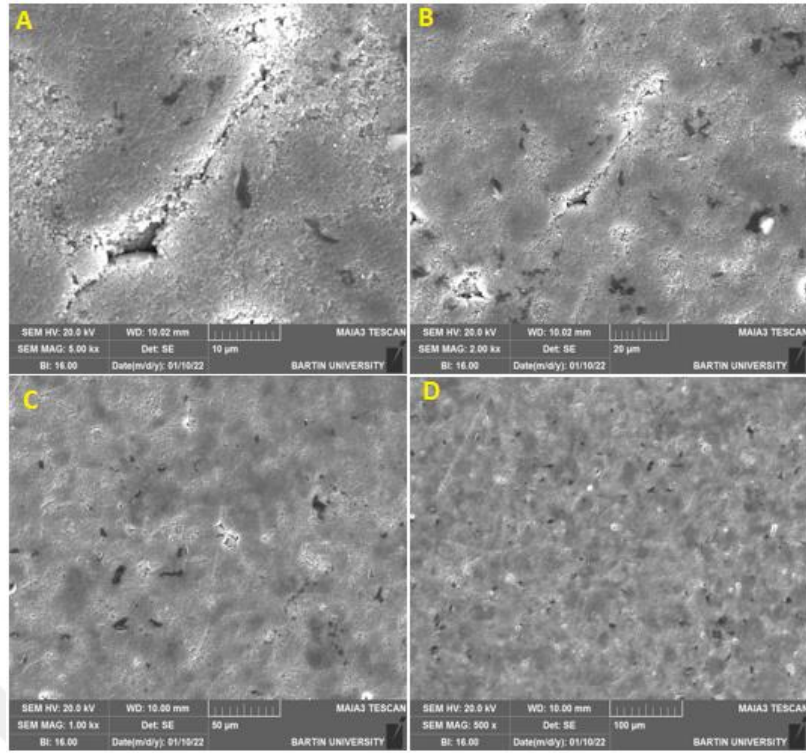
Pres Sonrası Numune	Birim	
Boyut	mm	51,2x51,2x13
Yaş Yoğunluk	g/cm ³	2,33

Tablo 4.2: Preslenme sonrası seramik özellikleri

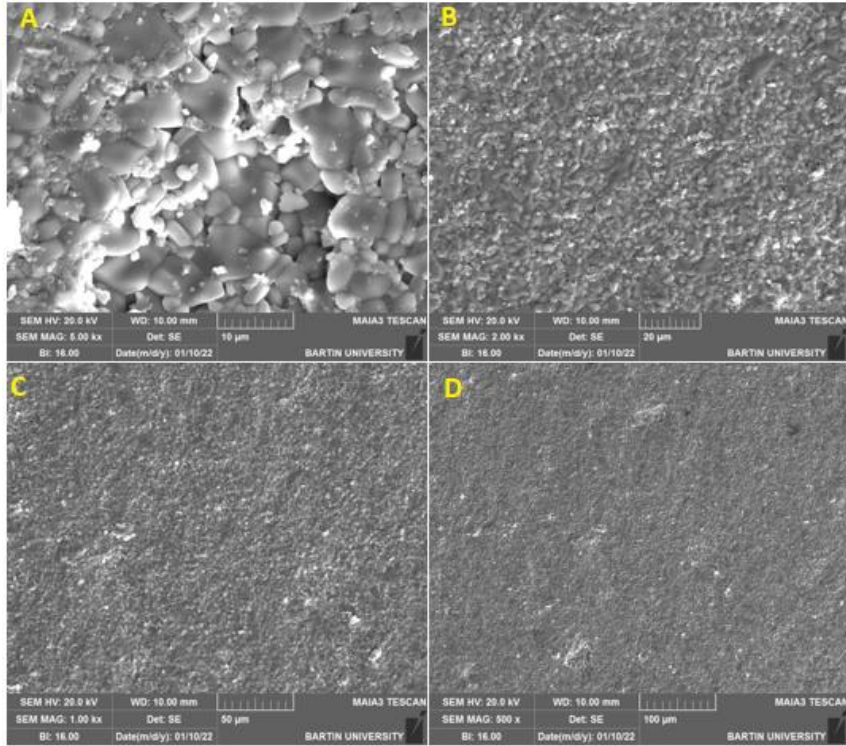


Şekil 4.1: Presleme sonrası düz şekilli alümina numune

Presleme işlemi ile şekil verilen seramik zırh numuneleri, sinterlenmek üzere fırına yerleştirildi ve 1650 °C’de 1 gün boyunca sinterlendi. Sinterlenme işlemi gerçekleştirilirken ilk 500°C’ ye kadar 1 dakika/ 1°C şeklinde ilerleme gerçekleştirilip sonrasında 1 dakika/5°C şeklinde ilerleme gerçekleştirilmiştir. Sonrasında sıcaklık hiç arttırılmadan 1650°C’de 1 saat bekletilmiştir. 1650 °’de bekleyen numuneler oda sıcaklığına gelene kadar kendi kendine soğumaya bırakılmıştır ve 2 gün sonrasında oda sıcaklığına gelmiştir. Sinterlemeden çıkan numunelere yapılan kontrollerde çatlama ve kırılma gibi deformasyonların görülmediği gözlenmiştir. Üretim işlemi tamamlandıktan sonra numunelere önce tahribatsız test olarak Taramalı elektron Mikroskobu (SEM) ile gözlemlenmiştir. SEM görüntülemesinden sonra numunelere sırasıyla, basma testi ve sertlik testi mekanik testleri uygulanmıştır.



