

## **Toz Metalürjisi ve Sıcak Preslemeyle Üretilen Karbon Nanotüp Katkılı Al6061 Matrisli Kompozitlerin Mikroyapısının ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması**

Mahmut Can ŞENEL<sup>1\*</sup> , Tülin ŞENBAŞ<sup>2</sup> 

### **Öz**

Alüminyum esaslı kompozitler; hafif olmaları, iyi ısı ve elektriksel iletkenliğe sahip olmaları, mekanik dayanımlarının yüksek olması sebebiyle çeşitli endüstriyel alanlarda (havacılık, otomotiv, uzay sanayi vb.) sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, toz metalürjisi ve sıcak presleme yöntemleriyle karbon nanotüp (KNT) katkı (ağırlıkça %0,1-0,5) Al6061 esaslı kompozitler üretilmiştir. Üretilen numunelerin faz yapısı ve mikroyapısı analiz edilip deneysel yoğunluğu, gözeneklilik oranı, sertliği ve basma dayanımı tespit edilmiştir. Yürütülen testler sonucunda Al6061 alaşımına kıyasla Al6061-%0,1KNT kompozitin sertliğinin ve basma dayanımının sırasıyla %10,2 ve %21 oranlarında iyileştiği görülmüştür. Sonuç olarak karbon nanotüp katkısının ağırlıkça belirli bir orana (%0,1) kadar mekanik özellikleri iyileştirdiği ve karbon nanotüpün alüminyum matrisli kompozitler için etkili bir takviye elemanı olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Al6061 alaşımı, Karbon nanotüp, Kompozit, Mikroyapı, Dayanım.

## **Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of Carbon Nanotube Reinforced Al6061 Matrix Composites Produced by Powder Metallurgy and Hot Pressing**

### **Abstract**

Aluminum-based composites are frequently utilized in various industrial areas (aviation, automotive, space industry, etc.) because they have lightweight structure, good thermal and electrical conductivity, and high mechanical strength. In this study, carbon nanotube (CNT) reinforced (0.1-0.5% by weight) Al6061 alloy matrix composites were fabricated via hot-pressing and powder metallurgy methods. The phase structure and microstructure of the produced specimens were analyzed, and their experimental density, porosity ratio, hardness, and compressive strength were determined. As a result of the performed tests, it was seen that hardness and compressive strength of the Al6061-0.1% CNT composite improved by 10.2% and 21%, respectively, compared with Al6061 alloy. Consequently, it is determined that carbon nanotube contribution up to a certain percentage (0.1wt.%) improves mechanical properties, and carbon nanotube is an effective reinforcement element for aluminum matrix composites.

**Keywords:** Al6061 alloy, Carbon nanotube, Composite, Microstructure, Strength.

<sup>1,2</sup>Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye, mahmutcan.senel@omu.edu.tr tulin\_senbas@hotmail.com

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

**Geliş/Received:** 16.01.2024

**Kabul/Accepted:** 13.05.2024

**Yayın/Published:** 18.06.2024

## 1. Giriş

Günümüzde kompozit malzemeler hemen hemen her alanda karşımıza çıkmaktadır. Bilinen en yaygın kullanım alanları; spor malzemeleri, elektrik-elektronik malzemeler, tıbbi cihazlar, uçak ve gemilerde kullanılan yapısal malzemeler şeklinde sıralanmaktadır. Kompozitler; farklı kimyasal ve fiziksel özellikleri barındıran iki veya daha fazla malzemenin birleşimiyle meydana gelen yeni tür malzemelerdir (Şahin, 2006). Bu tür malzemeler, tek bir malzemeyle elde edilemeyen özellikler sunmaları nedeniyle giderek daha fazla kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler takviye malzemesinin şekline göre; tabakalı, karma, fiber takviyeli, partikül takviyeli kompozitler olarak sınıflandırılabilir. Kompozitler ana malzemeye göre ise polimer, metal ve seramik esaslı kompozitler olarak sınıflandırılmaktadır (Chawla, 2006; Erdoğan, 2005).

Metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler, ana (matris) eleman olarak bir metalin (Al, Ti, Mg, Fe, Cu, vb.), takviye elemanı olarak da seramik ( $B_4C$ , SiC,  $Al_2O_3$ , BN,  $Si_3N_4$ , vb.) ve/veya karbon esaslı bir malzemenin (fulleren, karbon nanotüp, grafen, vb.) kullanıldığı kompozit yapılarıdır (Pul, 2010). Günümüzde en yaygın kullanılan matris eleman ise alüminyum ve alaşımlarıdır. Alüminyum ve alaşımları, kolay şekillendirilebilmeleri, yoğunluklarının düşük olması, elektrik ve ısı iletkenliklerinin iyi olması, mekanik dayanımlarının yüksek olması sebebiyle endüstriyel alanda MMK'lerde matris malzeme olarak tercih edilmektedir. Al6061 alaşımı içerisinde Fe, Ti, Mg, Al, Cu, Si, Zn, Cr, Mn gibi elementleri barındırmakta olup yüksek tokluğa, iyi korozyon dayanımına ve yüksek mukavemete sahip bir malzemedir. Bu sebeple, kazan imalatında, köprülerde, borularda, gemi inşa sektöründe, kamyon korkuluklarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Şahin 2014; Koli ve ark. 2012; Macke ve ark., 2012). Takviye elemanı olarak tercih edilen karbon nanotüp ise karbon atomlarının altıgen bir kafes yapısında düzenlendiği içi boş silindirik şeklindeki yapılarıdır. KNT malzemeler, yüksek ısı ve elektrik iletkenlik, kimyasal direnç, yüksek dayanım ve yüksek tokluk gibi özelliklere sahiptir. Bu üstün özellikler sayesinde KNT'ler elektronik cihazlarda, pillerde, sensörlerde, tıbbi cihazlarda, spor malzemelerinde ve otomotiv parçalarında tercih edilmektedir (Topcu, 2018).

Kompozit malzemeler farklı üretim yöntemleriyle (difüzyon bağlama, ekstrüzyon, sıvı infiltrasyon, toz metalürjisi, vb.) üretilebilmektedir. Bu yöntemler arasında toz metalürjisi (TM) yöntemi ön plana çıkmaktadır. TM yönteminin; karmaşık şekilli parçaların üretimi, yüksek dayanım ve tokluğa sahip parça üretimi, nihai şekle yakın ürün üretimi gibi avantajları vardır (German, 2005; Demir, 2022). Bu yöntem ile tozlar belli oranda karıştırılarak bir kalıp içerisinde preslenmekte ve şekillendirilmektedir. Sıkıştırma işleminden sonra numunelere mukavemet kazandırmak için numuneler ergime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta sinterlenir. Sonrasında daha yoğun bir mikroyapı

elde etmek amacıyla herhangi bir ikincil işlem (ekstrüzyon, haddeleme, sıcak presleme, vb.) uygulanarak üretim süreci sonlandırılır (Şenel ve ark., 2015).

