



TOZ METALÜRJİSİ VE SICAK PRESLEMEYLE ÜRETİLEN AL7075-Si₃N₄ KOMPOZİTLERİN MİKROYAPISININ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Aleyna TAŞKIN¹, Elif IŞIK², Mahmut Can ŞENEL^{3*}

¹ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Samsun
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-8308-9957>

² Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği, Sivas, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-8289-9512>

³ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Samsun,
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-7897-1366>

Anahtar Kelimeler

Öz

Toz metalürjisi, Al7075 alaşımı, Si₃N₄ kompozit

Bu çalışmada, yüksek mukavemetli Al7075 alüminyum alaşımı matrisine farklı oranlarda (%1, %3, 6, 9 ve 12) Si₃N₄ seramik partikülleri takviyesi yapılarak kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretim sürecinde toz metalürjisi ve sıcak presleme teknikleri kullanılmış, elde edilen kompozit malzemelerin mikroyapısı, yoğunluğu, gözeneklilik oranı, Vickers sertliği ve basma dayanımı gibi özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan testler sonucunda en yüksek yoğunluk (2,65 g/cm³), en yüksek Vickers sertliği (205 HV), en yüksek basma dayanımı (344 MPa) ve en düşük gözeneklilik oranı (%7,5) Al7075-9Si₃N₄ kompozitte elde edilmiştir. Mikroyapı analizlerinde ise takviye oranının artmasıyla Si₃N₄ partiküllerinin matris içerisinde daha homojen bir dağılım gösterdiği, ancak %12 oranında takviye ilavesinde partiküllerin kümelenme eğilimi nedeniyle bu homojenliğin azaldığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, %9 oranında Si₃N₄ takviyesi Al7075 alaşımı için optimum takviye oranı olarak belirlenmiştir. Bu oran, kompozitin mekanik özelliklerini en üst seviyeye çıkarmış, özellikle yoğunluk, sertlik ve basma dayanımı açısından en iyi sonuçların elde edilmesini sağlamıştır. Bu çalışma, Al7075-Si₃N₄ kompozitlerinin ileri mühendislik uygulamalarında kullanılacak yüksek performanslı malzemeler olarak potansiyelini ortaya koymaktadır.

* mahmutcan.senel@omu.edu.tr
doi : 10.46399/muhendismakina.1409791

INVESTIGATION OF THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF AL7075-Si₃N₄ COMPOSITES PRODUCED BY POWDER METALLURGY AND HOT PRESSING

Keywords

Powder metallurgy, Al7075 alloy, Si₃N₄ composite

Abstract

In this study, composite materials were produced by reinforcing Si₃N₄ ceramic particles at different rates (1%, 3%, 6%, 9% and 12%) into the high strength Al7075 aluminum alloy matrix. Powder metallurgy and hot-pressing techniques were used in the production process, and the properties of the obtained composite materials such as microstructure, density, porosity rate, Vickers hardness and compressive strength were examined in detail. As a result of the tests, the highest density (2.65 g/cm³), the highest Vickers hardness (205 HV), the highest compressive strength (344 MPa) and the lowest porosity rate (7.5%) were obtained in the Al7075-9Si₃N₄ composite. The microstructure analyses determined that the Si₃N₄ particles showed a more homogeneous distribution with the increase in the reinforcement rate in the matrix. However, this homogeneity decreased due to the agglomeration tendency of the particles in the addition of 12% reinforcement. As a result, the optimal reinforcement rate was determined as 9% Si₃N₄ reinforcement for the Al7075 alloy. This ratio maximized the mechanical properties of the composite, providing the best results, especially in terms of density, hardness, and compressive strength. This study demonstrates the potential of Al7075-Si₃N₄ composites as high-performance materials that can be used in advanced engineering applications.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 26.12.2024

Kabul Tarihi : 25.08.2024

Research Article

Submission Date : 26.12.2024

Accepted Date : 25.08.2024

Extended Abstract

Introduction

Nowadays, the trend towards new materials has increased day by day. In order to achieve this, composite materials have begun to be produced. Composite materials are a type of material developed to combine the superior properties of many materials. According to the matrix material, they are grouped as metal, ceramic, and polymer matrix composites. Metal matrix composites (MMC) are preferred in many areas, especially in the aviation, automotive, and aerospace industries, due to their properties such as low density and high strength. In MMCs, matrix material includes metal or metal alloys. Aluminum (Al) and its alloys are frequently used as matrix materials in metal matrix composites due to their properties such as low density, easy shaping, and good compatibility with the reinforcement material. 7XXX series aluminum alloys, including Al7075 alloy, attract attention in many industrial areas, especially in the fuselage and wings of aircraft, due to their high-strength properties. They consist of two components: matrix material and reinforcement element. Al7075 alloy, which contains high amounts of zinc, has superior properties such as high strength, low density, high fatigue resistance, and toughness. Reinforcing elements are added into the matrix to increase the strength of the composite material. Si_3N_4 is frequently used as a reinforcement element in composite materials due to its properties such as high hardness, high wear resistance, and high strength. Composite materials can be produced by different production methods (powder metallurgy, diffusion bonding, extrusion, liquid infiltration, etc.). Among these methods, powder metallurgy (PM) enables the production of parts that are difficult and costly to manufacture with minimum material loss and low cost when compared to other production methods. In the literature, there are many studies on the mechanical properties of Al-based Si_3N_4 -reinforced composites. However, no study has been found investigating the microstructures and mechanical properties of Al7075- Si_3N_4 composites produced by powder metallurgy and induction hot pressing methods. In this study, Al7075 matrix Si_3N_4 reinforced composites (1, 3, 6, 9, and 12 wt% contribution ratios) composites were produced by powder metallurgy and induction hot pressing methods. The microstructures and mechanical properties of the produced composites were examined.

Material and Methods

In this work, Al7075 alloy powder used as matrix material has a grain size of $\sim 10 \mu\text{m}$, a Vickers hardness of 68 HV, and a theoretical density of 2.81 g/cm^3 . The average particle size of Si_3N_4 used as a reinforcement element is $0.8 \mu\text{m}$, and its theoretical density is 3.25 g/cm^3 . Al7075- Si_3N_4 composites were fabricated by powder metallurgy and induction hot-pressing methods. The Al7075 alloy and ethanol mixture was first mixed in a mechanic mixer and then combined with the Si_3N_4 -ethanol mixture ground in a ball mill. Afterward, the mixture was filtered and dried under a vacuum. Sintering under vacuum and hot pressing were applied to the powders compressed by the pressing process. Sanding and polishing were done to remove any roughness on the sample surface. Then, microstructural analyses and mechanical tests of the samples were performed.

Findings and Discussion

Density, porosity ratio, Vickers hardness, and compressive strength tests were performed on the fabricated Al7075-Si₃N₄ composites. Among Al7075-Si₃N₄ composites, the highest density (2.65 g/cm³) and lowest porosity rate (7.5%) were determined in Al7075-9Si₃N₄ composite. During the hot pressing applied to the composites, the intergranular distance decreased due to the effect of temperature and pressure. Thus, the porosity of the composite decreased, and its density increased. The highest hardness (205±4 HV) and compressive strength (344±5 MPa) were obtained in the Al7075-Si₃N₄ composite. Due to the high hardness of the reinforcement element, there was an increase in the strength of the composite. Within the scope of microstructural investigations, scanning electron microscopy (SEM) was used to determine the surface morphology of the powders, fractured surface images of the samples, and element distribution maps. Energy dispersive X-ray analysis (EDX) was also performed using SEM to determine the distribution of the reinforcement element within the matrix. Finally, phase analyses of the samples were determined by an X-ray diffraction (XRD) device. As a result of the examinations, the densest microstructure was observed in the Al7075-9Si₃N₄ composite. It has been determined that the grains in this composite become closer to each other by necking, and therefore, the mechanical properties are improved. However, it was seen that the silicon nitride agglomerated at a 12% contribution rate, and the mechanical properties of the composite deteriorated accordingly.

Conclusions

In this study, Si₃N₄ reinforced Al7075 matrix composites were produced using powder metallurgy and induction hot-pressing methods. As a result, it was detected that the microstructure of the composite was intensified by reinforcing a certain amount of Si₃N₄ (9% by weight) into the Al7075 matrix. Accordingly, it was determined that the mechanical properties of the composite improved.