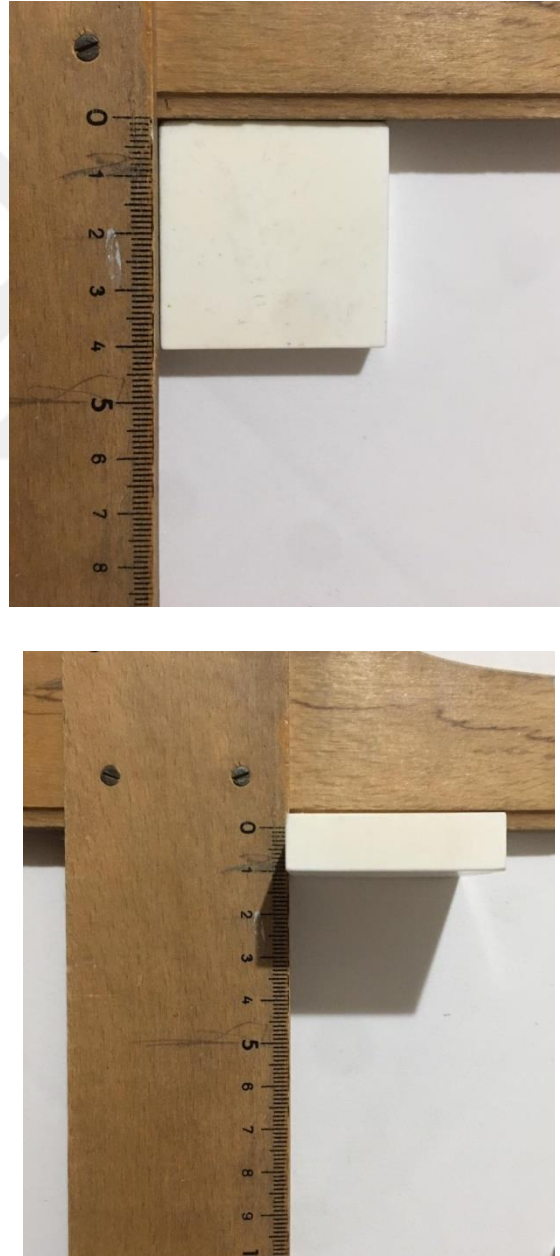
Şekil 4.2: Sinterlenme önce SEM görüntüsü



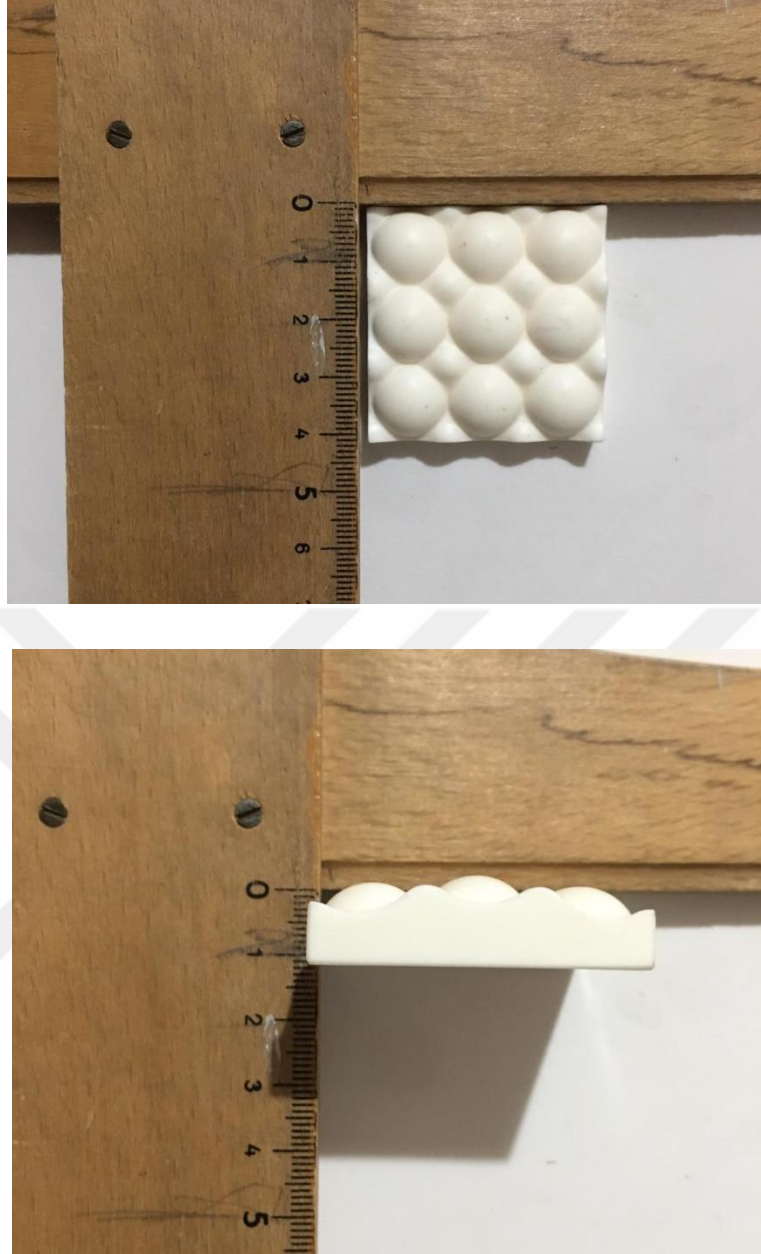
Şekil 4.3: Sinterlenme sonrası SEM görüntüsü

