



MATRİS MALZEMESİ OLARAK ALÜMİNAYA TİTANYUM VE GRAFEN İLAVELERİNİN ETKİLERİNİN BELİRLENMESİ

Samet YAVUZ^{1*}, Mevlüt GÜRBÜZ²

¹ Ondokuzmayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
Samsun ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-6912-279X>

² Ondokuzmayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
Samsun ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-2365-5918>

Anahtar Kelimeler

Öz

Al₂O₃, Ti, grafen, sinterleme, mekanik özellikler

Bu derlemede, matris malzemesi olarak alüminaya titanyum ve grafen ilaveleri ile yapılan kompozit çalışmaları özetlenmiştir. Son yıllarda yapılan çalışmaların ışığında grafen takviyesinin önemi ve aynı zamanda titanyum takviyelerinin de seramik matrisli kompozitlerin özelliklerine etkileri belirtilmiştir. Seramik matrisli kompozitlerden en yaygın kullanım alanı bulan alümina matrisli kompozitler düşük yoğunluk, yüksek sertlik ve kimyasal kararlılık gibi özelliklerinden dolayı geçmişten günümüze dek endüstride kullanılmaktadır. Ancak alüminanın düşük kırılma tokluğu (3,5 MPa.m^{1/2}) kullanım alanını kısıtlamakta bu sebeple ikinci faz ilaveleri ile mevcut olan mekanik özellikler iyileştirilmekte, bununla birlikte yapılan takviyelerle daha yüksek sertlik ve kırılma tokluğu elde edilmektedir. İncelenen çalışmalarda, alümina matrise titanyum takviyesinin genel olarak sertlik, kırılma tokluğu ve eğme dayanımlarında monolitik alüminaya kıyasla düşük sonuçlar elde edildiği ve titanyum takviyesinin kırılma tokluğu düşük olan alüminanın özelliklerinin geliştirilmesi açısından önemli bir aşama olduğu ifade edilse de yapılan bazı çalışmalarda titanyum ilavesinin kırılma tokluğu (4,32 MPa.m^{1/2}) ve eğme dayanımını artırdığı bildirilmiştir. Yapılan çalışmalar titanyumun alümina matrise takviyesi ile elde edilen mekanik özelliklerin geliştirilmesi amacıyla Al₂O₃-Ti kompozitine ikinci takviye malzemesinin ilave edildiğini göstermiştir. Grafenin, Al₂O₃-Ti yapısına ilavesi konusunda yapılan literatür çalışmaların kısıtlı olduğu görülmüştür. Sınırlı çalışmada grafen takviyesi ile monolitik alümina ve diğer takviyelere göre porozitenin azaldığı, iletkenlik, aşınma dayanımı, sertlik ve kırılma tokluğu arttırdığı (8,7 MPa.m^{1/2}) yönde sonuçlar elde edilmiştir. Bu veriler de grafen takviyelerinin kullanımının artarak devam edeceğini göstermektedir. Yapılan bu derleme ile alümina matrise titanyum ve grafen tozlarının ilavesi, toz metalurjisi metoduyla üretim yöntemleri, yapılan takviyelerin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir.

* smyvz4894@gmail.com

doi : 10.46399/muhendismakina.1421015

DETERMINATION OF THE EFFECTS OF TITANIUM AND GRAPHENE ADDITIONS TO ALUMINA AS A MATRIX MATERIAL

Keywords

Al₂O₃, Ti, graphene, sintering, mechanical, properties

Abstract

In this review, composite studies using titanium and graphene additions to alumina as matrix materials are summarized. In the light of studies conducted in recent years, the importance of graphene reinforcement and the effects of titanium reinforcement on the properties of ceramic matrix composites have been stated. Alumina matrix composites, which are the most widely used ceramic matrix composites, have been used in the industry from past to present due to their properties such as low density, high hardness and chemical stability. However, the low fracture toughness of alumina (3.5 MPa.m^{1/2}) limits its usage area, therefore, the existing mechanical properties are improved with second phase additions, and higher hardness and fracture toughness are obtained with the reinforcements. Although it has been stated in the reviewed studies that titanium reinforcement into alumina matrix generally results in lower hardness, fracture toughness and bending strength compared to monolithic alumina and that titanium reinforcement is an important step in improving the properties of alumina with low fracture toughness, some studies have shown that titanium addition has increased fracture toughness (4,32 MPa.m^{1/2}) and has been reported to increase bending strength. Studies have shown that a second reinforcement material is added to the Al₂O₃-Ti composite in order to improve the mechanical properties obtained by reinforcing titanium into alumina matrix. It has been observed that literature studies on the addition of graphene to the Al₂O₃-Ti structure are limited. In a limited study, results were obtained that graphene reinforcement reduced porosity and increased conductivity, wear resistance, hardness and fracture toughness (8.7 MPa.m^{1/2}) compared to monolithic alumina and other reinforcements. These data show that the use of graphene supplements will continue to increase. In this review, the addition of titanium and graphene powders to the alumina matrix, production methods by powder metallurgy method, and the effects of the reinforcements on microstructure and mechanical properties were examined.

Derleme Makalesi

Review Article

Başvuru Tarihi : 16.01.2024

Submission Date : 16.01.2024

Kabul Tarihi : 02.05.2024

Accepted Date : 02.05.2024

Extended Abstract

Introduction

In this review, composite studies using titanium and graphene additions to alumina as matrix materials are summarized. In the light of studies conducted in recent years, the importance of graphene reinforcement and the effects of titanium reinforcements on the properties of ceramic matrix composites are stated. In this study, the reinforcement materials applied to alumina matrix composites and the importance of titanium and graphene reinforcements as reinforcement materials are mentioned. In this context, by examining the publications made in recent years, the production methods and sintering processes of alumina matrix composites, and the post-production mechanical properties of Ti and Graphene reinforced alumina composites have been extensively examined.

Objectives/ Research Purpose

Alumina is more widely used than other oxide ceramics in advanced engineering studies due to its high mechanical and physical properties. Alumina is used in the production of cutting edges, automotive, defense, space industries and medical parts due to its high hardness, wear and corrosion resistance. Although alumina can replace metals and alloys due to its superior properties such as density, thermal expansion coefficient and hardness, its disadvantages such as low fracture toughness and thermal shock resistance come to the fore. In order to benefit from the superior properties of alumina, efforts to improve this fragile structure with second phase additions are continuing rapidly, as it is known that the addition of the second phase particle to the ceramic matrix will provide improvement in mechanical properties. It is seen in the literature studies that the composites obtained by reinforcements to the alumina matrix will be obtained through appropriate processes in order to improve the existing properties. With this study, the effects of Ti and Graphene reinforcements will be examined in order to benefit from the superior properties of alumina and will contribute to the literature.

Results/Findings

In this study, a comprehensive literature review was conducted on the effects of Ti and Graphene reinforcements on mechanical properties of Al_2O_3 matrix composite materials and their production methods. As a result of literature research, the use of Al_2O_3 matrix composite materials has been increasing for many years. Due to the brittle structure of Al_2O_3 , samples were obtained with many reinforcing elements in different ratios, different sintering methods and parameters, and the physical and mechanical properties of these samples were tried to be determined in the studies. In the TM method used in the production of Al_2O_3 matrix composites, high density and low porosity structures are obtained. has been detected. It has been determined that choosing the appropriate compression pressure for the sintering method to be applied in conjunction with the pressing and sintering processes in the production of Al_2O_3 matrix composites significantly affects the strength values to be obtained after sintering. Although Ti addition to the Al_2O_3 matrix is an important step in improving the properties of alumina with low fracture toughness, and although it has been reported in some studies that Ti addition increases fracture toughness and bending strength, it has been determined that Ti additions generally yield lower results in hardness, fracture toughness and bending strength compared to monolithic alumina. Considering that graphene is a new reinforcement material compared to others, it has been observed that the number of studies on graphene reinforcement into the Al_2O_3 matrix is limited. In studies on the subject, it has been determined that the porosity of composites with graphene reinforcement decreases and the conductivity, wear resistance, hardness, fracture toughness and bending strength increase compared to monolithic alumina and other reinforced samples. Additionally, it has been determined that mechanical properties are negatively affected by increasing graphene amounts above the optimal level.

1. Giriş

Günümüz mühendislik çalışmalarında enerji tasarrufu, yüksek dayanım ve hafiflik gibi malzeme özelliklerinin bir arada tutularak yeni malzemelerin geliştirilmesi ihtiyacı uzay, savunma ve otomotiv gibi endüstrinin temel alanlarında geliştirme çalışmalarının hız kazanmasını sağlamıştır. Bu geliştirme çalışmaları mevcut mühendislik malzemelerinin yerini almakta olan kompozit malzemelerin üretiminin de hız kazanmasını sağlamıştır. Kompozitler farklı malzemelerin birleştirilmesi ile oluşturulan ve bileşimde kullanılan fazların tekil olarak gösteremeyeceği daha yüksek özelliklerin elde edildiği yeni bir malzeme olarak tanımlanmaktadır. Kompozit malzemeler matris fazına kazandırılmak istenilen özelliklere sahip ikinci fazların ilaveleri ile elde edilen malzemelerdir. Bu sebeple daha çok olan yapı matris fazı olarak adlandırılır ve genel olarak matrisin özelliklerinin iyileştirildiği kabul edilmektedir. Matris malzemesine ilavesiyle özellikleri iyileştiren ikinci malzemeler ise takviye faz olarak adlandırılmaktadır. Birçok uygulamada takviye fazı matristen daha sert ve dayanıklıdır. Matrise ilave edilen faz yapısı farklı geometrilerde olabilmekte ve bu da ilave fazın etkisini üzerindeki ana parametre olarak belirtilmektedir. Takviye fazları partikül yapılı, kısa fiber (visker), tabakalı yapı ve sürekli fiber olarak farklı şekillerde olabilmektedir. Şekil 1’de takviye çeşidine göre kompozit malzemeler sematik olarak verilmiştir. Matris yapısının farklı bir işlevsel özelliği de ilave edilen fazları yük altında bir arada tutmak ve yükün homojen dağılımını sağlamaktır. Kompozitler matris malzemesine göre polimer matrisli, metal matrisli ve seramik matrisli olarak ana gruplarda sınıflandırılmışlardır (Ayaş, 2003; Gürbüz ve Mutuk, 2019).



Şekil 1. Takviye Çeşidine Göre Kompozit Malzemeler (Yontar, 2021)

Seramik, üretimi ve kullanımı eski çağlara dayandığı arkeolojik çalışmalarla tespit edilmiş malzeme olup, günümüze gelinceye kadar geliştirilerek teknik, ileri teknoloji seramikler adını alarak savunma, otomotiv, biyomedikal, kesici takım sanayisi gibi geniş bir üretim yelpazesinde kullanımı devam etmektedir (Rende ve Hanyaloğlu, 2012). Yüksek sıcaklık dayanımları, düşük özgül ağırlık, korozyon direnci, yüksek sertlik ve aşınma dayanımı gibi yüksek özellikleri endüstrinin ilgisini çekmiş bir malzeme grubu olmasına rağmen eğilme dayanımı ve kırılma tokluğunun zayıf yapıda olması özellikle yüksek sıcaklık ve ağır yüklemelerde güvenilirliğini düşürmektedir (Yin, Yuan, Huang, ve diğ., 2016). Kırılma yapıdaki

seramiklerin özelliklerini iyileştirmenin bir yolu ikinci takviye fazının ilavesidir. Elde edilen yapı seramik matrisli kompozit malzeme (SMK) olarak adlandırılmakla birlikte 1980'li yıllarda üretilmeye başlanarak günümüze kadar yaygın olarak kullanılarak gelmiştir. SMK üretiminde kullanılan ilave fazlar yoğunlaşma aşamasını güçlendirmekte, imalat sürecindeki proseslerin daha karmaşık hale gelmesine yol açmaktadır (Ayaş, 2003).

Son yıllarda mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmakta olan alümina (Al_2O_3) seramikleri, yirminci yüzyılda talaşlı imalat yöntemlerinde kesici uç üretimi için geliştirilmeye başlanmıştır. Alümina, mekanik özellikleri sayesinde çeşitli uygulamalarda yaygın kullanımı sebebiyle endüstride geleneksel olarak kullanılmakta olan metal ve alaşımlarının yerini almıştır. Yüksek sertlik ve aşınma dayanımı ile özgül ağırlığının düşük olması ve korozyon dayanımı gibi avantaj sağlayan özelliklerinin yanı sıra kırılma tokluğunun ve çekme dayanımının oldukça düşük olması alüminanın dezavantajları olarak belirtilmektedir (Ayaş, 2003; Özdemir, 2006; Rende ve Hanyaloğlu, 2012; You ve diğ., 2005).