1. Giriş

Günümüzde insan ihtiyaçları doğrultusunda yeni malzemelere yönelim giderek artmaktadır. Seçilen malzemelerin kullanıldığı yere göre dayanımlarının artırılması gereklidir. Bunu sağlamak amacıyla birden fazla üstün özelliği aynı anda karşılayabilen kompozit malzemeler üretilmeye başlanmıştır. Kompozit malzemeler birçok malzemenin üstün özelliklerini bir araya getirmek amacıyla geliştirilmiş bir malzeme türüdür (Bharathi ve Kumar, 2023; Adin ve Adin, 2022). Matris malzeme ve takviye elemanı olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Matris malzemesine göre; metal, seramik ve polimer matrisli kompozitler şeklinde gruplandırılmaktadır (Alharthi, Almotairy ve Almutairi, 2022; Kumar, Sachit, Mohan ve Akshayprasad, 2021).

Metal matrisli kompozitler (MMK) düşük yoğunluk ve yüksek dayanım gibi özelliklerinden dolayı havacılık, otomotiv, uçak-uzay sanayi başta olmak üzere birçok alanda tercih edilmektedir (Kumar ve Khanduja, 2024). MMK; matris malzemesi metal veya metal alaşımları olan kompozitlerdir. MMK yapılarında matris malzemesi olarak genellikle hafif metaller tercih edilmektedir (Taskin ve Senel, 2024). Alüminyum (Al) ve alaşımları; düşük yoğunluğa sahip olması, kolay şekillendirilebilmesi ve takviye malzemesi ile iyi uyum göstermesi gibi özelliklerinden dolayı metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak sıklıkla kullanılmaktadır (Sharma, Saxena, Salem, Mohammed, Singh ve Prakash, 2024). Al7075 alaşımını da içeren 7XXX serisi alüminyum alaşımlar; yüksek mukavemet özelliğine sahip olmaları nedeniyle uçakların gövde ve kanatları başta olmak üzere birçok endüstriyel alanda dikkat çekmektedir. Çinko elementinin yoğun olduğu Al7075 alaşımı; dayanımının yüksek olması, yoğunluğunun düşük olması, yorulma direncinin ve tokluğunun yüksek olması gibi üstün özelliklere sahiptir (Dursun ve Soutis, 2014; Shantharaj, Prashanth, Nagaral, Bharath, Auradi, ve Dharshan, 2022). Bu serinin en önemli özelliği çökeltme sertleşmesi olarak da bilinen yaşlandırma ısıl işlemlerle dayanımlarının yaklaşık iki kat artırılabilmesidir (Yıldırım ve Özyürek, 2018).

Kompozit malzemenin dayanımını artırmak ve malzemeye gelen gerilmeleri taşıyabilmek amacıyla matrise takviye elemanı ilave edilmektedir. Metal matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak genellikle silisyum nitrür (Si_3N_4), bor karbür (B_4C), zirkonyum dioksit (ZrO_2), alümina (Al_2O_3) ve tungsten karbür (WC) gibi malzemeler tercih edilmektedir (Şahingöz, Karakoç ve Çıtak, 2024). Si_3N_4 yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci ve yüksek mukavemet gibi özelliklerinden dolayı kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda sertlik ve dayanımını korumasından dolayı sıcaklık korozyonunun görüldüğü uygulamalarda da kullanılabilir. Silisyum (Si) ve nitrojen (N) atomları arasındaki kovalent bağ oldukça kuvvetlidir. Bu nedenle Si_3N_4

sert ortam şartlarına, metallere ve polimerlere göre daha fazla dayanıklıdır (Tümer, 2004).

Kompozit malzemeler farklı üretim yöntemleri (toz metalürjisi, difüzyon bağlama, ekstrüzyon, sıvı infiltrasyon vb.) ile üretilebilmektedir. Bu yöntemler arasından toz metalürjisi (TM) diğer üretim yöntemleri ile kıyaslandığında imalatı zor ve maliyetli olan parçaları minimum malzeme kaybı ve düşük maliyetle üretebilmeyi sağlamaktadır. TM yöntemi; yüksek yüzey kalitesinde, yüksek dayanımlı, sıcaklık direnci yüksek ve çevreye duyarlı parça üretimi sağladığından geniş kullanım alanına sahiptir. TM ile toz halinde bulunan malzemeler belirli oranda karıştırıldıktan sonra sıkıştırılarak dayanım kazanmaktadır. Sıkıştırma işleminden sonra toz halinde bulunan malzemelerin temas yüzeyleri arasında daha kuvvetli bağlar oluşması için malzemelere ergime sıcaklığının altında sinterleme işlemi uygulanmaktadır. Ardından ikincil işlemler yapılarak üretim tamamlanmaktadır (Ayvacı, 2019).

Literatürde alüminyum matrisli Si_3N_4 takviyeli kompozit malzemelerin üretilmesi ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Arık yaptığı çalışmada, toz metalürjisi yöntemi ile alüminyum matrisli Si_3N_4 (ağırlıkça %5, 10, 15 katkı oranlarında) takviyeli kompozitleri üretmiştir. Si_3N_4 partiküllerinin yüksek sertliğinden dolayı katkı oranının artmasıyla kompozitin mekanik ve tribolojik özelliklerinin iyileştiğini belirtmiştir (Arık, 2019). Blunavesh vd. çalışmalarında, karıştırmalı döküm yöntemiyle LM25 matrise ağırlıkça %10 Si_3N_4 takviye etmişlerdir. Üretilen kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Farklı kayma hızlarında (1,5, 3, 4,5 m/s), farklı kayma mesafelerinde (400, 800, 1200 m) ve farklı yükler (10, 20, 30 N) altında gerçekleştirilen testler sonucunda en iyi tribolojik özelliklerin 3 m/s kayma hızında, 1200 m kayma mesafesinde ve 10 N yüklemde elde edildiğini belirtmişlerdir (Bhuvanesh ve Radhika, 2017). Haq ve Anand çalışmalarında, Al7075 matrisli Si_3N_4 (ağırlıkça %2, 4, 6 katkı oranlarında) takviyeli kompozitleri karıştırma döküm yöntemiyle üretmişlerdir. Üretilen kompozitlere farklı bekleme sürelerinde (1, 5, 10 sn) ve farklı yükler (1, 2, 3, 5 N) altında sertlik testi uygulamışlardır. Testler sonucunda Al7075- Si_3N_4 kompozitin sertliğinin Si_3N_4 katkı oranının artmasıyla arttığını ancak bekleme süresi ve uygulanan yükün artmasıyla azaldığını tespit etmişlerdir (Haq ve Anand, 2018). Kumar vd. çalışmalarında, karıştırmalı döküm yöntemiyle Al7075 matrise ağırlıkça %4, 8, 12 katkı oranlarında Si_3N_4 ilave etmişlerdir. Katkı oranının artmasıyla kompozitin sertliğinin artmasına karşın yapı içerisindeki gözeneklilik oranında da arttığını tespit etmişlerdir. Bu durum kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Bundan dolayı gözeneklilik artışının çift karıştırma tekniği kullanılarak önlenilebileceğini belirtmişlerdir (Kumar, Vignesh ve Joshua, 2020). Mattli vd. toz metalürjisi yöntemiyle Al- Si_3N_4 kompozitleri üretmişlerdir. Al matrise ağırlıkça %1, 2, 3 katkı oranlarında nano Si_3N_4 ilave etmişlerdir. Katkı oranının kompo-

zitlerin mikroyapılarına ve mekanik özelliklerine olan etkisini incelemişlerdir. Yapılan testler neticesinde takviye elemanın yüksek yoğunluğuna bağlı olarak katkı oranının artmasıyla kompozitin yoğunluğunda artış meydana gelmiştir. En yüksek sertliği (38 HV) ve en yüksek basma dayanımını (305 MPa) Al-3Si₃N₄ kompozit yapıda elde etmişlerdir (Mattli, Matli, Shakoore ve Mohamed, 2019).