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi seramik numunelerde sinterlenme öncesi boşluklar görülmektedir. Şekil 4.3’e bakıldığında sinterlenme işlemi sonrasında bu boşluklar

kapanmış, seramik toz taneleri birbirine kaynaklanmıştır. Sinterleme işleminden önce seramik tozların 190 μ m olan boyut büyüklükleri sinterlenme prosesi sonrasında ortalama 2,93 μ m 'ye düşmüştür. Seramik numunelerde boşlukların büyük ve çatlakların olması mukavemeti oldukça fazla olumsuz etkilemektedir. Seramik tozlarda sinterleme işleminde sıcaklığın düşük olması mukavemetin düşük olacağını göstermekle birlikte, düşük sıcaklıkta sinterleme işleminde balistik test sonuçlarında çok büyük bir hasar alacağı düşünülmektedir. Bu sebepten dolayı sinterleme sıcaklığı önemli bir rol oynamaktadır. Literatür araştırmalarında incelendiğinde sonuçlar benzerlik verdiği için seçilen sinterlenme sıcaklığının uygun olduğu görülmüştür(Palacı 2001)(Liu et al. 2021).



Şekil 4.4: Sinterleme sonrası düz geometrili alümina ölçü görüntüleri



Şekil4.5: Sinterleme sonrası yuvarlak geometrili alümina ölçü görüntüleri

4.1 Mekanik Testler

Sinterlenme sonrası numunelerde %16 oranında küçülme görülmüştür. Sinterleme sonrasında küçülmesi seramik tozların birbirlerine daha iyi yapıştığını göstermektedir. Bu küçülmeyle birlikte numuneler ölçülerek boyutları yaklaşık 43x43x11mm olduğu görülmüştür. Seramik test numunelerine daha sonra Şekil4.3 de gösterilen sertlik ölçüm cihazı ile Vickers sertlik testi uygulanmış, 5 farklı noktadan ölçüm yapıp ortalaması alındığında yaklaşık 27GPa olduğu ölçülmüştür. Sertlik testinden sonrasında Şekil4.4’de fotoğraflanan Basma Dayanımı testi ölçüm cihazı ile Basma testi yapılmıştır ve sonuçlarda 9MPa dayanımı çıktığı görülmüştür. Literatüre bakıldığında; sertlik test sonucunda

yaklaşık 22GPa bulunurken, 27GPa değeriyle merminin kinetik enerji sönümlemesinin çok daha iyi olacağı öngörülmüştür(İnan 2005). Basma dayanımı sonuçlarında yine literatür değerlerine yakın değerler bulunduğu görülmüştür(İnan 2005).

Yapılan testlerin ardından seramik zırh numunelerinin zırh haline gelebilmesi için epoksi yardımıyla birbirlerine yapıştırma işlemleri yapılmıştır. Birbirlerine yapıştırılan seramik zırh numuneleri 1 gün kurumaya bırakılmıştır. Daha sonrasında ön ve arka katmanı olan çelik zırh plakası olan 200x200x5 mm saclara yapıştırıldı. Epoksi yardımı ile yapıştırılan seramik zırhların, zırh sistemlerinde balistik testlerde çok önemli bir rol oynadığı literatürde tespit edilmiştir. (Gao et al. 2018) Epoksi yapıştırıcının mukavemetli olmasının yanında esnek olmasının çok büyük bir avantaj yaratacağı bilinmekle birlikte literatürde araştırmalarla desteklenmiştir.(Gao et al. 2018)

