

Tungsten karbür katkısının ve ısıtılma işlemin Al7075-WC kompozitlerin mekanik özelliklerine olan etkisinin araştırılması

Investigation of effect of tungsten carbide addition and heat treatment on the mechanical properties of Al7075-WC composites

Mahmut Can Şenel^{1,*}, Erkan Öztürk², Selin Atıcı³

^{1,2,3} Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 55210, Samsun, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, Al7075-WC kompozitleri, toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleri kullanılarak üretilmiştir. Al7075 matrisine ağırlıkça %1, %3, %6, %9, %12, %15, %18, %25 ve %30 oranlarında WC takviyesi yapılmıştır. Katkı oranlarının ve uygulanan ısıtılma işlemlerinin (sinterleme ve indüksiyonla sıcak presleme), kompozitlerin mikro yapıları ile mekanik özellikleri (yoğunluk, Vickers sertliği, basma dayanımı) üzerine olan etkileri incelenmiştir. Yapılan testler sonucunda, Al7075-WC kompozitleri içerisinde en iyi mekanik özelliklerin, indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%30WC kompozitte elde edildiği tespit edilmiştir. İndüksiyonla sıcak presleme uygulanmış Al7075-%30WC kompozit ile yalnızca sinterlenmiş Al7075 alaşımı karşılaştırıldığında; yoğunluğun %30, sertliğin %54.2 ve basma dayanımının %72.3 oranında arttığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak Al7075 matrisine uygun miktarda (%30WC) WC ilavesiyle kompozitlerin mekanik özelliklerinin geliştirilebileceği ortaya konmuştur. Ayrıca, sinterleme sonrası uygulanan indüksiyonla sıcak presleme işleminin kompozitlerin mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Al7075 alaşımı, Tungsten karbür, Kompozit, Toz metalürjisi

1 Giriş

Son yıllarda sanayideki ve teknolojiye hızlı gelişme sebebiyle geleneksel malzemeler yerini daha üstün özelliklere sahip yeni malzemelere bırakmıştır. Bundan dolayı daha üstün ve yeni malzemelerin üretilmesi amacıyla araştırma ve geliştirme faaliyetleri aktif bir şekilde ilerlemektedir. Şu ana kadar yapılmış çalışmalar diğer malzemelere oranla daha üstün özelliklerin bir arada toplandığı kompozit malzemeler olarak ifade edilen yeni bir malzeme türünü ön plana çıkarmaktadır. [1].

Kompozit malzemeler; matris ve takviye fazından oluşacak şekilde üretilirler. Matris, çatlak ilerlemesini önlemek, malzemenin kırılmasını ya da kopmasını engellemektedir. Takviye fazı ise malzemenin mukavemetini arttırmak, yüksek sıcaklıkta gösterdiği özellikleri iyileştirmek ve tokluğunu arttırmak için kullanılır. Kompozit malzeme üretilirken maliyet, çevre şartlarının

Abstract

In this study, Al7075-WC composites were produced using powder metallurgy and induction hot pressing techniques. Tungsten carbide (WC) was added to the Al7075 matrix at weight ratios of 1%, 3%, 6%, 9%, 12%, 15%, 18%, 25%, and 30% by weight. The effects of reinforcement ratios and thermal treatment methods (sintering and induction hot pressing) on the microstructure and mechanical properties (density, Vickers hardness, compressive strength) of the composites were investigated. As a result of the tests, it was determined that the induction hot-pressed Al7075-%30WC composite exhibited the best mechanical properties among the Al7075-WC composites. When the induction hot pressed Al7075-30%WC composite was compared with the only sintered Al7075 alloy, it was found that the density, hardness, and compressive strength increased by 30%, 54.2% and 72.3%, respectively. In conclusion, it has been demonstrated that the mechanical properties of the composites can be enhanced by the appropriate addition (30%WC) of WC to the Al7075 matrix. Furthermore, induction hot pressing applied after sintering was found to positively influence the mechanical behaviour of the composites.

Keywords: Al7075 alloy, Tungsten carbide, Composite, Powder metallurgy

malzemeye etkisi, ham malzemenin özellikleri gibi faktörler dikkate alınmalıdır [2, 3]. Kompozit malzemeler, üretim yöntemlerinin çeşitliliği ve geniş kullanım alanları nedeniyle matris malzemesine göre; metal matrisli, polimer matrisli ve seramik matrisli kompozitler olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır. Metal matrisli kompozitler içerisinde en yaygın kullanılan matris malzemeler; alüminyum, bakır, magnezyum, titanyum ve demirdir [1-3].

Alüminyum, dünyada oldukça fazla rezerve sahip bir malzeme olup demirden sonra en çok tüketilen ve üretilen metalik malzemedir [4]. Alüminyumun kolayca şekillendirilebilmesinin yanı sıra hafif bir metal olması endüstride çokça uygulama alanı bulmasına sebep olmuştur. Alüminyum matrisli kompozitlerde, matris içerisine karbür veya oksit gibi seramik fazların takviye edilmesi sıvı veya katı olmak üzere iki yöntemle mümkündür. İlk yöntem sıvı yöntem olarak adlandırılan ergime dereceleri yüksek karbür

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mahmutcan.senel@omu.edu.tr (M. C. Şenel)

Geliş / Received: 01.10.2025 Kabul / Accepted: 29.11.2025 Yayınlanma / Published: 15.01.2026

doi: 10.28948/ngumuh.1794722

ya da oksitlerin, sıvı halde bulunan alüminyum içerisine katılmak için homojen şekilde alüminyum ile birlikte katılaşmasını sağlayarak gerçekleşmektedir. İkinci yöntem ise katı hal olarak adlandırılan toz metalurjisi yönteminin kullanıldığı metottur. Bu yöntemde toz halde bulunan karbür veya oksit toz halde bulunan alüminyumla homojen bir şekilde karıştırılır, preslenir ve sinterlenir. Diğer bir metot ise mekanik alaşımlama olan katı hal üretim metodudur. Mekanik alaşımlamada iki ya da daha fazla elementel toz belirli oranlarda birbiri içine eklenerek karışım toz elde edilmektedir. Sonrasında bu karışım yüksek enerjili bilyalı değirmene konularak mekanik alaşımlama işlemi gerçekleştirilmektedir [5].

Tungsten karbür (WC), 6B metal karbür grubuna aittir. Tungsten karbür, yüksek sertlik, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, yüksek aşınma ve korozyon direnci gibi mükemmel özelliklere sahip olduğu için refrakter malzemeler, kesici takımlar, kalıplar, aşındırıcı malzemeler ve nozulların üretilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. WC, bu özelliklerin yanı sıra alüminyum ile iyi ıslanabilirlik özelliği sayesinde takviye elemanı olarak kullanımı oldukça avantaj sağlamaktadır [6].