Literatür çalışmalarına bakıldığında Al matrisli Si₃N₄ takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelendiği birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle üretilen Al7075-Si₃N₄ kompozitlerin mikroyapılarının ve mekanik özelliklerinin incelendiği herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu nedenle bu çalışmada Al7075 matrisli Si₃N₄ takviyeli (ağırlıkça %1, 3, 6, 9 ve 12 katkı oranlarında) kompozitler toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin mikroyapıları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu çalışma indüksiyonla sıcak presleme işlemini esas alarak mekanik özellikleri gelişmiş Al7075-Si₃N₄ kompozit malzemelerini üretmeyi amaçlamaktadır. İndüksiyonla sıcak presleme işlemi sıcaklığın ve basıncın aynı anda ve hızlı bir şekilde uygulanmasından dolayı geleneksel sinterleme yöntemlerine kıyasla malzemelerin dayanımını arttırmada daha fazla etkilidir. Bu üretim yöntemi, yüksek verimlilik ve enerji tasarrufu sağlarken, aynı zamanda mikroyapıda homojen dağılım sağlamaktadır. Özellikle 9% Si₃N₄ takviyesinin mekanik performans üzerindeki olumlu etkileri, bu yöntemin potansiyelini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, indüksiyonla sıcak preslemenin Al7075-Si₃N₄ kompozitlerinin ileri mühendislik uygulamaları için yüksek performanslı malzemeler geliştirmedeki yenilikçi rolü vurgulanmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Materyal

Bu çalışmada matris malzemesi olarak Al7075 alaşımı kullanılmıştır. Al7075 alaşımı düşük yoğunluğa, yüksek dayanıma ve yüksek korozyon direncine sahiptir. Ayrıca hafif olması sebebiyle de mukavemet/ağırlık oranı yüksektir. Bu nedenle bu çalışmada Al7075 alaşımı tercih edilmiştir. Takviye elemanı olarak ise Si₃N₄ kullanılmıştır. Si₃N₄ yüksek mukavemete sahip seramik malzemelerden biridir. Düşük termal genişlemeye sahip olması ve kimyasal dayanıklılığından dolayı bu çalışmada kompozit malzemenin özelliklerini iyileştirmek amacıyla tercih edilmiştir. Kullanılan Al7075 alaşım ve Si₃N₄ tozları gaz atomizasyon yöntemi ile üretilmiş olup sırasıyla Nanografi Teknoloji (Türkiye) ve Ube Industry (Japonya) firmasından temin edilmiştir. Matris malzemesi olarak kullanılan Al7075 alaşımı Tablo 1'de gösterildiği gibi ağırlıklı olarak çinko (Zn), magnezyum (Mg) ve bakır (Cu) elementlerinden oluşmaktadır (Sönmez ve Başak, 2016). Al7075 alaşım tozu ~10 µm tanecik boyutuna, 68 HV Vickers sertliğine ve 2,81 g/cm³ teorik

yoğunluğa sahiptir. Takviye elemanı olarak kullanılan Si_3N_4 'ün ortalama partikül boyutu $0,8 \mu\text{m}$, teorik yoğunluğu ise $3,17 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Tablo 2'de Al7075 alaşımı ve Si_3N_4 'ün belirli özellikleri verilmiştir (Şenel, 2018; Yıldırım, 2016).

Tablo 1. Al7075 alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlıkça) (Sönmez ve Başak, 2016)

Cu	Zn	Mg	Si	Mn	Fe	Cr	Ti	Diğer	Al
1,20-2	5,10-6,10	2,10-2,90	0,40	0,30	0,50	0,18-0,28	0,20	0,15	kalan

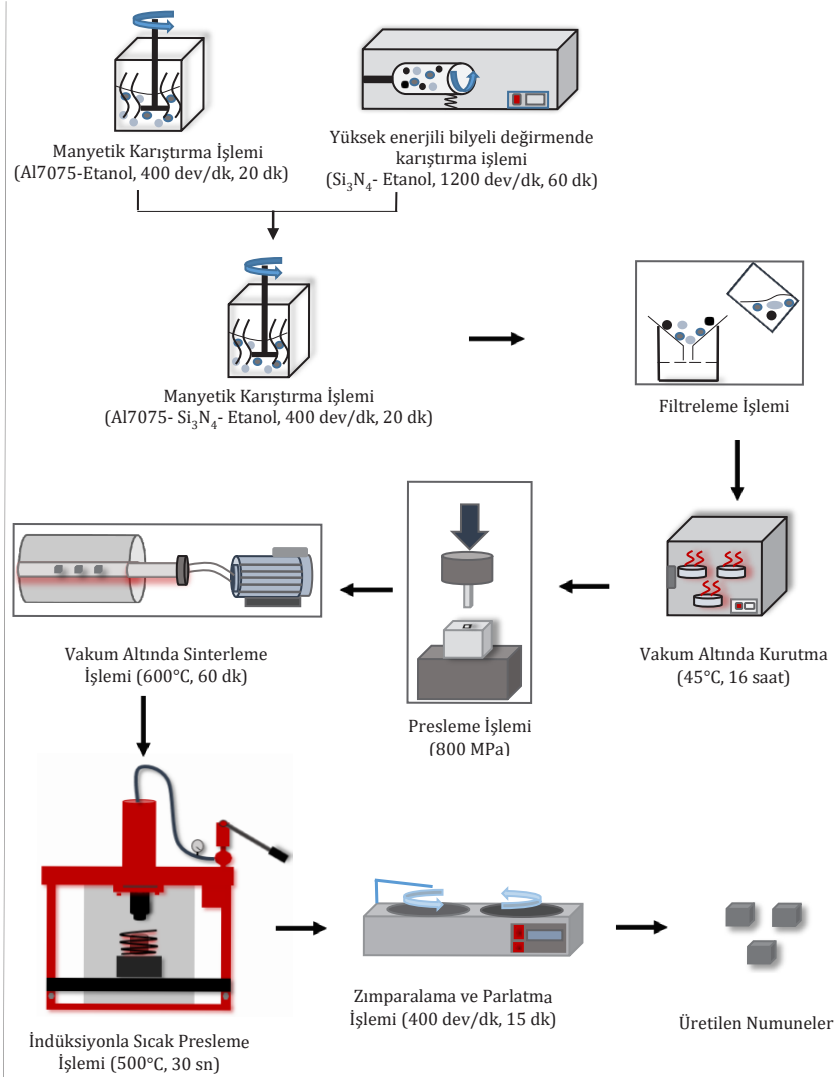
Tablo 2. Al7075 Alaşımının ve Si_3N_4 'ün belirli özellikleri (Şenel, 2018; Yıldırım, 2016)

Malzeme	Yoğunluk (g/cm^3)	Termal İletkenlik ($(\text{W}/(\text{m}^\circ\text{K}))$)	Elastisite Modülü (GPa)	Sertlik (HV)	Ergime Sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)
Al7075	2,81	167	71,7	68	635
Si_3N_4	3,17	29	310	1450	1800

2.2 Yöntem

Yapılan bu çalışmada Al7075- Si_3N_4 kompozitleri toz metalürjisi ve sıcak presleme yöntemiyle üretilmiştir (Şekil 1). İlk olarak Al7075 alaşım tozu etanol içerisinde manyetik karıştırıcıda 400 dev/dk hızda 20 dk süresince karıştırılmıştır. Eş zamanlı olarak Si_3N_4 tozu etanol ile birlikte 1200 dev/dk hızda 60 dk süresince yüksek enerjili bilyalı değirmende öğütülmüştür. Ardından Si_3N_4 -etanol karışımı damla damla Al7075-etanol karışımı içerisine aktarılarak manyetik karıştırıcıda 20 dk boyunca karıştırılmıştır. Etanolün karışımdan uzaklaşıp yalnızca katı partiküllerin kalması amacıyla filtreleme/süzme işlemi gerçekleştirilmiştir. Filtrelenen toz karışım içerisindeki kalan nemi gidermek için karışım 45°C sıcaklıkta 16 saat süresince etüv fırında kurutulmuştur. Sonrasında tozlara ham yoğunluk kazandırmak amacıyla 800 MPa basınç altında hidrolik pres makinesinde sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Presleme işlemi ile belirli dayanım kazanan tozlara asıl mukavemetini sağlayabilmek için 600°C sıcaklıkta 60 dk süresince sinterleme ve 500°C sıcaklıkta 30 sn süresince indüksiyon altında sıcak presleme işlemi uygulanmıştır (Gürbüz, Şenel ve Koç, 2018; Şenel ve Demir, 2023). Sinterleme işleminden sonra gözenekliliğin azaltılması, mikroyapının iyileştirilmesi, mekanik özelliklerin artırılması ve homojen dağılım sağlanması amacıyla sıcak presleme işlemi uygulanmıştır. Sinterleme işlemi toz partiküllerinin birbirlerine bağlanmasını sağlar ancak uygulanan sürenin uzun olmasından dolayı yapı içerisinde gözenek oluşması ihtimali bulunmaktadır. Sıcak presleme işlemi ile bu gö-

zenekler minimum seviyeye indirilerek kompozit yapının mekanik özelliklerinin iyileşmesi sağlanmıştır. Ayrıca sıcak presleme işleminde sinterleme işleminden farklı olarak hem sıcaklık hem de basınç aynı anda uygulanmaktadır. Bu durum kompozit yapıda, birim hacimdeki tane sayısının artmasına yol açmaktadır. Böylece kompozit malzemenin dayanımı artmaktadır. Sıcak presleme işleminden sonra üretilen numunelerin yüzeyindeki pürüzleri gidermek amacıyla numuneler 600, 1200 ve 2500 gritlik SiC su zımparaları kullanılarak zımparalanmıştır.