R.lue ve arkadaşları üç boyutlu yazıcıda yaptıkları kalıp ile dökülen bor karbür seramiğinin sinterlenmesi yapılmış olup, %96 saflıkta yapılan bor karbür 2290°C’de sinterleme işlemi uygulanmıştır. 1050°C’de 3 saat garbonize etmiş daha sonra da tekrar 2290°C’de 1 saat boyunca sinterleyerek Vickers sertlik ölçümü yapmışlardır. Çıkan sonuçlarda 23+-1.8 GPa sertlik değeri bulmuşlardır. Yüksek sıcaklıkta sinterlenmesine rağmen, bu tez çalışmasında balistik testte kullanılan presle üretilen alümina plakaları daha iyi sertlik değeri vermiştir. Üretim esnasında gerekli basınç uygulanmadığı için sertlik değeri düşük kalmıştır. Basınç uygulanmadan yapılan alümina zırh plakaları daha iyi sertlik değerini vermiş olduğu görülmüştür. (Lu et al. 2018)

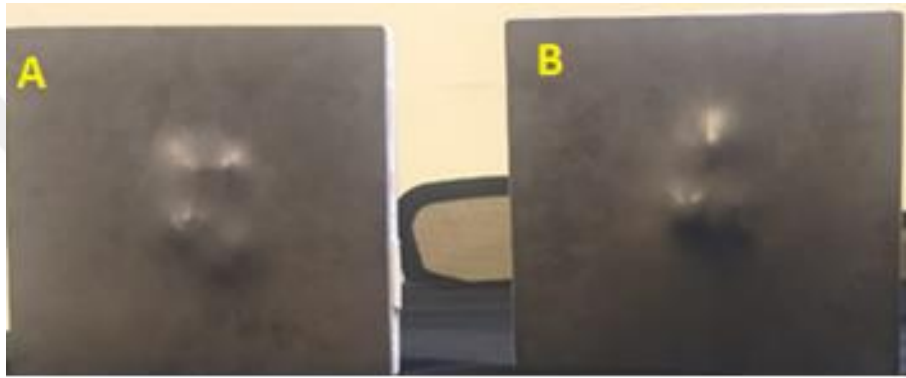
4.2 Balistik Test

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, literatürde bahsedildiği gibi olduğu görülmüştür.(Braga et al. 2018)



Şekil 4.6: Zırh numunelerine ateş edildikten sonra ön görüntüsü

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



Şekil 4.7: Zırh numunelerine ateş edildikten sonra arka görüntüsü

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

Düz geometrili seramik zırha ve yuvarlak geometrili seramik zırha arkadan ve önden bakıldığında kurşunların zırhtan dışarı çıkmadan içinde kaldığı, yani zırhları delip geçmediği görülmektedir. Fakat iki seramik numuneye de yan profilden bakıldığında düz geometrili seramik plakanın daha fazla tahribata uğradığı, sacın seramikten bir miktar ayrıldığı görülmektedir. Yuvarlak geometrili seramik zırh numunesi için böyle bir durum söz konusu değildir ve düz geometrili zırha göre daha fazla enerji sönmülemiştir.

Merminin bir yüzeyden diğer yüzeye geçtiği kısımdaki yapmış olduğu bombeler ölçülmüş olup; yuvarlak geometrili zırh için 8.25mm'dir. Düz seramikte açıklık gözlemlendiğinden bombe ölçüsü alınmayıp açıklık ölçüsü alınmıştır. Böylece yuvarlak geometrinin merminin enerjisini çok daha iyi sömürdüğü görülmüştür.

Düz geometride ki açıklık ölçümü yapıldığında ise yaklaşık 8mm açıklık olduğu görülmüştür.



Şekil 4.8: Merminin yuvarlak şekilli zırha giriş görüntüsü



Şekil 4.9: Merminin düz şekilli zırha giriş görüntüsü

Merminin girişinden Şekil 4.5'te ve Şekil 4.6'da görüldüğü gibi sac levhanın talaş kısımları aşağı yöne değil de yukarıya doğru çıktığı görülmüş olup, bunun sonuçları her iki geometri için ayrı ayrı incelenmiş ve tartışılmıştır.

Tartışma verilerine göre; iki geometri açısından da merminin saca ilk temas ettiği sac yüzeyde mermi kaldırdığı talaş miktarını kendi girişi ile birlikte aşağı yöne doğru sıvamaya çalışmış fakat, mermi alümina seramik yüzeye geldiğinde seramik yüzeyi delmekte zorlandığı için seramiğin sertliği sayesinde mermi sac metal talaşları yukarı yöne doğru çıkartmak durumunda kalmıştır. İki geometrinin farklılıklarına bakıldığında ise aynı sertlikte olduklarından herhangi gözle görülür farklılık oluşmamış, iki geometri de yüksek

sertlik özelliklerinden dolayı talaşın aşağı yönüne geçişine izin vermeyerek yukarı doğru sıvanmıştır.