Literatür incelendiğinde, karbon nanotüp katkılı alüminyum esaslı kompozitlerin özelliklerinin araştırılması konusunda literatürde farklı çalışmalara rastlanmıştır. Sridhar ve Narayanan yürüttükleri çalışmada, ağırlıkça %0,5-2 karbon nanotüp takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin mikroyapısını ve mekanik davranışını araştırmıştır. En üstün mekanik özellikler ağırlıkça %2KNT katkılı Al esaslı kompozit yapıda tespit edilmiştir. Saf alüminyumla karşılaştırıldığında çekme dayanımının ve Vickers sertliğinin sırasıyla; %87,5 ve %8,7 oranında arttığı belirlenmiştir (Sridhar ve Narayanan, 2009). Choi ve ark. yaptıkları çalışmada, karıştırıcı dönüş hızının (425, 520, 600 dev/dk) ve karıştırma süresinin (3, 6, 12 saat) hacimce %4,5 KNT katkılı Al matrisli kompozitlerin mikroyapısına ve mekanik davranışına etkisini araştırmıştır. En üstün mekanik özellikler 6 saatlik karıştırma süresinde ve 520 dev/dk'lık karıştırma hızında gözlemlenmiştir (Choi ve ark., 2012). Cao ve ark. yürüttükleri çalışmada, Al-KNT kompozitlerin yüksek sıcaklıklardaki çekme dayanımını araştırmıştır. Hacimce %5 KNT katkılı Al esaslı kompozitin 400°C'deki çekme dayanımının 205 MPa olduğu belirlenmiş olup literatürdeki benzer çalışmalara kıyasla kompozitin çekme dayanımının 100 MPa daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır (Cao ve ark., 2022). Raviathul Basariya ve ark. çalışmalarında, KNT katkılı Al matrisli kompozitlerde öğütme süresinin (0-50 saat) kompozitin mekanik özelliklerine olan etkisini incelemiştir. En yüksek sertliğe (436 HV) %2 KNT katkılı EN AW6082 matrisli kompozitte 50 saatlik öğütme süresinde ulaşılmıştır (Raviathul Basariya ve ark., 2014). Khan ve ark. yaptıkları çalışmada, karbon nanotüp (KNT: ağırlıkça %0,25-1) ve bor nitrid (BN: ağırlıkça %1-7) katkısının Al esaslı kompozitin mikroyapısına ve mekanik dayanımına olan etkisini araştırmıştır. %3 BN ve %0,5KNT katkısında en iyi mekanik özellikler elde edilmiştir. Saf alüminyuma kıyasla Al hibrit kompozitin çekme dayanımının %189 ve sertliğinin %106 oranında arttığı rapor edilmiştir (Khan ve ark., 2024). Dong ve ark. bakır kaplı karbon nanotüp takviyeli Al matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemiştir. En üstün mekanik özellikler %1,2 Cu kaplı KNT takviyeli Al esaslı kompozitte elde edilmiştir. Matris malzemeye kıyasla kompozitin basma dayanımının %53,5 ve akma dayanımının %39,3 oranında iyileştiği tespit edilmiştir (Dong ve ark., 2024). Mohammed ve Chen yaptıkları çalışmada alüminyum esaslı karbon nanotüp katkılı kompozitlerin KNT ve Al arasında gözlenen arayüz mekanizmalarını analiz etmiştir. Sonuç olarak kompozitin dayanımını artırmak için karbon nanotüpün etkili bir takviye malzemesi olduğunu ve mikroyapıda karbon nanotüpün homojen dağıtılmasının önemli olduğunu belirtmiştir (Mohammed ve Chen, 2019). Mansoor ve Shadid çalışmalarında, farklı karbon nanotüp katkı oranlarında (hacimce %0,1 ve %0,2) Al1199 matrisli kompozitlerin mikroyapısını ve mekanik davranışını araştırmıştır. Alüminyum alaşımıyla karşılaştırıldığında hacimce %0,2 KNT katkılı kompozitin sertliğinin ve çekme dayanımının sırasıyla ~%45 ve ~%52 oranlarında iyileştiği belirlenmiştir (Mansoor ve Shahid, 2016).

Yürütülen bu çalışma kapsamında, toz metalürjisi ve indüksiyon altında sıcak presleme yöntemleriyle ilk kez karbon nanotüp takviyeli Al6061 matrisli kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin sertliği, basma dayanımı, gözeneklilik oranı, yoğunluğu, mikroyapısı ve faz yapısı araştırılmıştır.

## 2. Malzeme ve Metot

Bu çalışma kapsamında, ana malzeme olarak Al6061 alaşım tozu, takviye malzeme olarak karbon nanotüp tozu kullanılmıştır. Al6061 alaşım tozu;  $\sim 2,7 \text{ g/cm}^3$  teorik yoğunluğa,  $\sim 10 \text{ }\mu\text{m}$  ortalama tanecik boyutuna ve %99 saflık derecesine sahip olup Nanografi firmasından temin edilmiştir. Al6061 alaşımında; Al, Si, Mg, Cu, Fe, Cr, Ti gibi alaşım elementleri yer almakta olup bu elementlerin %ağırlıkça dağılımı Tablo 1’de sunulmuştur. Temin edilen karbon nanotüp (KNT) tozu ise çok duvarlı bir yapıya sahip olup  $\sim 1,9 \text{ g/cm}^3$  teorik yoğunluğa,  $\sim 80 \text{ nm}$  dış çapa ve %98 saflığa sahiptir. Bu toz ticari olarak Nanografi firmasından satın alınmıştır.