Tungsten karbür takviyeli Al7075 matrisli kompozitler üzerine literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur. Babu vd. [7] yaptıkları çalışmada, karıştırılmalı döküm yöntemini kullanarak ağırlıkça farklı oranlarda (%1.5, 3, 4.5, 6) tungsten karbür takviyeli alüminyum matrisli kompozitleri üretmişlerdir. Yapılan testler sonucunda en yüksek sertlik ve çekme dayanımı değerine ağırlıkça %6 tungsten karbür takviyeli Al7075 matrisli kompozitte ulaşılmıştır. Tungsten karbür takviyesi arttıkça darbe dayanımında düşüş gözlemlenmiştir. Bu durumun tungsten karbürün gevrek ve kırılgan karakteristiğinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Fenghong vd. [8] yaptıkları çalışmada, farklı oranlarda (%5, 7.5, 10) silisyum karbür ve tungsten karbür takviyeli Al6061 matrisli kompozitleri üretmişlerdir. Üretilen kompozitlere uygulanan testler sonucunda en yüksek sertlik değerine (98.54 HV) Al6061-%10SiC-%10WC kompozitte ulaşılmıştır. Kompozitlerin uzama miktarına bakıldığında ise takviye oranı arttıkça uzama miktarının azalış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durumun SiC ve WC partiküllerinin elastik deformasyon kabiliyetinin oldukça sınırlı olmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Rajesh vd. [9] yaptıkları çalışmada, karıştırılmalı döküm yöntemini kullanarak ağırlıkça farklı oranlarda (%1, 2, 3 ve 4) tungsten karbür takviyeli Al6061 matrisli kompozitleri üretmişlerdir. Üretilen kompozitler incelendiğinde en yüksek sertlik (69 HV) ve çekme dayanımı (155.3 MPa) ağırlıkça %3 tungsten karbür takviyeli Al6061 matrisli kompozitte gözlemlenmiştir. Takviye oranının artırılmasının sertlik ve çekme mukavemeti gibi mekanik özelliklerde önemli bir artış sağladığı tespit edilmiştir. Mekanik özelliklerdeki en büyük artışın %3 tungsten karbür takviyeli kompozitte elde edildiği gözlemlenmiştir. Raju ve Swamy [10] tarafından yapılan çalışmada, toz metalurjisi yöntemiyle ağırlıkça farklı oranlarda (%2, 4, 6, 8 ve 10) tungsten karbür takviyeli Al6061 matrisli kompozitleri üretmişlerdir. Üretilen kompozitlere 540°C sıcaklıkta 120 dakika boyunca sinterleme işlemi yapılmıştır. Tungsten karbür takviyesi

sertlik, çekme mukavemeti ve basma mukavemeti gibi mekanik özelliklerde belirgin bir artış sağlamıştır. Mekanik özellikler açısından en yüksek sertlik (53 BHN), çekme mukavemeti (113.63 MPa) ve basma mukavemeti (694.72 MPa) Al6061-%12WC kompozitte elde edilmiştir. Bununla birlikte en yüksek aşınma oranına da Al6061-%12WC kompozitte ulaşılmıştır. SEM görüntüleri incelendiğinde ise tungsten karbür partiküllerinin Al6061 matrisi içinde homojen olarak dağıldığı gözlemlenmiştir. Ravikumar vd. [11] yaptıkları çalışmada, karıştırılmalı döküm yöntemini kullanarak ağırlıkça farklı oranlarda (%2, 4, 6, 8 ve 10) tungsten karbür takviyeli Al6082 matrisli kompozitleri üretmiş ve kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. İncelemeler sonucunda, tungsten karbür takviyesi arttıkça kompozitin yoğunluk değeri ve uzama miktarının azaldığı sertlik değerinin ise arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek yoğunluk değerine (2.69 g/cm³) saf alüminyumda, en yüksek sertlik değerine (80 HV) ise ağırlıkça %10 tungsten karbür takviyeli Al6082 kompozitte ulaşılmıştır. Çekme ve akma dayanımı değerleri incelendiğinde ağırlıkça %8 tungsten karbür katkısına kadar arttığı bu katkı oranından sonra ise azalmaya başladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde; Al-WC kompozitlerin toz metalurjisi veya karıştırılmalı döküm yöntemleriyle üretildiği tespit edilmiştir. Buna karşın, toz metalurjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleri birlikte kullanılarak üretilmiş Al7075-WC kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelendiği herhangi bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır.

Bu çalışmada, toz metalurjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleri birlikte kullanılarak Al7075-WC kompozit malzemelerin üretimi gerçekleştirilmiş olup mekanik özellikleri (yoğunluğu, Vickers sertliği, basma dayanımı) ve mikroyapısı incelenmiştir. Çalışma kapsamında Al7075 matrisli kompozit yapının mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır.

2 Materyal ve metot

2.1 Materyal

Bu çalışmada, matris malzemesi olarak 7075 alüminyum alaşımı, takviye malzemesi olarak tungsten karbür kullanılmış olup bu malzemeler kullanılarak Al7075-WC kompozitler toz metalurjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle üretilmiştir. Alüminyum matrisli kompozitler; üstün aşınma özellikleri, düşük ağırlıkları ve yüksek dayanıma sahip olmaları ile birlikte birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır [12]. Bu çalışmada kullanılan Al7075 alaşım tozunun boyutu yaklaşık 10 µm olup ticari olarak Nanografi (Türkiye) firmasından temin edilmiştir. Tablo 1'de Al7075 alaşımının genel özellikleri ve Tablo 2'de Al7075 alaşımının kimyasal bileşimi verilmiştir.

Takviye malzemesi olarak tercih edilen tungsten karbür tozu, ortalama 40 µm boyuta sahip olup ticari olarak Nanografi (Türkiye) firmasından satın alınmıştır. Tungsten karbür, tungsten ve karbonun belirli oranlarda bir araya gelerek oluşturduğu bir kimyasal bileşiktir. Tungsten karbür; yüksek oksidasyon direnci, yüksek sertlik, yüksek

mukavemet ve düşük sürtünme katsayısı gibi özelliklerinden dolayı birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tablo 1. Al7075 alaşımının genel özellikleri [12]

Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm ³)	2.81
Sertlik (Brinell)	60
Çekme mukavemeti (MPa)	228
Akma mukavemeti (MPa)	103
Kopma uzaması (%)	>%10
Elastisite modülü (GPa)	71.7
Poisson oranı	0.33
Kayma mukavemeti (MPa)	152

Tablo 2. Al7075 alaşımının kimyasal bileşimi (%) [13]

Cr	Cu	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Fe	Al
0.23	1.6	2.5	<0.30	<0.40	<0.20	5.6	<0.5	kalan

Bunlardan en önemlisi ise kesici ve delici takımlarda kullanımıdır [14]. Tungsten karbürün genel özellikleri Tablo 3’de verilmiştir.

