

Alüminyum Matrisli Silisyum Nitrür Takviyeli Metalik Köpük Üretimi ve Karakterizasyonu

İbrahim DOĞAN^{1*}, Elif IŞIK¹, Mehmet TÜRKER¹

¹Gazi University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 05/07/2025
Revision: 07/07/2025
Accepted: 25/07/2025

Keywords

Powder Metallurgy
Al-Based Metallic Foam
Silicon Nitride Reinforced
Macrostructure and
Microstructure
Compressive Strength

Makale Bilgisi

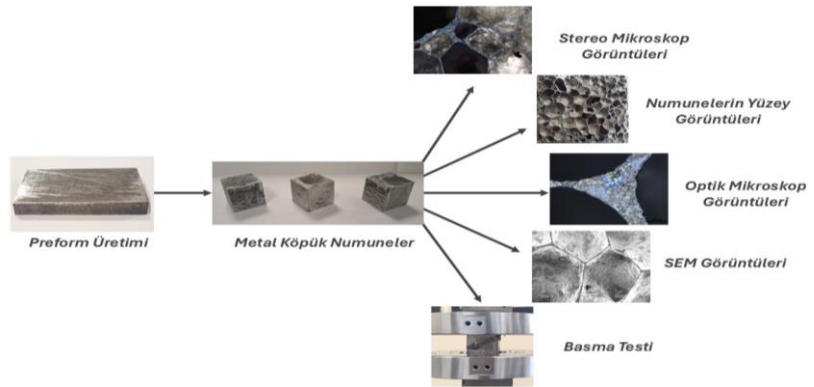
Araştırma makalesi
Başvuru: 05/07/2025
Düzeltilme: 07/07/2025
Kabul: 25/07/2025

Anahtar Kelimeler

Toz Metalurjisi
Al Esaslı Metalik Köpük
Silisyum Nitrür Takviyeli
Makro ve Mikroyapı
Basma Dayanımı

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, alüminyum matrisli silisyum nitrür takviyeli metalik köpükler üretilmiş ve gözenek yapısı ile mekanik özellikleri karakterize edilmiştir. / In this study, aluminum matrix metal foams reinforced with silicon nitride were produced, and their pore structure and mechanical properties were characterized.



Şekil A: Metal Köpük Numunelerinin Üretim ve Karakterizasyon Süreci. / Figure A: Production and Characterization Process of Metal Foam Samples.

Önemli noktalar (Highlights)

- Bu çalışmada, alüminyum matrisli silisyum nitrür takviyeli metalik köpüklerin üretimi ve karakterizasyonu yapılmıştır. / In this study, aluminum matrix metal foams reinforced with silicon nitride were fabricated and characterized.
- %1 TiH₂ ilavesi optimum genleşme sağlamıştır. / 1% TiH₂ addition ensured optimal expansion.
- %2 Si₃N₄ takviyesi, daha homojen gözenek yapısı oluşturmuştur. / 2% Si₃N₄ reinforcement produced a more uniform pore structure.
- Basma dayanımı testlerinde, takviyesiz numuneler en yüksek dayanımı göstermiş; %4 takviyede kısmi artış gözlenmiştir. / Compressive strength tests showed highest strength in unreinforced samples, with partial increase at 4% reinforcement.

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı, silisyum nitrür (Si₃N₄) takviyesinin Al esaslı metalik köpüklerin makro ve mikroyapısı ile mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemektir. / The aim of this study is to investigate the effects of silicon nitride (Si₃N₄) reinforcement on the macro and microstructure and mechanical properties of Al-based metallic foams.

Özgünlük (Originality): Literatürde Al esaslı metalik köpüklerde Si₃N₄ takviyesinin etkilerini inceleyen az sayıda çalışma vardır. Bu çalışma, farklı takviye oranlarının yapısal ve mekanik özelliklere etkisini detaylı inceleyerek özgün katkı sunmaktadır. / There are few studies on Si₃N₄ reinforcement effects in Al-based metallic foams. This study provides an original contribution by thoroughly examining the impact of different reinforcement ratios on structural and mechanical properties.

Bulgular (Results): Al-Si₃N₄ kompozit metal köpüklerde %1 TiH₂ ilavesi optimum köpük oluşumunu sağlarken, %2 Si₃N₄ takviyesi gözenek yapısının homojenliğini artırmıştır. En yüksek basma dayanımı takviyesiz numunelerde gözlenmiş, %4 takviyede kısmi artış tespit edilmiştir. / In Al-Si₃N₄ composite metal foams, 1% TiH₂ addition facilitated optimal foam formation, while 2% Si₃N₄ reinforcement enhanced pore homogeneity. The highest compressive strength was observed in unreinforced samples, with a partial increase at 4% reinforcement.

Sonuç (Conclusion): Çalışma, Al matrisli köpüklerde Si₃N₄ takviyesinin yapı özellikleri ve basma dayanımı üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. / The study revealed the effects of Si₃N₄ reinforcement on structural properties and compressive strength in Al matrix foams.



Alüminyum Matrisli Silisyum Nitrür Takviyeli Metalik Köpük Üretimi ve Karakterizasyonu

İbrahim DOĞAN^{1*} , Elif IŞIK¹ , Mehmet TÜRKER¹

¹Gazi University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Ankara, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 05/07/2025
Düzeltilme: 07/07/2025
Kabul: 25/07/2025

Anahtar Kelimeler

Toz Metalurjisi
Al Esaslı Metalik Köpük
Silisyum Nitrür Takviyeli
Makro ve Mikro yapı
Basma Dayanımı

Öz

Metalik köpükler, yapılarında %90'a kadar gözenek ihtiva eden hafif malzemelerdir. Düşük yoğunlukları ve yüksek enerji absorbe etme kapasiteleri sayesinde başta otomotiv, uzay ve savunma sanayii olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Bu çalışmada %0, %2 ve %4 oranlarında silisyum nitrür (Si_3N_4) takviyesinin Al esaslı metalik köpüklerin makroyapı, mikroyapı, yoğunluk ve basma dayanımları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada ön alaşımlı Alumix 231 tozu, Si_3N_4 tozu ve köpürtücü ajan olarak kullanılan titanyum hidrür (TiH_2) tozları kullanılmıştır. Tozlar karıştırmanın ardından sırasıyla soğuk ve sıcak olarak preslenerek preformlar elde edilmiştir. Elde edilen preformlar sınırlayıcı bir kalıbın içerisinde köpürtülerek 30x30x30 mm ebatlarında küp şeklinde metalik köpük numuneler elde edilmiştir. Köpük numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla uygulanan basma testi sonucunda farklı oranlarda silisyum nitrür takviyeli numunelerin basma dayanımında belirgin bir fark gözlemlenmemiştir.