Şekil 4.10: Düz şekilli plakanın yan profili



Şekil 4.11: Düz geometrideki açıklık ölçüsü



Şekil 4.12: Yuvarlak şekilli plakanın yan profilleri

Literatürde seramiklerin geometrilerinin balistik performansı etkilediği görülmektedir (Bracamonte et al. 2016). Bu teste bakıldığında; alümina seramik plakalarda konkav şekillerin önemi vurgulanmış olup, literatür araştırmalarında çıkan sonuçlarla eş değer bulgular gözlenmiştir. Epoksinin yapmış olduğu esneklik de seramik zırh plakaların dağılmasını önleyerek literatürde ortaya koyulan sonuçlar doğrultusunda olduğu görülmüştür. (Tepeduzu and Karakuzu 2019)

Bu çalışmada; seramik- metal zırhta seramik orta katman olarak kullanımı tercih edilmiştir. 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).

Balistik test bulgularında, kullanılan metal sac plakanın da seramiğin balistik performansını arttırdığı görülerek, yapılan araştırmalarda görülen sonuçlarla paralel sonuçlar çıktığı gözlemlenmiştir.(Übeyli et al. 2011)



Şekil 4.13: Düz geometrili seramik zırhta merminin yaptığı bombe ölçümü

Şekil 4.13'te verilen düz seramik zırhın yan profillerinden hesaplanmış 3 farklı kalınlık görülmektedir. Kalınlıklar sırasıyla 35.7mm, 38.2mm ve 31.7mm olarak ölçülmüştür. Düz geometrik zırhın balistik testten önce 22mm olarak ölçülüp, balistik testten sonra yaklaşık olarak 15mm'lik bir bombe oluşturmuştur. Balistik testte, düz zırhın delinmediği görülür ancak seramik ile arka sac plaka arasını patlatıp açıklık oluşturmuştur.



Şekil 4.14: Yuvarlak geometrili seramik zırhta merminin yaptığı bombe ölçümü

Şekil 4.14'te verilen yuvarlak zırh seramiğinin yan profillerinden hesaplanmış 3 farklı kalınlık görülmektedir. Bu kalınlıklar sırasıyla 29.4mm, 35.2mm ve 31.7mm olarak hesaplanmıştır. Yuvarlak geometrili zırhın balistik testten önce ölçüldüğünde kalınlıkları 22mm olarak ölçülüp, balistik testte kullanılan mermilerin oluşturduğu bombelerin kalınlığı yaklaşık olarak 12mm olarak hesaplanmıştır.

Yapılan balistik testten sonra düz geometrili zırh ve yuvarlak geometrili zırh incelendiğinde, balistik testte kullanılan 7.62x51mm mühimmatı arka plakada bulunan zırh çeliğini seramik plakadan ayırmıştır ancak her ne kadar ayırsa da zırhı delip geçmeyip

içinde kalmıştır. Yuvarlak geometrili zırh numunesinde ise bir ayırım gerçekleşmeyip, mühimmat aynı düz geometride olduğu gibi plaka içinde kalmıştır. Yuvarlak geometrili zırhın tasarım geometrisinden dolayı çelik plakalarla arasında oluşan hava boşlukları daha fazla enerji sönümleme yeteneği sağlayıp, yuvarlak seramik zırhın dayanımına olumlu etkisi olmuştur. Bundan sonraki çalışmalarda farklı geometriler üzerinde yoğunlaşıp, daha büyük ve geniş hava boşlukları oluşturulup enerji sönümleme özelliği daha artırılıp zırhların, daha güçlü mühimmatlara karşı dayanımı artırılabilir.

Sg. Savio çalışmasında, 7.62 mm zırh delici mermi kullanarak gerçekleştirdiği balistik testlerde kalınlığın etkisini incelemiştir. Testlerde 5mm kalınlığında alümina ve 6.2 mm kalınlığında bor karbür kullanılmıştır. Kalınlığın artmasıyla; 600m/sn hızla zırhlara temas eden mermilerde 6.2 mm kalınlığına sahip bor karbür plakası, 5mm kalınlıktaki alüminaya göre etki verimliliği, diferansiyel etki faktörü daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Savio aynı çalışmasında 7.62 mm zırh delici mühimmatını kullanarak gerçekleştirdiği balistik testte 800m/sn hızda gerçekleştirmiştir. Hızın artmasıyla testte değerlendirilen diferansiyel verimlilik faktörü oranı daha da arttığı görülmüştür.(Savio and Madhu 2018)

Böylece literatürde görülen kalınlığın balistik testlere etkisi birçok makalede araştırılmış, sonuçları da tartışılmıştır. Bu çalışmada kullanılan alümina kalınlığı 11mm ile yeterli bir kalınlığa sahipliği görülmekte, yapılan balistik testte merminin zırhtan dışarı çıkamadığı görülerek kalınlığın iyi olduğu öngörülmüştür.