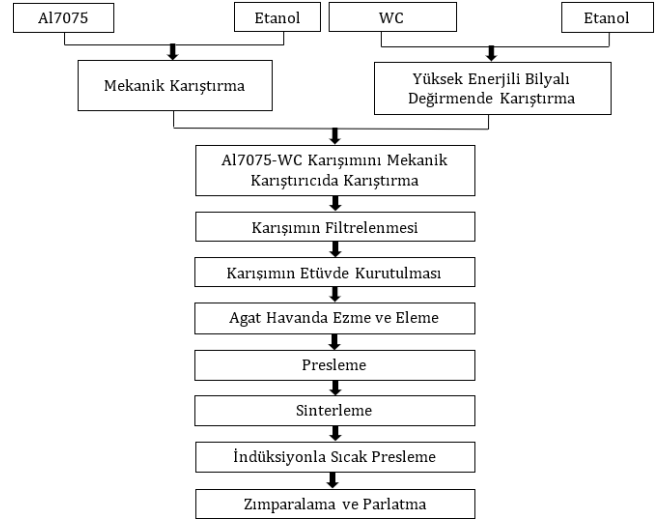
Tablo 3. Tungsten karbürün genel özellikleri [14]

Özellik	Değer
Kristal yapı	Hegzagonal
Yoğunluk (g/cm ³)	15.8
Ergime noktası (°C)	2870
Spesifik ısı (J/(mol.K))	39.8
Isıl iletkenlik (W/(m.°C))	63
Isıl genleşme (1/°K)	5.2×10 ⁻⁶
Elektriksel direnç (μΩ.cm)	17-22
Vickers sertliği (HV)	22
Elastisite modülü (GPa)	620-7720

2.2 Yöntem

Bu çalışmada, Al7075 alüminyum matrisli tungsten karbür takviyeli kompozitlerin toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemiyle üretimi yapılarak özellikleri incelenmiştir. Üretim aşamaları sırasıyla; mekanik karıştırıcıyla ve yüksek enerjili bilyalı değirmenle tozların karıştırılması, karışımın filtrelenmesi, etüvde kurutulması, agat havanda ezme ve eleme yapılması, presleme, sinterleme, indüksiyonla sıcak presleme, zımparalama ve parlatma işlemlerinden oluşmaktadır. Al7075-WC kompozitlerin üretim aşamaları Şekil 1’de gösterilmiştir

İlk olarak takviye tozları (tungsten karbür) belirli oranlarda etanol içerisinde zirkon bilya yardımıyla 600 dev/dk hızda 30 dakika boyunca yüksek enerjili bilyalı değirmenle karıştırılmıştır. Eş zamanlı olarak Al7075 tozları etanol içerisinde 300 dev/dk hızda karıştırılmıştır. Daha sonra iki karışım birleştirilerek 30 dakika daha karıştırma işlemine devam edilmiştir.



Şekil 1. Alüminyum hibrit kompozitlerin üretim aşamaları

Karıştırılan tozlar süzülerek 50°C sıcaklıktaki etüv fırında 18 saat boyunca kurutulmuştur. Kurutulan karışıma eleme işlemi uygulanmıştır. Üretilen tozlara şekil vermek amacıyla toz karışımı tek eksenli hidrolik pres yardımıyla yaklaşık 750 MPa basınç altında şekillendirilmiştir. Bu sayede 10×10×5 mm boyutlarında numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler Protherm marka PTF 12/20/250 model tüp fırında vakum altında 600 °C’de 60 dakika süresince sinterlenmiştir. Bu işlemin ardından malzemelerin mekanik özelliklerinin daha da iyileştirilmesi için numunelere indüksiyon altında sıcak presleme işlemi uygulanmıştır. İndüksiyonla ısıtma işlemi için ısıtma, bekletme ve soğutma süreleri sırasıyla 60 s, 60 s ve 10 s olacak şekilde cihaz üzerinden ayarlanmıştır. Bu sayede 500 °C sıcaklıkta ve 25 MPa’lık bir basınç altında sıcak presleme işlemi uygulanmıştır. Sonrasında üretilen numuneler sırasıyla 600, 1200, 2000 gritlik SiC su zımparaları kullanılarak 10’ar dakika süresince zımparalanmış ve ardından elmas çuha kullanılarak 15 dk süresince elmas solüsyon damlatılarak parlatılmıştır. Son aşamada ise üretilen kompozit malzemelere gerekli mekanik testler ve mikroyapısal analizler uygulanmıştır.

Üretilen numunelerin deneysel yoğunluk verileri, Arşimet prensibine göre çalışan hassas terazi kullanılarak tespit edilmiştir. Sertlik değerlerini belirlemek amacıyla numunelere Vickers sertlik testi uygulanmıştır. Sertlik testleri, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan TMTeck marka, HV-1000B model mikro Vickers sertlik cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında, yüzeyleri parlatılmış numunelere 1.961 N’luk yük ve 15 saniye süreyle batıcı uç yardımıyla uygulanmıştır. Oluşan izler köşegen uzunlukları ölçülüp ortalaması alınarak sertlik değeri belirlenmiştir. Numune yüzeyinin en az yedi farklı noktasından ölçüm alınarak ortalama sertlik değeri belirlenmiştir. Numunelerin basma dayanımı, Ondokuz Mayıs Üniversitesi (OMÜ) Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı’nda bulunan Mares marka TST 10T model basma/çekme test cihazı ile belirlenmiştir. Test öncesinde numunelere 1 mm/dk ön yükleme hızında 5 MPa’lık bir ön

yük uygulanmış ardından 3 mm/dk hızında basma testi gerçekleştirilmiştir.