Production And Characterization of Aluminum Based Silicon Nitride Reinforced Metallic Foam

Article Info

Research article
Received: 05/07/2025
Revision: 07/07/2025
Accepted: 25/07/2025

Keywords

Powder Metallurgy
Al-Based Metallic Foam
Silicon Nitride Reinforced
Macrostructure and
Microstructure
Compressive Strength

Abstract

Metallic foams are lightweight materials that contain up to 90% porosity in their structure. Due to their low density and high energy absorption capacity, they are used in various fields, particularly in the automotive, aerospace, and defense industries. In this study, the effects of silicon nitride (Si_3N_4) reinforcement at 0%, 2%, and 4% ratios on the macrostructure, microstructure, density, and compressive strength of Al-based metallic foams were investigated. Pre-alloyed Alumix 231 powder, Si_3N_4 powder, and titanium hydride (TiH_2) powder, used as a foaming agent, were utilized in the study. Following the mixing process, the powders were compacted through cold and hot pressing to produce preforms. These preforms were foamed within a constrained mold to obtain cube-shaped metallic foam samples with dimensions of 30x30x30 mm. Compression tests were conducted to evaluate the mechanical properties of the foam samples. The results indicated that there was no significant difference in the compressive strength of the samples reinforced with varying amounts of silicon nitride.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak kullanılan alüminyumun, yüksek geri dönüşüm oranı, kolay şekillendirilebilirliği, hafifliği, iyi elektriksel ve ısı iletkenliği gibi özellikler sayesinde geniş bir kullanım alanı vardır. Alüminyum ve alaşımları günümüzde, inşaat, havacılık, uzay ve otomotiv gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Alüminyumun tercih

edilmesinin sebebi hafifliği, oksidasyon direnci ve özgül ağırlığına oranla yüksek mukavemete sahip olmasıdır. Fakat yüksek sıcaklığa ve aşınmaya karşı düşük olan direnci, Al matrisli seramik parçacık takviyeli kompozit malzeme üretimi üzerine yapılan çalışmaları artırmıştır. Bu tür kompozitler genellikle ergiyik veya katı hal yöntemleriyle üretilmektedir [2,6]. Ergiyik yöntemle kompozit üretiminde, ergiyik metal içerisine SiC , Al_4C_3 , B_4C , Al_2O_3 ve Si_3N_4 gibi karbür, oksit veya nitrür tipi

seramik parçacıkların belirli oranlarda ilavesiyle üretim gerçekleştirilmektedir. Katı hal yöntemleri arasında ise toz metalurjisi (TM) metodu öne çıkmakta ve bu yöntemle TM kompozit parça üretimi gerçekleştirilmektedir [7,12]. Alüminyum alaşımlarının, daha yüksek korozyon direncine, elektriksel iletkenliğe ve düşük yoğunluğa sahip olmaları nedeniyle farklı endüstriyel alanlarda sıklıkla kullanılmaktadırlar. Ayrıca, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin artırılması, takviye malzemesi ile matris arasındaki etkileşime ve takviye fazının matris fazı içinde homojen dağılımına bağlıdır. SiC, B₄C, TiC ve Al₂O₃ gibi seramik takviyeler, çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [13].

Takviye elemanı olarak tercih edilen Si₃N₄, oksit dışı nitrür seramikler arasında üstün özelliklere sahip bir malzemedir. Yüksek sertlik, iyi aşınma direnci, düşük ısıl genleşme katsayısı, üstün ısıl şok direnci ve yüksek korozyon dayanımı gibi özellikleri sayesinde, Si₃N₄ yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir [14]. Literatürde, Si₃N₄ takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri ve aşınma dayanımı üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Karıştırma döküm yöntemiyle ağırlıkça %0, 2, 4, 6 ve 8 oranlarında Si₃N₄, AlN ve ZrB₂ katkılı Al2618 matrisli kompozitler üretilmiştir. Elde edilen bulgular, kompozitlerin sertlik, çekme ve basma dayanımı gibi mekanik özelliklerinin yanı sıra korozyon direncinin, takviye oranının artışıyla birlikte iyileştiğini ortaya koymuştur. Bu çalışma, takviye oranının artmasıyla kompozitlerin performansının belirgin şekilde arttığını göstermektedir [15].

Si₃N₄ takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerde üretim yönteminin (mekanik alaşımlama ve bilyalı değirmen ile öğütme) mekanik özelliklere olan etkisinin incelendiği bir çalışmada, mekanik alaşımlama tekniği ile Al matris içerisinde Si₃N₄ tozlarının daha homojen dağıldığı ve bu homojen dağılımın sertlik ve eğme dayanımını artırdığı görülmüştür. Ayrıca, ağırlıkça %10 Si₃N₄ takviyesi ve 660°C sinterleme sıcaklığında yapılan üretimlerin, kompozit malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır [16].

Karıştırma döküm yöntemiyle ağırlıkça %0, 2, 4, 6 ve 8 oranlarında Si₃N₄, AlN ve ZrB₂ katkılı Al2618 matrisli kompozitlerin tribolojik ve mekanik özellikleri incelendiği başka bir çalışmada yapılan testlerde, ağırlıkça %8 takviye oranında, 10 N yük altında ve 5 m/s hızda yapılan testlerde en düşük aşınma oranı (0,00030 mm³/m) elde edilmiştir. Ayrıca, takviye oranının artışıyla birlikte

kompozitlerin sertlik, çekme ve basma dayanımı gibi mekanik özelliklerinde de iyileşme gözlemlenmiştir [17].

Karıştırma döküm prosesi ile Si₃N₄ takviye edilmiş alüminyum alaşım kompozitlerinin mekanik özellikleri araştırıldığı çalışmada ise, alüminyum matristeki Si₃N₄ takviye oranının %0'dan %12'ye kadar artırılmasının, kompozitin maksimum çekme dayanımını, sertliğini ve yoğunluğunu artırdığı belirlenmiştir [18].

Metal köpükler basma yükü altında yüksek deformasyona uğrayabilen malzemelerdendir. Bu da enerji absorpsiyon kapasitelerinin yüksek olduğunu göstermektedir. Bu özellikler sayesinde metal köpükler hafiflik kadar rijitliğin de önemli olduğu yapısal uygulamalarda ve yüksek enerji absorpsiyon özelliği aranan uygulamalarda kullanılmaktadır. Hücresel yapı malzemeler içerdikleri boşlukların yapısına göre kapalı ya da açık gözenekli olarak ikiye ayrılmaktadır. Açık gözenekli malzemeler sünger olarak da adlandırılmaktadır. Köpükler ise kapalı gözenekli malzemelerdir. Basma yükleri altında köpüklerde akma gerilmesinden sonra süngerlerden farklı olarak birim uzama ile yavaşça artan gerilmeler dikkat çekmektedir. Bu artışın sebebi köpüklerde hücre duvarlarını birleştiren yüzeylerin de ezilme sırasında yük taşımasıdır [19]. Süngerlerde olmayan bu yüzeyler sayesinde kapalı gözenekli köpük malzemelerin basma yükü altındaki dayanımları daha yüksektir [20]. Al köpükler ise yoğunluklarının düşük olması, yüksek enerji absorpsiyon kapasiteleri, ses ve alev söndürme gibi özellikler sebebiyle endüstride yaygın bir kullanıma sahiptir. Bu malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi ve daha ekonomik üretim yöntemlerinin geliştirilmesi için yapılan çalışmalarda artış gözlenmektedir [21].

Metal malzemeler arasında, alüminyum, kolay işlenebilirliği ve düşük sıcaklıkları nedeniyle çok önemli bir yer tutmaktadır. Alüminyumun özelliklerine ek olarak, düşük ergime sıcaklığı ve mekanik dayanımı gibi önemli dezavantajları da bulunmaktadır. Alüminyumun dezavantajlarını ortadan kaldırmak ve onu daha yüksek mekanik özelliklere sahip bir malzeme haline getirmek için, farklı elementlerle alaşımlama yoluyla çeşitli alüminyum alaşım serileri üretilmektedir. Üretilen alaşım serilerinden biri de Alumix serisidir. Alumix serisinin ana bileşeni alüminyumdur. İçerdiği alaşım elementlerine göre farklı adlarla anılmaktadır. Alumix serisinde en yaygın kullanılan alüminyum alaşımları Alumix-123 (Al, Cu, Mg ve Si), Alumix-321 (Al, Mg ve Cu), Alumix-231 (Al,

Si, Mg ve Cu) ve Alumix-431 (Al, Zn, Mg ve Cu) alaşımlarıdır [13].