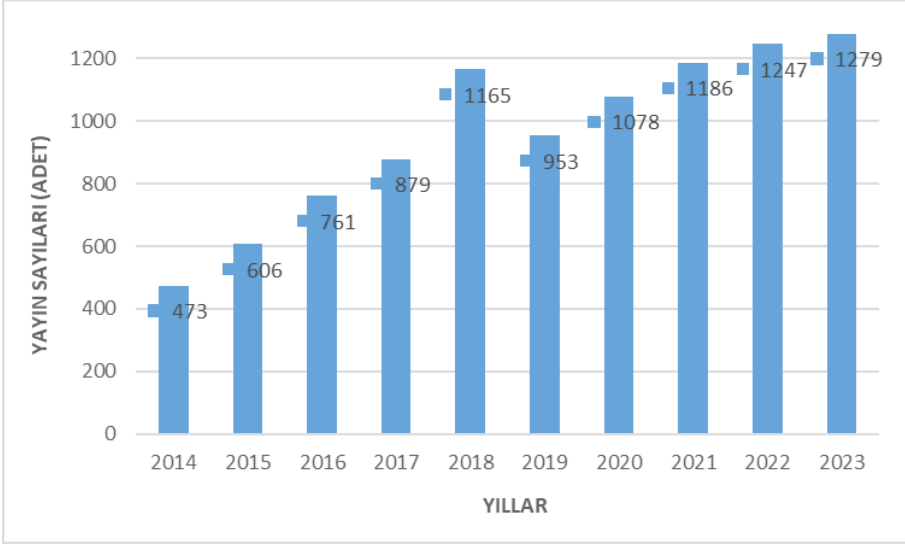
Alümina yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren, özgül ağırlığın düşük olması istenilen ve aşınma dayanımının yüksek olmasını gerektiren birçok özel mühendislik çalışmalarında kullanılmaktadır. Ancak kırılma tokluğunun düşük olması alüminanın kullanımında dezavantaj sağlamaktadır. Bu durum incelendiğinde sinterleme sonrası yüksek oranda kapalı porozite içermesi ve sinterleme ile oluşan tane büyümesinin önüne geçilememiş olması mekanik özelliklerini zayıflatmakta ve kırılma tokluğunu düşürmektedir (Ayaş, 2003; Özdemir, 2006; You ve diğ., 2005). Bu amaçla alüminanın gevrek ve kırılmanlı yapısının daha sünek hale getirilmesi ve kırılma tokluğunun artırılması için uzun süredir araştırmalar devam etmektedir. Yapılan çalışmalarda faz dönüşümü ile mekanik özelliklerin iyileştirilmesi ve sünek yapılı ikinci metal fazların alümina matrisine ilave edilmesi gibi yöntemler uygulanarak gevrek ve kırılmanlı yapısının iyileştirildiği ve kırılma tokluğunun daha yüksek olduğu alümina matrisli kompozitler üretilmiştir (Yin ve diğ., 2013; Yin, Yuan, Huang, ve diğ., 2016; You ve diğ., 2005). Bu çalışmalarda alüminaya mekanik özelliklerini geliştirmek ve kırılma tokluğunu artırmak için TiC (Cheng ve diğ., 2017), Ti (Meir, Kalabukhov, Frage ve Hayun, 2015), Ni (Lu ve diğ., 2020), Grafen (Gutierrez-Gonzalez ve diğ., 2015) olmak üzere birçok ikinci takviye malzemesi ile çalışmalar yapılmıştır. Alümina matrisine yapılan bu takviyeler ile sertlik, yoğunluk, kırılma tokluğu, aşınma dayanımı gibi özelliklerde uygun takviye oranları ile artış sağlandığı belirtilmiştir (Cheng ve diğ., 2017; Gutierrez-Gonzalez ve diğ., 2015; Yin ve diğ., 2013; Yin, Yuan, Huang, ve diğ., 2016; You ve diğ., 2005).

Kompozit malzeme üretiminde takviye fazlarının seçimi, elde edilecek kompozit malzemeden istenilen özelliklere göre uygun imalat yöntemi ve oluşacak

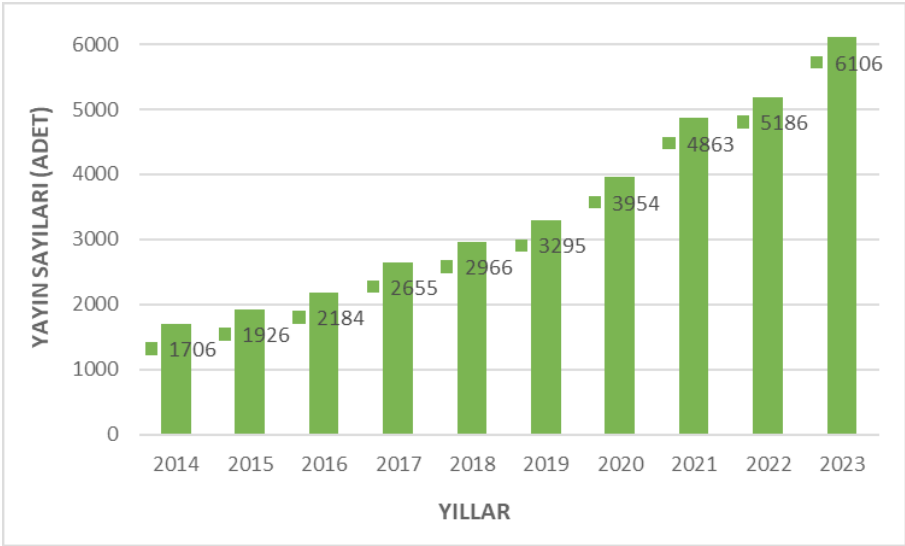
maliyetler hesaplanarak değişkenlik gösterebilmektedir. Titanyum malzemeler düşük özgül ağırlık, korozyon direnci ve diğer metallere kıyasla mukavemetinin yüksek olması sebebiyle medikal, savunma ve uzay endüstrisinde alüminyum alaşımlarının yerine kullanılmaya başlamıştır. Ancak titanyumun maliyet kriterlerine göre yüksek olması ve temas halinde çalışma esnasında çabuk aşınmaya uğraması dezavantaj olarak öne çıkmaktadır. Yüksek mekanik özellikleri sebebiyle son yıllarda alümina matrisli kompozitlerde gevrek ve kırılğan yapıya sünek yapıli metal takviyeleri çalışmalarında titanyum ilavesi araştırmaları hız kazanmıştır. Yapılan araştırmalarda alümina matrise Ti ilavesinin sertliği artırdığı ve kırılma tokluğunu iyileştirdiği ve bunun yanı sıra Ti'nin yanında ikinci bir faz takviyesi ile de daha yüksek mekanik özelliklerin elde edilebileceği bildirilmiştir (Bahraminasab, Ghaffari ve Eslami-Shahed, 2017; Meir ve diğ., 2015; S. Shi, Cho, Goto, Kusunose ve Sekino, 2018; S. Shi, Sekino, Cho ve Goto, 2020).

Yapılan çalışmalarda karbon esaslı takviye fazı seçimlerinde grafit ve karbon nanotüp seçilirken yapılan son ar-ge çalışmaları ile birlikte grafen daha çok kullanılmaya başlanmıştır. Grafeni oluşturan kuvvetli karbon bağları sebebiyle mukavemet açısından en iyi malzemeler grubuna girmiştir. Grafen takviye elemanı olarak kullanıldığında sahip olduğu yağlayıcılık özelliği sayesinde kompozitlere düşük sürtünme ve yüksek aşınma dayanımı özellikleri sağlamaktadır. Grafenin düşük özgül ağırlığı, çok ince yapısı ve mukavemetinin yüksek olması özellikle son yıllarda bilimsel çalışmalarda önemi giderek artmaktadır (Gürbüz ve Mutuk, 2019). Bu bakımdan grafenin takviye elemanı olarak alümina matrisli kompozitlerde kullanımı ile alümina matrisli kompozitlerin kırılma mukavemeti ve iletkenlik gibi özelliklerinin iyileştirdiği görülmekte fakat yapılan literatür çalışmalarının yetersiz olduğu bu sebeple literatürün bu açığını geliştirmek Grafenin sağlayacağı üstün özelliklerden faydalanmak adına önem arz etmektedir.

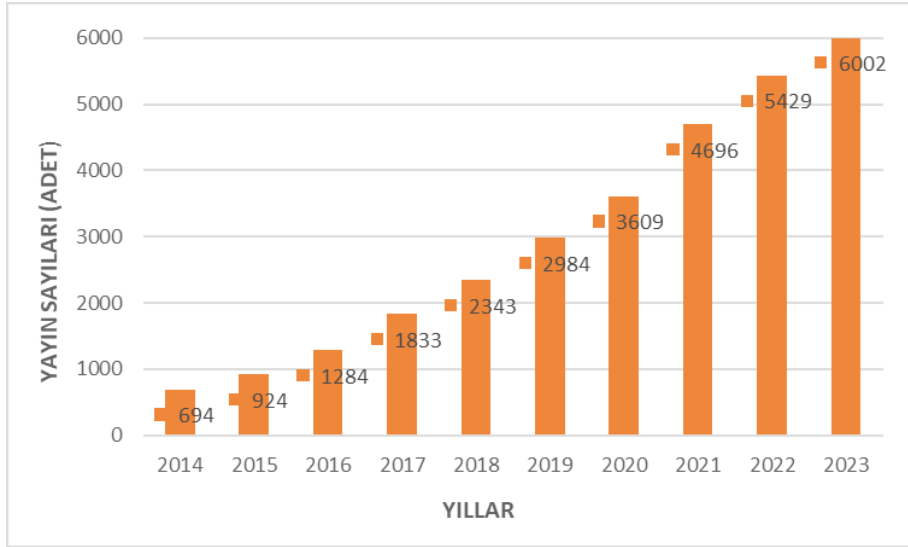
Alümina matrisli kompozitler konusunda son 2014-2023 yıllarının literatür taraması yapıldığında Science Direct veri tabanında günümüze kadar 9627 çalışma yapılmış olup, bu çalışmaların 5743 adedi son 5 yıl içerisinde yapıldığı görülmüştür. Bu literatür çalışmalarının son yıllarda yoğunluğunun artması alümina matrisli kompozitlerin kullanımının arttığı ve yapılacak yeni çalışmalar ile literatüre katkının devam edeceğini göstermektedir. Şekil 2'de alümina matrisli kompozitler, Şekil 3'de Ti takviyeli kompozitler ve Şekil 4'de Grafen takviyeli kompozitler hakkında yapılan literatür çalışmalarının yıllara göre dağılımları verilmiştir. Hem matris malzemesi hem de takviye malzemelerinin giderek artan sayılarda literatür çalışmaları konunun dünya genelinde önemini göstermekle birlikte literatür açığının kapanmasına katkı sağlamak, ülkemiz endüstrinin gelişimine katkı sağlayacak yeni nesil malzeme üretimini konusunda faydalı olacaktır.



Şekil 2. Alümina Matrisli Kompozitler Konusunda 2014-2023 Yılları Arasında Yapılan Yayınlar



Şekil 3. Ti Takviyeli Kompozitler Konusunda 2014-2023 Yılları Arasında Yapılan Yayınlar



Şekil 4. Grafen Takviyeli Kompozitler Konusunda 2014-2023 Yılları Arasında Yapılan Yayınlar

Şekil 3’de verilen Ti takviyeli kompozitler incelendiğinde son on yılda 34.841 çalışma yapılmış olup çalışmaların her yıl arttığı ve son 5 yıl içerisinde 23.404 çalışmanın yapıldığı görülmektedir. Şekil 4’te verilen Grafen takviyeli kompozit çalışmaları incelendiğinde son on yılda 29.798 çalışmanın yapıldı ve her yıl çalışma sayısının arttığı ve bununla birlikte son 5 yılda 22.720 çalışmanın yapıldığı görülmektedir.

Yapılan bu çalışmada alümina matrisli kompozitlere titanyum-grafen takviyelerinin önemine değinilmiştir. Önceki çalışmalar incelendiğinde alümina matrise yapılan takviyelerde mekanik özelliklerde artış sağlandığı belirtilmiş ancak Ti takviyeleri ile elde edilen mekanik özelliklerin geliştirilmesi açısından yapılan çalışmalarda Ti’nin yanında ikincil faz ilavelerinde grafen takviyesi çalışmalarının oldukça yetersiz olduğu belirlenmiştir. Bu amaçla yapılan bu çalışmanın literatürde az sayıda değinilmiş bir konu olan ve grafenin Al_2O_3 -Ti kompozitlerine ilavesi ile elde edilecek mekanik özelliklerin mühendislik uygulamalarına sağlayacağı avantajlar, bu çalışmanın özgünlüğünü ortaya koymaktadır. Bu kapsamda son yıllarda yapılan yayınlar incelenerek alümina matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri ve sinterleme işlemleri, Ti ve Grafen takviyeli alümina kompozitlerin üretim sonrası mekanik özellikleri geniş kapsamda değerlendirilmiştir.

2. Matris Malzemesi Olarak Al_2O_3 ve Özellikleri

Alümina, 1887 yılında Bayer’in çalışmaları ve 1892 yılında boksitlerden NaOH çözeltilisinde yüksek sıcaklık ve basınç ile alüminanın ayrıştırılması ile günümüze

gelinceye kadar üretimin %95'i bu proses ile yapılmaktadır. Yaygın olarak kullanılmakta olan bu proses bir takım kimyasal reaksiyonlar içermektedir ve proses kısaca boksitin 80 veya 100 meshe öğütülmesi sonrasında özel tanklarda 3,5-5 atm basınç altında 160-170°C NaOH ile reaksiyona sokulması şeklinde özetlenebilir. Bu işlemlerin ardından %99,55 saflıkta Al_2O_3 elde edilmektedir. Ergime derecesi yaklaşık 2000 °C olan alümina yüksek sıcaklıklarda korozyona ve uygulanan yüklere karşı dayanımı en yüksek olan malzemeler arasında yer almaktadır. Saf alümina nispeten düşük sıcaklıklarda farklı formlarda olurken, tane boyutu ve atmosfer şartlarına göre 750-1200 °C aralıklarında α -alümina yapısına dönüşmekte, ayrıca 1600 °C üzerindeki sıcaklarda bu dönüşüm işlemi daha hızlı olmakta ve oluşan bu fazın dönüşümü tersinir formda değildir (Çerezci, 2008; Öztürk, 2007).