S.Güngör ve arkadaşları çalışmalarında 50x50x10 mm boyutunda bor karbür ve alümina seramik plakaların balistik performansını incelemiştir. Çalışmalarında 7.62x51 mm mühimmatı tercih edilmiş 15 metre mesafeden atış yapılmıştır. Bu mühimmat özellikleri 24g fişek ağırlığı, 838m/sn hızla ve 71.12mm fişek boyu olarak verilmiştir. Alümina plakanın saflığı %99.2 ölçülmüş olup bor karbür tespit edilememiştir. Balistik test gerçekleştiğinde görülen sonuçlar da, her iki plakanın iyi bir performans sergilediği gözlemlenmiş olup bor karbürün alüminaya göre daha iyi sonuç vereceği düşüncesinin aksine alüminanın sertliğinin bor karbür sertliğinden daha düşük olduğu için balistik özelliği daha üstün çıktığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada da aynı şekilde ve aynı mühimmatla daha düşük yoğunluklu plakaya uygulanan balistik test başarı göstererek literatürle eşdeğer çıkmıştır. (GÜNGÖR) KOC 2021)

Medvedovski çalışmasında alümina mineralini 7.62x51 mm Nato mermileri ile NIJ standardına uygun balistik test gerçekleştirmiştir. Test sonuçlarında merminin 28 mm kalınlığındaki zırhı delip geçmediği, mermilerin bombe oluşturduğu görülmüştür. Seramiğin içindeki minerallerin sağladığı yüksek enerji dağıtma kabiliyeti ve düşük gevreklik sayesinde bu sonuçlar elde edilmiştir.(Medvedovski 2010)

Literatürde seramik numunelere form verme denenmiş ve bu şekilde numunelere balistik test uygulanmıştır. M. Akdoğan ve arkadaşları alümina seramik plakaları konkav ve düz şekilli olarak sayısal modellemesini gerçekleştirip balistik teste tabi tutmuşlardır. Her iki farklı şekilli geometri için 8mm kalınlıkta arkası için alüminyum plaka ve 15mm kalınlıkta ön kısım için alümina plaka olacak şekilde sayısal modelleme gerçekleştirmişlerdir. 7.62x51 mm zırh delici mermi kullanılarak balistik test uygulanmıştır. Düz plakada zaman içinde deformasyon giderek arttığı görülmektedir fakat her iki geometri için de ilk 5 saniye içinde mermi de deformasyon izlenmiştir. Kinetik enerji grafiğine bakıldığında ise zamanla konkav yapıdaki alümina-alüminyum plakadaki mermi kinetik enerjisi düz plakaya göre daha hızlı bir düşüş sergilemiştir. Böylece görülen sonuçlarda konkav yapının merminin deformasyonunu daha hızlı sağlayıp kinetik enerjisini düşürerek yapılan bu tez ile çıkan sonuçların örtüştüğü görülmektedir.(Akdoğan n.d.)

Sonuç olarak bakıldığında seramik zırhlar; literatürde araştırması yapılmış, deneysel çalışmalarda kullanılarak mukavemeti, hafifliği ve balistik performansı kanıtlanmıştır.

5.SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma sonucunda, elde edilen sayısal değerlere bakıldığında literatüre göre uygun ve yakın değerler çıktığı gözlemlenmiştir. Zırh uygulamaları için kullanabilirliği açısından oldukça avantajlı konumda olduğu saptanmıştır. Ağırlık bakımından çeliğin yarısı kadar olup yüksek mukavemetli ve mermi sönümleyici özelliğiyle zırhlar için tercih edilebilirliği kanıtlanmıştır.

Sinterlenme sıcaklığının etkisi sayesinde tanecik boyutundaki küçülmeler, boşlukların kapanması gibi etkiler mukavemet açısından numunelerin iyiliğini göstermektedir.

Sinterleme işlemi sırasında uygulanan ilk 500°C'ye kadar 1dakika/1°C sonrasında, 1650°C'ye kadar 1dakika/5°C şeklinde artış ve 1650°C'de 1 saat bekleyen ve daha sonrasında oda sıcaklığına gelene kadar beklenen numuneler, sinterleme işleminden sonra yapılan göz ile ilk kontrolleri gerçekleştirilen numunelerde çatlama, kırılma gibi deformasyon durumları gözlemlenmediğinden, uygulanan sıcaklık rejiminin doğru bir proses olduğu görülmüştür.

Numunelerin presleme esnasında uygulanan basınç uygundur fakat daha fazla basınçla çok daha iyi sonuçların çıkması mümkündür. Aynı zamanda sıcak pres yöntemiyle şekillendirilen numunelerde ön ısıtma da olacağından mukavemet açısından iyileşme görüleceği de öngörülmektedir.

Balistik testte genel olarak 2 plakada da dağılma görülmemiş fakat konkav şekilli alümina plakada herhangi bir kopma dağılma olmaması, konkav şekilli üretime yöneleneceği yönünde olup, literatürde olan tüm araştırma sonuçlarıyla eş değer çıkmıştır.