Yüksek kaliteli köpükler üretmek için, ısı etkisiyle gaz salınımı yaparak ayrışan köpürtme ajanının, alüminyum alaşımına zarar vermemesi gerekmektedir. Ayrıca, gaz salınımının alaşımın sıvılaşmış bölgesine mümkün olduğunca yakın bir şekilde gerçekleşmesi sağlanmalıdır. Uygulamada, köpürtme ajanının çok önce ayrışmasının, gözenek birliği eksikliği ve köpüklerin tekrarlanabilir olmayan özelliklerinin nedenlerinden biri olduğu düşünülmektedir. Bugüne kadar, TiH_2 , ZrH_2 ve MgH_2 gibi bazı metalik hidrürler, $MgCO_3$ ve $CaCO_3$

gibi karbonatlar, metalik köpüklerin üretiminde kullanılmıştır. Ancak, TiH_2 , alüminyum köpürtme için en yaygın kullanılan köpürtme ajanıdır çünkü dehidrojenasyon reaksiyonu, alüminyumun erime noktasına çok yakındır ve çok düşük miktarlarda (yaklaşık %1 ağırlık) gaz salınımı yaparak yüksek gözenekli yapı oluşturmak için yeterlidir. Ayrıca, bu hidrürün tersinir dehidrojenasyon reaksiyonu, hidrojen depolama araştırmaları açısından da ilgi çekicidir. TiH_2 ayrışma reaksiyonu, partikül boyutu, başlangıç yüzey oksidasyonu miktarı, hidrürlerin ısıtıldığı atmosfer ve ısıtma hızı gibi birçok faktöre bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir [22].

2. MALZEME VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Malzeme (Material)

2.1.1. Alumix 231 Alaşımı (Alumix 231 Alloy)

Al-Si ötektik alaşımları, özellikle otomotiv endüstrisinde, iyi aşınma direnci, yüksek sıcaklıklarda yüksek çekme dayanımı ve iyi dökülebilirlik özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu alaşımlar, Al esaslı matriste ötektik Si ikincil fazlarından oluşan mikroyapıları nedeniyle düşük kırılma tokluğuna sahiptir. Ayrıca, Al esaslı metal matristeki Si fazlarının boyutu, morfolojisi [23,24] ve dağılımının, Al-Si alaşımlarının mekanik dayanımına [24,25], sertliğine [25] ve sünekliğine [24] güçlü etkileri olduğu bildirilmiştir. Yapılan

çalışmalarda %12 Si ile takviye edilmiş Al'den üretilen köpüklerde, daha homojen köpük yapısı ve yüksek köpürebilirlik gözlenmiştir. Aynı zamanda köpürme işleminin daha hızlı gerçekleştiği ve belirtilen katkı oranının lineer genleşmeye de olumlu yansıdığı görülmüştür [26].

Yapılan deneysel çalışmada metal köpük matris malzemesi olarak ECKA Granules firması tarafından üretilen ve kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilen ön alaşımlı Alumix 231 tozu, köpürtücü ajan olarak Atlantic Equipment Engineers firması tarafından üretilen %99,7 saflıktaki TiH_2 tozu ve parçacık takviyeli kompozit köpük üretimi için ise American Elements tarafından üretilen %99,9 saflıkta Si_3N_4 tozu kullanılmıştır. Tablo 2'de köpük üretiminde kullanılan tozların fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Alumix-231 alaşımının belirtilen kimyasal bileşimleri (ağırlıkça %) [27]. (The specified chemical compositions (in wt.%) of the Alumix-231 alloy are given in [27].)

Element	Al	Si	Cu	Mg	Fe
Bileşim	Bal.	14-16	2,4-2,8	0,5-0,8	Yok

2.1.2. Silisyum Nitrür (Silicon Nitride)

Silisyum nitrür, yüksek sıcaklık ve aşınma dayanımı, termal şok direnci, yüksek ısı iletkenlik özelliklerinin yanı sıra hafif bir malzeme olması nedeniyle pek çok alanda tercih edilen bir seramik olmuştur. Günümüzde, Si_3N_4 ve kompozitleri endüstride yüksek performanslı rulmanlar, türbin bıçakları ve ateşleme bujileri gibi alanlarda (yüksek kırılma tokluğu, yüksek mukavemet ve yüksek aşınma özelliklerine sahip bir malzeme gerektiren uygulamalar) kullanılmaktadır [28].

2.1.3. Titanyum Hidrür (Titanium Hydride)

Al ve alaşımları için köpürtücü ajan olarak kullanılan ve yapıda homojen olarak dağılmış

bulunan TiH_2 'ün ergime derecesi civarında ısıtılması neticesinde titanyum ile hidrojenin ayrışması ile ortaya çıkan gaz salınımı ile (hidrojen gaz çıkışı olur) malzemede genleşme görülür ve kapalı gözenekli köpük meydana gelir [29,32]. TiH_2 'deki hidrojen salınımı yaklaşık $450^\circ C$ 'de başlar ve daha yüksek sıcaklıklarda devam eder [33,34]. Bu sıcaklık ticari Al alaşımlarının ergime derecesinin çok altındadır. Köpürme sıcaklığında malzemenin uzun süre bekletilmesi köpük yapının tekrar çökmesine ve ana yapının deforme olmasına sebep olur [32,35]. Köpürme aşamasında birçok parametre etkili olmakla birlikte, Al köpükler %80-90 gözeneklilik ve preform kalınlığının yaklaşık %400 genleşmesiyle elde edilir [36].

Tablo 2. Metal köpük üretiminde kullanılan tozların fiziksel özellikleri. (The physical properties of the powders used in metal foam production.)

Malzeme	Malzemelerin Fiziksel Özellikleri		
	Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime Sıcaklığı (°C)	Toz Boyutu (µm)
Alumix 231	2,67	577	<160
TiH ₂	3,91	450	<75
Si ₃ N ₄	2,2-3,5	1900	-

2.2. Metot (Method)

2.2.1. Toz Karışımının Hazırlanması (Preparation of the Powder Mixture)

Bu çalışmada, preformun metal köpük üretiminde kullanılacak kalıbı doldurabilmesi adına uygun preform kalınlığı 10 mm olarak belirlenmiştir. Al, TiH₂ ve Si₃N₄'den Tablo 3'te belirtilen oranlarda

hazırlanan toz karışımı önce üç boyutlu karıştırıcı olan Turbula cihazı içerisine yerleştirilerek 45 dakika boyunca karıştırılmıştır ve homojen bir toz karışımı elde edilmiştir. Toplamda 3 adet preform malzeme üretilmiştir. Preformların her birinde TiH₂ köpürtücü ajanı %1 oranında bulunurken, Si₃N₄ katkı malzemesi oranı %0, %2 ve %4 olarak değişmektedir.

Tablo 3. Her bir preform üretimi için kullanılan tozların ağırlığı. (The weight of the powders used for the production of each preform.)

Numune	Alumix 231 (g)	TiH ₂ (g)	Si ₃ N ₄ (g)
%0 Si ₃ N ₄	71,64	0,72	0
%2 Si ₃ N ₄	70,19	0,72	1,45
%4 Si ₃ N ₄	68,74	0,72	2,90

2.2.3. Preformların Hidrolik Presleme ile Şekillendirilmesi (Shaping of the Preforms by Hydraulic Pressing)

Karıştırılan tozlar HeriTechnics marka eksenel tek yönlü hidrolik pres yardımıyla önce soğuk, ardından da sıcak olarak preslenerek preform üretimi sağlanmıştır. 250 MPa yük altında soğuk olarak preslenen tozlar sonrasında 130 MPa yük altında 1 saat boyunca 420°C sıcaklıkta preslenmiştir.