Şekil 1. Al7075-Si₃N₄ Kompozitlerin Toz Metalürjisi Ve Sıcak Presleme Yöntemiyle Üretim Aşamaları

Son olarak numune yüzeyleri elmas solüsyon ile 15 dk süresince 400 dev/dk hızda parlatılmıştır. Ardından numunelere 22°C sıcaklıkta ve %60 nem oranındaki ortamda mikroyapı analizleri ile mekanik testler uygulanmıştır. Bu ortam koşullarının literatürle uyumlu olduğu tespit edilmiştir (Adin ve Okumuş, 2022).

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

2.3 Mikroyapı Analizleri

Çalışma kapsamında tozların (Al7075, Si₃N₄) ve üretilen numunelerin (Al7075 alaşımı, Al7075-Si₃N₄ kompozitleri) mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Matris ve takviye elemanı olarak kullanılan tozların tane boyut ölçümü Malvern marka Mastersizer 3000 model tane boyut ölçüm cihazıyla yapılmıştır. Tozların yüzey morfolojisini, numunelerin kırık yüzey görüntülerini ve element dağılım haritalarını belirlemek amacıyla Jeol marka JSM-7001F model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Ayrıca takviye elemanının matris içerisindeki dağılımını belirleyebilmek amacıyla SEM kullanılarak enerji dağıtıcı X-ışını analizi (EDX) yapılmıştır. Son olarak Rigaku marka Smartlab model X-ışını kırınım cihazı (XRD) ile numunelerin faz analizleri belirlenmiştir.

2.4 Karakterizasyon

Üretilen numunelere deneysel yoğunluk, Vickers sertliği ve basma dayanımı testleri uygulanmıştır. Numunelerin deneysel yoğunlukları (ρ_D) Arşimet prensibine göre belirlenmiştir. İlk olarak numunelerin sudaki asılı kütlesi (m_A), suya doymuş kütlesi (m_D) ve kuru kütleleri (m_K) ölçülmüştür. Sonrasında Eşitlik 1 kullanılarak numunelerin deneysel yoğunlukları hesaplanmıştır. Eşitlikteki ρ_{su} suyun yoğunluğu olup 1 g/cm³ olarak alınmıştır. Her numuneden 5 ölçüm yapılmış ve ortalaması hesaplanarak deneysel yoğunluk değeri belirlenmiştir.

$$\rho_D = [m_K / (m_D - m_A)] \rho_{su} \quad (1)$$

Kompozit numunelerin teorik yoğunluğu (ρ_K) ise Eşitlik 2 ile belirlenmektedir. Eşitlikteki ρ_M ve %M sırasıyla matris malzemesinin (Al7075) yoğunluğu ve ağırlıkça katkı oranıdır. ρ_{TK} ve % TK ise takviye elemanının (Si₃N₄) yoğunluğu ve ağırlıkça katkı oranıdır (Şenel ve Mahmutoglu, 2022).

$$\rho_K = (\rho_M \times \%M) + (\rho_{TK} \times \%TK) \quad (2)$$

Kompozitlerin mekanik özelliklerini etkileyen diğer parametre ise gözeneklilik oranıdır. Gözeneklilik oranının azalmasıyla kompozitlerin mekanik özellikleri iyileşmektedir. Üretilen kompozitlerin gözeneklilik oranı (%G) Eşitlik 3 ile hesaplanmaktadır.

$$\%G = \left(1 - \frac{\rho_D}{\rho_K}\right) \times 100 \quad (3)$$

Al7075 alaşımının ve Al7075-Si₃N₄ numunelerin sertliklerini ölçmek için Vickers sertlik ölçme yöntemi kullanılmıştır (ASTM E384). Mikro Vickers sertlik ölçüm cihazı (HV1000B) kullanılarak kompozitlerin yüzeyine 15 s süresince 1,961 N yük uygulanmıştır. Yük kaldırıldıktan sonra yüzeyde oluşan kare tabanlı piramitin köşegen uzunlukları ölçülerek numunelerin Vickers sertlik değerleri hesaplanmıştır (Eşitlik 4). Her numuneden en az 7 ölçüm yapılarak bu ölçümlerin ortalaması alınmış ve numunelerin ortalama sertlik değeri (HV) belirlenmiştir. Eşitlikte P numune yüzeyine uygulanan yük ve d ise ortalama köşegen uzunluğudur.

$$HV = \frac{1,8544 \times P}{d^2} \quad (4)$$

Kompozitlerin basma dayanımı Mares marka Tst-10t model basma cihazı ile belirlenmiştir (ASTM E9). Numunelere 1 mm/dk basma hızında 5 MPa ön yük uygulanmıştır. Sonrasında 3 mm/dk hızda basma testi gerçekleştirilmiştir. Her numuneye en az üç basma testi yapılarak bu değerlerin ortalaması alınmış ve kompozitlerin ortalama basma dayanımı belirlenmiştir.

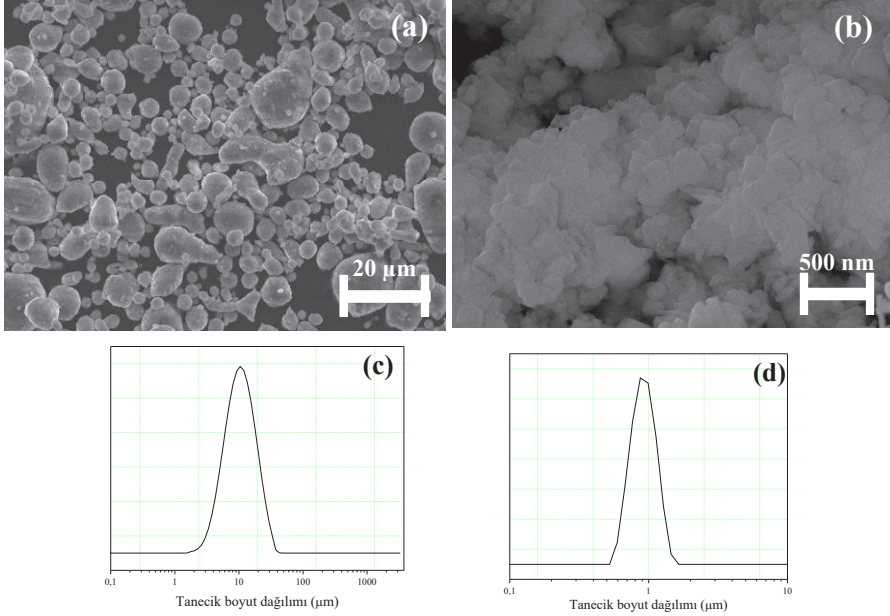
3. Bulgular ve Tartışma

3.1 Tozların Karakterizasyonu

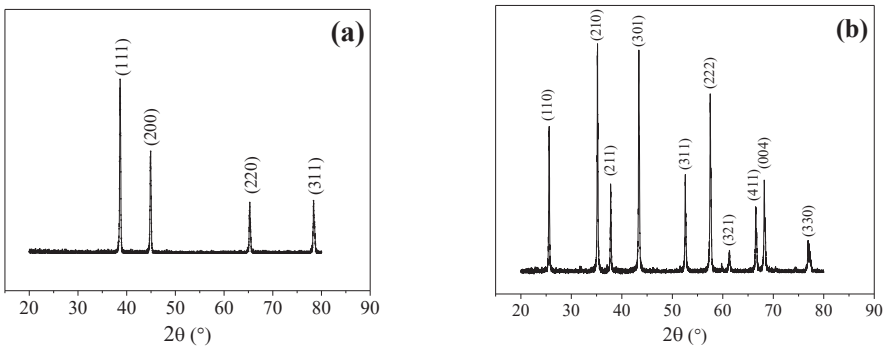
Al7075 alaşım ve Si₃N₄ tozlarının SEM görüntüleri ve tanecik boyut dağılımları Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2(a)'da gösterilen Al7075 tozunun SEM görüntüsü incelendiğinde partiküllerin küresele yakın bir morfolojide olduğu görülmektedir. Şekil 2(b)'de verilen Si₃N₄ partiküllerinin ise küresel olmayan düzensiz yapıda olduğu tespit edilmiştir. Tanecik boyut dağılımı analiz sonuçlarına göre; Al7075 alaşım tozunun ortalama 10 µm ve Si₃N₄ tozunun ortalama 800 nm boyutunda olduğu tespit edilmiştir (Şekil 2(c, d)).