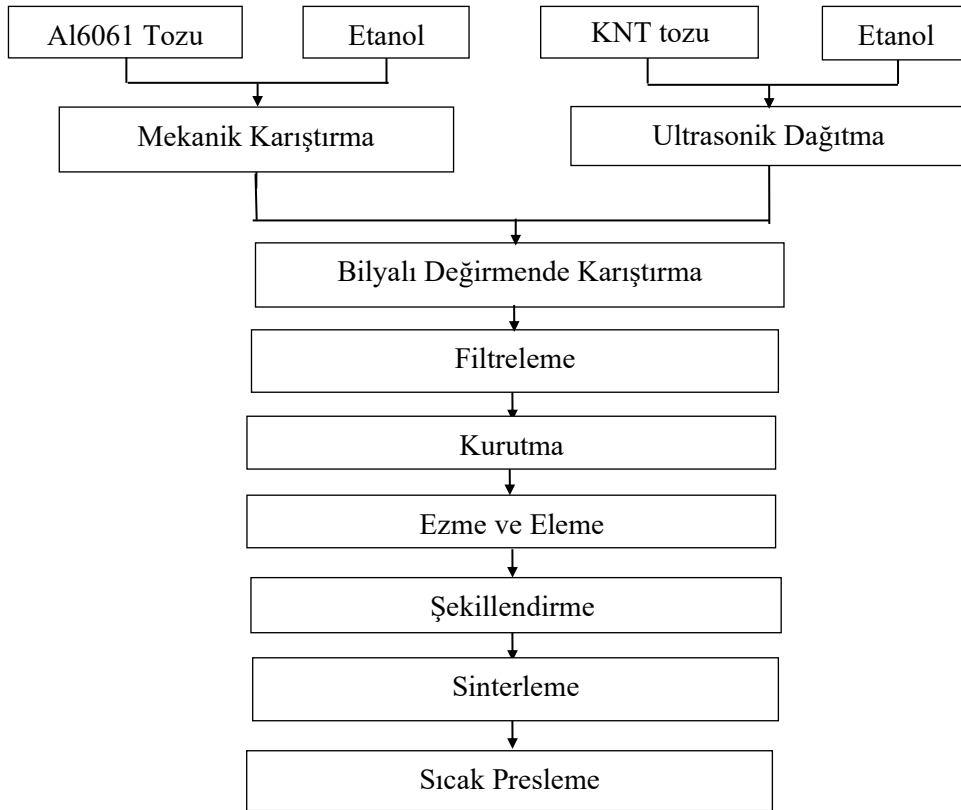
**Tablo 1.** Al6061 alaşımındaki elementlerin %ağırlıkça dağılımı [9].

Si	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	Cr	Ti	Diğer	Al
0,4-0,8	0,8-1,2	0,15-0,40	0,7	0,15	0,25	0,04-0,35	0,15	0,15	Kalan

Toz metalürjisi ve indüksiyon altında sıcak presleme yöntemi kullanılarak bu çalışmada Al6061-KNT kompozitler üretilmiştir (Şekil 1). İlk olarak Al6061 alaşım tozu etil alkol içerisinde 1 saat süresince mekanik karıştırıcıyla karıştırılmıştır. Eş zamanlı olarak karbon nanotüp tozu etil alkol içerisinde ultrasonik karıştırıcıyla dağıtılmıştır. Sonrasında KNT-etanol karışımı azar azar Al6061-etanol karışımına eklenmiştir. Tüm karışım yüksek enerjili bilyalı değirmende 600 dev/dk hızda 15 dk süresince karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra etil alkolü ayırıştırmak için karışıma filtreleme ve 16 saat süresince vakum altında etüvde kurutma işlemi uygulanmıştır. Kurutma işlemi sonrasında karışımdaki toprakları kırmak amacıyla toz karışımı agat havanda ezilerek elekte eleme işlemine tabi tutulmuştur. Al-KNT toz karışımı 700 MPa basınç altında tek eksenli hidrolik presle paslanmaz çelik kalıp içerisinde preslenmiştir. Böylece ham numuneler  $10 \times 10 \times 6 \text{ mm}$  boyutlarında üretilmiştir. Üretilen numuneler, sürekli vakumda  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta 60 dk boyunca tüp fırın içerisinde sinterlenmiştir. Kompozit malzemelere ait mikroyapıda tanelerin yaklaşmasını sağlamak ve birim alandaki tane sayısını artırmak amacıyla numuneler indüksiyon altında sıcak presleme işlemine tabi tutulmuştur. Bu aşamada indüksiyonla ısıtma makinesi ve hidrolik pres eş zamanlı kullanılarak sıcak presleme işlemi uygulanmıştır. İndüksiyonla ısıtma makinesi 50 Hz frekansa ve 25 kW çıkış gücüne sahip olup soğutma süresi 10 s, bekleme süresi 30 s ve ısıtma süresi 40 s olarak ayarlanmıştır. Bu sayede  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta sıcak presleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sıcak preslemede kullanılan

manuel hidrolik pres 10 ton kapasiteye sahip olup presleme işlemi 25 MPa basınç altında gerçekleştirilmiştir. Bu iki işlem (ısıtma ve presleme) hızlı bir şekilde (yaklaşık 1 dakikada) birlikte uygulanarak tane büyümesi olmaksızın ve oksidasyon oluşumuna fırsat vermeden numunelere ikincil işlem uygulanarak mukavemet kazandırılmıştır. Sıcak presleme sonrası ise numunelere zımparalama ve parlatma işlemi uygulanmıştır. Zımparalama işlemi için her bir numune sırasıyla 600, 1500 ve 2500 gritlik zımpara kağıtlarıyla 5 dk süresince zımparalanmıştır. Sonrasında elmas çuha üzerine 1 mikronluk elmas solüsyon püskürtülerek numuneler 30 dk süresince parlatılmıştır. Böylece numune üretim süreci tamamlanmıştır.

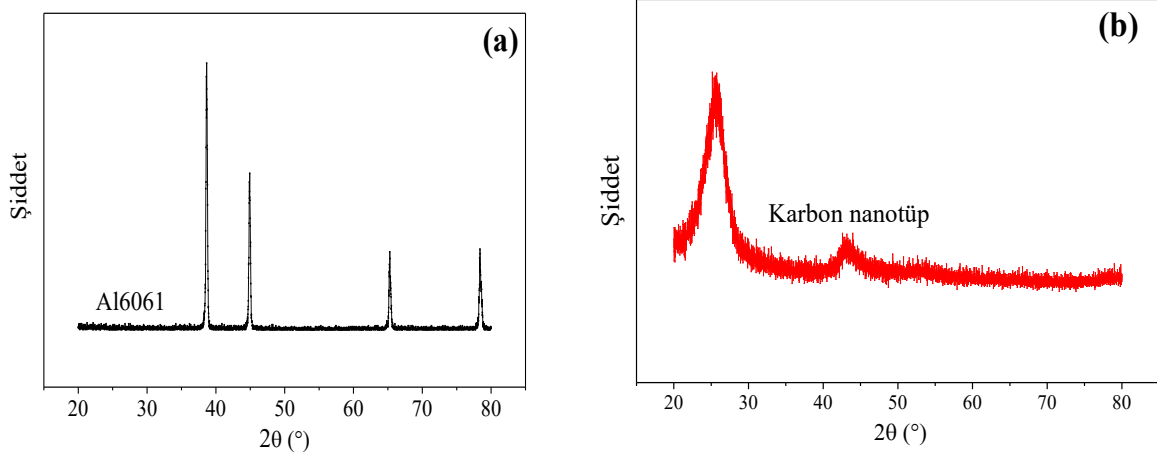
Üretilen numunelerin yoğunluğu Arşimet yoğunluk ölçüm kiti kullanılarak tespit edilmiştir. Numunelerin sertliği Vickers sertlik ölçüm cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Sertlik ölçümü, 200 gf yük altında 15 s'de gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümü için numune yüzeyinden en az sekiz noktanın sertlik değeri ölçülerek numunenin ortalama sertliği hesaplanmıştır. Numunelerin basma mukavemeti Mares tst-10t üniversal test makinesiyle test edilmiş olup basma hızı 2 mm/dk olarak belirlenmiştir. Numunelerin faz yapısı, Rigaku Smartlab model XRD ünitesiyle incelenmiştir. Üretilen numunelerin kırılmış yüzey görüntüleri ve toz morfolojileri Jeol JSM7001F model taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) analiz edilmiştir. Aynı mikroskobun Enerji Dağıtıcı X-Işını (EDX) modülü kullanılarak numuneye ait element dağılım haritaları elde edilmiştir.