2.2.4. Metal Köpük Üretimi (Metal Foam Production)

Çalışmada gerçekleştirilen basma testine uygun kapalı hücreli metal köpük numuneler üretmek amacıyla 30x30x30 mm boyutlarında, köpürtme kalıbı tasarlanmıştır. Bu kalıp tasarımı ile preformun köpürmesi sınırlandırılmış ve istenilen boyutlara uygun metal köpük numuneler üretilmiştir. Metal köpük üretimi sırasında özel olarak köpük malzeme üretimi için tasarlanmış ön kapağında pencere bulunan ve köpürme işlemi gözlenebilen PROTHERM marka alt tablası hareket edebilen kızaklı fırın kullanılmıştır. Fırın içerisinde numuneler 700°C'de köpürtme işlemine tabi tutulmuştur. Kalıp içerisindeki preformun köpürme

süresini belirlemek için fırın içerisine kalıbın yanı sıra aynı preformdan hazırlanmış bir parça daha konulmuştur. Açıkta duran preformda yeterli köpürme gözlemlendiğinde fırın kapağı açılarak kalıp fırından çıkartılmıştır ve oda sıcaklığında soğutulmuştur. Her bir katkı oranındaki numuneden basma deneyi ve mikroyapı ve makroyapı analizinde kullanılmak üzere numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerin köpürme sürelerinde farklılıklar gözlenmiştir.

Numunelerde köpürme esnasında farklı oranda hacimsel genleşme gözlenmiştir. Köpük numunelerin son hacmi Arşimet prensibiyle ölçülmüştür. Ağırlığı da ölçülen numunelerin hacimsel büyümeleri, yoğunlukları ve dikey büyümeleri (lineer genleşme) hesaplanmıştır. Kullanılan kalıpla birlikte köpük numune yüksekliği 30 mm ile sınırlandırıldığından ve 10 mm yüksekliğinde preform kullanıldığından tüm numunelerde dikey büyüme %300 olarak gözlemlenmiştir.

2.2.5. Uygulanan Test ve Analizler (Applied Tests and Analyses)

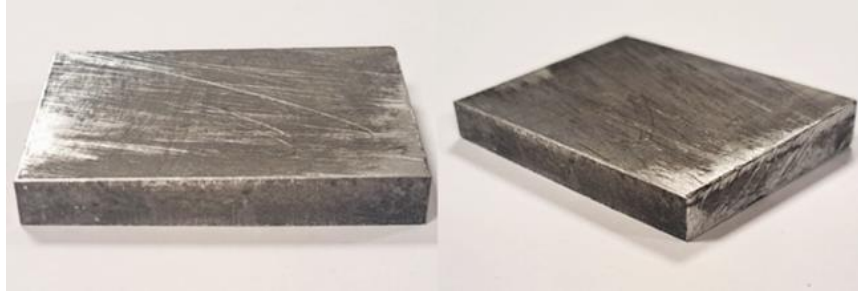
Metal köpük numunelerin basma dayanımının belirlenmesi için hazırlanan numuneler Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bünyesinde bulunan INSTRON marka 3369 Universal model basma testi cihazıyla yapılmıştır. 50 kN kapasiteli olan cihazda basma hızı dakikada 5 mm olarak seçilmiştir.

Metal köpüklerin makroskobik analizi ve makroyapı görüntüleri Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bünyesinde bulunan LEICA marka M205 C model stereo mikroskop cihazıyla çekilmiştir. Metal köpüklerin mikroskobik görüntüleri yine aynı bölümde bulunan LEICA marka DMI5000 M model optik mikroskopta, SEM görüntüleri ise JEOL marka JSM-6060 LV model SEM cihazı kullanılarak alınmıştır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Üretilen Numuneler ve Köpürme Verileri (Produced Specimens and Foaming Data)

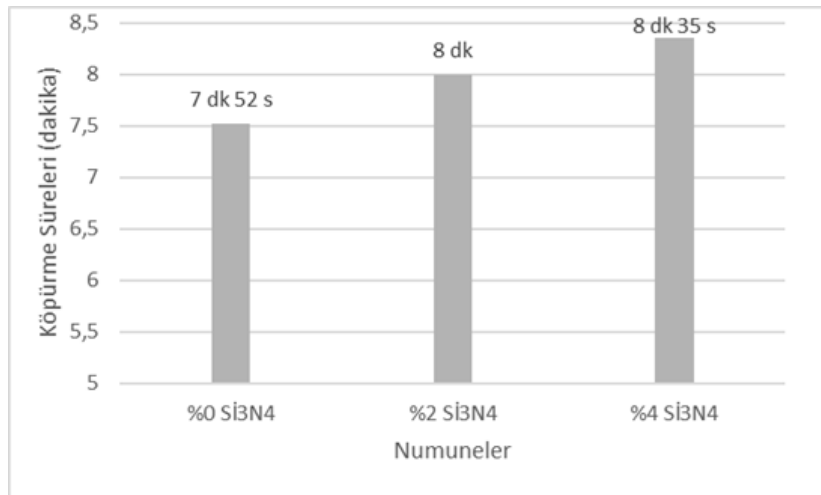
Çalışmada kullanılan metal köpük üretim sürecinin ilk aşaması olan preform malzeme hazırlığı, belirlenen üretim parametreleri ve şartlar doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, Resim 1'de görüldüğü üzere 67x40x10 mm boyutlarında üç farklı preform malzeme sıcak preste üretilmiş olup, bunlardan biri katkısız olarak hazırlanırken, diğer ikisine sırasıyla %2 ve %4 oranlarında Si_3N_4 ilave edilmiştir. Elde edilen preform malzemeler, belirlenen boyutlarda kesilerek kalıp içerisine yerleştirilmiş ve köpürtme aşamasına hazır hale getirilmiştir.



Resim 1. Deney kapsamında üretilen köpürmeye hazır preform malzemeler. (Foamable preform materials produced within the scope of the experiment.)

Kalıp içerisine yerleştirilen preformlar, belirlenen üretim süreci doğrultusunda 700°C sıcaklığa ayarlanmış fırında köpürtme işlemine tabi tutulmuştur. Kalıp içerisinde bulunan preformların yeterli hacimsel genişlemeye ulaşması beklenirken, aynı koşullara maruz bırakılan ancak kalıp dışında tutulan preformda gözlenen hacimsel genişleme referans alınarak işlem süresi belirlenmiştir.

Yapılan gözlemler sonucunda, kalıp dışındaki preformun yeterli hacimsel genişlemeye ulaştığı anlaşıldığında, kalıpta bulunan preform fırından çıkartılarak havada soğutulmuştur. Şekil 1'de detaylı olarak görüldüğü üzere, Si_3N_4 katkı oranındaki artış, numunelerin köpürme sürelerinde küçük de olsa bir artışa sebep olmuştur.



Şekil 1. Numunelerin katkı oranlarına göre köpürme süreleri. (Foaming durations of the samples based on their additive ratios.)

Her bir katkı oranı için üretilen metal köpük numuneleri çeşitli fiziksel ve yapısal özellikler açısından analiz edilmiştir. Üretilen metal köpük numuneler herhangi bir işleme tabi tutulmadan Resim 2’de gösterilmiştir. Tablo 4’te görüldüğü üzere numuneler, ağırlık, yoğunluk, % hacimsel büyüme ve % gözeneklilik oranı gibi parametreler açısından farklılık göstermektedir. Ancak numune hacmi ve % dikey büyüme parametreleri, köpürtme işleminin sınırlayıcı bir kalıp içerisinde gerçekleştirilmesi nedeniyle tüm numuneler için sabit kalmıştır. Deneysel veriler incelendiğinde, %0, %2 ve %4 Si_3N_4 takviyeli numuneler için ortalama köpük numune yoğunluğunun sırasıyla 0,5 g/cm^3 , 0,44 g/cm^3 ve 0,52 g/cm^3 olduğu belirlenmiştir. Aynı şekilde, ortalama hacimsel

büyüme oranları sırasıyla %440, %511 ve %420 olarak hesaplanmış, ortalama gözeneklilik oranları ise %82, %84,2 ve %81,5 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, metal köpüklerin yoğunluk ve gözeneklilik özelliklerinin katkı maddesi içeriğine bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır. Özellikle %2 Si_3N_4 katkılı numunelerde gözlenen hacimsel büyüme oranındaki artış, katkı malzemesinin köpükleşme mekanizmasına olan etkisini göstermektedir. Bununla birlikte, %4 oranında katkı içeren numunelerde hacimsel büyüme oranında bir düşüş yaşandığı tespit edilmiştir. Bu durum, katkı maddesinin belirli bir oranın üzerine çıkıldığında, köpükleşme sürecini sınırlayabileceğini ve gözenek oluşumunu etkileyebileceğini göstermektedir.