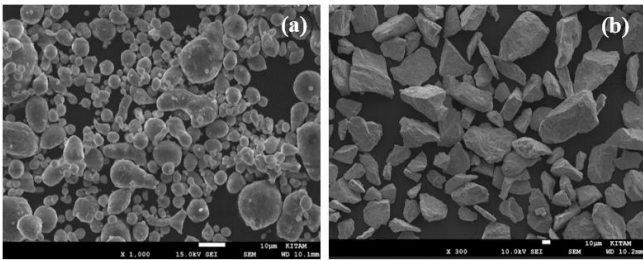
Al7075 alaşım ve tungsten karbür tozlarının tane boyut dağılımı Malvern marka Mastersizer 3000 model tane boyut ölçüm cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Numunelerin içyapı analizi X-ışını kırınımı (XRD) cihazı ve taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) gerçekleştirilmiştir. XRD analizi, OMÜ Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma Merkezi (KİTAM)'nde bulunan Rigaku marka Smartlab model XRD cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında SEM analiziyle tozların morfolojik yapısı, kompozit malzemelerin kırık yüzey analizleri ve elementel dağılım haritaları elde edilmiştir. Söz konusu analizler, OMÜ KİTAM'da bulunan Jeol JSM7001-F model SEM cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Tozların karakterizasyonu

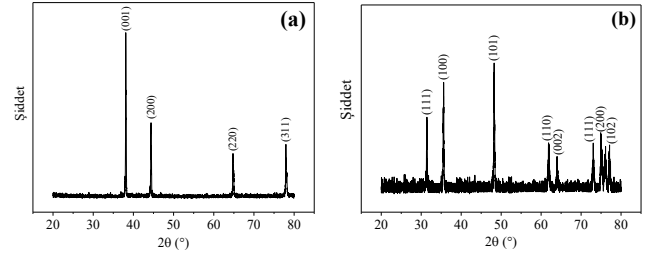
Bu bölümde, Al7075 matrisli tungsten karbür (ağırlıkça %1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 25, 30) takviyeli kompozit malzemelerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu kapsamda, kompozitlerin faz yapısı, mikroyapısı, yoğunluğu, Vickers sertliği ve basma dayanımı incelenmiştir.

Çalışmada kullanılan Al7075 alaşım ve tungsten karbür tozlarına ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir. Al7075 tozlarının SEM görüntüleri incelendiğinde partiküllerin genel olarak küresele yakın bir morfolojiye sahip olduğu ve yaklaşık 10-15 µm boyutta olduğu belirlenmiştir. Takviye malzemesi olarak kullanılan tungsten karbür (WC) tozlarının keskin kenarlı ve düzensiz morfolojide olduğu; partikül boyutlarının ise 50 µm'nin altında olduğu tespit edilmiştir.



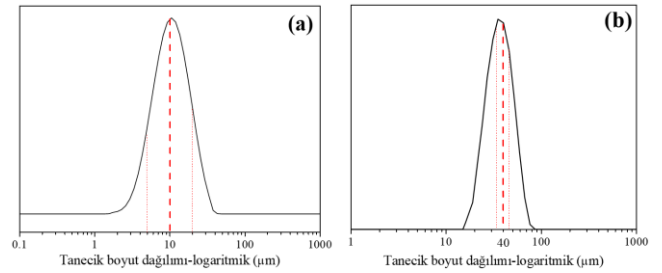
Şekil 2. (a) Al7075 alaşım ve (b) tungsten karbür tozlarının SEM görüntüsü

Al7075 alaşım ve tungsten karbür tozlarının faz analizi Rigaku marka Smartlab model X-ışını kırınım cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu analiz, kompozit yapı içerisinde alüminyum matrisinin ve tungsten karbür takviye fazlarının varlığını doğrulamak amacıyla uygulanmıştır. Şekil 3'de verilen XRD örgü desenleri incelendiğinde matris malzemesi olarak kullanılan Al7075 alaşımına ait kırınım açılarının yaklaşık 2θ=38°, 45°, 66° ve 78° olduğu tespit edilmiştir. Takviye fazı olarak kullanılan tungsten karbürün kırınım açılarının ise yaklaşık olarak 2θ=32°, 36°, 49°, 63°, 65°, 73°, 75° ve 77° olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3. (a) Al7075 alaşımının ve (b) tungsten karbür tozlarının XRD örgü desenleri

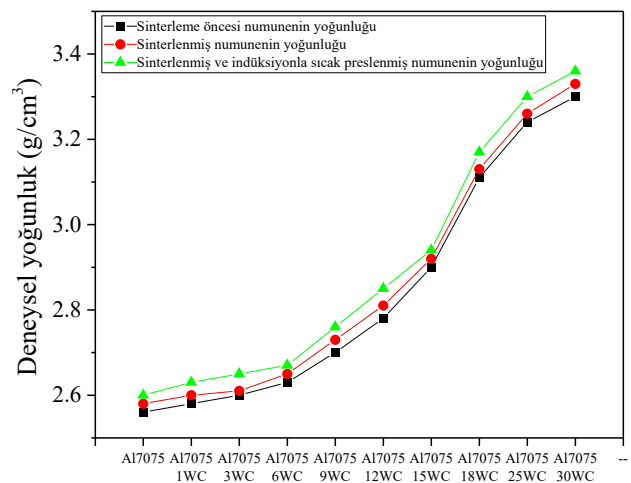
Şekil 4'de yatay eksen logaritmik ölçekte tanecik boyutu dağılımını, dikey eksen ise hacimsel oranı göstermektedir. Ölçüm sonuçları incelendiğinde, Al7075 alaşım tozlarının yaklaşık 10 µm, tungsten karbür tozlarının ise yaklaşık 40 µm büyüklüğünde tanecik boyutuna sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4. (a) Al7075 alaşım ve (b) tungsten karbür tozlarına ait tane boyut dağılımı

3.2 Yoğunluk ölçüm sonuçları

Al7075 matrisli ve tungsten karbür takviyeli kompozit malzemelere ait yoğunluk değerleri, takviye oranı ve uygulanan ısıtma işlem türüne bağlı olarak Şekil 5'te verilmiştir. Şekil incelendiğinde ısıtma işleminin kompozitlerin yoğunluklarında artışa neden olduğu tespit edilmiştir.