Şekil 3'te Al7075 alaşım ve Si₃N₄ tozlarının XRD örgü desenleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde; matris malzemesi olarak kullanılan Al7075 alaşımının kırınım açılarının 2θ=~38°, 45°, 66° ve 78° olduğu belirlenmiştir. Bu analizde yer alan tüm fazların alüminyuma ait olduğu tespit edilmiş olup bu kırınım açılarına karşılık gelen düzlemler (111), (200), (220) ve (311) şeklindedir. Takviye malzemesi olarak tercih edilen Si₃N₄'ün kırınım açılarının ise 2θ=~26°, 35°, 38°, 43°, 53°, 57°, 61°, 67°, 69°, 77° olduğu tespit edilmiştir. Bu kırınım açılarına karşılık gelen düzlemler ise (110), (210), (211), (301), (311), (222), (321), (411), (004), (330)'dır. Si₃N₄ tozunun faz analizindeki tüm piklerin silisyum nitrüre ait oldu-

ğu belirlenmiş olup kirlilikten doğabilecek herhangi bir faza rastlanmamıştır. Bu analiz ısıl işlem sonrasında üretilen numunelerin faz yapılarının belirlenmesinde yardımcı olmaktadır.



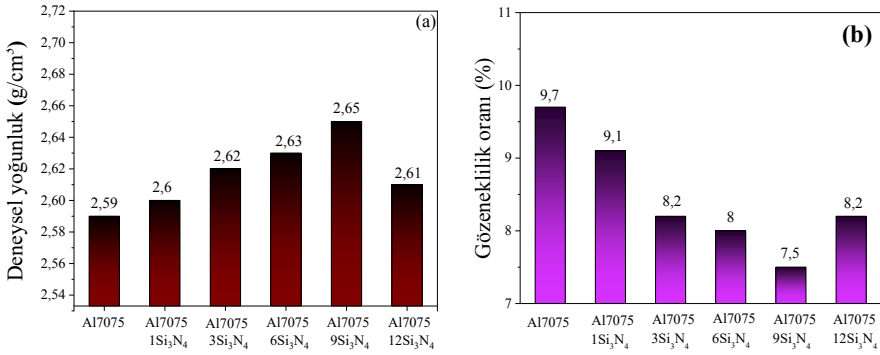
Şekil 2. Tozların SEM Görüntüleri: Al7075 Alaşım (a), Si₃N₄ (b) ve Tanecik Boyut Dağılımları: Al7075 Alaşım (c), Si₃N₄ (d)



Şekil 3. Al7075 Alaşım (a) ve Si₃N₄ (b) Tozlarının XRD Analizi

3.2 Yoğunluk ve Gözeneklilik Oranı Ölçüm Sonuçları

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen Al7075 matrisli Si₃N₄ takviyeli kompozitlerin yoğunluk ve gözeneklilik oranı değerleri Şekil 4'te verilmiştir. Şekil incelendiğinde Si₃N₄ takviye oranının artmasıyla kompozitlerin gözeneklilik oranının azaldığı buna bağlı olarak yoğunluk değerinin arttığı görülmektedir. Al7075-Si₃N₄ kompozitleri arasında en yüksek yoğunluk (2,65 g/cm³) ve en düşük gözeneklilik oranı (%7,5) %9 Si₃N₄ takviyeli kompozitte elde edilmiştir. Ancak %12 Si₃N₄ katkı oranında partiküllerin bir araya gelerek toplanmasından dolayı yapı içerisinde boşluklar oluşmuştur. Bu nedenle kompozitin gözeneklilik oranı artarak yoğunluğu azalmıştır.



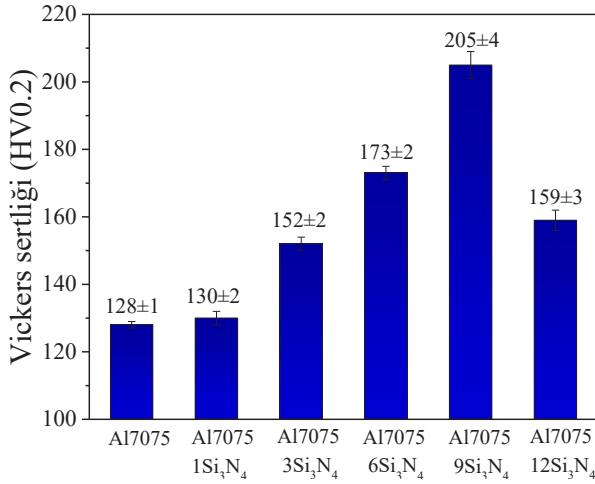
Şekil 4. Al7075 Alaşımı ile Al7075-Si₃N₄ Kompozitlerin Yoğunluk (a) ve Gözeneklilik Oranı (b) Değerleri

3.3 Mekanik Test Sonuçları

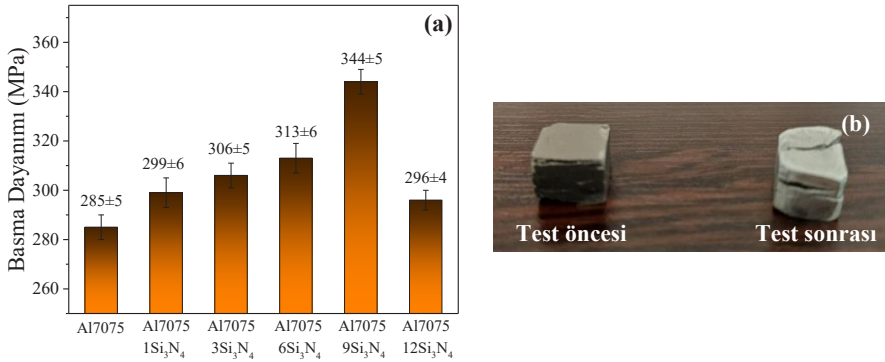
Al7075 alaşımı ve Al7075-Si₃N₄ kompozitlerin katkı oranına bağlı olarak Vickers sertliği değişimi Şekil 5'te verilmiştir. Şekle göre Si₃N₄ katkı oranının artmasıyla kompozitlerin sertliği artmıştır. En yüksek sertlik değeri (205±4 HV) Al7075-9Si₃N₄ kompozitte belirlenmiştir. Al7075 alaşımına (128±1 HV) kıyasla Al7075-9Si₃N₄kompozitte sertlik değeri %60,2 oranında artmıştır. Bu artış, takviye elemanı olarak kullanılan silisyum nitrürün sert ve aşınma direnci yüksek seramik yapısından kaynaklanmaktadır.

Şekil 6'da üretilen kompozitlerin katkı oranına bağlı olarak basma dayanımı değerleri verilmiştir. Al7075 alaşımında 285±5 MPa olan basma dayanımı, Al7075-9Si₃N₄ kompozitte %20,7 artışla 344±5 MPa değerine yükselmiştir. Kompozit yapılarına uygulanan ısıl işlemin etkisinden dolayı sıcaklık ve basınç birlikte uygulandığında taneler arası boşluk azalmaktadır. Ayrıca basma dayanımı oldukça yüksek seramik bir malzeme olan silisyum nitrür katkısıyla Al7075-Si₃N₄ kompo-

zitin basma dayanımı da artmaktadır. Ancak %12 Si_3N_4 katkısında partiküllerin bir araya gelerek topaklanmasından kaynaklı olarak yapı içerisinde gözenekler meydana gelmiştir. Bu durum da Al7075-12 Si_3N_4 kompozitin basma dayanımının azalmasına sebep olmuştur.