Tablo 4. Numunelerin köpürme verileri. (Foaming data of the samples.)

Numune	Ağırlık (g)	Preform Hacmi (cm^3)	Numune Hacmi (cm^3)	Numune Yoğunluğu (g/cm^3)	Hacimsel Büyüme (%)	Dikey Büyüme (%)	Gözenek Oranı (%)
%0 Si_3N_4	13,5	4,99	25	0,54	402	300	80,7
	11,7	4,33	25	0,47	477	300	83,2
%2 Si_3N_4	11,8	4,37	25	0,47	472	300	83,1
	10,4	3,85	25	0,42	550	300	85,2
%4 Si_3N_4	12,7	4,7	25	0,51	432	300	81,9
	13,3	4,93	25	0,53	407	300	81



Resim 2. Deney sonucunda üretilen ve herhangi bir işleme tabi tutulmayan kübik metal köpük numunelerin görünümü. (The appearance of the cubic metal foam samples produced in the experiment without any post-processing.)

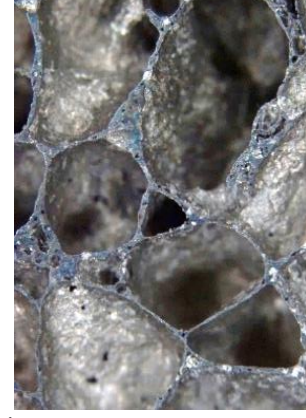
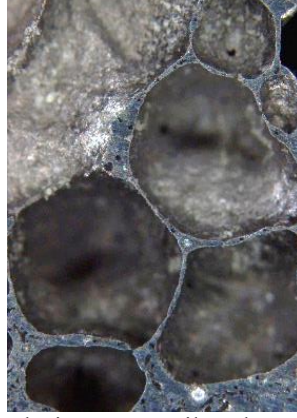
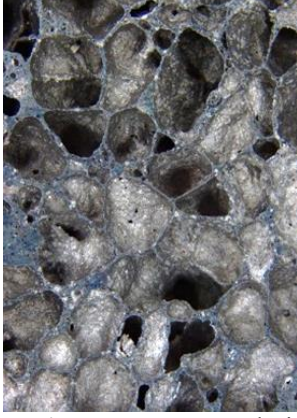
3.1. Makroyapı Analizi Sonuçları (Macrostructure Analysis Results)

Makroyapı analizlerinden elde edilen verilere göre, %0 ve %2 Si_3N_4 takviyeli numunelerde ince duvarlı ve daha homojen boyut dağılımına sahip gözenek yapısı gözlemlenmiştir. Bu durum, katkı oranının düşük olması durumunda gözenek oluşum mekanizmalarının daha düzenli bir şekilde gerçekleştiğini ve gözenek duvarlarının daha ince yapıda oluştuğunu göstermektedir. (Resim 3 ve Resim 4)

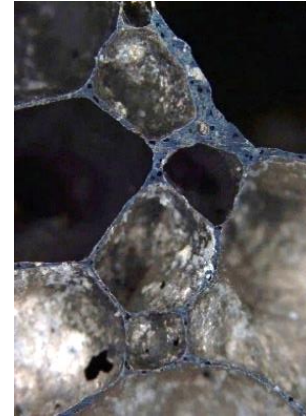
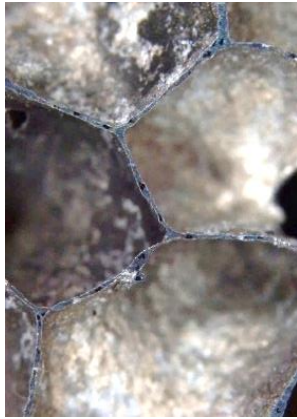
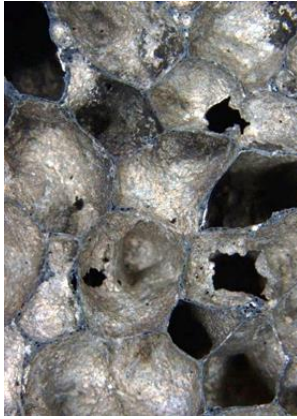
%4 Si_3N_4 takviyeli numunede ise daha kalın duvarlı ve heterojen boyut dağılımına sahip gözenek yapısı elde edilmiştir. (Resim 5) Katkı oranındaki artışın gözenek oluşum mekanizmasını etkileyerek, duvar kalınlığında artışa ve gözenek boyutlarının daha düzensiz bir şekilde dağılmasına neden olduğu ve daha ince gözenekli bir yapıda oluştuğu görülmektedir. Bu durum, %4 takviyeli numunede malzeme iç yapısının daha heterojen olduğunu ve gözenek boyutlarının birbirinden belirgin şekilde farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Köpük numunelerin kesit yüzeyleri daha geniş bir perspektiften incelendiğinde, %4 takviyeli numunede ince hücre duvarlarından ziyade, çok daha kalın hücre duvarlarına sahip, dağılım ve boyut açısından düzensiz bir hücre yapısının olduğu gözlemlenmiştir. %0 takviyeli numunede benzer bir

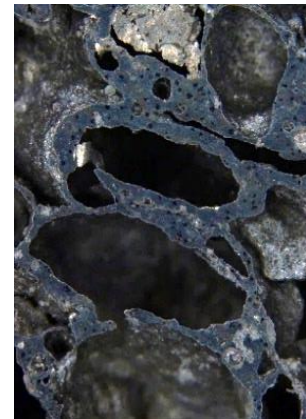
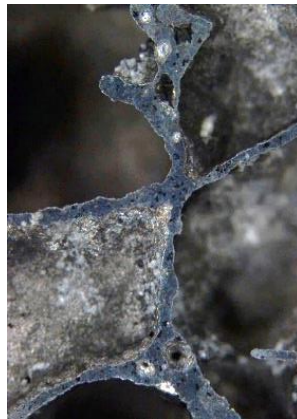
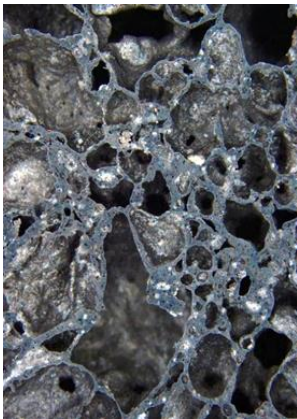
durum kısmen görülürken, %2 takviyeli numunede bu düzensizlikler yer yer numunenin dış yüzeyine yakın bölgelerde gözlemlenmiştir. Ancak yapının genelinde hücre yapılarının ve duvar kalınlıklarının daha homojen ve düzenli olduğu belirlenmiştir. (Resim 6)