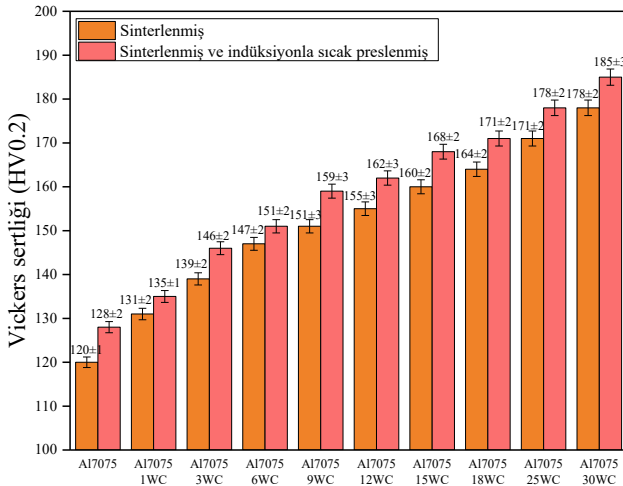
Şekil 5. Al7075 alaşımı ile Al7075-WC kompozitlerin ısıtma işlem türüne bağlı olarak deneysel yoğunluk değerleri

Deneysel çalışmalar sonucunda en yüksek deneysel yoğunluk (3.36 g/cm³) indüksiyonla sıcak presleme yöntemiyle üretilmiş Al7075-%30WC kompozitinde elde

edilmiştir. Yoğunluğun artması Al7075 alaşımının teorik yoğunluğu olan 2.8 g/cm³'e kıyasla daha yüksek teorik yoğunluk değerine sahip olan tungsten karbür partiküllerinin (15.63 g/cm³) mikro yapıya eklenmesinden kaynaklanmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda alüminyum matrisle tungsten karbür katkısıyla 3 g/cm³'e kadar yoğunluk artışının tespit edildiği raporlanmıştır [15, 16]. Bu çalışmada ise tungsten karbür katkısıyla ve sıcak preslemenin etkisiyle 3.36 g/cm³ yoğunluğa ulaşılmıştır.

3.3 Sertlik ölçüm sonuçları

Bu bölümde, üretilen Al7075-WC kompozitlerin takviye oranı ve ısıtım işlem türüne bağlı olarak Vickers sertlik değerleri incelenmiş olup Şekil 6'da verilmiştir. Her numunenin yüzeyinden yedi farklı noktadan sertlik ölçümü yapılmış ve bu değerlerin ortalaması alınarak değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilere göre sinterleme sonrasında indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan kompozit malzemelerde Vickers sertliğinde belirgin bir artış tespit edilmiştir.



Şekil 6. Al7075 alaşımı ile Al7075-WC kompozitlerin ısıtım işlem türüne bağlı olarak Vickers sertlik değerleri

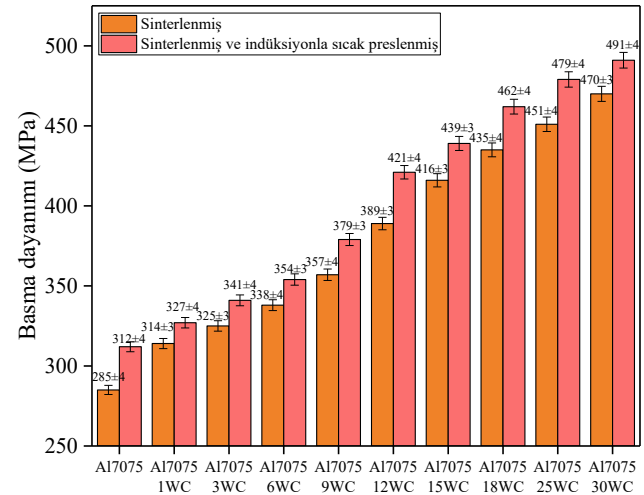
Bu sertlik artışının sebebi sıcaklık ve basınç etkisiyle malzeme içindeki gözeneklerin azalması ve takviye partiküllerinin daha homojen şekilde matris içerisine yerleşmesidir. Ayrıca tungsten karbür partiküllerinin yüksek sertliğinden dolayı tungsten karbür takviye oranı arttıkça Vickers sertliğinin de arttığı tespit edilmiştir. En yüksek Vickers sertliği (185 HV) indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%30WC kompozitte tespit edilmiştir. Sadece sinterlenmiş Al7075 alaşımına (120 HV) kıyasla sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%30WC kompozitte sertlik değeri %54 oranında artmıştır. Bu durum, takviye elemanı olarak kullanılan tungsten karbür partiküllerin rijit ve sert yapısından kaynaklanmaktadır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde; tungsten karbür katkısıyla alüminyum matrisli kompozitin sertliğinin 160 HV'ye kadar yükseldiği rapor edilmiştir [17, 18]. Mevcut çalışmada ise sıcak preslemeyle ve tungsten karbür katkısıyla sertliğin 185 HV'ye kadar arttığı tespit edilmiştir.

Yüksek sertlikteki takviye elemanlarının yapıda bulunması, kompozit malzemelerin genel sertliğinde artışa yol açmaktadır. Bu artış, karışım kuralı kullanılarak hesaplanabilir. Kompozitin sertliği (H_K) Denklem (1)'de yer alan formül yardımıyla hesaplanmaktadır. Bu bağlamda H_M matris fazının sertliğini, H_T ise takviye fazının sertliğini ifade ederken; f_M ve f_T sırasıyla matris ve takviye fazlarının hacimsel katkı oranlarını ifade etmektedir [19].

$$H_K = H_M f_M + H_T f_T \quad (1)$$

3.4 Basma test sonuçları

Şekil 7'de Al7075-WC kompozitlerin takviye oranı ve ısıtım işlem türüne bağlı olarak basma dayanımı üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Elde edilen veriler, tungsten karbürün yüksek sertliğe sahip yapısı nedeniyle takviye miktarındaki artışın kompozitlerin basma dayanımını genel olarak artırdığını ortaya koymuştur. En yüksek basma dayanımı (491 MPa) indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%30WC kompozitte tespit edilmiştir. Sadece sinterlenmiş Al7075 alaşımına (285 MPa) kıyasla sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%30WC kompozitte basma dayanımı %72.3 oranında artmıştır. Bu artış, sert seramik partiküllerin matris içerisinde homojen yakın bir şekilde dağılmasından kaynaklandığı öngörülmektedir. Bu sebeple de kompozitlerin kırık yüzey mikroyapıları bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Mevcut çalışmaya kıyasla literatürdeki bir çalışmada Al7075-WC-Co kompozitin basma dayanımının 600 MPa seviyelerine ulaştığı görülmüştür [20]. Bu durumun WC-Co birleşimiyle elde edilen sert sermet yapıların takviye elemanı olarak kullanılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 7. Al7075 alaşımı ile Al7075-WC kompozitlerin ısıtım işlem türüne bağlı olarak basma dayanımı değerleri