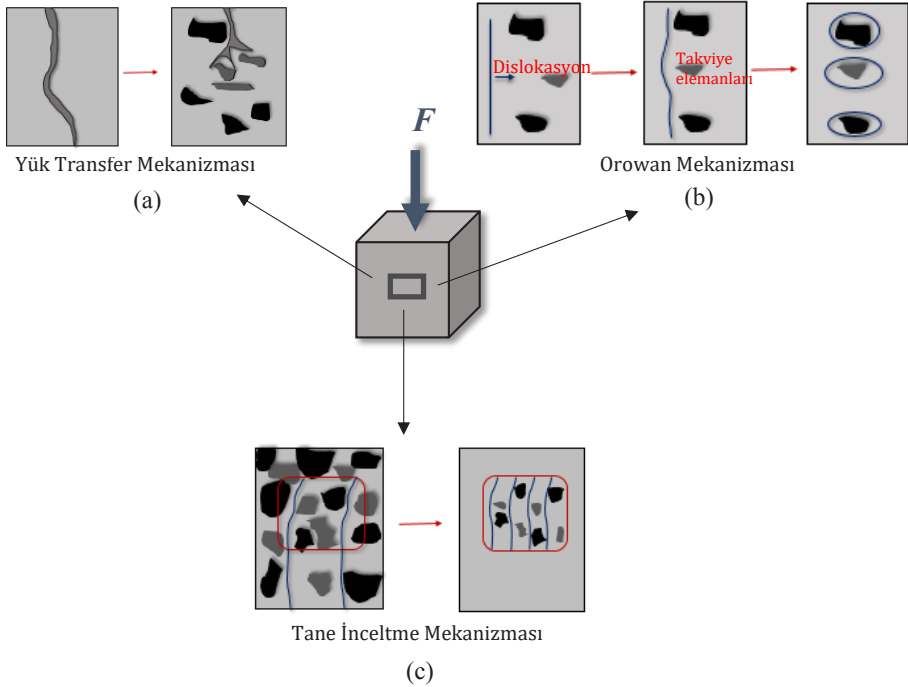
Şekil 5. Al7075 Alaşımı ve Al7075-9 Si_3N_4 Kompozitlerin Vickers Sertlik Değerleri



Şekil 6. Al7075 Alaşımı, Al7075- Si_3N_4 Kompozit Malzemelerin Basma Dayanımı Değerleri (a) ve Basma Testi Öncesi-Sonrası Numune Görüntüleri (b)

Kompozit malzemelerin dayanımını artırmak için çeşitli mekanizmalar bulunmaktadır. Yük transferi, tane inceltme ve Orowan güçlendirme mekanizması ile kompozitlerin mukavemeti artırılabilir. Şekil 7(a)'da gösterilen yük transfer mekanizmasında kompozit malzemeye gerilme uygulandığında matris malzemesinin hasara uğramasına sebep olan yük, takviye elemanlarına transfer

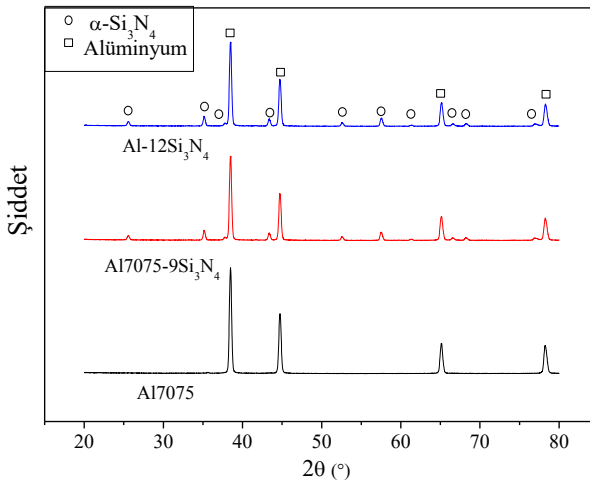
olmaktadır. Böylelikle takviye elemanı ve matris malzemesi arasında güçlü bir bağ oluşmaktadır. Al7075-Si₃N₄ kompozitlerde, matris malzeme Al7075 ve takviye elemanı Si₃N₄ arasında güçlü bir bağ oluşturmak için, sinterleme ve sıcak presleme yöntemleri kullanılmıştır. Al7075 matris malzemesi üzerindeki yük Si₃N₄ partiküllerine transfer olmaktadır. Bu, malzemenin daha fazla yük taşımaya ve hasar görmeden önce daha yüksek mukavemete sahip olmasını sağlamaktadır. Şekil 7(b)'de gösterilen Orowan mekanizmasında ise dislokasyon yoğunluğunun artması ile birlikte dislokasyon çizgileri takviye partikülleri etrafında dairesel şekil almaktadır. Al7075-Si₃N₄ kompozitlerde, Si₃N₄ dislokasyonların hareketini engelleyerek, partiküllerin etrafında dairesel şekiller almasına neden olmaktadır. Bu dairesel döngüler yapı içerisinde dislokasyonların hareketini kısıtlayarak kompozit malzemenin dayanımını artırmaktadır. Diğer bir güçlendirme mekanizması ise Şekil 7(c)'de gösterilen tane inceltme mekanizmasıdır. Tane inceltme mekanizmasında tanelerin boyutunun azalması tane sınırı sayısının artmasına yol açmaktadır. Tane sınırı sayısının artmasıyla ise dislokasyonlar kompozit yapı içerisinde kolay hareket edemez ve kompozitin dayanımı artar (Chen, Tao, Yi, Liu, Li ve Bao, 2018).



Şekil 7. Yük Transfer (a), Orowan (b) ve Tane İnceltme (c) Mekanizmaları

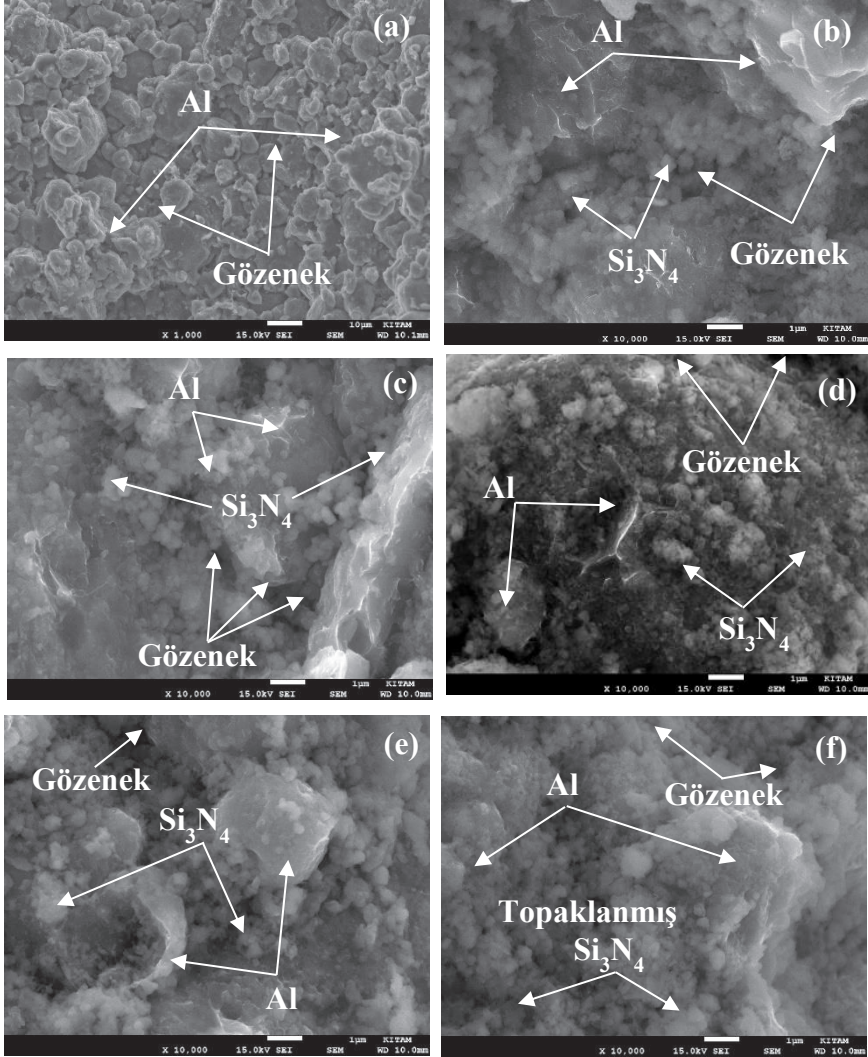
3.4 Numunelerin Kırık Yüzey ve XRD Analizi

Şekil 8’de Al7075 alaşımı, Al7075-9Si₃N₄ ve Al7075-12Si₃N₄ kompozitlerin XRD örgü desenleri verilmiştir. □ simgesi Al7075’i, o simgesi ise Si₃N₄’ü ifade etmektedir. Si₃N₄ 1420°C sıcaklığın altında α-Si₃N₄ yapıdadır. Bu çalışmada üretilen kompozit numuneler, 600°C sıcaklıkta sinterlendiğinden XRD analizinde α-Si₃N₄ yapı bulunmaktadır. Ayrıca şekil incelendiğinde kompozitin mekanik özelliklerinin kötüleşmesine sebep olan Al₄C₃ gibi ikincil faz oluşumu gözlemlenmemiştir. Çünkü Al₄C₃ oluşumu için gerekli olan sıcaklık 830°C’dir. Çalışmada 600°C sıcaklıkta sinterleme işlemi yapıldığı için ikincil faz oluşumu için yeterli sıcaklık oluşmamıştır.