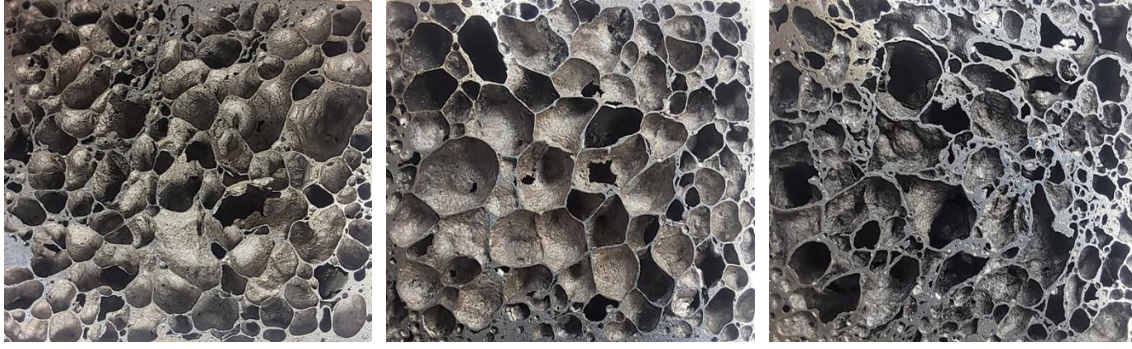
Resim 3. %0 Si_3N_4 takviyeli numunelerin stereo mikroskop görüntüleri. (Stereo microscope images of the samples reinforced with 0% Si_3N_4 .)



Resim 4. %2 Si_3N_4 takviyeli numunelerin stereo mikroskop görüntüleri. (Stereo microscope images of the samples reinforced with 2% Si_3N_4 .)



Resim 5. %4 Si_3N_4 takviyeli numunelerin stereo mikroskop görüntüleri. (Stereo microscope images of the samples reinforced with 4% Si_3N_4 .)



Resim 6. Soldan sağa doğru sırasıyla %0, %2 ve %4 Si_3N_4 takviyeli numunelerin yüzey görüntüleri. (Surface images of the samples reinforced with 0%, 2%, and 4% Si_3N_4 , respectively, from left to right.)

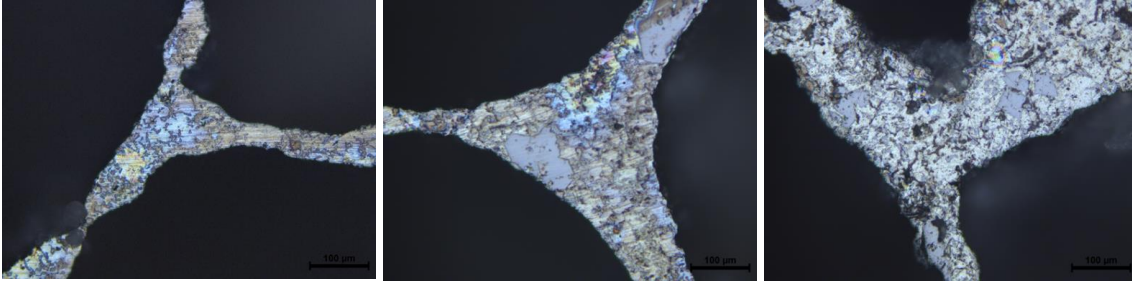
3.2. Mikroyapı Analizi Sonuçları (Microstructure Analysis Results)

Mikroyapı analizinden elde edilen verilere göre, gözeneklerin oluşturduğu üçlü birleşim noktalarında takviye oranına bağlı olarak farklı duvar yapıları oluşmuştur. %0 ve %4 takviyeli numunelerde, üçlü birleşim noktalarında düzensiz bir duvar yapısı gözlemlenmiştir. (Resim 7) Bu durum, takviyesiz numunede yapısal düzenin yetersizliğini gösterirken, %4 takviyeli numunede ise yüksek takviye oranının gözenek duvarlarının oluşum mekanizmasını olumsuz etkilediğini göstermektedir.

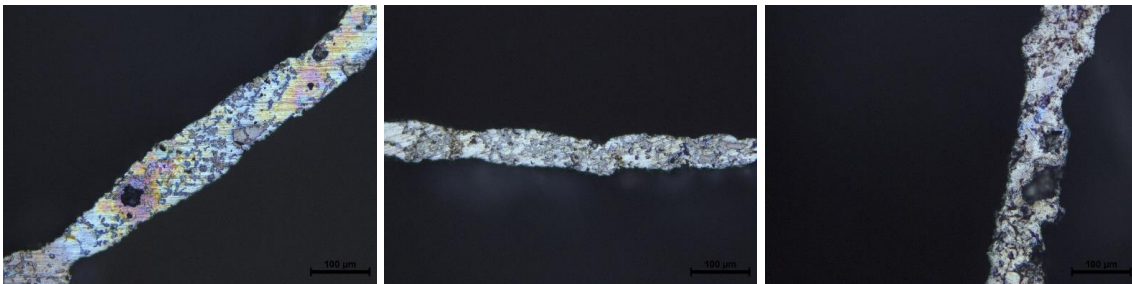
%4 takviyeli numunede, gözenek duvarlarının çok kalın olduğu ve bu kalınlığın düzensiz bir şekilde dağıldığı tespit edilmiştir. (Resim 8) Bu durum, yüksek katkı oranının malzeme mikroyapısında

drenaj etkisini azaltarak homojenliği bozduğunu ve duvar kalınlıklarının farklı olmasına sebep olduğunu düşündürmektedir. Gözenek duvarlarındaki bu düzensizlik, üçlü birleşim noktalarının açılarında da düzensizliğe yol açmıştır. (Resim 9)

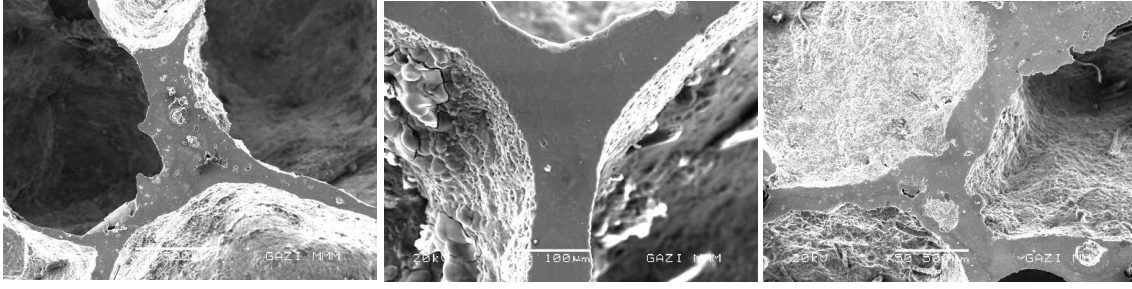
%2 takviyeli numunede ise gözenek yapısının daha düzenli bir şekilde olduğu görülmüştür. Üçlü birleşim noktalarında hem duvar kalınlığının hem de birleşim açılarının oldukça düzenli olduğu gözlemlenmiştir. (Resim 9) Bu durum, %2 katkı oranının numunenin içyapısında homojenliği sağladığını, her bölgede benzer drenaj etkisi gösterdiğini ve gözenek oluşum mekanizmasının daha dengeli bir şekilde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır.



Resim 7. Soldan sağa doğru sırasıyla %0, %2 ve %4 Si_3N_4 takviyeli numunelerin 200x büyütme ile çekilen optik mikroskop görüntüleri. (Optical microscope images of the samples reinforced with 0%, 2%, and 4% Si_3N_4 at 200 $\times$ magnification, shown from left to right, respectively.)



Resim 8. Soldan sağa doğru sırasıyla %0, %2 ve %4 Si_3N_4 takviyeli numunelerin 200 X büyütme ile çekilen optik mikroskop görüntüleri. (Optical microscope images of the samples reinforced with 0%, 2%, and 4% Si_3N_4 , respectively, taken at 200 $\times$ magnification and arranged from left to right.)