Kompozit malzemelerin mekanik dayanımını artırmaya yönelik olarak tane inceltme, yük transferi, termal uyumsuzluk ve Orowan mekanizması gibi çeşitli güçlendirme mekanizmaları kullanılmaktadır. Tane inceltme mekanizmasıyla sağlanan dayanım artışı, Hall-Petch denklemiyle tanımlanmaktadır Denklem (2). Bu denklemde k malzeme sabitini ve d ise ortalama tane çapını ifade

etmektedir. Tane boyutunun küçülmesi ile tane sınırı sayısını artar ve dislokasyon hareketi sınırlanır. Böylece dislokasyon yoğunluğu artmakta ve kompozit malzemenin dayanımı gelişmektedir [21, 22].

$$\sigma_{GR} = kd^{-1/2} \quad (2)$$

Yük transferi mekanizması, Denklem (3) ile ifade edilmektedir. Bu denklemde f_r takviye fazının hacimsel oranını ve σ_{YM} ise matris malzemesinin akma dayanımını göstermektedir. Matris malzemesi hasar gördüğünde, gerilme takviye fazına aktarılmaktadır. Böylece matris ile takviye malzemesi arasında güçlü bir arayüzey bağının oluşması sağlanmaktadır [22].

$$\sigma_L = 0.5f_r\sigma_{YM} \quad (3)$$

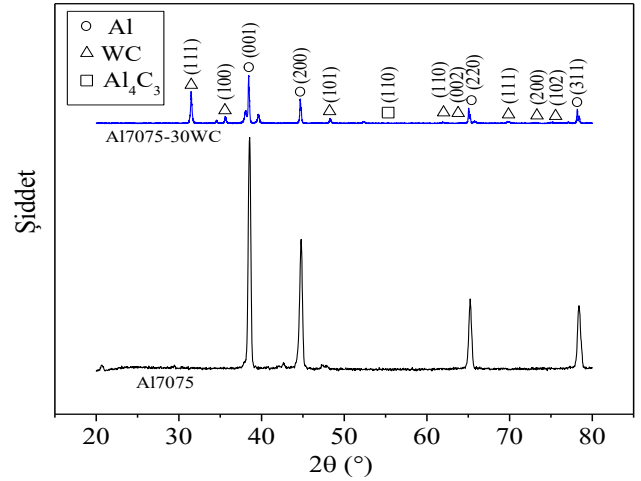
Matris ve takviye fazları farklı termal genleşme katsayıları ile elastik modül değerlerine sahiptir. Bu farklılık, sıcaklık değişimlerinde matris ve takviye arasındaki arayüzeyde artık termal gerilmelerin oluşmasına yol açmaktadır. Oluşan bu gerilmeler ile elastik modül farkı, mikroyapıda dislokasyon yoğunluğunu artırmaktadır. Dislokasyon yoğunluğundaki artış ise malzemenin mukavemetini yükseltmektedir. Termal uyumsuzluk ile dislokasyon yoğunluğu arasındaki ilişki Denklem (4) ile ifade edilmekte olup bu denklemde $\Delta\alpha\Delta T$ termal genleşme farkını, b Burgers vektörünü ve N_A ise nanopartikül sayısını göstermektedir [19].

$$\Delta\rho = \Delta\alpha\Delta TN_A/b \quad (4)$$

Kompozit yapı içerisinde dislokasyon yoğunluğunun artması, Orowan döngülerinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu döngüler, dislokasyon çizgilerinin belirli bir yoğunluğa ulaştığında takviye taneleri etrafında dairesel yollar izlemesiyle meydana gelmektedir. Orowan döngüleri, dislokasyon hareketini kısıtlayarak malzeme dayanımında artış sağlamaktadır. Orowan güçlendirme mekanizmasına ait dayanım katkısı (σ_O), Denklem 5 ile ifade edilmektedir. Bu denklemde λ takviye taneleri arasındaki mesafeyi ve r ise bu tanelerin yarıçapını göstermektedir [1].

$$\sigma_O = 0.13(Gb/\lambda) \ln(r/b) \quad (5)$$

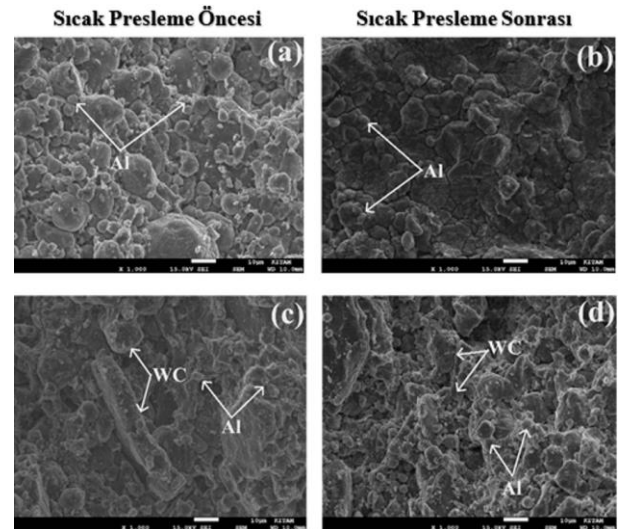
Bu bölümde, Al7075 matrisli WC takviyesi ile üretilen kompozitlerin XRD faz analizi sonuçları değerlendirilmiştir. Al7075 alaşımı ve Al7075-%30WC kompozitlerinin içyapısındaki fazları belirlemek amacıyla Şekil 8’de gösterildiği gibi XRD faz analizleri yapılmıştır. Faz analizlerinde, alüminyum fazları “o” sembolüyle, WC fazları ise “Δ” sembolüyle ve Al_4C_3 fazı “□” sembolüyle gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, tüm kırınımaların alüminyum ve WC fazlarına ait olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, sinterleme işlemi yaklaşık 600°C’de gerçekleştiği için XRD faz analizlerinde Al_4C_3 gibi istenmeyen ikincil fazların bulunmadığı anlaşılmaktadır.