Merminin yapmış olduğu bombe yüksekliklerine bakıldığında ise konkav yapılı olan yuvarlak şekilli seramik zırh plakaların düz seramik plakaya göre yüksekliği daha az olduğu görülmüş, böylece konkav şekilli seramik plakaların merminin yüzeye geçmesini daha çok önlediği görülmüştür. Konkav yapılı seramiklerin içindeki hava boşluklarından ve merminin yüzeye dik gelemeyişinden dolayı mermimin kinetik enerjisinin büyük bir bölümünü sömürmüştür.

Epoksi maddesinin etkisiyle seçilen epoksinin daha esnek yapıda olması ise; seramik plakaya esneklik katıp kırılma olasılığını minimuma indirmiştir. Seramiklerin çok sert olması kırılma olasılığını arttırdığı için balistik anlamda dezavantajlıdır, fakat epoksi gibi

esnek malzemelerle güçlendirildiğinde, plakalar hem mukavemetli hem de esnek yapıda olduğu görülmüştür. Bu sayede de merminin plakaları kırma ihtimali oldukça zorlaşmış olmaktadır.

Seramik plakaların kalınlığının 21 mm olması mermilerin bir yüzeyden girip diğer yüzeyden çıkmasını engellemiş, böylece kalınlığın uygunluğu görülmüştür. Kalınlığın daha fazla olması merminin dışarı çıkma oranını daha da düşüreceği için kalınlık arttıkça mukavemetin artacağı öngörülmektedir. Ancak kalınlığın artması toplam ağırlığı etkileyeceğinden, zırhı kullanacak görevlinin kullanımını zorlaştıracak açık bir şekilde görülür. İleriki çalışmalar için toplam boyut ve ağırlık için optimum değerlerin bulunması için çalışma yapılması gerekmektedir.

Balistik testte kullanılan 7.62x51 mm mühimmatının çok güçlü mermi tipi olmasına rağmen seramik plakaların, 3 atışta da dağılıp kırılmadan sağlam kalabilmesi, seramiklerin zırh malzemesi için oldukça uygun ve koruyuculuğunun yüksek olduğu görülmüştür.

Mermilerin seramik zırhlara girişinde, sac üzerinde yapmış olduğu talaş kaldırma işlemi talaşların yukarı yönde olduğunu göstermektedir. Buradan anlaşılabileceği üzere seramiğin sertliği ve mukavemetinin yüksek olması sayesinde talaşların yukarı doğru itildiği görülmektedir. Yani mermi seramikle birlikte talaşları içe doğru sıvayamamıştır. Her iki geometri içinde aynı durum söz konusu olduğundan konkav yapının bu duruma herhangi bir farklı etkisi gözlenmemiştir.

Yuvarlak geometrili alümina seramik plakada hiçbir dağılma ve ayrım söz konusu olmadan sadece mermilerin yapmış olduğu yükseklikler görülmektedir. Düz plakada da aynı şekilde herhangi bir dağılma kopma görülmemesine rağmen yan yüzeyden görülen kopmaya yakın ayrılma söz konusu olmuştur. Böylece düz yapı konkav yapıya göre dağılıma ve kopmaya daha müsait olduğu görülmüştür.

Yapılan zırh numunelerinde, çelik saclar yerine kullanılan maddelerin daha esnek ve hafif olması; balistik test sonucunda ve zırhların daha kolay kullanılabilirliğini arttıracak öngörülmektedir.

Kullanılan 7.62x51 mm' lik mühimmatı keskin nişancı tüfeğinden çıkış hızı 816m/s'dir. Namlu enerji de 3643 jouldür. 7.62x51 mm'lik mühimmat zırh plakaları delmeyerek içinde kalmıştır, bu verilere bakılarak zırhların başarılı olduğu söylenebilmektedir. İleriki

Çalışmalarda daha yüksek namlu enerjili ve daha yüksek hızda çıkış yapan mühimmatlar tercih edilerek seramik zırhların güvenilirliği test edilerek geliştirilebilir.

Yapılan bu araştırma ve balistik testler sonucunda kullanılan alüminanın yeterliliği ve üstün özellikleri kanıtlanmıştır. Ancak seçilen alüminanın daha yüksek saflıkta olması balistik test sonuçlarının çok daha iyi çıkacağı yönünde olup aynı zamanda alümina dışında alüminadan daha iyi özelliklere sahip olan bor karbür teknik seramiğinin kullanımı balistik açısından zırhlardan elde edilecek maksimum koruma seviyelerine çıkacağı öngörülmekle birlikte bor karbürün ekonomik açıdan alüminaya göre çok daha maliyetli olması alümina tercih edilme olasılığını arttırmaktadır.