Alümina yüksek mekanik ve fiziksel özellikleri sebebiyle ileri mühendislik çalışmalarında diğer oksit seramiklerden daha yaygın olarak kullanım alanı bulmaktadır. Malzemenin yüksek sertlik, aşınma ve korozyon direncine sahip olması kesici uç, otomotiv, savunma, uzay endüstrileri ve medikal parçalarının üretiminde yaygın olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Birçok uygulamada kullanılan alüminanın farklı saflık derecelerindeki özellikleri Tablo 1'de karşılaştırılmıştır.

Tablo 1. Farklı Saflık Oranlarındaki Alüminanın Özellikleri (Çerezci, 2008)

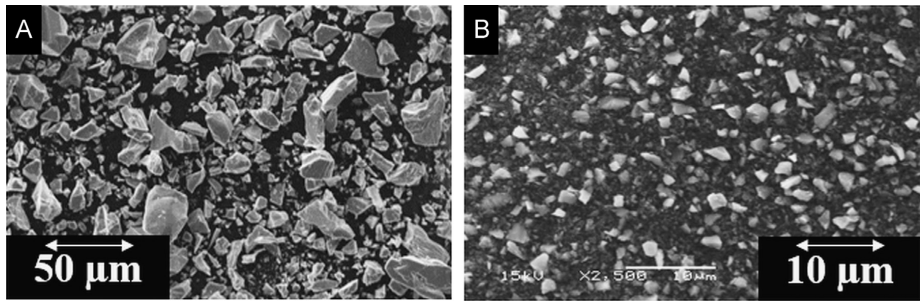
Alümina İçeriği %	85	95	99,7
Yoğunluk (g/cm^3)	3,5	3,7	3,9
Bağıl dielektrik sabiti	8,5	9,2	9-10,1
Dielektrik mukavemeti (kV/mm)	28	-	10-35
Özdirenç, Ωcm (600 °C'de)	4×10^6	5×10^9	4×10^{10}
Termal iletkenlik (W/m °C)	15	20	28-35
Termal genleşme katsayısı	7	7,6	8
Maksimum kullanım sıcaklığı (°C)	1300	1500	1700
Eğme mukavemeti (MPa)	300	350	350
Basma mukavemeti (MPa)	1800	2000	2200-2600
Elastik modül (GPa)	260-330	340-375	380-410
Poisson oranı	0,22-0,25	0,23-0,26	0,24-0,27
Sertlik (HV ₁)	800-1000	1200-1600	1500-2000

Tablo 1'de alüminanın yoğunluk, termal genleşme katsayısı, sertlik gibi üstün özelliklerinin sağladığı avantajları sebebiyle metal ve alaşımlarının yerini almasını sağlasa da alüminanın düşük kırılma tokluğu ve termal şok direncinin zayıf

olması dezavantajları ön plana çıkmaktadır. Alüminanın üstün özelliklerinden faydalanmak adına kırılğan olan bu yapının, ikinci faz partikülünün seramik matrise ilavesinin mekanik özelliklerde sağlayacağı gelişme bilindiğinden, ikinci faz ilaveleri ile geliştirilme çalışmaları hızla devam etmektedir (You ve diğ., 2005). Alümina matrise yapılan takviyeler ile elde edilen kompozitlerin mevcut özelliklerin geliştirilmesinin uygun proseslerle gerçekleştirildiği yapılan literatür çalışmalarında görülmektedir.

3. Ti Takviyeli Kompozitler

Ti esaslı malzemeler düşük yoğunluk, yüksek mekaniksel dayanım, yüksek korozyon direnci ve biyouyumluluk gibi birçok avantaja sahiptirler. Ancak kendi veya başka malzemelerle temas halinde çalıştıklarında çabuk aşınmaya maruz kalmaktadırlar. Al_2O_3 gibi seramikler yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı ve düşük aşınma oranı gibi özelliklere sahipken kırılma toklukları ve çekme dayanımları oldukça düşüktür. Bu sebeple gevrek olan Al_2O_3 matrise daha sünek ilave malzemelerin takviye edilmesi konusunda birçok çalışma yapılmış olup, Ti ilavesi konusunda yapılan çalışmalarda son yıllarda hız kazanmış olmakla beraber oldukça yetersiz aşamadır (Bahraminasab ve diğ., 2017; Meir ve diğ., 2015; S. Shi, Sekino, ve diğ., 2020). Al_2O_3 seramik ve Ti metalinin sinterlenmesi ile elde edilecek olan kompozit umut vaat eden bir malzeme olarak adlandırılmakta olup, alümina matrise Ti ilavesiyle kırılma tokluğu, sertlik gibi mekaniksel özelliklerde artış görüldüğü bildirilmektedir (S. Shi ve diğ., 2018; S. Shi, Sekino, ve diğ., 2020). Şekil 5’de Ti tozu ve karıştırma işlemi sonrası Al_2O_3 ve Ti tozlarının SEM görüntüleri verilmiştir. Tablo 2’de yüksek saflıkta (%99,9) Ti’nin özellikleri verilmiştir.



Şekil 5. SEM Görüntüsü A) Ti Tozu, B) Karıştırma Sonrası Al_2O_3 -Ti Tozları (Meir ve diğ., 2015)

Tablo 2. Titanyumun Özellikleri (Manes ve Giglio, 2018)

Yoğunluk	p	4,52 kg/dm ³
Elastisite modülü	E	122000 Mpa
Poisson's oranı	v	0,32
Statik akma gerilimi	A	236 MPa
Sertleşme modulu	B	245 Mpa
Sertleştirme katsayısı	n	0,539
Gerilme oranı katsayısı	C	0,0125
Kopmada efektif plastik deformasyon	PSFAIL	1,2483

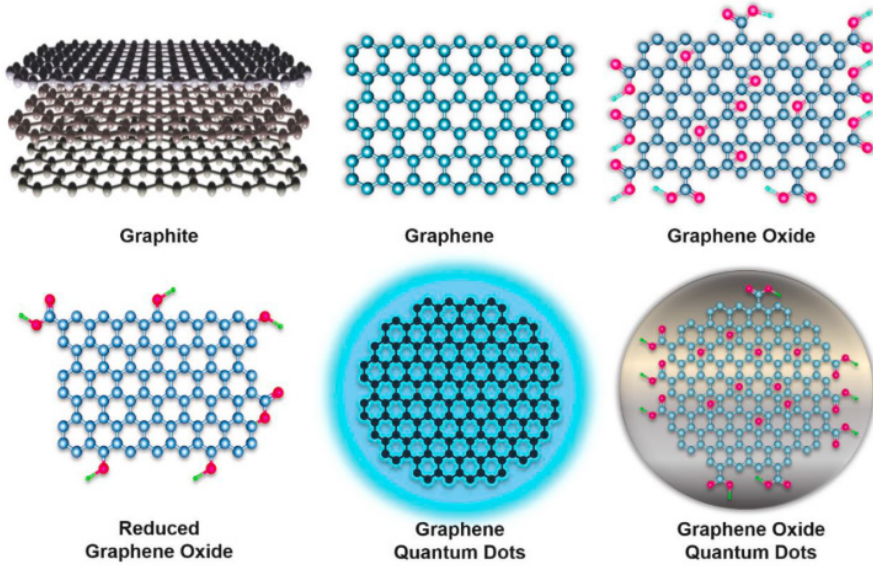
Takviye malzemesi olarak Ti kullanımı özellikle alümina gibi kırılma tokluğu düşük olan seramik yapıların daha sünek ikinci bir faz takviyesi ile iyileştirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda Ti takviyelerinin genel olarak monolitik alüminaya kıyasla kırılma tokluğunu iyileştirdiği ancak yüksek oranlarda Ti takviyelerinin mekanik özellikleri düşürdüğü belirtilmiştir. Bunun sebebi olarak çatlak ilerlemelerinin alümina fazında taneler arası, Ti fazında tane içi kırılma olması, alümina-titanyum arayüzlerinin kuvvetli olmamasına neden olacağından yüksek oranlı Ti ilavelerinin mekanik özellikleri düşürdüğü bildirilmiştir (Meir ve diğ., 2015).

4. Grafen Takviyeli Kompozitler

Grafen ilk kez 2004 yılında Novoselov'in yaptığı çalışmalarla sentezlenmiş olup, 2010 yılından itibaren üzerinde yapılan çalışmalar artarak kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır (Bedeloğlu ve Taş, 2016; Dörtoğul, 2018; Santra, Bose, Mitra ve Adalder, 2024; Şenel, Gürbüz ve Koç, 2015, 2017). Grafen karbon atomlarının hegzagonal şekilde bal peteği şeklinde dizilimi ile oluşan iki boyutlu nano yapı bir malzemedir. Dijital teknoloji endüstrisinde iletkenliğinin yüksek olmasından kaynaklı yaygın olarak kullanılmasının yanı sıra, sahip olduğu mekanik özellikler sayesinde de otomotiv, uçak ve savunma sanayilerinde de kullanımı artmaya başlamıştır (Dörtoğul, 2018; Santra ve diğ., 2024; Şenel ve diğ., 2015, 2017). Grafenin matrise ilavesiyle mekanik özelliklerinin arttığına anlaşılması üzerine Al matrise Grafen takviyesi yapılarak çekme dayanımının incelendiği çalışmada, ikinci faz olarak %3 Al₂O₃ ilavesinin çekme dayanımını %249 artırarak 464 MPa ulaştığı belirtilmiştir (Wan ve diğ., 2023). Tablo 3'de Grafene ait mekanik özellikler verilmiştir. Şekil 6'da ise karbon esaslı malzemelerin şematik gösterimi verilmiştir.

Tablo 3. Grafene Ait Mekanik Özellikler (Koruyucu ve Soy, 2019)

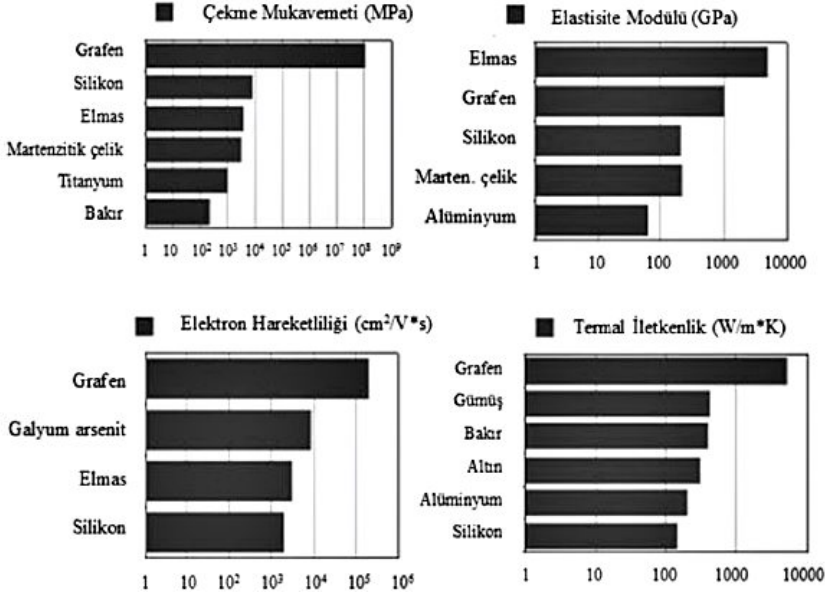
Grafen	Kristal Yapısı	Çekme Dayanımı MPa	Yoğunluk g/cm ³	Elastisite Modülü GPa	Ergime Sıcaklığı °C
	sp ² -Hegzagonal	130500	2,25	1000	5503,85



Şekil 6. Karbon Esaslı Malzemelerin Şematik Gösterimi (Santra ve diğ., 2024)

Grafenin bilinen en önemli özelliği olan elektriksel iletkenliğinin yanında Şekil 7'de diğer malzemelerle karşılaştırılması yapılarak değerlendirilen çekme mukavemeti, elastisite modülü termal iletkenlik, elektron hareketliliği gibi özelliklerinin de endüstride çok geniş kullanım alanı olan alüminyum, çelik gibi malzemelerden yüksek olması kullanımını ve gelişimini artırmakta (Şenel ve diğ., 2015) ve bu özelliklerinden faydalanmak adına mekanik özelliklerin geliştirilmesi için alüminyaya takviye fazı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Al₂O₃ seramiklerin düşük olan kırılma tokluğu ve elektriksel iletkenliğinin grafen takviyesi ile artırıldığı yapılan çalışmalarda bildirilmektedir (Stolyarov, Frolova ve Sudzhanskaya, 2020) the ceramic materials were studied over a wide temperature range, 23–530 °C and over a frequency range of 10–1 – 106 Hz. More than a half decrease in the porosity of the sintered composite with an increase in the graphene content was observed. Raman spectroscopy indicated the absence of graphene degrada-

tion during the SPS. The range of frequencies (100–103 Hz. Ancak grafenin kompozitlere ilave miktarının diğer malzemelerden daha az olduğu bu sebeple grafen takviyesinden elde edilmesi beklenen yüksek mekanik özelliklerin grafenin homojen dağılımı ile elde edileceği göz önünde tutulmalıdır (Şenel ve diğ., 2015).