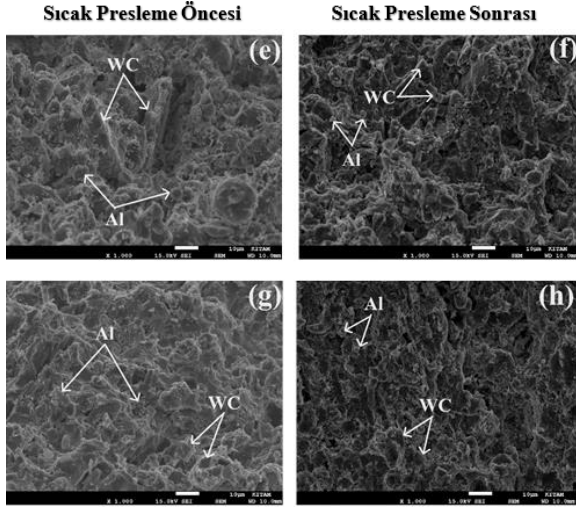
Şekil 8. Al7075 alaşımı ile Al7075-%30WC kompozitlere ait XRD faz analizleri

3.5 Kırık yüzey SEM ve SEM-EDX görüntülerinin analizi

Toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleri kullanılarak üretilen Al7075 alaşımı, Al7075-%6WC, Al7075-%15WC, Al7075-%30WC kompozitlerinin indüksiyonla sıcak presleme öncesi ve sonrası kırık yüzeylerine ait SEM görüntüleri Şekil 9’da verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde WC tozlarının kompozit yapı içerisinde homojene yakın bir şekilde dağıldığı tespit edilmiştir. WC takviye oranının artmasıyla birlikte gözenekliliğin azaldığı belirlenmiştir. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan kompozitlerde sıcaklıkla birlikte uygulanan basınç etkisiyle daha yoğun bir mikro yapının meydana geldiği gözlemlenmiştir.

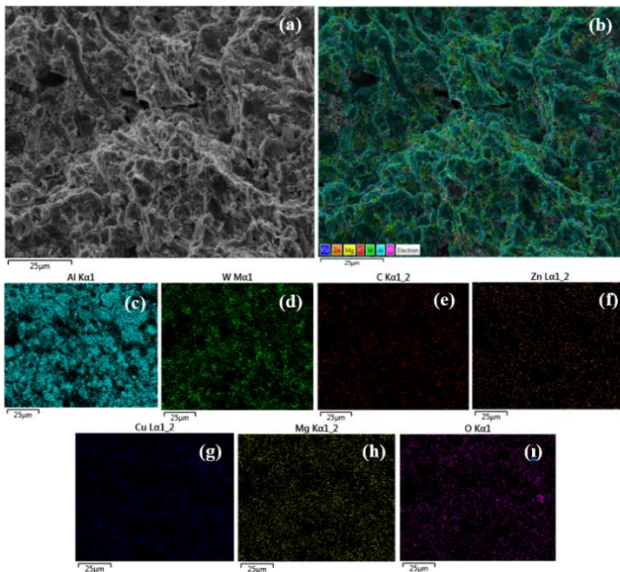


Şekil 9. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi: (a) Al7075 alaşımına, (c) Al7075-%6WC, (e) Al7075-%15WC, (g) Al7075-%30WC ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası: (b) Al7075 alaşımına, (d) Al7075-%6WC, (f) Al7075-%15WC, (h) Al7075-%30WC kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri



Şekil 9. (Devam) İndüksiyonla sıcak presleme öncesi: (a) Al7075 alaşımına, (c) Al7075-%6WC, (e) Al7075-%15WC, Al7075-%30WC ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası: (b) Al7075 alaşımına, (d) Al7075-%6WC, (f) Al7075-%15WC, (h) Al7075-%30WC kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri

Şekil 10'da Al7075-%30WC kompozit yapıya ait kırık yüzey SEM-Enerji Dağıtıcı X-ışını (EDX) görüntüsü, element dağılımları ve kantitatif element dağılım oranları Şekil 10'da sunulmuştur. Al7075-%30WC kompozit yapıdaki elementlerin (W, C, Al, Zn, Cu, Mg, O) her biri farklı renk ile gösterilmiştir. Mg, Al, Zn, Cu, Mg, O elementleri Al7075 alaşımının dağılımını, W ve C elementleri ise WC dağılımını ifade etmektedir. Şekil incelendiğinde WC partiküllerin homojene yakın bir şekilde dağıldığı ve bu durumun da mekanik dayanımı pozitif yönde etkilediği sonucuna varılmıştır. Al7075-%30WC kompozitin kantitatif element dağılım oranları incelendiğinde; tungsten ve karbon elementlerinin ağırlıkça ortalama %30-35 oranında mikroyapıda yer aldığı tespit edilmiştir.



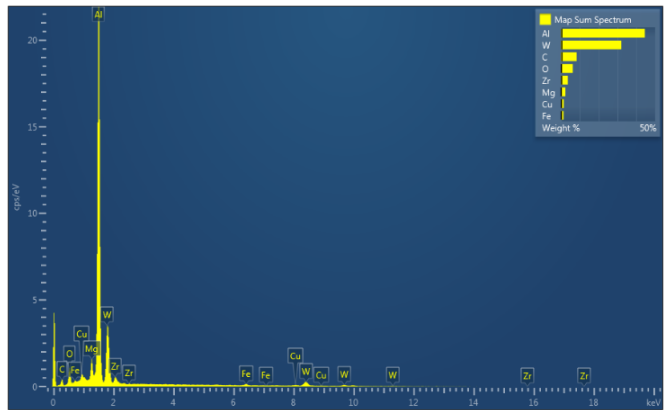
Şekil 10. Al7075-%30WC kompozit: (a) SEM görüntüsü, (b) SEM-EDX görüntüsü, (c-i) element dağılımları ve (i) kantitatif element dağılım oranları

Bu durum, katkı malzemesi olarak içyapıda yer alan WC partikülleriyle tutarlı olduğunu göstermektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleri kullanılarak Al7075 alaşımına ağırlıkça %1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 25 ve 30 oranlarında tungsten karbür (WC) takviyesi yapılarak Al7075-WC kompozitleri üretilmiştir. Üretilen bu kompozitlerin deneysel yoğunlukları, Vickers sertlik değerleri, basma dayanımları ve mikro yapıları detaylı şekilde incelenmiş ve elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- Tungsten karbür takviyeli Al7075 matrisli kompozitler arasında en yüksek deneysel yoğunluk (3.36 g/cm^3) ve en yüksek Vickers sertlik değeri (185 HV) indüksiyonla sıcak presleme uygulanmış Al7075-%30WC kompozitinde elde edilmiştir. Yalnızca sinterlenmiş Al7075-%30WC kompoziti ile Al7075 alaşımı karşılaştırıldığında; yoğunlukta yaklaşık %29 oranında artış ve Vickers sertlik değerinde %48.33 oranında artış belirlenmiştir. İndüksiyonla sıcak presleme uygulanmış Al7075-%30WC kompozit ile yalnızca sinterlenmiş Al7075 alaşımı karşılaştırıldığında ise; yoğunluk yaklaşık %30 ve sertlik değeri %54.2 oranında artmıştır. Her iki ısıtım işlem türünde de (sinterleme ve indüksiyonla sıcak presleme), tungsten karbür takviyesi ile sertlik değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Bu durum tungsten karbür partiküllerinin yüksek sertliği ve matris içinde homojen dağılmasıyla ilişkilidir. Ayrıca indüksiyonla sıcak presleme işlemiyle sertlik değerlerinin daha da arttığı görülmüştür. Bu artış sıcaklık ve basıncın etkisiyle yapıdaki gözeneklerin azalması ve yumuşak matris bölgelerine takviye elemanlarının daha etkili şekilde yerleşmesiyle açıklanabilmektedir.