Şekil 1. Karbon nanotüp takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin üretimine ait akış şeması.

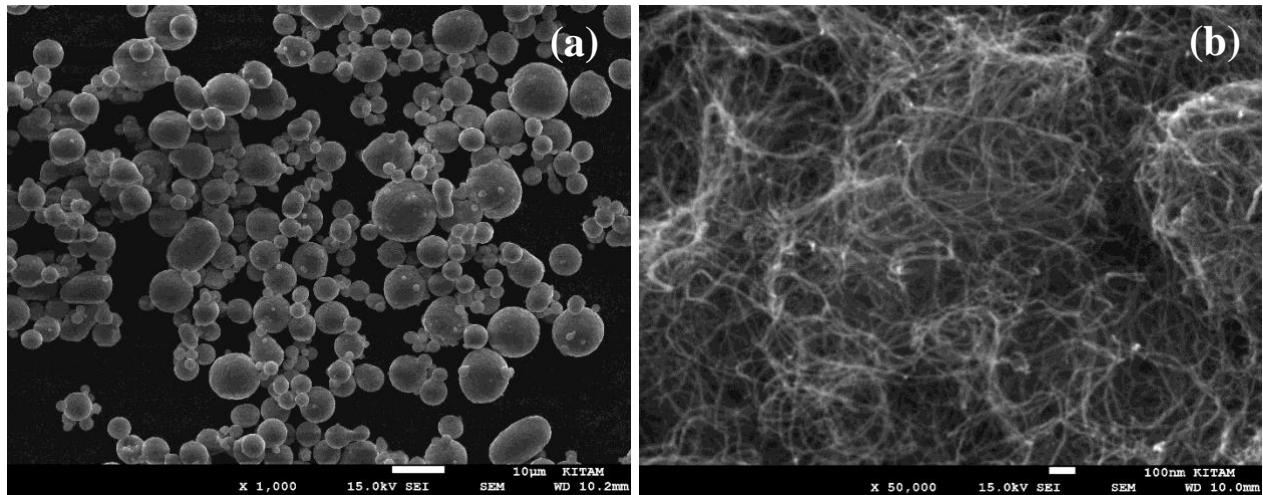
### 3. Bulgular ve Tartışma

Ticari olarak temin edilen Al6061 alaşım ve karbon nanotüp tozlarının faz yapısını belirlemek amacıyla X-ışını kırınımı faz analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Analizlerden karbon nanotüpün kırınım açısının  $27,2^\circ$  olduğu; Al6061 alaşımının kırınım açılarının  $38,3^\circ$ ,  $45,6^\circ$ ,  $65,7^\circ$ ,  $78,1^\circ$  olduğu belirlenmiştir. Bu analizlerden temin edilen tozların Al6061 alaşım ve karbon nanotüp tozları olduğu belirlenmiştir. Ayrıca üretilen kompozit malzemelerde faz yapılarının tespiti için bu analizler önem arz etmektedir.



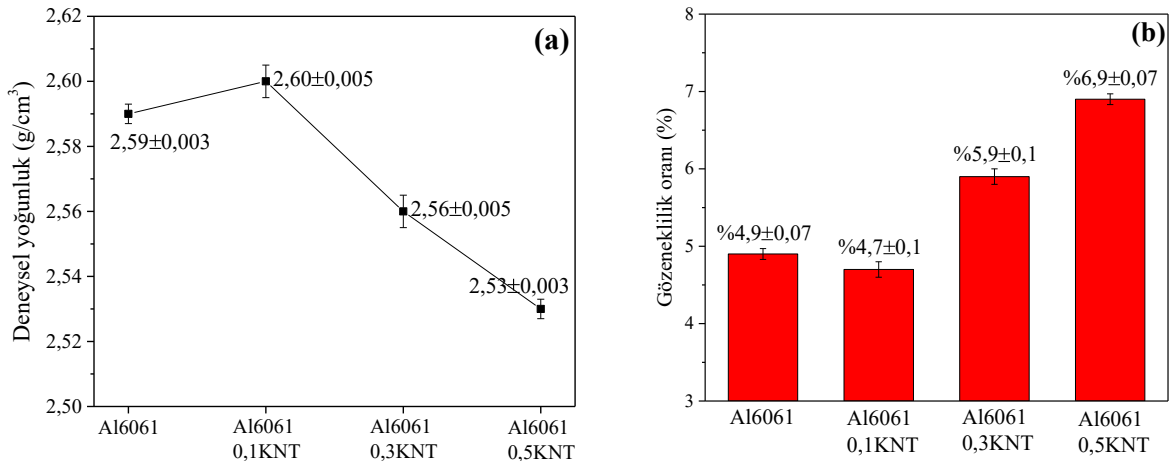
Şekil 2. Tozların X-ışını kırınımı analiz sonuçları: (a) Al6061 alaşım ve (b) karbon nanotüp.

Şekil 3'de Al6061 alaşım ve karbon nanotüp tozlarına ait SEM görüntüleri sunulmuştur. Bu görüntülerden Al6061 alaşım tozlarının küresele yakın bir morfolojiye sahip olduğu ve ortalama tanecik boyutunun  $10 \mu\text{m}$  olduğu gözlenmiştir (Şekil 3a). Karbon nanotüp tozlarının ise silindirik şeklinde sarılmış bir morfolojide olduğu ve uzunluklarının mikron altı seviyesinde olduğu görülebilmektedir (Şekil 3b).



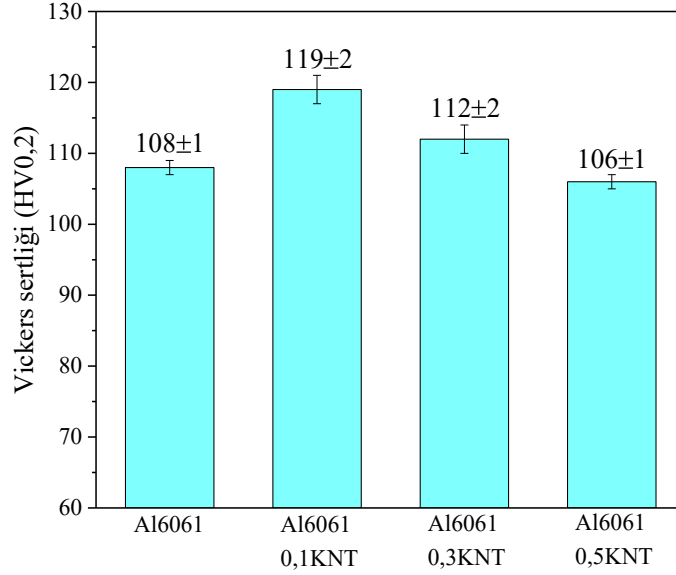
Şekil 3. Tozların SEM görüntüleri: (a) Al6061 alaşımı ve (b) karbon nanotüp.