Şekil 8. Al7075 Alaşımı ve Al7075-Si₃N₄ Kompozitlerin XRD Örgü Desenleri

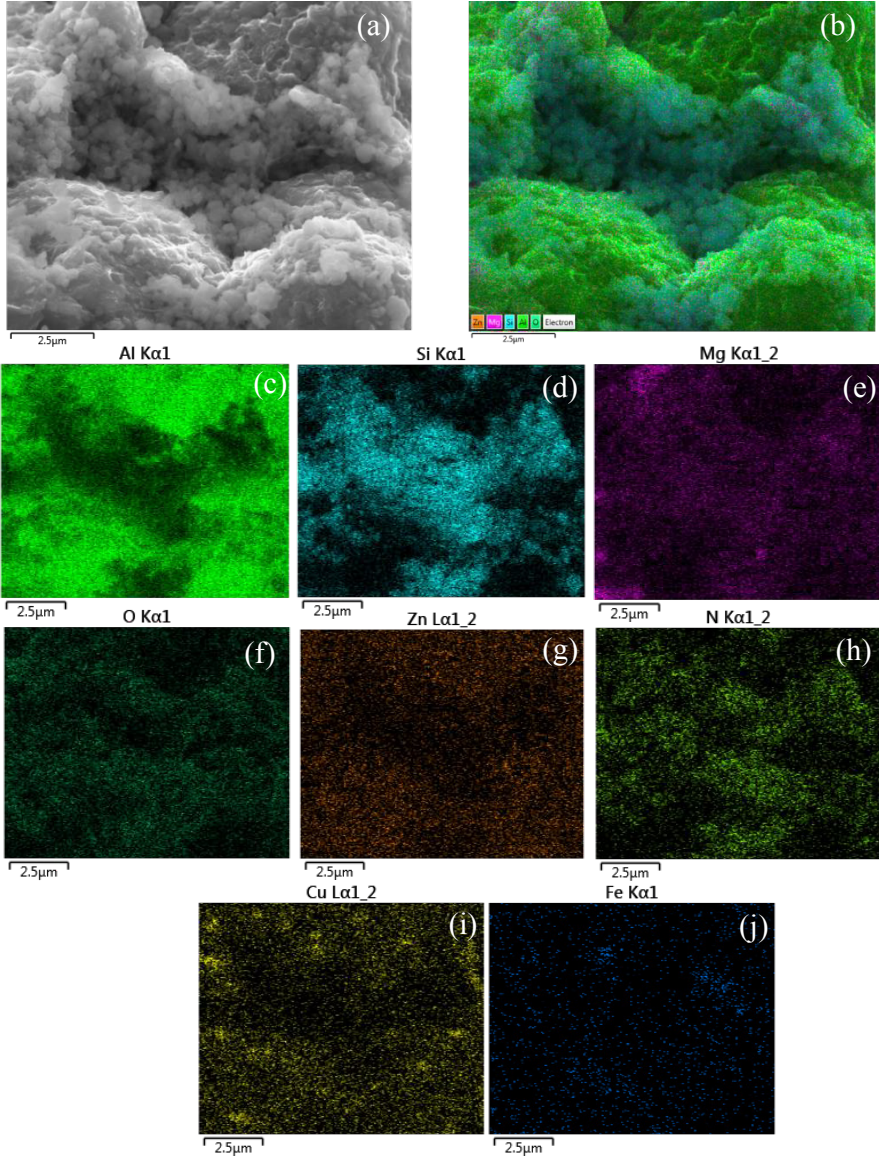
Al7075 alaşımı, Al7075-3Si₃N₄, Al7075-9Si₃N₄ ve Al7075-12Si₃N₄ kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 9’da verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde Al7075-9Si₃N₄ kompozit yapının Al7075 alaşımına ve diğer kompozit yapılarla kıyasla daha yoğun bir mikroyapıya sahip olduğu ve takviye partiküllerinin daha homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Bundan dolayı en iyi mekanik özellikler Al7075-9Si₃N₄ kompozit yapıda elde edilmiştir. Ancak Şekil 9(d)’de verilen %12Si₃N₄ katkı oranında Si₃N₄ partiküllerinin topaklandığı belirlenmiştir. Bu topaklanmalar matris malzeme ve takviye elemanı arasındaki yoğunluk farkı ve partiküller arasındaki elektrostatik çekim kuvvetlerinden dolayı oluşabilmektedir (Ahmad, Khan ve Hasan, 2020; Rao ve Mohan, 2020; Sekar, Pradeep, Silambarasan ve Dhairiyasamy, 2024). Buna bağlı olarak Al7075-12Si₃N₄ kompozitin mekanik özellikleri kötüleşmiştir.



Şekil 9. Al7075 Alaşımına (a), Al7075-1Si₃N₄ (b), Al7075-3Si₃N₄ (c), Al7075-6Si₃N₄ (d), Al7075-9Si₃N₄ (e) ve Al7075-12Si₃N₄ (f) Kompozitlere Ait Kırık Yüzey SEM Görüntüleri

Şekil 10'da Al7075-12Si₃N₄ kompozit yapıya ait SEM görüntüsü, SEM-EDX analizi ve element dağılım haritaları verilmiştir. Şekilde Al7075-12Si₃N₄ kompozit yapıdaki elementlerin (Al, Mg, O, Cu, Zn, Si, N ve Fe) her biri farklı renk ile gösterilmiştir. Bu elementler arasından Al, Mg, O, Cu, Zn ve Fe kompozit yapı içerisindeki Al7075 alaşımının dağılımını ifade etmektedir. Si ve N elementleri ise yapıda-

ki Si_3N_4 takviye partiküllerini temsil etmektedir. Şekil incelendiğinde %12 Si_3N_4 katkı oranında takviye partiküllerinin homojen dağılmayıp kümелendiği ve bu nedenle mekanik özelliklerin bozulduğu tespit edilmiştir.



Şekil 10. Al7075-12Si₃N₄ Kompozite Ait Kırık Yüzey SEM Görüntüsü (a), SEM-EDX Analizi (b) ve Element Dağılım Haritaları (c-j)

4. Sonuçlar

Bu çalışmada toz metalürjisi yöntemiyle Al7075 matrisli Si₃N₄ takviyeli kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin yoğunluk, gözeneklilik oranı, Vickers sertliği ve basma dayanımı incelenmiştir. Ayrıca numunelerin mikroyapısını incelemek amacıyla kompozitlere SEM, SEM-EDX ve XRD faz analizleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Al7075-Si₃N₄ kompozitleri arasında en yüksek deneysel yoğunluk (2,65 g/cm³), en yüksek Vickers sertliği (205 HV), en yüksek basma dayanımı (344 MPa) ve en düşük gözeneklilik oranı (%7,5) Al7075-9Si₃N₄ kompozitte elde edilmiştir. Si₃N₄ partiküllerinin yüksek sertliği ve matris içerisinde homojen dağılımı sebebiyle ağırlıkça %9 Si₃N₄ katkı oranında kompozitin mekanik özellikleri iyileşmiştir. Ancak ağırlıkça %12 Si₃N₄ katkı oranında Si₃N₄ partiküllerinin yapı içerisinde homojen dağılamaması sebebiyle mekanik özellikler olumsuz etkilenmiştir.
- Partiküllerin homojen dağılamamasının sebebi; belirli bir katkı oranından sonra Si₃N₄ partikülleri arasında elektrostatik çekim kuvvetleri ve yüzey enerjisinin artmasından dolayı oluşan topaklanmalardır. Bu durum, literatürde partikül kümelenmesi ve bunun mekanik özellikler üzerindeki olumsuz etkileriyle ilgili bulgularla uyumludur.
- Al7075 alaşımına kıyasla Al7075-9Si₃N₄ kompozitte deneysel yoğunluğun, Vickers sertliğinin ve basma dayanımının sırasıyla %2,3, %60,1 ve %20,7 oranlarında arttığı tespit edilmiştir. Bu artışlar, Si₃N₄ partiküllerinin sertlik ve dayanım özellikleri üzerindeki olumlu etkilerini açıkça göstermiştir.
- Üretilen Al7075-9Si₃N₄ kompozitlerin SEM görüntüleri incelendiğinde takviye partiküllerinin matris içerisinde diğer kompozitlere kıyasla daha homojen dağıldığı tespit edilmiştir. XRD faz analizi sonucunda; kompozit yapılarda Al₄C₃ gibi istenmeyen ikincil faz oluşumu gözlenmemiştir. Ayrıca Al7075 alaşımına kıyasla Al7075-9Si₃N₄ kompozitlerde mikroyapının daha yoğun olduğu belirlenmiştir.
- Sonuç olarak Al7075 matrise belirli orana kadar (%9) Si₃N₄ takviye edildiğinde kompozitin mekanik özelliklerinin iyileştiği belirlenmiştir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Aleyna TAŞKIN ve Elif IŞIK deneysel çalışmaların yürütülmesinde; Mahmut Can ŞENEL de mikroyapı ve faz yapısı incelemelerinin yapılmasında katkı sağlamışlardır.