- En yüksek basma dayanımı (491 MPa) indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%30WC kompozitte tespit edilmiştir. Sadece sinterlenmiş Al7075 alaşımına (285 MPa) kıyasla sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%30WC kompozitte basma dayanımı %72.3 oranında artmıştır.
- SEM analizleri, tungsten karbür partiküllerinin Al7075-%30WC kompozit yapı içerisinde homojene yakın bir şekilde dağıldığını göstermiştir. Ayrıca indüksiyonla sıcak preslenmiş kompozitlerde mikroyapının, sadece sinterlenmiş kompozitlere kıyasla daha yoğun olduğu gözlenmiştir.
- XRD faz analizleri sonucunda mevcut fazların tamamının Al7075 alaşımı ve tungsten karbür partikülleri ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Alüminyum ile tungsten karbür arasında reaksiyon sonucu oluşabilecek istenmeyen Al_4C_3 gibi ikincil fazlara rastlanmamıştır. Ayrıca indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan kompozitlerde sadece sinterlenmiş kompozitlere kıyasla mikro yapının daha yoğun olduğu tespit edilmiştir.
- Gerçekleştirilen ölçüm ve analizler sonucunda, Al7075-WC kompozitlerde en uygun WC takviye oranının ağırlıkça %30 olduğu belirlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, 124M230 kodlu Tübitak projesi tarafından desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Tübitak kurumuna teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

- [1] A. Taşkın, Al7075-Si₃N₄-grafen ve Al7075-B₄C-grafen hibrit kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2023.
- [2] M. C. Şenel, 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, Türkiye, 2018.
- [3] Ö. Yılmaz, Atık alüminyum içecek kutuları kullanarak Grafen/SiC takviyeli kompozitlerin üretimi ve mekanik karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [4] E. Tulgar, Demirdışı Metaller Metalurjisi. İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul, 1987.
- [5] V. Ş. Ekinci, Alümina takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzeme üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2007.
- [6] G. Soy, Alüminyum matrisli tungsten karbür ve grafen takviyeli üretim ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi.

- Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2022.
- [7] A. Babu, N. Balu, B. Ravi, Microstructure and mechanical properties of as-cast Al7075-tungsten carbide metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 18 (1), 413–419, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.319>.
 - [8] C. Fenghong, C. Chang, W. Zhenyu, T. Muthuramalingam, G. Anbuezhhiyan, Effects of silicon carbide and tungsten carbide in aluminium metal matrix composites. *Silicon*, 11, 2625–2632, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12633-018-0051-6>.
 - [9] D. Rajesh, P. Anand, N. Lenin, V. K. Bupesh Raja, K. Palanikumar, V. Balaji, Investigations on the mechanical properties of tungsten carbide reinforced aluminium metal matrix composites by stir casting. *Materials Today: Proceedings*, 46 (9), 3618–3620, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.634>.
 - [10] B. Raju, A. R. K. Swamy, A. Ramesha, Mechanical characterization of Al6061-tungsten karbür composites using powder metallurgy technique. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 4 (7), 325–331, 2019.
 - [11] K. Ravikumar, K. Kiran, V. S. Sreebalaji, Characterization of mechanical properties of aluminium/tungsten carbide composites. *Measurement*, 102, 142–149, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.01.045>.
 - [12] Ç. R. Daşkesen, Alüminyum matrisli B₄C takviyeli kompozit malzemeden açık hücreli metal köpük üretimi ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2021.
 - [13] M. E. Demir, Aramid fiber ve B₄C parçacık ile takviye edilmiş al7075 matrisli kompozitlerde haddelemenin ve yaşlandırmanın mekanik ve tribolojik özelliklere etkisi. Doktora Tezi, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2021.
 - [14] B. Şenyurt, Tungsten borür/tungsten karbür kompozit tozlarının tungsten oksit ve yerli bor oksit hammaddelerinden katı hal sentezleme yöntemi ile üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.
 - [15] M. Yadav, L. A. Kumaraswamidhas, A. Kumar, V. P. Singh, Study of Al-based composites reinforced with Al₂O₃ and WC: mechanical and surface properties. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2025. <https://doi.org/10.1080/01694243.2025.2555668>.
 - [16] T. A. Krylova, Y. A. Chumakov, Synthesis of Al–Mg–WC composite coating by relativistic electron beam. *Materials Letters*, 439, 1–3, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134822>.
 - [17] U. B. G. Krishna, B. Vasudeva, V. Auradi, M. Nagaral, Mechanical characterization and tensile fractography of Al7075-WCP-CoP composite. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 60, 283–290, 2022. <https://doi.org/10.321/IGF-ESIS.60.20>.
 - [18] T. V. Kishore, Al 7075 reinforced with WC metal

- matrix composites, Journal of Science and Technology, 4(2), 45-50.
- [19] E. Işık, Al7075-Al₂O₃-grafen ve Al7075-ZrO₂-grafen hibrit kompozitlerin mekanik, tribolojik özelliklerinin ve mikroyapısının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2023.
- [20] N. G. Guruchannabasavaiah, V. Auradi, B.M. Nandeeshaiiah, S.B. Boppana, B.N. Nishanth, Investigation on the microstructure and mechanical properties of aluminum 7075 reinforced with different weight percentage of tungsten carbide and cobalt metal matrix hybrid composites. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1013, 1-6, 2021.
- [21] W. Chen, T. Yang, L. Dong, A. Elmasry, J. Song, A. Elmarakbi, T. Liu, H. B. Lu, Y. Q. Fu, Advances in graphene reinforced metal matrix nanocomposites: mechanisms, processing, modelling, properties and applications. Nanotechnology and Precision Engineering, 3 (4), 189–210, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.npe.2020.12.003>.
- [22] M. C. Şenel, Ü. Mahmutoglu, Effect of induction heat treatment on the mechanical properties of Si₃N₄-graphene reinforced Al2024 hybrid composites. Bulletin of Materials Science, 45 (1), 1-17. 2022. <https://doi.org/10.1007/s12034-021-02638-5>.