Karbon nanotüp takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin gözeneklilik oranı ve deneysel yoğunluğu Şekil 4’de sunulmuştur. Alüminyum yapıya ağırlıkça %0,1’e kadar karbon nanotüp katkısının kompozitin yoğunluğunu arttırdığı ve gözeneklilik oranını düşürdüğü belirlenmiştir. Maksimum yoğunluk ( $2,60\pm 0,005$  g/cm<sup>3</sup>) ve minimum gözeneklilik oranı (%4,7±0,1) Al6061-%0,1KNT kompozit yapıda elde edilmiştir. Kompozit malzemede KNT katkı oranı ağırlıkça %0,5 olduğunda ise yoğunluğun  $2,53\pm 0,003$  g/cm<sup>3</sup> ve gözeneklilik oranının %6,9±0,07 seviyelerinde olduğu görülmüştür. Bu durumun, karbon nanotüpün muhtemel kümeleşmesinden ve KNT ile alüminyumun termal genleşme katsayılarının birbirinden çok farklı olmasından kaynaklandığı öngörülmektedir.



Şekil 4. Karbon nanotüp takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin (a) yoğunluk ve (b) gözeneklilik oranı.

Şekil 5’de karbon nanotüp katkılı Al6061 alüminyum esaslı kompozitlerin Vickers sertlik değerleri sunulmuştur. Testler sonucunda Al6061 alaşımının ortalama sertlik değeri  $108\pm 1$  HV olarak ölçülürken; Al6061-%0,1KNT kompozitin ortalama sertlik değeri  $119\pm 2$  HV değerine yükselmiştir. Matris yapıya ağırlıkça %0,1 karbon nanotüp katkısıyla numunenin sertliğinin %10,2 oranında arttığı belirlenmiştir. Bu artışta karbon nanotüpün sert karbon yapısının önemli bir etkisi olduğu düşünülmektedir. Kompozit yapıda KNT katkı oranı %0,3 ve %0,5 oranına çıktığında ise sertliğin hızla düştüğü tespit edilmiştir. Bu durum, karbon nanotüp partiküllerinin toplanarak birbiri üzerinde kaymasından kaynaklandığı öngörülmektedir.



Şekil 5. Karbon nanotüp takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin Vickers sertliği.

Kompozit yapıların sertliği ( $H_c$ ) karışım kuralı Denklem (1) ile ifade edilebilmektedir (Şenel, 2018).

$$H_c = H_a f_a + H_t f_t \quad (1)$$

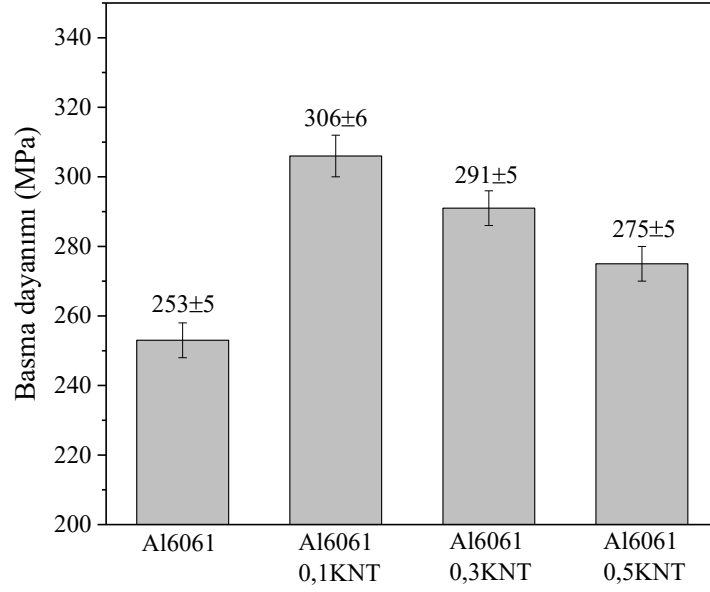
Bu eşitlikte,  $H_a$  ve  $H_t$  ana ve takviye elemanının sertliği,  $f_a$  ve  $f_t$  ana ve takviye elemanının hacimsel katkı oranıdır. Kompozitlerin sertliği ( $H_c$ ), dislokasyon yoğunluk mekanizması ile artırılabilir. Kompozit yapıda yoğunluğu artan dislokasyonlar birbirini zorlamakta ve malzemenin şekil değişimine karşı gösterdiği direnç yükselmektedir. Bu sayede, kompozit yapının sertliği artmaktadır (Şenel, 2018).

$$H_c = Gb\alpha\sqrt{\rho} + h\sqrt{td} \quad (2)$$

Burada  $b$  Burger vektörünü,  $\alpha$ ,  $h$ ,  $G$  malzeme sabitlerini ve  $\rho$  dislokasyon yoğunluğunu ifade etmektedir.

Karbon nanotüp katkılı Al6061 matrisli kompozitlerin basma dayanımı değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Al6061 alaşımının basma dayanımı  $253\pm 5$  MPa iken; Al6061-%0,1KNT kompozitin basma dayanımı  $306\pm 6$  MPa'dır. Al6061 alaşımıyla karşılaştırıldığında %0,1 karbon nanotüp katkılı kompozitin basma dayanımının %21 oranında iyileştiği belirlenmiştir. Bu artışın ısı işlem esnasında KNT'nin bir bariyer etkisi göstererek Al tane büyümesini engellemesinden kaynaklandığı öngörülmektedir. KNT katkısı %0,1'in üzerine çıktığında topaklanmış karbon nanotüp partiküllerinin plastik deformasyon sırasında kolay kayması sebebiyle basma dayanımı düşmüştür.





Şekil 6. Karbon nanotüp takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin basma dayanımı.

Kompozit yapılarda takviye elemanının mukavemeti ve boyutu üretilen kompozitin dayanımını etkilemektedir. Karbon nanotüp partiküller arasındaki mesafe Denklem (3) kullanılarak teorik olarak belirlenebilmektedir (Şenel ve Gürbüz, 2020).

$$\lambda = [4r(1 - f)]/(3r) \quad (3)$$

Bu eşitlikte  $r$  ve  $f$  sırasıyla karbon nanotüp partiküllerinin yarıçapı ve hacimsel katkı oranıdır. Karbon nanotüp katkı oranının artmasıyla alüminyum tanecikler arasındaki mesafe azalmaktadır. Al tanecikler arasındaki mesafe ( $\lambda$ ) ile kayma gerilmesi ( $\tau_0$ ) arasındaki ilişki Denklem (4)'de ifade edilmiştir (Şenel ve Gürbüz, 2020).

$$\tau_0 = Gb/\lambda \quad (4)$$

Burada  $G$  kayma modülünü ve  $b$  Burger vektörünü ifade etmektedir. Tanecikler arasındaki mesafenin azalmasıyla karbon nanotüp katkılı alüminyum matrisli kompozitin dayanımı da artmaktadır. Karbon nanotüp, Al yapı içerisinde bir engel gibi davranarak dislokasyon hareketini engellemekte ve bu durum da mukavemetin artışına sebep olmaktadır.

