



Mahmut Can Şenel

Ondokuz Mayıs University, mahmutcan.senel@omu.edu.tr, Samsun-Turkey

DOI	http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2021.16.1.1A0467
ORCID ID	0000-0001-7897-1366
CORRESPONDING AUTHOR	Mahmut Can Şenel

**ÇOK KATMANLI KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ ALÜMİNYUM ESASLI KOMPOZİTLERİN
MEKANİK ÖZELLİK VE MİKROYAPI İNCELEMESİ**

ÖZ

Bu çalışmada, toz metalürjisi prosesi kullanılarak çok katmanlı karbon nanotüp takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemeler üretilmiştir. Karbon nanotüp katkı oranının (ağırlıkça %0.15, 0.30 ve 0.45) alüminyum esaslı kompozitlerin mikroyapısı, deneysel yoğunluğu, gözenekliliği, basma dayanımı ve Vickers sertliği üzerine olan etkisi incelenmiştir. Toz metalürjisi yöntemi; karıştırma, ultrasonik dağıtma, kurutma, süzme, sinterleme ve şekillendirme işlemlerinden oluşmaktadır. Numunelerin kristal yapısı ve mikroyapısı X-ışını kırınımı cihazı ve taramalı elektron mikroskopuyla incelenmiştir. En iyi mekanik özellikler ağırlıkça %0.3 karbon nanotüp katkılı alüminyum esaslı kompozit yapıda elde edilmiştir. Test sonuçlarına göre; saf alüminyuma kıyasla ağırlıkça %0.3 katkılı alüminyum esaslı kompozitin basma dayanımının ~%72. Vickers sertliğinin ~%38 ve deneysel yoğunluğunun ~%2 oranında iyileştiği tespit edilmiştir. Ağırlıkça %0.30 katkı oranının üzerinde ise taramalı elektron mikroskobu altında gözlemlenen karbon nanotüplerin topaklanması sebebiyle Al-KNT kompozitlerin mekanik dayanımının kötüleştiği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Karbon Nanotüp, Alüminyum, Kompozit,
Toz Metalürjisi, Mikroyapı

**INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF ALUMINUM
BASED COMPOSITES REINFORCED WITH MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES**

ABSTRACT

In this study, aluminum based composites reinforced with multi-walled carbon nanotube were produced by the powder metallurgy method. The effect of carbon nanotube amount (0.15, 0.30, and 0.45wt.) on the microstructure, apparent density, porosity, compressive strength, and Vickers hardness of the aluminum based composites was examined. The powder metallurgy route consists of mixing, ultrasonic dispersing, drying, filtration, sintering, and pressing processes. The microstructure and crystal structure of specimens were examined by X-ray diffractometer and scanning electron microscopy, respectively. The highest mechanical properties were obtained at aluminum based composite reinforced with 0.3wt. carbon nanotube. The test results showed that the compressive strength, Vickers hardness, and apparent density of 0.3wt. carbon nanotube reinforced aluminum based composites were improved by ~72%, ~38%, and ~2% compared with those of pure aluminum, respectively. It was detected that the strength of carbon nanotube reinforced aluminum based composites are thought to be deteriorated because of the segregation or accumulation clustering carbon nanotubes observed under the scanning electron microscope.

Keywords: Carbon Nanotube, Aluminum, Composite, Powder Metallurgy, Microstructure

How to Cite:

Şenel, M.C., (2021). Çok Katmanlı Karbon Nanotüp Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özellik ve Mikroyapı İncelemesi, Engineering Sciences (NWSAENS), 16(1):39-48, DOI: 10.12739/NWSA.2021.16.1.1A0467.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzdeki metalik malzemelerden istenilen mekanik, ısı ve tribolojik özellikler ihtiyaçları karşılayamayacak duruma gelmiştir. Bu yüzden yeni nesil ve fonksiyonel kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Kompozit malzemeler matris (ana) malzemeye göre; polimer, seramik veya metal esaslı kompozitler şeklinde sınıflandırılabilir. Metal esaslı kompozitlerde; bakır (Cu), magnezyum (Mg), alüminyum (Al), titanium (Ti) ve alaşımları ana (matris) malzeme olarak kullanılabilir. Silisyum nitrür (Si_3N_4), silisyum karbür (SiC), bor karbür (B_4C), bor nitrür (BN), alümina (Al_2O_3) gibi seramik malzemeler ile grafen, grafit, karbon nanotüp (KNT) gibi karbon esaslı malzemeler ise takviye elemanı olarak kullanılabilir [1, 2, 3 ve 4]. Metal matrisli kompozitlerde matris malzeme olarak en fazla alüminyum ve alaşımları tercih edilmektedir. Alüminyumun yoğun bir şekilde kullanımında; yüksek tokluk, iyi işlenebilirlik, düşük yoğunluk ($\sim 2.69 \text{ g/cm}^3$), iyi elastisite (Young) modülü ($\sim 68 \text{ GPa}$) ve yüksek korozyon direnci etkilidir. Bu sayede alüminyum esaslı malzemeler; otomotiv, imalat, havacılık ve uzay sanayinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [5, 6, 7, 8 ve 9]. Kompozit yapılarda takviye elemanı olarak kullanılan karbon nanotüp, nanometre ölçeğinde bir dış çapa sahip olup silindirik tüp şeklinde bir morfolojidedir. Karbon esaslı malzemelerden biri olan karbon nanotüp, katman sayısına, katmanların kalınlığına ve uzunluğuna bağlı olarak tek katmanlı karbon nanotüpler, çok katmanlı karbon nanotüpler ve çift katmanlı karbon nanotüpler şeklinde sınıflandırılmaktadır. Karbon nanotüpler, sıradışı atomik yapısı ve üstün özellikleri sebebiyle araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Olağanüstü mekanik özelliklerinin yanı sıra, karbon nanotüp son derece yüksek bir en-boy oranına, mükemmel kimyasal kararlılığa, üstün ısı ve elektriksel özelliklere sahiptir. Sahip olduğu bu mükemmel özellikler sayesinde karbon nanotüp, alüminyum matrisli takviye elemanı olarak yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [10, 11, 12 ve 13].