Şekil 7. Grafenin Özelliklerinin Diğer Malzemelerle Karşılaştırılması (Gürbüz ve Mutuk, 2019)

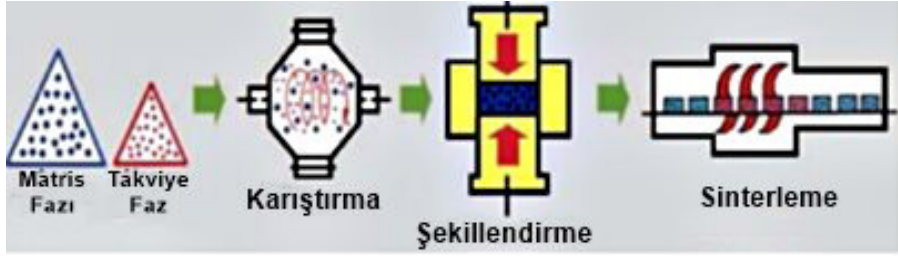
Al matrisine Grafen/TiO₂ ilavesinin mekanik özelliklere etkilerinin incelendiği çalışmada, takviyelerin aynı oranlarda %1,2,3 yapıldığı, en yüksek mekanik özelliklerin %2 takviye oranında elde edildiği belirtilmiştir. Bu çalışmada 137 HV sertlik ve 334 MPa çekme dayanımına ulaşıldığı, aşınma oranının ise %65 azaldığı bildirilmiştir (Ghazanlou ve diğ., 2023).

5. Al₂O₃ Esaslı Ti ve Grafen Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Metoduyla Üretim Yöntemleri

5.1 Toz Metalurjisi

Toz metalürjisi (TM), metal ve alaşım tozlarının farklı oranlarda, basınç altında kalıp içerisinde belirli bir şekil ve istenilen formun sağlanması amacıyla tüm bileşen tozların atmosfer kontrollü ortamda ısıtılması işlemi olarak tanımlanabilir. Diğer bir açıdan metal ve alaşım tozlarının uygun işlem basamaklarından geç-

rek mühendislik parçalarına dönüştürülmesidir. TM işlemi genel olarak, uygun tozların üretimi, tozların karıştırılması, tozların basınç altında şekillendirilmesi ve sinterleme olmak üzere dört ana aşamadan meydana gelmektedir (Çivi, 2016; Koruyucu ve Soy, 2019). Şekil 8’de TM’nin aşamaları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 8. TM'nin İşlem Adımlarının Şematik Gösterimi (Koruyucu ve Soy, 2019)

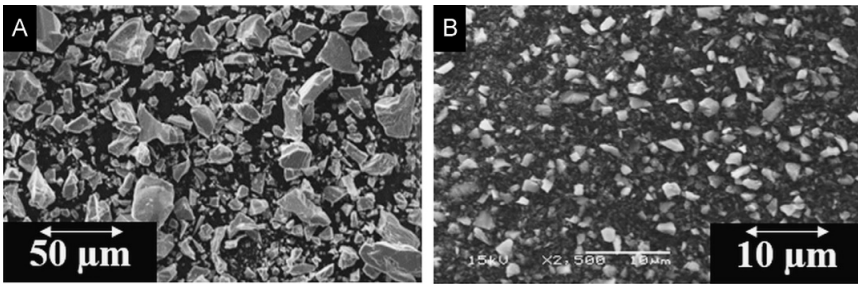
Tozların üretimi ve karıştırılması homojen dağılım sağlanması ve istenilen yapıda kompozitlerin elde edilmesini sağlamak açısından oldukça önemli bir işlem basamağıdır (Çivi, 2016; Koruyucu ve Soy, 2019). Bu konuda detaylı literatür incelemesi yapılmıştır. Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

5.1.1 Tozların Üretimi ve Karıştırılması

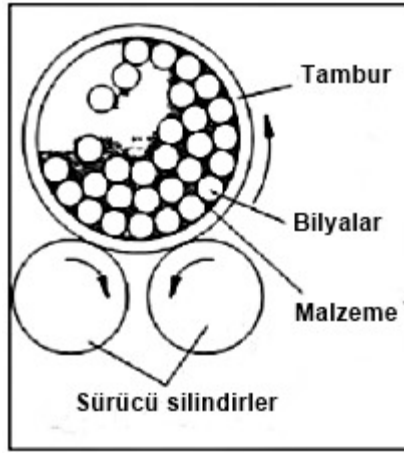
Tüm malzemeler toz haline getirilebilir fakat tozların nasıl üretildiğinin bilinmesi başlangıçta tozların şekil ve yapıları hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlamaktadır (Çivi, 2016). TM’de tozların üretilmesi ve topaklanmaların önlenmesi için öğütme olarak da adlandırılan işlem, bilyalı değirmenler içerisinde kaba olarak işlenmiş tozların dönen veya titreşen bilyalar arasında daha küçük boyutlu tozların elde edilmesi veya karıştırılması şeklinde gerçekleşmektedir. Eğer tozlar gevrek yapıda ise ince taneli tozlar elde edilirken, sünek yapıli tozlarda ise yassılaştır ve gevrek yapıya dönerek ince toza dönüşeceklerinden işlem süreleri daha uzun olmaktadır. Bu sebeple su, alkol gibi sıvı kullanılarak hem işlem hızlandırılır hem de ince taneli tozlar elde edilmiş olur (Çivi, 2016; Şenel, Gürbüz ve Koç, 2018). Karıştırma işleminin amacı ise tozların homojen dağılımını sağlayarak tozların presleme ve sinterlemeye hazır hale getirilmesini sağlamaktır. İyi bir karışım işlemi homojen dağılımlı kompozitlerin üretilmesini sağlamaktır (Çivi, 2016). Şekil 9’de öğütme işleminin şematik gösterimi verilmiştir.

Alümina matrisli kompozitlerin üretiminde tozların üretim ve karıştırılması konusunda yapılan çalışmalarda; Al_2O_3 matrise TiC ilaveli kompozit üretimi konusunda yapılan bir çalışmada, %56 Al_2O_3 (0,5 μm), %6 TiC nano boyutlu parçacıkları (40nm), %35 TiC nano boyutlu parçacıkları (0,5 μm) ve %2 Co (2 μm) karışım oranlarında ve toz boyutları ile üretim yapıldığı belirtilmiştir (Yin, Yuan, Huang, ve diğ., 2016). Al_2O_3 -TiC seramik kompozitlerinde tane boyutunun incelendiği

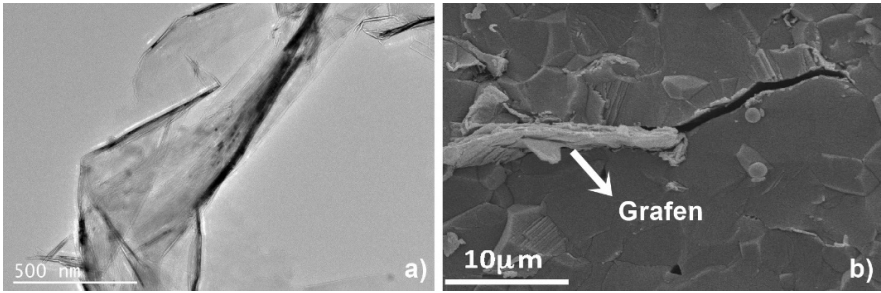
çalışmada, %70Al₂O₃-%30TiC karışım oranında, 0,24, 3,12 µm Al₂O₃ tozu, 0,32-1,36 µm TiC tozu kullanıldığını, öğütme ve karıştırma işlemleri için 1, 2 ve 24 saat sürelerinin uygulandığı bildirilmiştir (You ve diğ., 2005). Al₂O₃/Ti kompoziti üretiminin yapıldığı farklı bir çalışmada Al₂O₃ matrise %20,40,60,80,100 oranlarında Ti ilavesi yapıldığı, Al₂O₃ (0,5 µm) tozu ve Ti (325 mesh) tozunun hazır satın alındığı ve karıştırma işleminin etanol ilavesi yapılarak 72 saat işlem parametresinde gerçekleştirildiği bildirilmiştir (Meir ve diğ., 2015). Al₂O₃/Ti kompoziti üretimi konusunda yapılan diğer bir çalışmada Al₂O₃ matrise %25,50,75,100 oranlarında Ti ilavesi yapıldığı, Al₂O₃ (0,1-3 µm) tozu ve Ti (325 mesh) tozunun hazır satın alındığı, tozlarının karıştırmasının 100 d/dk, 1 saat işlem parametresinde gerçekleştirildiği bildirilmiştir (Bahraminasab ve diğ., 2017). Al₂O₃/Grafen kompoziti üretimi çalışmasında Al₂O₃ matrise %0,5, 1 ve 2 oranlarında Grafen ilavesi yapıldığı, Al₂O₃ tozlarının 36 nm ve Grafen tozlarının ise 3 nm ile 2-3 µm boyutlarında pullar şeklinde olduğu ve tozların karışım oranlarında birleştirilerek öğütüldüklerini bildirmişlerdir (Stolyarov ve diğ., 2020). Al₂O₃-ZrO₂ ve Al₂O₃-Ti (C,N) matrislere Grafen takviyesinin incelendiği çalışmada % 0,2, 0,5, 0,7, 1 oranlarında Grafen takviyesi yapıldığı, grafen tozunun ise 4-5 µm kalınlık ve 12 nm tane boyutlarında olduğu ve karıştırma işleminin izopropil alkol ile 8 saat süresince yapıldığı bildirilmiştir (Petrus ve diğ., 2019). Santrifüjlü döküm yöntemiyle üretilmiş Al₂O₃-Ti-Ni kompozitlerinde farklı oranlarda karışımlardan hazırlanan numuneler içerisinde en yüksek sertliğin homojenliği en iyi sağlanan mikroyapıda elde edildiği belirtilmiştir (Zygmuntowicz ve diğ., 2022). Şekil 10'da ham madde olarak kullanılan TiH₂ tozu ve Al₂O₃-TiH₂ tozlarının karışımının SEM görüntüsü verilmiştir. Karıştırma işlemi öncesi toz boyutlarının karıştırma işlemi ile küçüldüğü ve keskin köşeli geometrik yapıların giderildiği görülmektedir. Bu işlem ile tozlar arasında boşlukların azaltılması sağlanmakta, sinterleme sonrası yüksek yoğunluk ve düşük porozite elde edilmektedir (Meir ve diğ., 2015). Şekil 11'de Grafenin SEM görüntüsü ve karışım sonrası alümina matris içerisinde tane sınırlarındaki SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 10. a) TiH₂ tozu, b) Al₂O₃- TiH₂ karışımı SEM Görüntüleri (Meir ve diğ., 2015)



Şekil 9. Tozların Öğütme İşlemi (Çivi, 2016)



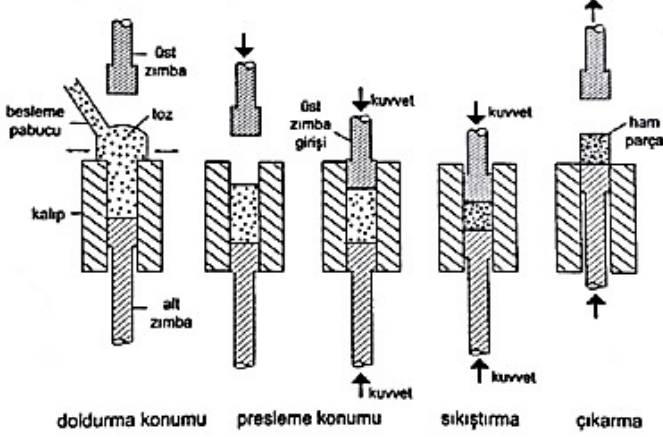
Şekil 11. a) Grafenin SEM Görüntüsü, b) Grafenin tane sınırındaki Görüntüsü (Cui ve diğ., 2018; Yazdani, Xia, Ahmad ve Zhu, 2015)

Matris malzemesi olan $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ tozu ortalama tane büyüklüğü yaklaşık $0,5 \mu\text{m}$ ve %99,9 saflıkta, Ti tozu %98 saflıkta ve tane büyüklüğü $< 45 \mu\text{m}$ (325 mesh), Grafen ise $3\text{-}4 \mu\text{m}$ kalınlık ve $3\text{-}12 \text{nm}$ tane boyutlu taneler şeklinde yüksek saflıkta hazır olarak satın alınmakta oldukları ve alınan bu tozların genellikle alkol eklenmesiyle ortalama 1 saat ile 72 saat arasında öğütülme ve karıştırma işlemlerinden geçirdikleri görülmektedir. Bu işlemden sonra bir sonraki adım olan tozların sıkıştırılması işlemine geçilmektedir.

5.2 Presleme / Sıkıştırma İşlemi

Toz metalürjisinde önemli bir işlem adımı olan sıkıştırma, genel anlamıyla tozların kalıba konularak basınç altında istenilen şekil ve formun elde edilmesi işlemidir (Çivi, 2016; Koruyucu ve Soy, 2019; Kurt, 2004). Bu işlem ile sinterleme öncesi parçanın taşınmasında gerekli olan dayanımı sağlamaktadır. Tozların bu presleme işlemi ile mukavemeti ve yoğunluğu artırılrsa da asıl mukavemet artı-

şı ve ideal yoğunluğa ulaşması sinterleme işlemi sonrasında elde edilmektedir (Çivi, 2016; Kurt, 2004; Yavaş, 2014). Tozların kalıpta sıkıştırma işleminin şematik gösterimi Şekil 12' deki gibi gerçekleşmektedir.