Kompozit yapıya yapılan takviyeler sonucunda mekanik özelliklerde tespit edilen iyileşme Denklem (5) ile ifade edilebilmektedir (Şenel, 2018).

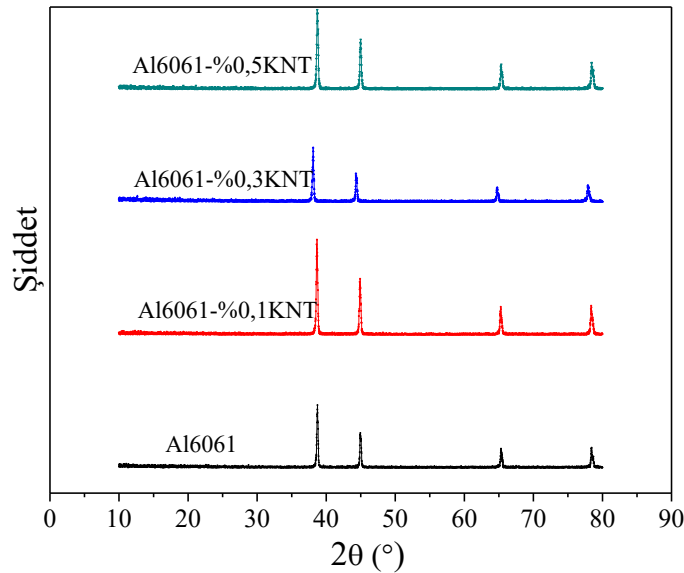
$$\sigma_c = \sigma_a f_a + \sigma_t f_t \quad (5)$$

Burada,  $\sigma_t$  ve  $\sigma_a$  takviye ve ana malzemenin mukavemetini,  $f_t$  ve  $f_a$  takviye ve ana malzemenin hacimsel katkı oranını belirtmektedir. Genel olarak teorik eşitliklerin A6061-KNT kompozitlere ait basma dayanımı test sonuçlarıyla tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Kompozitlerin dayanımını artıran bir diğer etken ise tane boyutudur. Yapı içerisindeki taneler daha ince bir forma getirildiğinde veya daha ince taneli bir malzeme yapıya ilave edildiğinde tane sınırı sayısı artmaktadır. Tane sınırı sayısının artması dislokasyonların hareketini zorlaştırmakta ve kompozitin mukavemetini artırmaktadır. Tane inceltme mekanizması olarak bilinen Hall-Petch denklemi (Denklem (6)) de Al kompozit yapıdaki mukavemet artışını ifade etmektedir. Bu eşitlikte  $\sigma_Y$  akma dayanımını,  $d$  ortalama tane çapını ve  $k$  ise malzeme sabitini vermektedir (Dieter, 1961).

$$\sigma_Y = kd^{-1/2} \quad (6)$$

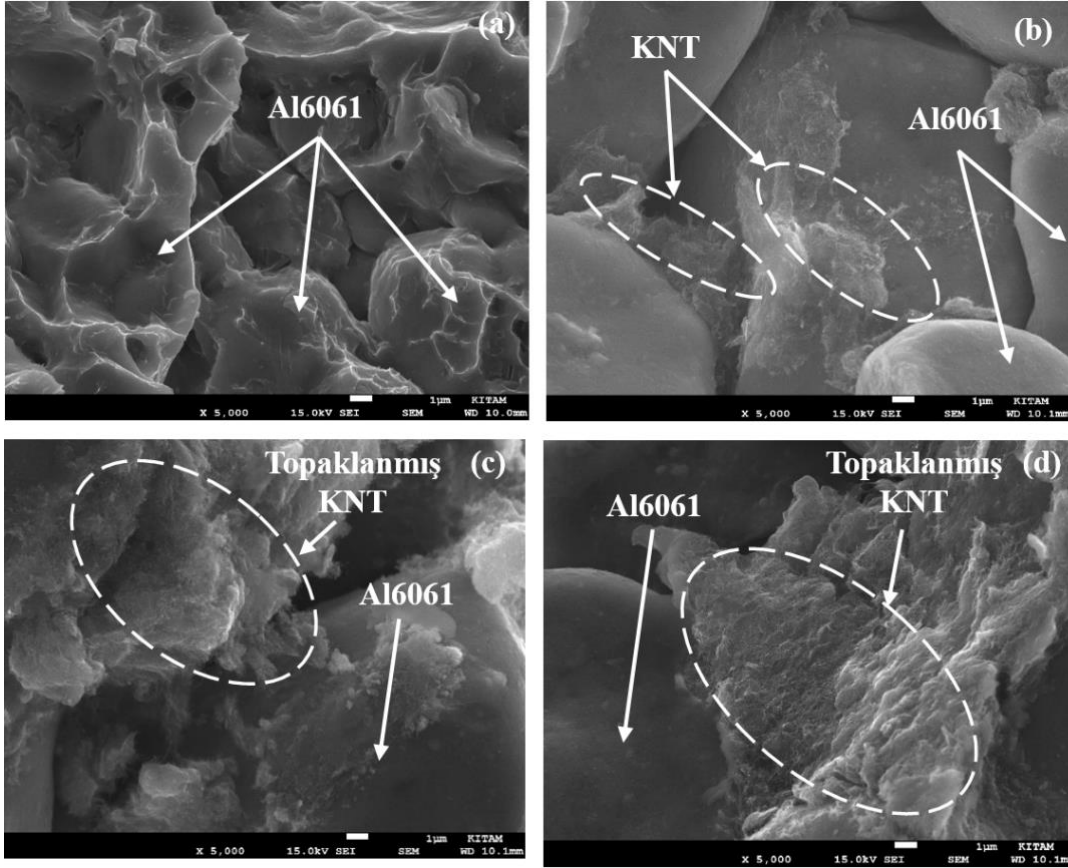
Al6061-KNT kompozitlerin XRD faz incelemeleri Şekil 7’de ortaya konulmuştur. Üretilen numunelere ait kırınım açıları incelendiğinde; tüm piklerin ( $2\theta=38,3^\circ$ ,  $45,6^\circ$ ,  $65,7^\circ$ ,  $78,1^\circ$ ) alüminyuma ait olduğu görülmüştür. XRD ünitesinin düşük hassasiyeti ve KNT’nin düşük takviye oranı nedeniyle kompozit yapıda karbon nanotüp pikine rastlanmamıştır. Ayrıca istenmeyen ikincil fazlar ( $Al_4C_3$ ) da gözlenmemiştir. Bu durum, ısıl işlemin ( $\sim 600^\circ C$ )  $Al_4C_3$  oluşum sıcaklığından ( $>830^\circ C$ ) daha düşük sıcaklıkta gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır (Şenel ve Gürbüz, 2020).