KAYNAKLAR

- (GÜNGÖR) KOC, Serap. 2021. “B4C ve Al2O3 Seramik Plakaların Mekanik ve Balistik Özelliklerinin İncelenmesi.” *Journal of Polytechnic* 0900(3): 991–96.
- Aboudi, Jacob, Steven Arnold, and Brett Bednarczyk. 2013. *Micromechanics of Composite Materials* *Micromechanics of Composite Materials*.
- Akdoğan, Mehmet Akif. “Ballistic Protection Performance of Curved And.”
- Akdoğan, Mehmet Akif, and Osman Selim Türkbaş. 2016. “Ballistic Protection Performance of Curved and Plain Ceramic Armors.” *Gazi Journal Of Engineering Sciences*.
- AKKURT, Fatih. 2019. “ÜstünÖzelliklereSahilleriTeknolojiSeramiği:TitanyumDiborür.” *Journal of Boron* 4(4): 203–8.
- Anonymous. *Alumina Ceramics*.
- Auerkari, Pertti. 1996. “Mechanical and Physical Properties of Engineering Alumina Ceramics.” *VTT Tiedotteita - Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus* (1792).
- Avcıoğlu, Celal. 2014. “Püskürtmeli Kurutma Yöntemi İle PVA Katkılı TiO2 Tozlarının Granülasyonu ve Sinterlenmiş Numunelerin Karakterizasyonu.” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- B.R.Jones, A.R.Prunier, A.J.Pyzik. 2002. “Brake Or Clutch Components Having A Ceramic-Metal Composite Friction Material.” : 7.
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100406-7.00012-X>.
- 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.
- Cerit, Afşin Alper. 2004. “Partikül ve Fiber Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitin Balistik Performansının İncelenmesi.”
- Çinaz, Ender. 2012. “Ağırlıkça %2 MgO VE %2 TiO2 Katkılı Alümina Seramiğinin Farklı Sıcaklıklarda Sinterlenme ve Karakterizasyonu.” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Cöcen, Ümit. *Hidrometalurjik Süreçlerin Endüstriyel Uygulamaları*.
- Dağışan Bulucu, Esen. 2020. “MBM 301 Seramikler Ders Notları.”
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.01.024>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.07.017>.
- Güldoğan, Yasemen. 2014. “Bayer Gibsiti ve Alüminyum Tuzlarından Yüksek Saflıkta Alüminyum Hidroksit ve Alümina Üretimi.” Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi.
- Gündüzer, Onur. 2011. “İç Balistik Davranışın Etkisi.” Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.
- Hu, Pengcheng et al. 2021. “A Metal / UHMWPE / SiC Multi-Layered Composite Armor against Ballistic Impact of Flat-Nosed Projectile.” *Ceramics International* (January). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.259>.
- 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.
- 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.
- Kıran, Mustafa. 2006. “Alüminanın Ekstrüzyonla Şekillendirilmesi.” Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- Krishnan, Saravanan Vanal et al. 2021. “Technical Review: Improvement of Mechanical Properties and Suitability towards Armor Applications – Alumina Composites.” *Ceramics International* 47(17): 23693–701. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.05.146>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.05.051>.
- Lu, Ryan et al. 2018. “Complex Shaped Boron Carbides from Negative Additive Manufacturing.” *Materials & Design* 148: 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.03.026>.
- Medvedovski, Eugene. 2010. “Ballistic Performance of Armour Ceramics: Influence of Design and Structure. Part 1.” *Ceramics International* 36(7): 2103–15.
- 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>.

- Öztürk, Muhammet. 2007. “SiC İlaveli Alümina Seramik Kompozitler.” Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- Palacı, Yüksel. 2001. “Alüminanın Özelliklerini, Şekillendirme Yönteminin, Katkıların ve Sinterleme Sıcaklığının Etkisi.” Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- R. Güneş, J.N.Reddy , Aydın M., Arslan K. 2015. “Fonksiyonel Kademelendirilmiş Sandviç Plakaların Balistik Darbe Etkisi Altında Lineer Olmayan Mekanik Analizleri.” Erciyes Üniversitesi.
- Reed, J.S. 1995. *Principles of Ceramics Processing*. New York: John Wiley & Sons, Inc. (US).
- Sarıdede, Nezihi Muhlis, and Burak Birol. 2005. “Özel Alüminalar-1 Kalsine Alüminalar.” *Metalurji Dergisi* 141.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.11.020>.
- Silva, M. V. et al. 2014. “Alumina-Based Ceramics for Armor Application: Mechanical Characterization and Ballistic Testing.” *Journal of Ceramics* 2014: 1–6.
- Sōmiya, Shigeyuki. 1989. “Ceramics: Definitions.” *Advanced Technical Ceramics*: 3–9.
- Tambaş, Turan. 1998. “Seydişehir Alüminasından Kalıplamayla Seramik Malzemelerin Üretilmesi.” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Tan, V. B.C., and K. J.L. Khoo. 2005. “Perforation of Flexible Laminates by Projectiles of Different Geometry.” *International Journal of Impact Engineering* 31(7): 793–810.
- 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.
- Yürüyen, Suha. 2011. “Talk-Koalen-Alümina Seramik Sisteminde Kordiyerit Oluşumuna Mekanik Aktivasyonun Etkisi.” Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.