Şekil 12. Tozların Presleme İle Şekillendirme İşlemi (Çivi, 2016)

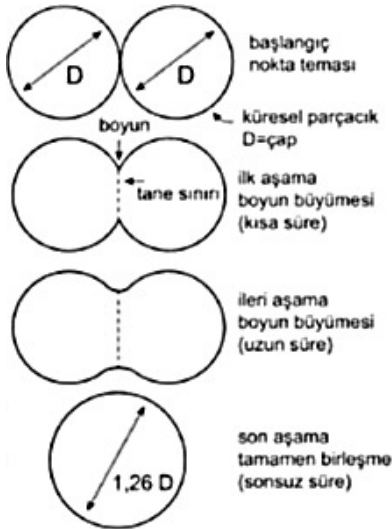
Alümina matrisli kompozitlerin üretiminde tozların sıkıştırılması konusunda yapılan çalışmalarda; Al_2O_3 matrise Y_2O_3/Ti ilavesi ile kompozit üretimi yapılan çalışmada uygulama basıncı olarak 30 MPa parametresi kullanıldığı belirtilmiştir (S. Shi ve diğ., 2018). Al_2O_3-Ti kompozitine Grafen takviyesinin etkilerinin incelendiği çalışmada presleme işleminde 32 MPa uygulama basıncı kullanıldığı bildirilmiştir (Cui, Zhao ve Wang, 2019). Al_2O_3-Ti kompozitine Ni-Ti ilavesinin etkilerinin incelendiği çalışmada uygulama basıncı 32 MPa parametresinin kullanıldığı belirtilmiştir (Xiu ve diğ., 2008). Al_2O_3 matrise Ti ilavesinin incelendiği çalışmada, karıştırma işleminden sonra presleme işleminde 200 MPa basınç uygulandığı bildirilmiştir (Yin, Yuan, Wang, ve diğ., 2016). Al_2O_3 matrise Ti ve TiC ilaveleri ile kompozit üretimi gerçekleştirilen çalışmada, kompozitlerin preslenmesinde 30 MPa uygulama basıncı kullandığı bildirilmiştir (S. Shi, Sekino, ve diğ., 2020). $Al_2O_3/(W, Ti)C$ kompozitine Grafen ilavesinin etkilerinin incelendiği çalışmada, kompozitlerin üretiminde 32 MPa uygulama basıncı kullanıldığı bildirilmiştir (Cui ve diğ., 2018). Al_2O_3/TiC kompozitine Grafen takviyelerinin etkilerinin incelendiği çalışmada, kompozitlerin üretiminde 200 MPa uygulama basıncı kullanıldığı belirtilmiştir (Cheng ve diğ., 2017). Alüminyum matrise grafen takviyesi ile kompozit üretiminde sinterleme süresi ve sıcaklığının etkilerinin incelendiği çalışmada, tozların 600 MPa uygulama basıncı ile şekillendirildiği bildirilmiştir (Gürbüz, Şenel ve Koç, 2018).

Sıkıştırma-şekillendirme işleminde uygulanan basınç kullanılan sinterleme

yöntemlerine değişiklik göstermekte olup, 30 ila 600 MPa arasında uygulama basınçlarının kullanıldığı görülmüştür. Sinterleme işleminde istenilen yoğunluğun ve mukavemetin elde edilmesi için oldukça önemli olan sıkıştırma işleminde seçilecek olan basıncın uygulanacak olan sinterleme yöntemine uygun olarak seçilmesinin oldukça önemli olduğu tespit edilmiştir.

5.3 Sinterleme ve Sinterleme Mekanizmaları

Sinterleme prosesi matris fazı ve/veya ilave fazların tozlarından oluşturulan gözenekli yapının ergime derecesinin (T_e) $T_e/2$ veya $T_e/3/4$ sıcaklığına ısıtılması olarak tanımlanabilir (Ayaş, 2003; Meir, Kalabukhov ve Hayun, 2014). Benzer şekilde sinterlemenin diğer bir tanımlanması da poroz yapının porozitesiz ve yoğunluğu daha yüksek bir yapıya dönüştürülmesi için uygulanan ısı işlemidir (Kurt, 2004). Sinterleme esnasında birbirleri ile temas halindeki toz taneleri arasında gerçekleşen atom difüzyonu ile taneler arası boşluk küçülür ve sinterleme öncesine kıyasla boyutunda küçülme ve daha yüksek yoğunluğa sahip malzemeler üretilmektedir (Ayaş, 2003). Sinterleme süreci üç aşamalıdır; ilk aşamada temas halindeki taneler arasında boyun oluştururlar. İkinci adımda sinterlenen malzeme yoğunluğu teorik yoğunluğun %90-95'i seviyelerine erişir ve bu süreçte tane büyümesi oluşmuyorsa taneler arası boşlukların azalması zamanla devam etmektedir. Son aşamada taneler arasında kalan porozitenin tane sınırlarından difüzyonla yapıdan atılması gerçekleşmektedir. Bu süreç oldukça yavaş ilerlediğinden tam olarak %100 teorik yoğunluğa erişmek güçleşmektedir (Ayaş, 2003; Kurt, 2004; Meir ve diğ., 2014; Yavaş, 2014). Şekil 13'de sinterleme işleminin aşamalarının iki küre modeli ile şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 13. Sinterleme Prosesi Aşamaları Şematik Gösterimi (Yavaş, 2014)

Sinterleme türleri gaz fazı, katı faz, sıvı faz ve reaktif sıvı olmak üzere dört ana gruptur. Tablo 4’de her bir fazın taşınım mekanizması ve sinterleme için belirtilen itici güçleri verilmiştir (Yavaş, 2014).

Tablo 4. Sinterleme Türleri (Yavaş, 2014)

Sinterleme Türü	Taşınım Mekanizması	Sinterleme İtici Gücü
Gaz faz	Buharlaştırma-yoğunlaşma	Buhar basıncı farklılığı
Katı hal	Difüzyon	Serbest enerji ve/veya kimyasal potansiyeldeki değişim
Sıvı faz	Vizkoz akış, difüzyon	Kapiler basınç, yüzey gerilimi
Reaktif sıvı	Vizkoz akış, çözelti-çökelti	Kapiler basınç, yüzey gerilimi

Sinterleme işlemleri, reaksiyon, termal plazma, mikro dalga, atmosferik sinterleme gibi prosesler ile basınçsız, sıcak pres (HP), indüksiyonla sinterleme, spark plazma (SPS), sıcak izostatik pres (HIP) gibi prosesler ile basınçlı olmak üzere iki ana grupta gerçekleştirilmektedir (Ayaş, 2003; Çivi, 2016; Koruyucu ve Soy, 2019; Kurt, 2004; Yavaş, 2014). Bu işlemleri birbirinden ayıran özellikler işlem sırasında kullanılan atmosfer, ısıtma yöntemi, işlem sıcaklıkları, süresi ve sinterleme sonrası elde edilen yoğunluk farkları olarak belirtilebilir. Ayrıca hangi sinterleme işleminin uygulanacağı konusunda işlemlerin maliyetlerinin farklılık göstermesinin yanı sıra kullanılan tozların yalıtkanlık veya iletkenlik özellikleri de oldukça önem arz etmektedir (Çivi, 2016; Yavaş, 2014). Şekil 14’de indüksiyonla sinterleme işleminin şematik gösterimi ve indüksiyonla sinterleme düzeneğinde gerçekleşen sinterleme işleminin görüntüleri verilmiştir (Çivi, 2016).

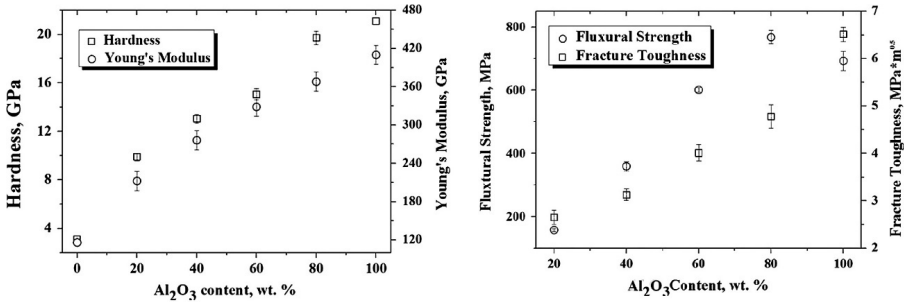
ğunluğun azaldığı, %0,5 grafen ilavesinde en yüksek sertliğin elde edildiği bildirilmiştir (Stolyarov ve diğ., 2020). $Al_2O_3-ZrO_2$ ve $Al_2O_3-Ti(C,N)$ kompozitlerine Grafen ilavelerinin tribolojik ve mekanik özelliklerine etkilerinin incelendiği çalışmada sinterlemenin SPS yöntemiyle 1550 °C sıcaklık ve 4 dk işlem süresi parametrelerinde gerçekleştirildiği bildirilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda grafen takviyelerinin sertlik ve aşınma direncini artırdığını fakat kırılma tokluğunda artışın gözlemlenmediği belirtilmiştir (Petrus ve diğ., 2019). Al_2O_3 matrise Ti ve Y_2O_3 ilavelerinin etkilerinin incelendiği çalışmada sinterlemenin HP yöntemiyle 1500 °C sıcaklık ve 1 saat parametrelerinde gerçekleştirildiği bildirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda Ti ilavesinin sertliği düşürdüğü fakat kırılma tokluğunu artırdığı, Y_2O_3 ilavesinin hem sertlik hem de kırılma tokluğunu artırdığı, en yüksek kırılma tokluğunun Al_2O_3 -%20 Ti-%2 Y_2O_3 numunesinden elde edildiği bildirilmiştir (S. Shi ve diğ., 2018). $Al_2O_3-Ti(C,N)$ matrise Grafen ilavesinin etkilerinin incelendiği çalışmada, HP sinterleme yöntemiyle, 1200 °C sıcaklık ve 10 dk parametrelerinde ön sinterleme, 1700 °C ve 10 dk parametrelerinde, vakum ortamında sinterlemenin gerçekleştirildiği bildirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda grafen takviyesinin seramik yapının kırılma tokluğu, sertlik ve eğilme dayanımı artırdığı ve en iyi sonucun %0,4 grafen takviyesinden elde edildiği bildirilmiştir (Cui ve diğ., 2019). $Al_2O_3-Ti(C,N)$ seramik kompozitin üretimi ve karakterizasyonunun incelendiği çalışmada, sinterleme sıcaklığının mekanik özellikler üzerinde etkileri incelemiştir. Bu çalışmada mikro dalga sinterleme işlemi ile 50 °C/dk ısıtma oranı, 10 dk işlem süresi ve 1500 - 1650 °C sıcaklıklarda sinterlemenin gerçekleştirildiği bildirilmiştir. Elde edilen sonuçların analizinden 1550 °C ve 10 dk parametrelerinde en yüksek sertlik, kırılma tokluğu ve yoğunluğun elde edildiği belirtilmiştir (Yin, Yuan, Wang, ve diğ., 2016). Alüminyum matrise farklı oranlarda Grafen takviyesi yapılarak sinterleme süresi ve sıcaklığının etkilerinin incelendiği çalışmada, 550, 600, 630°C sıcaklıkları ve 60,120,180 ve 300 dk işlem sürelerini kullanıldığı bildirilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda en yüksek yoğunluk ve mekanik özelliklerin Al-%0,1Grafen kompozitinde 630°C - 180 dk parametrelerinde elde edildiği belirtilmiştir. 180 dk işlem süresinin altında poroz mikroyapı, üzerindeki sıcaklıklarda ise tane büyümesi ve yüksek porozite gözlemlendiği rapor edilmiştir (Gürbüz ve diğ., 2018).

Al_2O_3 matrisli kompozitlerin üretiminde SPS ve HP sinterleme işlemlerinin yaygın olarak kullanıldığı bununla birlikte gelişen teknoloji ile SPS işleminin nispeten daha düşük sıcaklık ve sürelerde sinterlemeyi sağlaması sebebiyle kullanımının arttığı gözlemlenmiştir. Al_2O_3 matrisli kompozitlerin üretiminde ortalama sinterleme sıcaklığı 1500-1550 °C, işlem süresinin ise ortalama 10-30 dk arasında olduğu tespit edilmiştir. Sinterleme işlemi elde edilecek parçanın nihai işlemi olduğundan bu işlemin parametreleri nihai ürünün mekanik ve mikroyapı özelliklerini doğrudan etkilediğinden oldukça önemlidir. Ayrıca işlem parametrelerinin,

ilave fazların ergime dereceleri, yalıtkanlıkları, tane büyüklükleri göz önüne alınarak belirlenmesi gerektiği tespit edilmiştir.