Şekil 7. Karbon nanotüp takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin XRD faz analizleri.

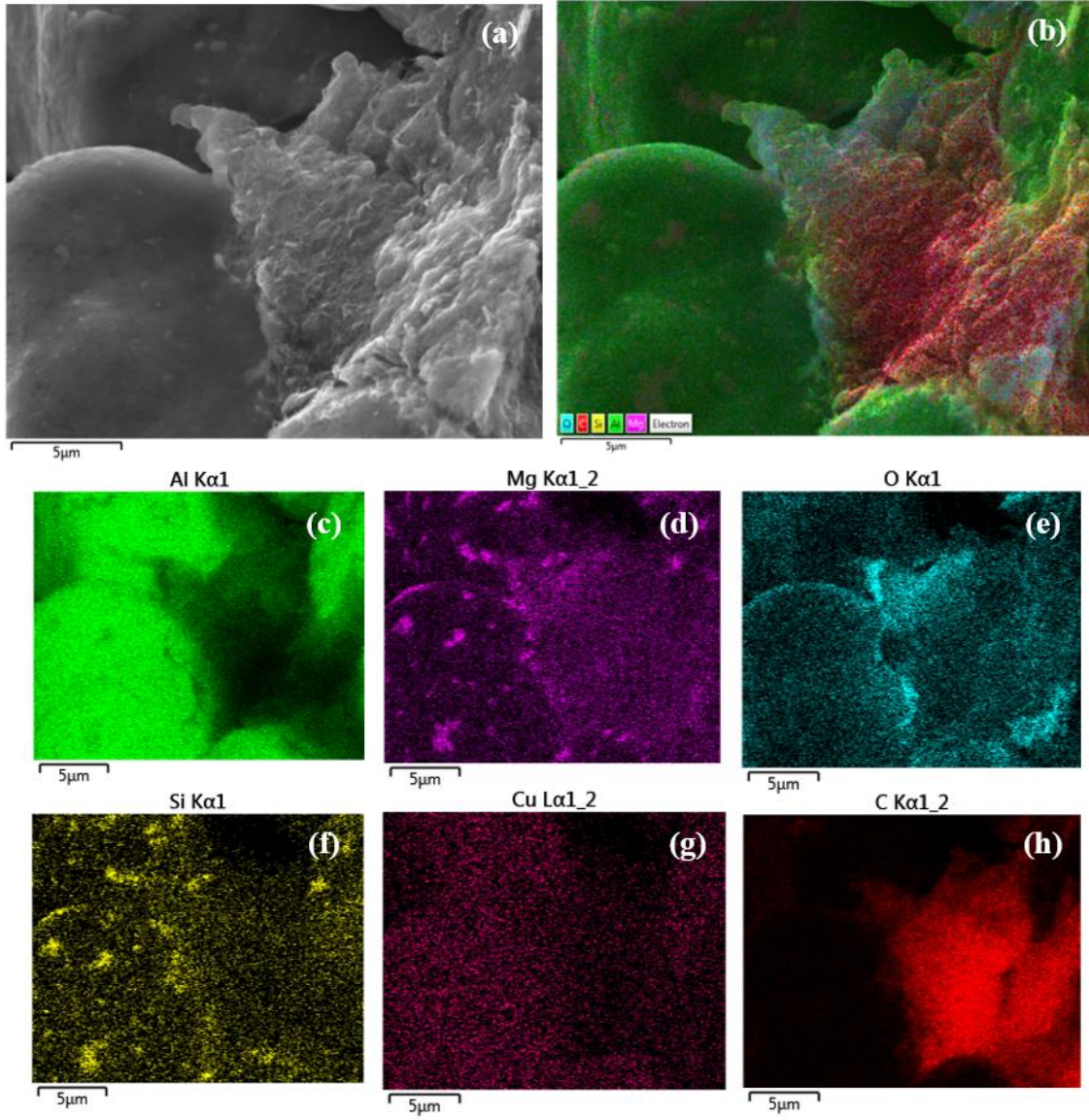
Şekil 8’de Al-KNT kompozitlere ve Al6061 alaşımına ait kırılmış yüzey görüntüleri verilmiştir. Kırık yüzey SEM görüntülerinden; mikroyapının oldukça yoğun olduğu ve numunelerin boyun vererek etkin bir şekilde ısıl işleme maruz kaldığı gözlemlenmiştir. Al-%0,1KNT kompozit yapıda

KNT partiküllerin homojene yakın dağıldığı belirlenmiştir. Bu homojen dağılımın dislokasyonların hareketini engellediği düşünülmektedir. Ağırlıkça %0,3 ve %0,5KNT katkısında karbon nanotüp partiküllerin üst üste yığılarak kümeleştiği görülmüştür. Bu durum, kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemiş olup mikroyapı incelemeleri ile mekanik test sonuçlarının tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır.



**Şekil 8.** Kompozitlerin kırılmış yüzey görüntüleri: (a) Al6061 alaşımı, (b) Al6061-%0,1KNT, (c) Al-%0,3KNT, (d) Al6061-%0,5KNT kompozitler.

Ağırlıkça %0,5 karbon nanotüp katkılı Al6061 matrisli kompozitlere ait SEM-EDX analizi Şekil 9’da sunulmuştur. Şekil incelendiğinde Al6061 alaşımının elementleri olan Al (yeşil renk), Mg (mor renk), Si (sarı renk) ve Cu (pembe renk) dağılımı rahatlıkla görülebilmektedir. Karbon (C) elementinin (kırmızı renk) dağılımı ise karbon nanotüpü temsil etmektedir. Element dağılımından karbon nanotüpün alüminyum tanecikler arasında istiflendiği ve bir bölgede yoğun bir şekilde kümeleştiği görülmektedir. Bu durum, nano yapılı KNT’nin tane sınırında birikerek matris ile takviye eleman arasında zayıf bir arayüzey bağı oluşmasına neden olmuştur. Sonuç olarak da Al-%0,5KNT kompozitin mukavemeti ve sertliği düşmüş, gözeneklilik oranı ise artmıştır.