Kaynakça

- Adin, H. and Adin, M. (2022). "Effect of particles on tensile and bending properties of jute epoxy composites." *Materials Testing*, 64(3), 401-411. Doi: <https://doi.org/10.1515/mt-2021-2038>.
- Adin, M.Ş. and Okumuş, M. (2022). "Investigation of Microstructural and Mechanical Properties of Dissimilar Metal Weld Between AISI 420 and AISI 1018 Steels." *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47:8341-8350. doi: <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06243-w>.
- Ahmad, Z., Khan, S. and Hasan, S. (2020). "Microstructural characterization and evaluation of mechanical properties of silicon nitride reinforced LM 25 composite." *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4):9129-9135. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.037>.
- Alharthi, N. H., Almotairy, S. M., and Almutairi, M. A. (2022). "Frictional behavior and mechanical performance of Al reinforced with SiC via novel flake powder metallurgy." *Metals*, 12(2), 1-14. doi: <https://doi.org/10.3390/met12020323>.
- Arik, H. (2019). "Al-Si₃N₄ toz metal kompozit malzeme üretimi ve aşınma davranışının araştırılması." *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7(4):776-787. doi: <https://doi.org/10.29109/gujsc.621116>.
- Ayvacı, B. (2019). *Toz metalürjisi ile üretilen çeliklerde presleme tekniğinin mikro-yapı mekanik özelliklere etkisinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Bharathi, P. and Kumar, T.S. (2023) "Mechanical characteristics and wear behaviour of Al/SiC and Al/SiC/B₄C hybrid metal matrix composites fabricated through powder metallurgy route," *Silicon*, 15(10):4259-4275. doi: <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02347-0>.
- Bhuvanesh, D., and Radhika, N. (2017). "Experimental investigation on tribological characteristics of silicon nitride reinforced aluminium metal matrix composites." *Journal of Engineering Science and Technology*, 12(5):1295-1306.
- Chen, X., Tao, J., Yi, J., Liu, Y., Li, C., and Bao, R. (2018). "Strengthening behavior of carbon nanotube-graphene hybrids in copper matrix composites." *Materials Science and Engineering: A*, 718:427-436. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.02.006>.
- Dursun, T., and Soutis, C. (2014). "Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys." *Materials and Design*, 56:862-871. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.002>.
- Gürbüz, M., Şenel, M. C., and Koc, E., (2018). "The effect of sintering time, tem-

- perature, 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>.
- Haq, M. U. I. M., and Anand, A. (2018). "Microhardness studies on stir cast AA7075-Si₃N₄ based composites." *Materials Today: Proceedings*, 5(9):19916-19922. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.357>.
- Kumar, P. N. S., Sachit, T. S., Mohan, N., and Akshayprasad, M. (2021). "Dry sliding wear behaviour of Al -5Si-3Cu-0.5Mn alloy and its WC reinforced composites at elevated temperatures." *Materials Today: Proceedings*, 44:566-572. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.351>.
- Kumar, S. A., Vignesh, J. H., and Joshua, S. P. (2020). "Investigating the effect of porosity on aluminium 7075 alloy reinforced with silicon nitride (Si₃N₄) metal matrix composites through stir casting process." *Materials Today: Proceedings*, 39:414-419. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.690>.
- Kumar, N. and Khanduja, D. (2024) "A study of mechanical properties on aluminum - based hybrid metal matrix composite (AA7175/B₄C/SiC/Gr)," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 105(1):351-358. doi: <https://doi.org/10.1007/s40033-023-00485-8>.
- Mattli, M. R., Matli, P. R., Shakoor, A., and Mohamed A. M. A. (2019). "Structural and mechanical properties of amorphous Si₃N₄ nanoparticles reinforced Al matrix composites prepared by microwave sintering." *Ceramics*, 2(1):126-134. doi: <https://doi.org/10.3390/ceramics2010012>.
- Rao, P.S.R. and Mohan, C.B. (2020). "Study on mechanical performance of silicon nitride reinforced aluminium metal matrix composites." *Materials Today: Proceedings*, 33(8):5534-5538. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.495>.
- Şenel, M. C., and Mahmutoğlu, Ü. (2022). "Effect of induction heat treatment on the mechanical properties of Si₃N₄-graphene-reinforced Al2024 hybrid composites." *Bulletin of Materials Science*, 45(1):1-17. doi: <https://doi.org/10.1007/s12034-021-02638-5>.
- Şenel, M. C. (2018). Grafen-seramik tanecik takviyeli alüminyum matrisli hibrit kompozitlerin toz metalürjisi metoduyla üretimi, mekanik ve mikroyapı özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Şenel, M. C., and Demir, M., (2023). "Effect of induction heat treatment process and graphene/B₄C amount on the tribological and mechanical properties of Al6061 hybrid composites." *JOM*, 75(7):2554-2568. doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-023-05790-x>.

- Sekar, B.K., Pradeep, G.V.K., Silambarasan, R. and Dhairiyasamy, R. (2024). "Microstructural and mechanical characterization of AA2124 aluminum alloy matrix composites reinforced with Si_3N_4 particulates fabricated by powder metallurgy and high-energy ball milling." *Revista Materia*, 29(3):1-22. doi: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0196>.
- Shantharaj, P., Prashanth, A. S., Nagaral, M., Bharath, V., Auradi, V., and Dharshan, K. (2022). "Microstructure, tensile and compression behaviour of B4C particles reinforced Al7075 matrix composites." *Materials Today: Proceedings*, 52:1135–1139. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.008>.
- Sharma, S.K., Saxena, K.K., Salem, K.H., Mohammed, A., Singh, R. and Prakash, C. (2024) " Effects of various fabrication techniques on the mechanical characteristics of metal matrix composites : a review." *Advances in Materials and Processing Technologies*, 10(2):277-294. doi: <https://doi.org/10.1080/2374068X.2022.2144276>.
- Sönmez, F., and Başak, H. (2016). "Sürtünme karıştırma kaynağının yaşlandırılabilir parçalar üzerinde etkisi effect of stir friction welding on age hardenable parts." *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 31(ÖS1):29-34. doi: <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.311198>.
- Şahingöz, B. Karakoç, H. and Çıtak, R. (2024) "Production of AA6061/TiB₂/B₄C/GNP hybrid surface composites processed by friction stir processing (FSP) and investigation of mechanical properties," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C Tasarım ve Teknoloji*, 12(1):405–426. doi: <https://doi.org/10.29109/gujsc.1435733>.
- Taskin, A. and Şenel, M. C. (2024) "Tribological properties and microstructures of tungsten carbide and few-layer graphene-reinforced aluminum-based composites," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 77(2):445–456, doi: <https://doi.org/10.1007/s12666-023-03114-w>.
- Tümer, M. (2004). Silisyum tozu üretilmesi ve sinterlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Yıldırım, M. (2016). Mekanik alışım yöntemi ile AA7075- karbon nanotüp takviyeli metal matrisli kompozit üretimi karakterizasyonu ve aşınma davranışlarının incelenmesi. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Yıldırım, M., and Özyürek, D. (2018). "Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen 7075 Al alışımlarında Mn miktarının aşınma davranışlarına etkisinin incelenmesi." *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(2):269–276. doi: <https://doi.org/10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.336025>.