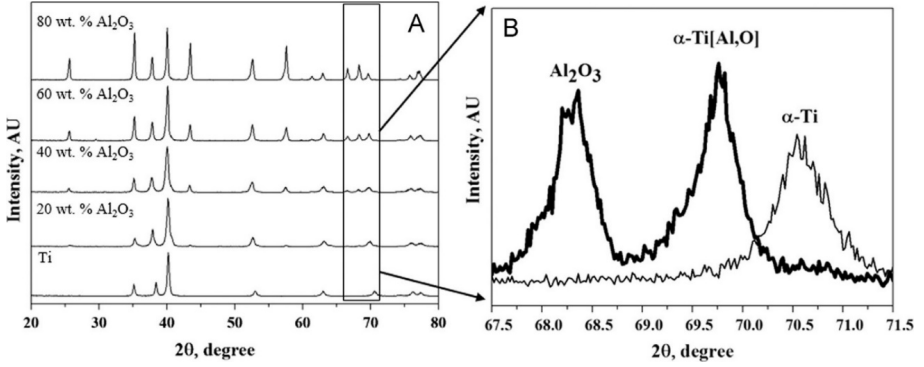
5.4 Ti Takviyeli Alümina Esaslı Kompozitler Üzerine Çalışmalar

Al_2O_3 matrisli Ti takviyeli kompozitlerin üretimi konusunda literatürde yapılan çalışmalar incelenmiş ve konu hakkında yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar şu şekildedir: Al_2O_3 matrisine %0,20,40,60,80,100 Ti ilavelerinin yapıldığı çalışmada, mikroyapı analizinde alümina ve titanyumun homojen dağılım gösterdiği ve Ti ilavelerinin sertlik ve Young's modülünün arttığı fakat kırılma tokluğunun azaldığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, kompozitlerin ince taneli mikroyapısı soğutma sırasında oluşan mikro çatlak oluşumlarını önlemekte olduğu bildirilmiştir. En yüksek eğilme mukavemetlerinin %80 Al_2O_3 kompozitinde 767,23 MPa olarak ölçüldüğü belirtilmiştir. Şekil 15'te Al_2O_3 -Ti kompozitinin sinterleme sonrası sertlik, Young's Modülü, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu değerlerinin takviye oranına göre değişimleri verilmiştir. En yüksek sertlik, Young's modülü ve kırılma tokluğunun monolitik alüminada elde edildiği, Ti takviye oranı arttıkça mekanik özelliklerin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir (Meir ve diğ., 2015)



Şekil 15. Al_2O_3 -Ti Kompozitlerinde Mekanik Özelliklerin Takviye Oranına Göre Değişimi

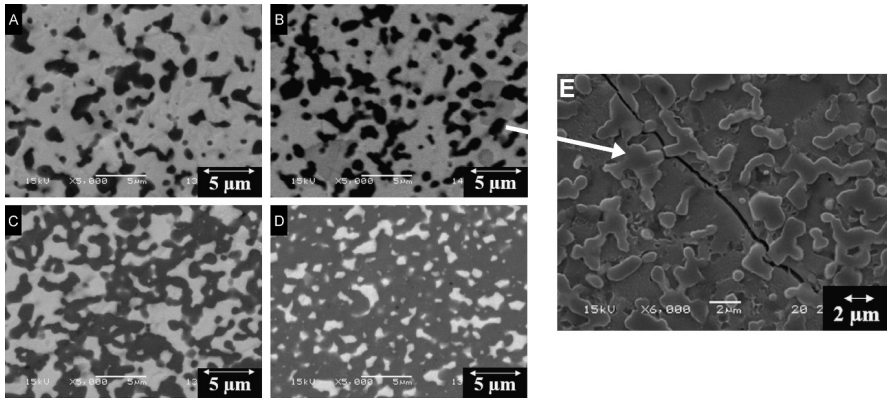
Şekil 16'da Al_2O_3 -Ti kompozitlerinin EDS analiz sonuçları verilmiştir. Şekilde detay görüntüsünde belirtilen, %100 Ti fazında oluşmayan piklerin, Al_2O_3 miktarına bağlı olarak oluşmaya başlayarak en yüksek alümina miktarında maksimum düzeye çıktığı görülmektedir. Ek olarak Al_2O_3 'ün ayrıştığı ve Al ve O nun çözünerek α -Ti(Al_2O_3) oluştuğu, sinterleme kusuruna sebep olacak TiH₂ fazının oluşmadığı görülmektedir (Meir ve diğ., 2015).



Şekil 16. Al_2O_3 -Ti Kompozitlerinin EDS Analizi (Meir ve diğ., 2015)

Al_2O_3 matrise %0,25,50,100 Ti ilavelerinin yapıldığı çalışmada, artan Ti oranlarıyla yoğunluğun arttığı, sertlik ve eğilme dayanımının azaldığı belirtilmiştir. %100 Al_2O_3 numunesinde 19,76 GPa sertlik, 294,55 MPa eğme dayanımı ölçülürken, %25 Ti ilavesinde 11,47 GPa sertlik, 172,97 MPa eğme dayanımı değerleri elde edildiği bildirilmiştir (Bahraminasab ve diğ., 2017). Al_2O_3 matrise %20 Ti ve %2 Y_2O_3 ilavelerinin etkilerinin incelendiği çalışmada, Ti ilavesinin yoğunluğu ve kırılma tokluğunu artırdığı, Young's modülü ve sertliği düşürdüğü, monolitik alümina numunesinde 17,1 GPa sertlik, 3,58 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ kırılma tokluğu değerleri ölçülürken, %20 Ti ilaveli kompozitte 14,5 GPa sertlik ve 4,32 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ değerleri ölçüldüğü bildirilmiştir (S. Shi ve diğ., 2018). Al_2O_3 -Ti (C,N) kompozitinde sinterleme parametrelerinin etkilerinin incelendiği çalışmada, %60 Al_2O_3 -%31 Ti karışım oranı kullanıldığı, yapılan deneylerde 18,42 GPa sertlik, 6,72 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ kırılma tokluğu değerlerinin elde edildiği bildirilmiştir (Yin, Yuan, Wang, ve diğ., 2016). Al_2O_3 matrise Ti ve TiC ilavelerinin incelendiği çalışmada, %90 Al_2O_3 -%10 Ti karışımı oranı kullanıldığı, Ti ilavesiyle yoğunluk, eğme dayanımı, sertlik değerlerinin azaldığı, kırılma tokluğunun arttığı bildirilmiştir. %100 Al_2O_3 'de 17,1 GPa sertlik ve 3,5 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ kırılma tokluğu değeri, %90 Al_2O_3 'de 15,7 GPa sertlik ve 3,9 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ kırılma tokluğu değerleri elde edildiği bildirilmiştir (S. Shi, Sekino, ve diğ., 2020). Katmanlı yapıli Ti/ Al_2O_3 kompozitinde çatlak oluşumu ve yayılmasının incelendiği çalışmada, sinterleme sonrası Ti ve Al_2O_3 arasında oluşan ara yüzeyin çatlakların sapmalarını ve yön değiştirmelerini sağladığı ve bu sebeple monolitik duruma göre daha yüksek kırılma dayanımı gösterdikleri bildirilmiştir (Wu, Li ve Wang, 2016). Al_2O_3 -Ti kompozitine TiC takviyesinin mekanik özellikler ve elektriksel iletkenliğe etkilerinin incelendiği çalışmada, %2 TiC takviyesi ile en yüksek sertlik değerine 16,5 GPa, %0,5 TiC takviyesi ile en yüksek Young's modülüne 381 GPa, %1 TiC takviyesi ile en yüksek kırılma tokluğu 5,29 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ değerinin elde edildiği belirtilmiştir (S. Shi, Cho, Goto ve Sekino, 2020a). Al_2O_3 matrise Ti ilavesinin elektriksel iletkenliğe etkisinin

incelendiği çalışmada, %5,10,15,20 Ti takviyesi ile numuneler 1600 °C,1650 °C ve 1700 °C sıcaklıklarda sinterlenmiştir. Elde edilen sonuçlarda hem Ti takviyesinin artışı hem de sıcaklığın artışının elektriksel iletkenliği artırdığı, bunun sebebinin taneler arası boşlukların azalması olduğunu belirtmişlerdir (Sabuan, Asmelash, Azhari, Mulubrhan ve Alemu, 2021). Şekil 17' de Al₂O₃-Ti kompozitinin %20,40,60,80 oranlarında sinterleme sonrası SEM görüntüleri verilmiştir. Şekilde beyaz bölgeler titanyum fazını göstermekte ve dağılımın homojen olduğu anlaşılmaktadır. Al₂O₃-Ti kompozitinde çatlak ilerlemesi Ti fazında tane içi, alümina fazında taneler arası şeklinde olmaktadır. Şekilde fazlar arasında çatlak ilerleyişinin SEM görüntüsü verilmiştir.



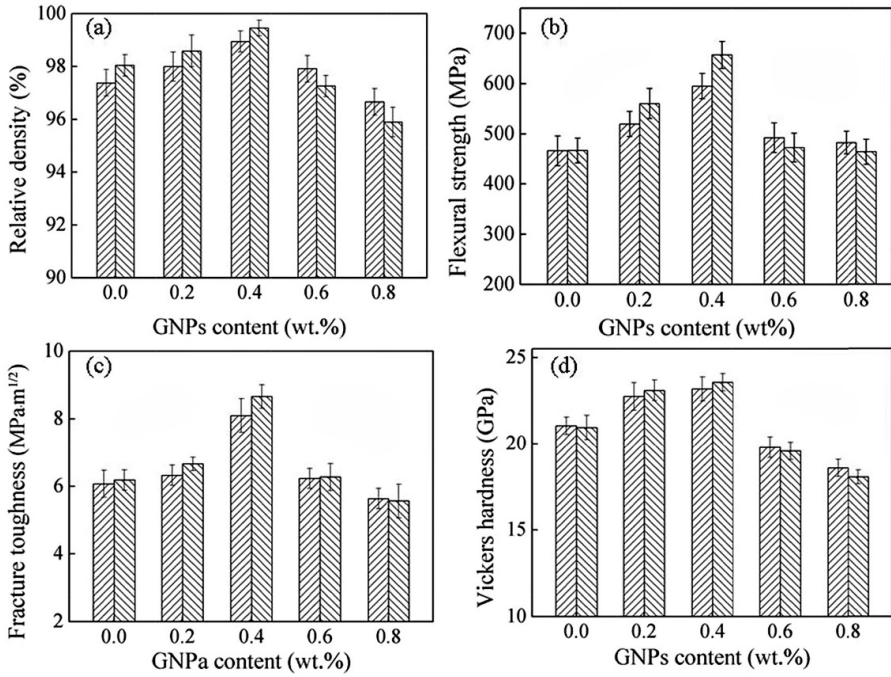
Şekil 17. SEM Görüntüsü Alümina-Titanyum Kompozit, a) %20 Al₂O₃, b) %40 Al₂O₃, c) %60 Al₂O₃, d) %20 Al₂O₃, e) %40 Al₂O₃ İçeren Kompozitte Çatlak İlerlemesi, Beyaz Renkler Titanyumu Göstermektedir (Meir ve diğ., 2015)

Al₂O₃/ZrO₂/CeO₂ matrise Ni ve Ti ilavelerinin mekanik özelliklere ve mikro yapıya etkilerinin incelendiği bir çalışmada tüm numunelerin aynı şartlarda 1650 °C'de konvansiyonel sinterleme işlemi ile hazırlandığı ve bu işlemlerde %3 Ti ve %3 Ni ilavelerinin yapıldığı bildirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda sertlik ve kırılma tokluğunda en düşük değerlerin monolitik alüminada olduğu görülürken, Al₂O₃-%3 Ni ve Al₂O₃-%3 Ti numunelerinin sertlik ve kırılma tokluklarının monolitik alümina yüksek olduğu fakat diğer numunelerden düşük olduğu tespit edilmiştir. En yüksek sertlik değeri 14,95 GPa olarak Al₂O₃-40ZrO₂ numunesinde, en yüksek kırılma tokluğu değerinin 4,9 MPa.m^{1/2} olarak Al₂O₃-40ZrO₂-3Ni numunesinde elde edildiği bildirilmiştir (Verma ve Kumar, 2017). Literatürde yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde alümina matrise titanyum ilaveli ser-met kompozitlerin üretimi gevrek ve kırılğan yapıları olan alüminanın geliştirilmesi açısından önemli bir aşama olarak kaydedilmiş olup, çalışmalar incelendiğinde Al₂O₃ matrise Ti ilavesinin kırılma tokluğu, sertlik ve yoğunluğu artırdığı fakat

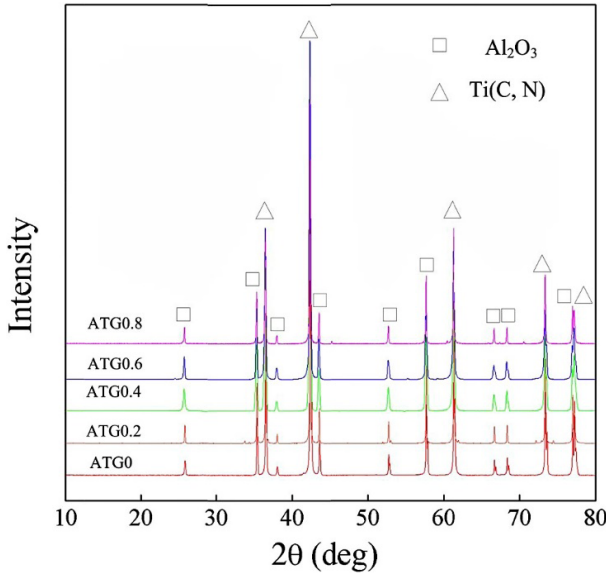
Ti'nin yanı sıra ikinci ilave malzemeleri katkısı ile daha yüksek sertlik, yoğunluk ve kırılma tokluğu değerlerine ulaşıldığı ve Al_2O_3 -Ti kompozitine yapılan ikinci takviyelerin Ta_2O_5 (Xu, Zhang, Wang, Wu ve Yang, 2017), Y_2O_3 (Liu ve diğ., 2015; G. Shi, Wang, Liu ve Wang, 2015), CeO_2 (S. Shi, Cho, Goto ve Sekino, 2020b; Wu ve diğ., 2014), Pr_6O_{11} (Xu ve diğ., 2016), Grafen (Cui ve diğ., 2019; Petrus ve diğ., 2019) şeklinde bilimsel çalışmaların devam ettiği görülmüştür.