**Şekil 9.** Al6061-%0,5KNT kompozit yapıya ait (a) SEM, (b) SEM-EDX görüntüsü ve (c-h) element dağılım haritaları.

#### 4. Sonuçlar ve Öneriler

Yürütülen bu çalışmayla, karbon nanotüp katkılı Al6061 esaslı kompozitler toz metalürjisi ve sıcak presleme yöntemleriyle üretilerek kompozitlerin mikroyapısı, gözeneklilik oranı, yoğunluğu, basma dayanımı ve sertliği incelenmiştir. Analizler ve testler neticesinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Yürütülen fiziksel ve mekanik testler sonucunda; en düşük gözeneklilik oranı, en yüksek yoğunluk, sertlik ve basma dayanımı ağırlıkça %0,1KNT katkılı Al6061 esaslı kompozitte elde edilmiştir. Al6061 alaşımına kıyasla Al6061-%0,1KNT kompozitin sertliğinin %10,2 ve basma dayanımının %21 oranında iyileştiği belirlenmiştir. Katkı malzemesi olarak kullanılan karbon nanotübün sert ve rijit yapısının bu artışta etkili olduğu düşünülmektedir.

- XRD faz analizlerinden; numunelere ait faz yapılarındaki tüm piklerin alüminyuma ait olduğu gözlemlenmiştir.  $Al_4C_3$  gibi ısı işlem etkisiyle oluşabilecek istenmeyen ikincil fazlara rastlanmamıştır. Karbon nanotüp pikinin görülmemesi düşük cihaz hassasiyetinden ve karbon nanotüpün düşük katkı oranlarında kullanılmasından kaynaklanmaktadır.
- Mikroyapı incelemelerinden; mikroyapının oldukça yoğun olduğu ve karbon nanotüpün tane sınırlarına yerleştiği gözlemlenmiştir. Al6061-%0,1KNT kompozit yapıda karbon nanotüpün homojene yakın bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Bu durum da dislokasyonların hareketini zorlaştırarak mekanik dayanımı artırmaktadır. Ağırlıkça %0,3 ve %0,5 karbon nanotüp katkısında ise karbon nanotüpün kümeleştiği ve bu durumun mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir.

Sonuç olarak, Al6061 matrise ağırlıkça %0,1'e kadar karbon nanotüp katkısının numunenin mekanik davranışını ve mikroyapısını olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir.

### **Teşekkür**

Bu çalışmada, SEM ve XRD analizi konusunda vermiş olduğu destekten dolayı Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'ne (KİTAM) teşekkür ederiz. Yürütülen çalışma PYO.MUH.1901.22.008 kodlu proje ile Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından desteklenmiştir.

### **Yazarların Katkısı**

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

### **Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı**

Yazarlar, makalenin tüm süreçlerinde "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, karşılaşılabilecek etik ihlallerden Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi ve yayın kurulunun herhangi bir sorumluluğunun bulunmadığını, bu çalışmanın Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi dışında herhangi bir akademik yayın ortamında değerlendirilmediğini beyan ederler.

## Kaynaklar

- Cao, L., Chen, B., Wan, J., Kondoh, K., Guo, B., Shen, J., and Li, J.S., (2022). Superior high-temperature tensile properties of aluminum matrix composites reinforced with carbon nanotubes. *Carbon*, 191, 403-414.
- Chawla, K.K., (2006). *Composite Materials*, New York: Springer.
- Choi, H.J., Shin, J.H., and Bae, D.H., (2012). The effect of milling conditions on microstructures on microstructures and mechanical properties of Al/MWCNT composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43, 1061-1072.
- Demir, M., (2022). *İndüksiyonla sıcak işlemin grafen ve/veya  $Si_3N_4/B_4C$  takviyeli Al6061 esaslı kompozitlerin mekanik, tribolojik özelliklerine ve mikroyapısına olan etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Samsun.
- Dieter, G.E., (1961). *Mechanical Metallurgy*. UK: McGraw-Hill.
- Dong, X., Zeng, M., and Yan, H., (2024). Microstructure and mechanical properties of Cu-coated carbon-nanotubes-reinforced aluminum matrix composites fabricated by ultrasonic-assisted casting. *Metals*, 14(3), 1-17.
- Erdoğan, M., (2005). *Çelik takviyeli alüminyum kompozit üretimi ve mekanik özelliklerinin deneysel incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- German, R. M., (2005). *Powder metallurgy and particulate materials processing*. New Jersey: Princeton University Press.
- Khan, M.A., Uz Zaman, A., Khan, K.I., Karim, M.R.A., Hussain, A., and Haq, E., (2024). Synergistic effects of carbon nanotubes (CNTs) and white graphite (h-BN) on the microstructure and mechanical properties of aluminum matrix composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-14.
- Koli, D.K., Agnihotri, G., and Purohit, R., (2012). Advanced aluminium matrix composites: the critical need of automotive and aerospace engineering fields. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 3032-3041.
- Macke, A., Schultz, B.F., and Rohatgi, P., (2012). Metal matrix composites offer the automotive industry an opportunity to reduce vehicle weight improve performance. *Advanced Materials&Proceedings*, 170, 19-23.
- Mansoor, M., and Shahid, M., (2016). Carbon nanotube-reinforced aluminum composite produced by induction melting. *Journal of Applied Research and Technology*, 14(4), 215-224.
- Mohammed, S.M.A.K., and Chen, D.L., (2019). Carbon nanotube reinforced aluminum matrix composites. *Advanced Engineering Materials*, 22, 1-26.
- Raviathul Basariya, M., Srivastava, V.C., and Mukhopadhyay, N.K., (2014). Microstructural characteristics and mechanical properties of carbon nanotube reinforced aluminum alloy composites produced by ball milling. *Materials and Design*, 64, 542-549.
- Sridhar, I., and Narayanan, K.R., (2009). Processing and characterization of MWCNT reinforced aluminum matrix composites. *Journal of Materials Science*, 44, 1750-1756.
- Şahin, İ., (2014). Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin matkap ile delinmesi konusunda yapılan çalışmaların incelenmesi. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 55(649), 9-16.
- Şahin, Y., (2006). *Kompozit malzemelere giriş*, Ankara: Seçkin Yayınevi.
- Şenel, M.C., Gürbüz, M., ve Koç, E., (2015). Grafen takviyeli alüminyum matrisli yeni nesil kompozitler. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 56(669), 36-47.
- Şenel M.C., and Gürbüz, M., (2020). Investigation on mechanical properties and microstructure of  $B_4C$ /graphene binary particles reinforced aluminum hybrid composites. *Metals and Materials International*, 27, 2438-2449.
- Şenel, M.C., Gürbüz, M., and Koç, E., (2018). Mechanical and tribological behaviors of aluminum matrix composites reinforced by graphene nanoplatelets. *Journal of Materials Science and Technology*, 34(16), 1980-1989.
- Pul, M., (2010). *Al matrisli MgO takviyeli kompozitlerin infiltrasyon yöntemi ile üretilmesi ve işlenebilirliğinin değerlendirilmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Topcu, I., (2018). Karbon nanotüp takviyeli alüminyum matrisli AlMg/KNT kompozitlerinin mekanik davranışlarının incelenmesi. *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4(1), 99-109.