Resim 9. Soldan sağa doğru sırasıyla %0, %2 ve %4 Si_3N_4 takviyeli numunelerin SEM görüntüleri. (SEM images of the samples reinforced with 0%, 2%, and 4% Si_3N_4 , respectively, arranged from left to right.)

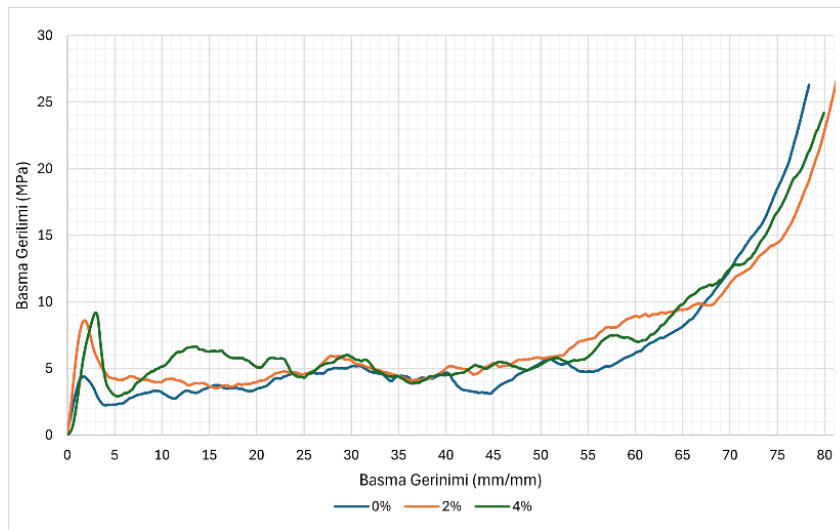


Resim 10. Soldan sağa doğru sırasıyla %0, %2 ve %4 Si_3N_4 takviyeli numunelerin SEM görüntüleri. (SEM images of the samples containing 0%, 2%, and 4% Si_3N_4 reinforcement, respectively, from left to right.)

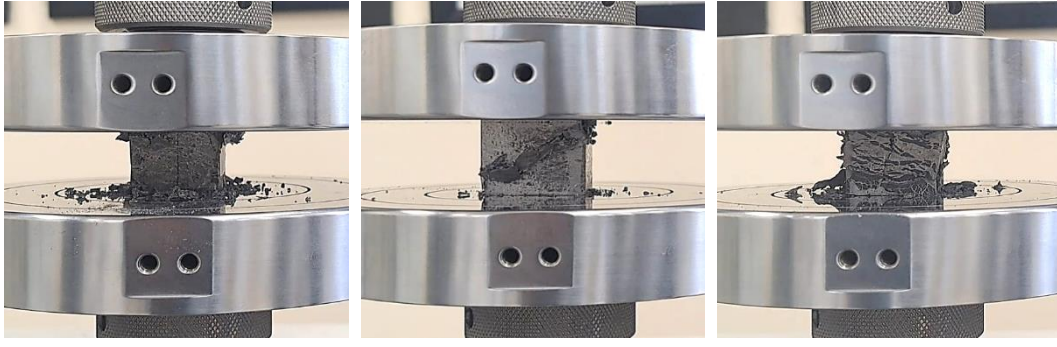
3.3. Basma Testi Verilerinin Analizi (Analysis of Compression Test Data)

Gerçekleştirilen basma testleri sonucunda, Si_3N_4 içermeyen numunenin en yüksek basma gerilimi değerine (25,25 MPa) ulaştığı gözlemlenmiştir. %2 Si_3N_4 takviyeli numunede basma gerilimi 18,56 MPa'ya düşmüş, %4 Si_3N_4 takviyeli numunede ise basma geriliminin 20,75 MPa seviyesine bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, Si_3N_4 takviyesinin Al matrisli metalik köpüklerin basma dayanımı üzerinde belirgin bir etkisi olduğu görülmektedir. %2 oranında yapılan takviyenin, basma dayanımında önemli bir azalmaya sebep olduğu, ancak takviye oranının %4'e çıkarılmasıyla mekanik özelliklerde kısmi bir iyileşme meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, Si_3N_4 partiküllerinin köpük içerisindeki dağılımı, matris-faz ara yüzey etkileşimleri ve gözenek yapısının homojenliği gibi mikro yapısal faktörlerin basma davranışını önemli ölçüde etkilediğini düşündürmektedir.



Şekil 2. %0, %2 ve %4 Si_3N_4 takviyeli numunelerin basma gerilim-gerinim grafikleri. (Compressive stress-strain curves of the samples reinforced with 0%, 2%, and 4% Si_3N_4 .)



Resim 11. Soldan sağa doğru sırasıyla %0, %2 ve %4 Si₃N₄ takviyeli numunelerin basma testi sırasındaki davranışları. (Compression behavior of the samples reinforced with 0%, 2%, and 4% Si₃N₄, respectively, from left to right.)

Tablo 5. %0, %2 ve %4 Si₃N₄ takviyeli numunelerin basma testindeki gerilim ve gerinim değerleri.

Numune	Basma Gerilimi (MPa)	Basma Gerinimi (%)
%0 Si ₃ N ₄	25,25	78
%2 Si ₃ N ₄	18,56	78
%4 Si ₃ N ₄	20,75	78

4. SONUÇLAR (RESULTS)

Alüminyum matrisli ve silisyum nitrür takviyeli kompozit metal köpük üretimi ve basma dayanımları üzerine yapılan çalışmalardan elde edilen genel çıkarımlar şu şekildedir:

1. %1 oranında TiH₂ ilavesinin üretilen metal köpüklerde yeterli genişmeyi ve uygun köpük oluşumunu sağladığı gözlemlenmiştir.
2. %0, %2 ve %4 takviyeli numuneler için ortalama köpük numune yoğunluğu sırasıyla 0,5 g/cm³, 0,44 g/cm³ ve 0,52 g/cm³, ortalama hacimsel büyüme sırasıyla %440, %511 ve %420, ortalama gözenek oranı ise sırasıyla %82, %84,2 ve %81,5 olarak gözlemlenmiştir.
3. Makroyapı görüntülerinden yola çıkarak %0 ve %2 takviyeli numunelerde ince duvarlı ve nispeten daha homojen boyut dağılımlı gözenek oluşumu gözlenirken, %4 takviyeli numunede kalın duvarlı ve heterojen boyut dağılımlı bir gözenek yapısı gözlemlenmiştir.
4. Mikroyapı görüntülerinden yola çıkarak gözeneklerin oluşturduğu üçlü birleşim noktalarında, %0 ve %4 takviyeli numunede düzensiz bir duvar yapısı gözlenirken, %2 takviyeli numunede üçlü noktada daha düzenli duvar yapısı gözlemlenmiştir.
5. %0 katkı oranına sahip numune, %2 ve %4 takviyeli numunelere kıyasla daha iyi basma dayanımı sergilemiştir. %4 Si₃N₄ takviyeli

numunenin basma dayanımında ise %2 takviyeli numuneye kıyasla kısmi bir artış görülmüştür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

“2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı” kapsamında 1919B012318446 numaralı proje ile çalışmamıza katkı sunan ve destek veren TÜBİTAK’a teşekkür ederiz.

Çalışmamızın temellerini birlikte attığımız, hasta yatağında dahi bizlere yol gösterici olan, yakın zamanda kaybettiğimiz çok değerli hocamız Prof. Dr. Adem KURT’a bu çalışmamızı atfediyoruz.

We would like to express our gratitude to TÜBİTAK for supporting and contributing to our study through the project numbered 1919B012318446 within the scope of the “2209-A Research Projects Support Programme for Undergraduate Students.”