5.5 Grafen Takviyeli Alümina Esaslı Kompozitler Üzerine Çalışmalar

Al_2O_3 matrise Grafen ilaveli kompozitlerin üretimi konusunda literatürde yapılan çalışmalar incelenmiş ve konu hakkında yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar şu şekildedir; Al_2O_3 matrise %0,22 Grafen takviyesinin tribolojik ve mekaniksel özelliklere etkilerinin incelendiği çalışmada, Grafen takviyesinin aşınma oranını %50 oranında azalttığı, ayrıca eğme dayanımını %80 oranında artırdığı bildirilmiştir (Gutierrez-Gonzalez ve diğ., 2015). Al_2O_3 matrise %0,0,5,1,2 Grafen takviyenin elektriksel iletkenlik üzerine etsinin incelendiği çalışmada numunelerin mekanik özellikleri incelendiğinde, %1 grafen takviyesi ile 22,7 GPa sertlik ve %0 porozite gözlemlenirken, monolitik alüminada 22,4 GPa sertlik ve %5 porozitenin olduğu bildirilmiştir (Stolyarov ve diğ., 2020)the ceramic materials were studied over a wide temperature range, 23–530 °C and over a frequency range of 10–1 – 106 Hz. More than a half decrease in the porosity of the sintered composite with an increase in the graphene content was observed. Raman spectroscopy indicated the absence of graphene degradation during the SPS. The range of frequencies (100–103 Hz. Al_2O_3 -Ti(C, N) seramik kompozite %0,2,0,4,0,6,0,8 Grafen takviyelerinin mekanik özelliklere etkilerinin incelendiği çalışmada, seramik kompozitin %0,4 Grafen ilavesi ile en yüksek sonuçların elde edildiği, artan grafen takviyesiyle mekanik özelliklerin azaldığı, grafen takviyesi yapılmayan numuneye kıyasla %0,4 Grafen takviyeli numunede eğilme dayanımında %40,13, kırılma tokluğunda %40,78 artış sağlandığı belirtilmiştir. Şekil 18'de Al_2O_3 -Ti(C, N) kompozitine Grafen takviye miktarının mekanik özelliklere etkileri verilmiştir. Yapılan çalışmada yoğunluk, eğilme dayanımı, kırılma tokluğu ve sertlik değerleri karşılaştırılmış ve en yüksek değer %0,4 Grafen takviyesi ile elde edildiği görülmektedir. Bu değer in altında ve üstünde yapılan takviye oranlarında mekanik özelliklerin azaldığı görülmektedir. Şekil 19'da yine aynı çalışmada Grafen takviye miktarın EDS analizi verilmiştir. Yapılan EDS analizinde Grafen takviyesiz numunenin analiz sonucu ile Grafen takviyeli numunelerin analizlerinin benzer olduğu ve kusur oluşturacak fazların oluşmadığı bildirilmiştir (Cui ve diğ., 2019).



Şekil 18. Grafen Takviye Miktarının Mekanik Özelliklere Etkileri (Cui ve diğ., 2019)



Şekil 19. Grafen Takviye Oranının EDS Analizi (Cui ve diğ., 2019)

Al₂O₃-(W, Ti)C-Grafen kompozitinin mikro yapı ve tokluk mekanizmasının incelendiği çalışmada, %0,2,0,4,0,6,0,8 oranlarında Grafen takviyesi yapıldığı, %0,2 Grafen takviyesi yapılan numunede Grafen takviyesi yapılmamış numuneye oranla eğilme dayanımında %49, kırılma tokluğunda %35,3 ve sertlikte %5 artış sağlandığı tespit edilmiştir. Fazla miktarda Grafenin topaklanmaya sebep olarak mikro yapıda kusurlara sebep olarak mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilediği bildirilmiştir (Cui ve diğ., 2018). Al₂O₃TiC kompozitine Grafen takviyesinin mekanik özellikler ve tokluk mekanizmasına etkilerinin incelendiği çalışmada, %0,1,0,2,0,4,0,6,0,8 Grafen takviyelerinin etkileri incelenmiş olup, %0,2 Grafen takviyesi yapılan numunede optimum mekanik özelliklerin elde edildiği ve 18,5 GPa sertlik, 8,7 MPa.m^{1/2} kırılma tokluğu değerlerinin ölçüldüğü bildirilmiştir. Yapılan bu çalışmada %0,2 grafen takviyesi ile sertlikte %12,7 azalma olmasına karşın, kırılma tokluğunda takviyesiz numuneye oranla %67,13 'lük iyileşme sağlandığı belirtilmiştir (Cheng ve diğ., 2017). Al₂O₃ matrisine Grafen takviyesinin mikroyapı, kırılma davranışları, mekanik özellikler ve elektriksel iletkenliğe etkilerinin incelendiği çalışmada, %0,1,0,6,1 oranlarında Grafen takviyesi uygulanmış olup, mekanik deneyler sonucunda %0,6 Grafen takviyeli numunede en yüksek kırılma tokluğu değerlerin elde edildiği, takviyesiz alümina numunesinde 21,9 GPa sertlik, 2,8 MPa.m^{1/2} kırılma tokluğu değerleri ölçülürken, %0,6 Grafen takviyeli numunede 21,3 GPa sertlik ve 3,6 MPa m^{1/2} kırılma tokluğu değerine ulaştığı belirtilmiştir. Elektriksel iletkenliğin ise artan grafen oranı ile arttığı %1 Grafen takviyesi olan numunede en yüksek değer elde edildiği bildirilmiştir (Hrubovčáková ve diğ., 2020). Al₂O₃-WC-TiC kompozitine Grafen takviyesinin mikroyapı, mekanik özellikler ve kırılma tokluğuna etkilerinin incelendiği çalışmada, %0,25,0,5,0,75,1,1,5,2 oranlarında Grafen ilavesi uygulanmış olup, en yüksek değerlerin %0,5 Grafen takviyeli numunede elde edildiği bildirilmiştir. %0,5 grafen takviyeli numunede eğilme dayanımı 646,31 MPa, sertlik 24,64 GPa ve kırılma tokluğu 9,42 MPa m^{1/2} olarak ölçülürken, grafen takviyesiz kompozitte eğilme dayanımı 550,92 MPa, sertlik 23,54 GPa, kırılma tokluğu 8,76 MPa m^{1/2} olarak ölçüldüğü rapor edilmiştir. Bununla birlikte seramik kompozitlerde artan Grafen oranlarında mekanik özelliklerin hızlıca düştüğü bildirilmektedir (Wang ve diğ., 2019). Al₂O₃-Ti(C,N) kompozitinin kırılma tokluğunun geliştirilmesi için Grafen takviyesinin incelendiği çalışmada, seramik matrisine %0,1,0,2,0,3,0,4,0,5 oranlarında Grafen ilavesi yapıldığı, %0,4 Grafen takviyesi ile en yüksek kırılma tokluğu 8,43 MPa.m^{1/2} değerinin elde edildiği bildirilmiştir (Cui, Zhao, Wang ve Sun, 2022). Al₂O₃-WC-TiC kompozit yapıları kesici uçların kesme performansının iyileştirilmesi için %0,5 Grafen takviyesi ile üretilen uçların mekanik özelliklerinin ve kesme parametrelerinin değerlendirildiği çalışmada, Grafen takviyesiz duruma kıyasla %0,5 grafen takviyesi ile sertlik, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğunda artış sağlandığı ve sırasıyla 22,41 GPa, 856,92 MPa, 8,97 MPa.m^{1/2} de-

ğerlerinin elde edildiği, ayrıca Grafen ilavesinin kesici takım performansını ve ömrünü artırdığı belirtilmiştir (Wang ve diğ., 2022).

Grafen takviye elamanı olarak alümina matrisli seramik, ser-met yapıli kompozitlerde daha önceden elde edilmiş olan mekanik özelliklerin gelişiminin daha iyi seviyelere gelmesini sağlamaktadır. Grafen takviyelerinde ağırlıkça takviye oranı düşük miktarlardadır ve istenilen mikro yapı, kırılma tokluğunun elde edilmesi açısından homojen karışımların elde edilmesi oldukça önemlidir. Grafen yapılan literatür araştırmalarında optimal seviyede takviye edildiği kompozitlerin yoğunluk, sertlik, kırılma tokluğu ve iletkenlik özelliklerini artırmaktadır. Alümina matrisin bilinen gevrek ve kırılğan yapısının Ti ilavesi ile iyileştirme çalışmaları gelişen Grafen teknolojisi ile daha da yüksek noktaya geleceği görülmektedir. Fakat yapılan literatür araştırmalarında alümina matrise Grafen takviyeli çalışmaların sayısı oldukça az olduğu, literatürün bu açığınin Grafen 'in sağlayacağı üstün özelliklerden faydalanmak adına geliştirmek önem arz etmektedir.

6. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada Al_2O_3 matrise Ti ve Grafen takviyelerinin üretim yöntemleri ve mekanik özelliklere etkilerinin literatür taraması yapılmıştır. Yapılan çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda sıralanmıştır,

1. Yapılan literatür araştırmalı sonucunda Al_2O_3 matrisli kompozit malzemelelerin kullanımı uzun yıllardır artarak devam etmektedir. Al_2O_3 'ün düşük olan kırılma tokluğunun iyileştirilmesi amacıyla birçok takviye elamanı ile farklı ilave oranlarında, farklı sinterleme yöntemleri ve parametrelerinde numuneler elde edilmiş ve yapılan çalışmalarda bu numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri tespit edilmeye çalışılmıştır.
2. Al_2O_3 matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan TM yönteminde, yüksek yoğunluk ve düşük poroziteli yapıların elde edildiği tespit edilmiştir. TM yönteminde öğütme, karıştırma işlemlerinin ince taneli ve homojen dağılım sergileyen mikro yapının elde edilmesi açısından önemli olduğu, işlem parametrelerinin 1 ile 72 saat arasında seçildiği, ince taneli yapıların elde edilmesi amacıyla alkol eklentisinin yapıldığı tespit edilmiştir.
3. Al_2O_3 matrisli kompozitlerin üretiminde presleme ve sinterleme işlemlerinin birbiri ile bağlantılı olarak uygulanacak sinterleme yöntemine uygun sıkıştırma basıncı seçilmesinin sinterleme sonrası elde edilecek mukavemet değerlerini önemli derecede etkilediği belirlenmiş, sıkıştırma basıncı olarak 30-600MPa arasında parametrelerinin uygulandığı görülmüştür. Sinterleme işleminde 1500-1550 °C sıcaklık, 10-30 dk bekleme süresi parametrelerinin seçildiği, bu işlemin nihai işlem olduğu göz önüne alınarak takviye fazların ergime dereceleri, tane büyüklükleri ve elektriksel iletkenlik gibi özellikleri-

nin de işlem metodu seçimi ve uygulanmasında oldukça önemli olduğu tespit edilmiştir.

4. Al_2O_3 matrisine Ti takviyesinin, alüminanın düşük kırılma tokluğunun geliştirilmesi açısından önemli bir aşama olduğu ve yapılan bazı çalışmalarda Ti ilavesinin kırılma tokluğu ve eğme dayanımını artırdığı bildirilse de genel olarak Ti ilavelerinde sertlik, kırılma tokluğu ve eğme dayanımlarında monolitik alüminaya kıyasla düşük sonuçların elde edildiği tespit edilmiştir. Bu sebeple son zamanlarda yapılan çalışmalarda alümina matrise Ti takviyesinden elde edilecek mekanik özelliklerin iyileştirilmesi adına ikinci bir takviye malzemesinin yapıya ilave edildiği tespit edilmiştir.
5. Al_2O_3 matrisine Grafen takviyesinde Grafen'in diğerlerine nazaran yeni takviye malzemesi olduğu göz önünde bulundurularak yapılan çalışmaların kısıtlı sayıda olduğu görülmüştür. Konu ile ilgili yapılan çalışmalarda Grafen takviyesinin poroziteyi azalttığı, iletkenlik, aşınma dayanımı, sertlik, kırılma tokluğu ve eğme dayanımını artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca optimal seviyenin üzerinde artan grafen miktarlarında mekanik özelliklerin olumsuz yönde etkilendiği tespit edilmiştir.
6. Al_2O_3 matrisli kompozitlerde Grafen takviye miktarının oldukça düşük olduğu, bu sebeple homojen dağılımın sağlanması, mikro yapının istenilen özelliklere sahip olması açısından karıştırma işleminin oldukça önemli olduğu belirlenmiştir.
7. Ti ve Grafen takviyelerinin Al_2O_3 matrisli kompozitlerin mekanik ve fiziksel özelliklerini önemli derecede iyileştirdiği görülmektedir. Fakat alümina matrise Ti ve Grafen takviyelerinin etkilerinin belirlenmesi amacıyla yapılan literatür çalışmaların az sayıda olduğu belirlenmiştir. Al_2O_3 matrise Ti ve Grafen takviyelerinin araştırılması hem metal ve alaşımlarının yerini almakta olan kompozitlerin üstün özelliklerinden daha fazla yararlanmak hem de ülkemiz kompozit malzeme üretimi bilgi birikimine katkı sağlamak adına faydalı olacaktır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynakça

- Ayaş, E. (2003). *Al_2O_3 -TiC/TiCN Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri*. Anadolu Üniversitesi.
- Bahraminasab, M., Ghaffari, S. ve Eslami-Shahed, H. (2017). Al_2O_3 -Ti functionally graded material prepared by spark plasma sintering for orthopaedic appli-