We dedicate this study to our esteemed professor, Prof. Dr. Adem KURT, with whom we laid the foundations of this work. Even from his hospital bed, he continued to guide us, and we recently lost him with great sorrow.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

İbrahim DOĞAN: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Elif IŞIK: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Mehmet TÜRKER: Sonuçları analiz etmiştir.

He conducted analyzed the results.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Şenel, C. M., Gürbüz, M., Koç, E. 2015. "Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Yeni Nesil Kompozitler," Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 669, s. 36-47.

[2] Rosso M. 2006, Ceramic and metal matrix composites: Routes and properties. Journal of Materials Processing Technology, 175 (364-375), (2006).

[3] Mahajan G.V., Aher V.S. Composite material: A review over current development and automotive application, International Journal of Scientific and Research Publications, 2 (1-5), (2012).

[4] Babalola P.O., Bolu C.A., et all. Development of aluminium matrix composites: A review, Journal of Engineering and Technology Research, 1(1-11), (2014).

[5] Sahu P.S., Banchhor R. Effect of different reinforcement on mechanical properties of aluminium metal matrix composites, Res. J. Engineering Sci., 6 (39-45), (2017).

[6] Mattli M.R., Matli R.R et all. Structural and mechanical properties of amorphous Si₃N₄ nanoparticles reinforced Al matrix composites prepared by microwave sintering. Ceramics, 2 (126-134), (2019).

[7] Bedir F. Characteristic properties of Al-Cu-SiCp and Al-Cu-B₄Cp composites produced by hot pressing method under nitrogen atmosphere, Materials and Design, 28(1238-1244), (2007).

[8] Ramnath B.V., Elanchezhian C. Aluminium metal matrix composites - A review, Advanced Materials Science, 38(55-60), (2014).

[9] Attar S., Nagaral M., et all. A review on particulate reinforced aluminum metal matrix composites, Journal of Emerging Technologies and Innovative Research, 2(225-229), (2015).

[10] Efvina Efvana M.N., Siti Syazwani N., and Abdullah M.M.A.B. Fabrication method of aluminum matrix composite (Amcs): A review, Key Engineering Materials, 700(02-110), (2016).

[11] Thirumoorthy A, Arjunan T.V., Senthil Kumar K.L. Latest research development in aluminum matrix with particulate reinforcement composites – A review, Materials Today: Proceedings 5(1657–1665), (2018).

[12] Manohar G., Dey A., Pandey K.M. and Maity S.R. Fabrication of metal matrix composites by powder metallurgy: A review, International Conference on Electrical, Electronics, Materials and Applied Science, 020041(1-8), (2019).

[13] Gökmen, U. Et Al. 2023. Microstructural and Radioactive Shielding Analyses of Alumix-231 and Alumix-231 Reinforced with B₄C/SiC/Al₂O₃ Particles Produced through Hot Pressing. ACS OMEGA, vol.8, no.39 , 35755-35767.

[14] Akbulut, A., Tatlı, Z., Çalışkan, F. 2009. "Si₃N₄ Seramiklerinin Al₂O₃, MgO Katkıları Kullanılarak Basıncsız Sinterlenmesi", 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, Türkiye.

[15] Kumar, N. M., Kumaran, S.S., Kumaraswamidhas, L. A. 2015. "An Investigation of Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Al₂618 Alloy Reinforced with Si₃N₄, AlN and ZrB₂ Composites", Journal of Alloys and Compounds, vol. 652, p. 244-249.

[16] H. Arik, H., "Effect of Mechanical Alloying Process on Mechanical Properties of a-Si₃N₄ Reinforced Aluminum-Based Composite Materials", Materials and Design, vol.29, pp.1856-1861, 2008.

[17] Kumar, N. M., Kumaran, S. S., Kumaraswamidhas, L. A. 2016. "Aerospace Application on Al₂618 with Reinforced-Si₃N₄, AlN and ZrB₂ in-situ Composites", Journal of Alloys and Compounds, vol. 672, p. 238-250.

- [18] P. Sharma, S. Sharma, D. Khanduja, "Production and Some Properties of Si₃N₄ Reinforced Aluminium Alloy Composites", *Journal of Asian Ceramic Societies*, vol.3, pp.352-359, 2015.
- [19] Ashby, M.F., A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson and H.N.G. Wadley, *Metal Foams: A Design Guide*, Butterworth Heineman, 2000.
- [20] Altenpohl, D. G. 1980. Present Structure and Future Trends in Key Materials Industries. *Materials in World Perspective: Assessment of Resources, Technologies and Trends for Key Materials Industries*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, Heidelberg p.21–126.
- [21] Özen, M., Taşkın, N. Ü. (2021). Alüminyum Kompozit Köpük Malzemelerde Takviye Oranına Bağlı Olarak Darbe Davranışının İncelenmesi, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(2), 87-95.
- [22] Proa, Paula & Mendoza-Suarez, Guillermo & Drew, Robin. (2012). Effect of TiH₂ particle size distribution on aluminum foaming using the powder metallurgy method. *Journal of Materials Science - J MATER SCI*. 47. 10.1007/s10853-011-5820-1.
- [23] A. Ma, N. Saito, M. Takagi, Y. Nishida, H. Iwata, *Mater. Sci. Eng. A* 395 (2005) 70–76.
- [24] A. Ma, K. Suzuki, Y. Nishida, N. Saito, I. Shigematsu, M. Takagi, H. Iwata, A. Watazu, T. Imura, *Acta Mater.* 53 (2005) 211–220.
- [25] C.M. Cepeda-Jimenez, J.M. Garcia-Infanta, A.P. Zhilyaev, O.A. Ruano, F. Carreno, J. *Alloys Compd.* 509 (2011) 636–643.
- [26] TÜRKER, M., (2009). Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilen Alüminyum Esaslı Metalik Köpükte Si İlavesinin Köpürmeye Etkisi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye (ss.1-6). Karabük, Türkiye
- [27] Ismail Ozdemir, Ceren Gode, Hakan Yilmazer, Hasan Callioglu, The effect of extrusion and high-pressure torsion on the properties of Alumix-231, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 532, 2012, Pages 573-578.
- [28] Brook, R.J. (1991). *Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials*. Pergamon Press: Oxford.
- [29] Yu, C.-J., H.H. Eifert, J. Banhart and J. Baumeister, "Metal foaming by a powder metallurgy method: Production, properties and applications". *Materials Research Innovations*, 181-188, (1998).
- [30] Banhart, J., "Metallic foams: challenges and opportunities". *Eurofoam*, 13-20, (2000).
- [31] Schaeffler, P., W. Rajner, D. Claar, T. Trendelenburg and H. Nishimura, "Production, properties, and applications of Alulight® closed-cell aluminum foams", *Proceedings of the Fifth International Workshop on Advanced Manufacturing Technologies*, 151-156, (2005).
- [32] Babcsán, N., F.G. Moreno and J. Banhart, "Metal foams high temperature colloids: part II: in situ analysis of metal foams". *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 254-263, (2007).
- [33] Uzun, A. and M. Turker, "The investigation of mechanical properties of B₄C-reinforced AlSi₇ foams". *International Journal of Materials Research*, 970-977, (2015).
- [34] Yang, D., et al., "Effect of decomposition kinetics of titanium hydride on the Al alloy melt foaming process". *Journal of Materials Science & Technology*, 361-368, (2015).
- [35] Turker, M., "Production of Ceramics Reinforced Al Foams by Powder Metallurgy Techniques", *Materials Science Forum*, 39-46, (2011).
- [36] Sharma, S.S., S. Yadav, A. Joshi, A. Goyal and R. Khatri, "Application of metallic foam in vehicle structure: A review". *Materials Today: Proceedings*, 347-353, (2022).