- cations. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 72 (February), 82–89. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2017.04.024>
- Bedeloğlu, A. ve Taş, M. (2016). Graphene And Its Production Methods. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 16 (3), 544–554. doi: <https://doi.org/10.5578/fmbd.32173>
- Çerezci, T. (2008). *Nikel Partikül Takviyeli Alumina Seramik Kompozitlerin Sentezi ve Karakterizasyonu*. Sakarya Üniversitesi.
- Cheng, M., Liu, H., Zhao, B., Huang, C., Yao, P. ve Wang, B. (2017). Mechanical properties of two types of Al_2O_3/TiC ceramic cutting tool material at room and elevated temperatures. *Ceramics International*, 43 (16), 13869–13874. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.07.110>
- Çivi, C. (2016). *Toz Metal Parçaların Orta ve Düşük Frekanslı İndüksiyon ile Sinterlenmesinde Sinterleme Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi*. Celal Bayar Üniversitesi.
- Cui, E., Zhao, J. ve Wang, X. (2019). Determination of microstructure and mechanical properties of graphene reinforced $Al_2O_3-Ti(C, N)$ ceramic composites. *Ceramics International*, 45(16), 20593–20599. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.07.041>
- Cui, E., Zhao, J., Wang, X., Sun, J., Huang, X. ve Wang, C. (2018). Microstructure and toughening mechanisms of $Al_2O_3/(W, Ti)C$ /graphene composite ceramic tool material. *Ceramics International*, 44(12), 13538–13543. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.185>
- Cui, E., Zhao, J., Wang, X. ve Sun, Z. (2022). Improved fracture resistance and toughening mechanisms of GNPs reinforced ceramic composites. *Ceramics International*, 48(17), 24687–24694. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.05.115>
- Dörtoğul, C. (2018). *Grafen Oksitin Sentezlenmesi ve Karakterizasyonu*. Selçuk Üniversitesi.
- Ghazanlou, S. I., Ghazanlou, S. I., Ghazanlou, S. I., Hosseinpour, S., Liao, Y. ve Javidani, M. (2023). Improving the properties of an Al matrix composite fabricated by laser powder bed fusion using graphene-TiO₂ nanohybrid. *Journal of Alloys and Compounds*, 938, 168596. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168596>
- Gürbüz, M. ve Mutuk, T. (2019). Karbon Esaslı Malzeme Takviyeli Titanyum Kompozitler ve Grafen Üzerine Yeni Eğilimler. *Mühendis ve Makina*, 60(695), 101–118.
- Gürbüz, M., Şenel, M. C. ve Koç, E. (2018). The effect of sintering time, temperature, and graphene addition on the hardness and microstructure of aluminum

- composites. *Journal of Composite Materials*, 52(4), 553–563. doi: <https://doi.org/10.1177/0021998317740200>
- Gutierrez-Gonzalez, C. F., Smirnov, A., Centeno, A., Fernández, A., Alonso, B., Rocha, V. G., ... Bartolome, J. F. (2015). Wear behavior of graphene/alumina composite. *Ceramics International*, 41(6), 7434–7438. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.02.061>
- Hrubovčáková, M., Múdra, E., Bureš, R., Kovalčíková, A., Sedlák, R., Girman, V. ve Hvizdoš, P. (2020). Microstructure, fracture behaviour and mechanical properties of conductive alumina based composites manufactured by SPS from graphenated Al₂O₃ powders. *Journal of the European Ceramic Society*, 40(14), 4818–4824. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.03.072>
- Koruyucu, S. ve Soy, G. (2019). Alüminyum Matrisli Kompozitlerde Tungsten Karbür ve Grafen Takviyelerinin Mekanik Özelliklere Etkileri Üzerine Bir Araştırma. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(3), 1466–1487. doi: <https://doi.org/10.29130/dubited.536359>
- Kurt, A. O. (2004). *Toz Üretim Yöntemleri ve Sinterleme*. Sakarya.
- Liu, M., Wang, Z., Li, Q., Shi, G., Wu, C. ve Li, Y. (2015). Effects of Y₂O₃ on the mechanical properties of Ti/Al₂O₃ composites of hot pressing sintering. *Materials Science and Engineering: A*, 624(1), 181–185. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.11.058>
- Lu, Y., Zhu, M., Zhang, Q., Hu, T., Wang, J. ve Zheng, K. (2020). Microstructure evolution and bonding strength of the Al₂O₃/Al₂O₃ interface brazed via Ni-Ti intermetallic phases. *Journal of the European Ceramic Society*, 40(4), 1496–1504. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.11.066>
- Manes, A. ve Giglio, M. (2018). Microstructural numerical modeling of Al₂O₃/Ti composite. *Procedia Structural Integrity*, 8(2018), 24–32. doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.12.004>
- Meir, S., Kalabukhov, S., Frage, N. ve Hayun, S. (2015). Mechanical properties of Al₂O₃/Ti composites fabricated by spark plasma sintering. *Ceramics International*, 41(3), 4637–4643. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.12.008>
- Meir, S., Kalabukhov, S. ve Hayun, S. (2014). Low temperature spark plasma sintering of Al₂O₃-TiC composites. *Ceramics International*, 40, 12187–12192. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.04.059>
- Özdemir, A. (2006). *Seramik Malzemelerin Kırılma Tokluğu Değerlerinin Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Teorik Olarak Belirlenmesi*. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Öztürk, M. (2007). *SiC İlaveli Alümina Seramik Kompozitler*. Sakarya Üniversitesi.

- Petrus, M., Wozniak, J., Cygan, T., Kostecki, M., Cygan, S., Jaworska, L., ... Olszyna, A. (2019). Comprehensive study on graphene-based reinforcements in $Al_2O_3-ZrO_2$ and $Al_2O_3-Ti(C,N)$ systems and their effect on mechanical and tribological properties. *Ceramics International*, 45(17), 21742–21750. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.07.175>
- Rende, H. ve Hanyaloğlu, C. (2012). Rulmanlarda ve Kaymalı Yataklarda Seramiklerin Kullanımı. *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, 53(633), 28–35. Erişim Adresi: http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/f998a325e36f5e7_ek.pdf
- Sabuan, N. A., Asmelash, M., Azhari, A., Mulubrhan, F. ve Alemu, T. (2021). Investigation on the electrical conductivity of Al_2O_3-Ti ceramic composites using a pressureless sintering process. *Materials Today: Proceedings*, 46, 1718–1723. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.520>
- Santra, S., Bose, A., Mitra, K. ve Adalder, A. (2024). Exploring two decades of graphene: The jack of all trades. *Applied Materials Today*, 36(January). doi: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2024.102066>
- Şenel, M. C., Gürbüz, M. ve Koç, E. (2015). Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Yeni Nesil Kompozitler. *Mühendis ve Makina*, 56(669), 36–47.
- Şenel, M. C., Gürbüz, M. ve Koç, E. (2017). Grafen Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(8), 974–978. doi: <https://doi.org/10.5505/pajes.2017.65902>
- Şenel, M. C., Gürbüz, M. ve Koç, E. (2018). Toz Metalürjisi Metoduyla Üretilen $Al-Si_3N_4$ Metal Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 59(693), 33–46.
- Shi, G., Wang, Z., Liu, L. ve Wang, C. (2015). Influence of Y_2O_3 addition on the Ti/Al_2O_3 cermets by hot pressing sintering. *Journal of Alloys and Compounds*, 628(6), 413–415. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.12.014>
- Shi, S., Cho, S., Goto, T., Kusunose, T. ve Sekino, T. (2018). Combinative effects of Y_2O_3 and Ti on Al_2O_3 ceramics for optimizing mechanical and electrical properties. *Ceramics International*, 44(15), 18382–18388. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.07.054>
- Shi, S., Cho, S., Goto, T. ve Sekino, T. (2020a). CNT-induced TiC toughened Al_2O_3/Ti composites: Mechanical, electrical, and room-temperature crack-healing behaviors. *Journal of the American Ceramic Society*, 103(8), 4573–4585. doi: <https://doi.org/10.1111/jace.17152>
- Shi, S., Cho, S., Goto, T. ve Sekino, T. (2020b). Role of CeAl11O18 in reinforcing Al_2O_3/Ti composites by adding CeO2. *International Journal of Applied Cera-*

- mic Technology*, 18(1), 170–181. doi: <https://doi.org/10.1111/ijac.13629>
- Shi, S., Sekino, T., Cho, S. ve Goto, T. (2020). Ti and TiC co-toughened Al₂O₃ composites by in-situ synthesis from reaction of Ti and MWCNT. *Materials Science and Engineering A*, 777(January), 139066. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139066>
- Stolyarov, V. V., Frolova, V. ve Sudzhanskaya, I. V. (2020). Dielectric properties of nanocomposite ceramics Al₂O₃/graphene processed by spark plasma sintering. *Ceramics International*, 46(5), 6920–6925. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.11.188>
- Verma, V. ve Kumar, M. B. V. (2017). Synthesis, Microstructure and Mechanical Properties of Al₂O₃/ZrO₂/CeO₂ Composites with Addition of Nickel and Titania Processed by Conventional Sintering. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 3062–3071. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.189>
- Wan, J., Yang, J., Zhou, X., Chen, B., Shen, J., Kondoh, K. ve Li, J. (2023). Superior tensile properties of graphene/Al composites assisted by in-situ alumina nanoparticles. *Carbon*, 204(January), 447–455. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.12.088>
- Wang, X., Zhao, J., Cui, E., Song, S., Liu, H. ve Song, W. (2019). Microstructure, mechanical properties and toughening mechanisms of graphene reinforced Al₂O₃-WC-TiC composite ceramic tool material. *Ceramics International*, 45(8), 10321–10329. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.02.087>
- Wang, X., Zhao, J., Gan, Y., Tang, X., Gai, S. ve Sun, X. (2022). Cutting performance and wear mechanisms of the graphene-reinforced Al₂O₃-WC-TiC composite ceramic tool in turning hardened 40Cr steel. *Ceramics International*, 48(10), 13695–13705. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.01.251>
- Wu, C., Li, Y. ve Wang, Z. (2016). Evolution and mechanism of crack propagation method of interface in laminated Ti/Al₂O₃ composite. *Journal of Alloys and Compounds*, 665, 37–41. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.01.041>
- Wu, C., Wang, Z., Li, Q., Shi, G., Liu, M. ve Li, Y. (2014). Mechanical properties and microstructure evolution of Ti/Al₂O₃ cermet composite with CeO₂ addition. *Journal of Alloys and Compounds*, 617, 729–733. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.08.007>
- Xiu, Z., Laeng, J., Sun, X., Li, Q., Hur, S. K. ve Liu, Y. (2008). Phase formation of Al₂O₃/Ti(C,N)-NiTi composite. *Journal of Alloys and Compounds*, 458(1–2), 398–404. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.03.116>
- Xu, H., Wang, Z., Wu, J., Li, Q., Liu, M. ve Li, Y. (2016). Mechanical properties and microstructure of Ti/Al₂O₃ composites with Pr6O11 addition by hot pressing

- sintering. *Materials and Design*, 101, 1–6. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.127>
- Xu, H., Zhang, L., Wang, Z., Wu, J. ve Yang, F. (2017). Effects of Ta₂O₅ on mechanical properties and elements diffusion of Ti/Al₂O₃ composites prepared via hot pressing sintering. *Ceramics International*, 43(10), 7935–7941. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.03.003>
- Yavaş, B. (2014). *Monolitik ve Takviyeli Bor Karbür Seramiklerin Spark Plazma Sinterleme (SPS) Yöntemi ile Üretimi ve Karakterizasyonu*. İstanbul Teknik Üniversitesi. Erişim Adresi: <https://ej.e.bioscientifica.com/view/journals/eje/171/6/727.xml>
- Yazdani, B., Xia, Y., Ahmad, I. ve Zhu, Y. (2015). Graphene and carbon nanotube (GNT)-reinforced alumina nanocomposites. *Journal of the European Ceramic Society*, 35(1), 179–186. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceram-soc.2014.08.043>
- Yin, Z., Huang, C., Zou, B., Liu, H., Zhu, H. ve Wang, J. (2013). Preparation and characterization of Al₂O₃/TiC micro-nano-composite ceramic tool materials. *Ceramics International*, 39(4), 4253–4262. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.10.277>
- Yin, Z., Yuan, J., Huang, C., Wang, Z., Huang, L. ve Cheng, Y. (2016). Friction and wear behaviors of Al₂O₃/TiC micro-nano-composite ceramic sliding against metals and hard materials. *Ceramics International*, 42(1), 1982–1989. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.10.001>
- Yin, Z., Yuan, J., Wang, Z., Hu, H., Cheng, Y. ve Hu, X. (2016). Preparation and properties of an Al₂O₃/Ti(C,N) micro-nano-composite ceramic tool material by microwave sintering. *Ceramics International*, 42(3), 4099–4106. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.11.082>
- Yontar, O. (2021). *Grafe-Silisyum Nitrür Partikül Takviyeli Kalsiyum Fosfat Matrisli Hibrit Kompozitlerin Üretimi ve Mekanik Davranışlarının İncelenmesi*. Ondokuz Mayıs Üniversitesi.
- You, X. Q., Si, T. Z., Liu, N., Ren, P. P., Xu, Y. D. ve Feng, J. P. (2005). Effect of grain size on thermal shock resistance of Al₂O₃-TiC ceramics. *Ceramics International*, 31(1), 33–38. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2004.02.009>
- Zygmuntowicz, J., Tomaszewska, J., Wiczorek, M., Żurowski, R., Piotrkiewicz, P., Wachowski, M. ve Wiciński, P. (2022). Properties of Al₂O₃/Ti/Ni composites fabricated via centrifugal slip casting under environmentally assessed conditions as a step toward climate-neutral society. *Ceramics International*, 48(15), 21920–21933. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.04.174>