Literatürdeki çalışmalar araştırıldığında; karbon nanotüp takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin mikroyapısının incelenmesi ve mekanik dayanımının belirlenmesi üzerine birçok çalışmanın olduğu görülmektedir. Mansoor ve Shadid çalışmalarında, AA1199 alüminyum alaşıma hacimce %0.1 ve %0.2 oranında çok katmanlı karbon nanotüp katkısı yaparak üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerini ve mikroyapılarını incelemiştir. AA1199 alüminyum matrisli oranla hacimce %0.2 çok katmanlı karbon nanotüp katkılı kompozitin çekme dayanımının ~ 52 ve Vickers sertliğinin ~ 45 oranında iyileştiğini tespit etmiştir [14]. Mohammed ve Chen çalışmalarında karbon nanotüp takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin üretim yöntemlerini, alüminyum ve karbon nanotüp arasındaki arayüz mekanizmalarını incelemiştir. Çalışma neticesinde karbon nanotübün mukavemet artırmada iyi bir takviye elemanı olduğu ve mikroyapı içerisinde dağıtılmasının önemli bir parametre olduğu ortaya konulmuştur [15]. Sridhar ve Narayanan çalışmalarında, karbon nanotüp (ağırlıkça %0.5, 1, 2) takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini ve mikroyapılarını incelemiştir. En iyi mekanik özellikler Al-%2KNT kompozit yapıda elde edilmiş olup saf alüminyuma kıyasla Vickers sertliğinin ~ 9 ve çekme dayanımının ~ 88 oranında arttığı belirlenmiştir [16]. Choi ve ark. çalışmalarında, öğütme süresinin (3, 6, 12 saat) ve öğütücü dönüş hızının (425, 520, 600 dev/dk) Al-KNT (hacimce %4.5 KNT katkılı) kompozitlerin mekanik özellikleri ve mikroyapıları üzerine olan etkisini incelemiştir. En iyi mekanik özellikler 520 dev/dk öğütücü dönüş hızında ve 6 saat öğütme süresinde elde edilmiştir [17].

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Bu çalışmada, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak toz metalürjisi yöntemiyle oldukça düşük katkı oranlarında (%0.15, 0.30 ve 0.45) karbon nanotüp katkılı saf alüminyum matrisli kompozitler üretilerek mekanik ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Yürütülen bu çalışmayla, karbon nanotüp katkı oranının üretilen kompozitlerin mikroyapısı, basma dayanımı, sertliği, gözeneklilik oranı ve deneysel yoğunluğu üzerine olan etkisinin araştırılması amaçlanmaktadır.

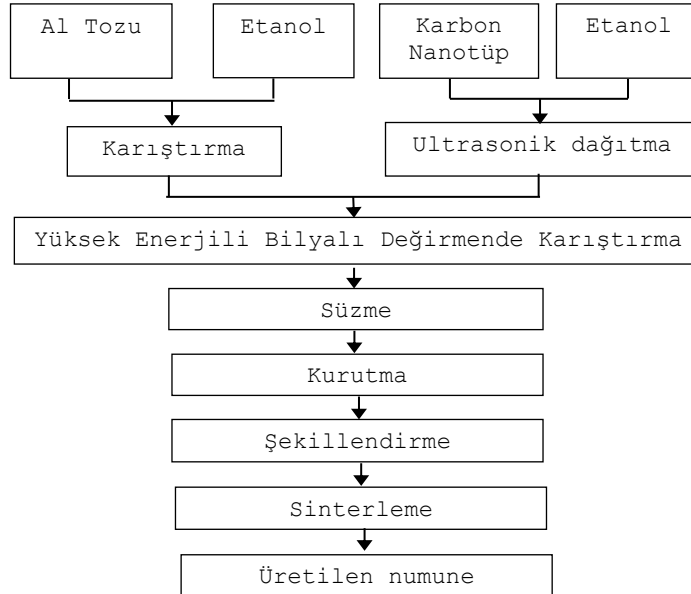
3. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

3.1. Materyal (Material)

Yürütülen çalışma kapsamında Al-KNT kompozit malzeme üretiminde ana malzeme olarak alüminyum (%99 saflıkta ve 8-15 µm partikül boyut aralığında) ve takviye malzemesi olarak çok katmanlı karbon nanotüp (%98 saflıkta ve boyut olarak 8-18 nm dış çap, 0.5-20 µm uzunluğa sahip) kullanılmıştır. Saf alüminyum tozu Alfa Aesar firmasından (Birleşik Krallık) ve karbon nanotüp partikülleri ise Nanografi (Türkiye) firmasından temin edilmiştir.

3.2. Yöntem (Method)

Al-KNT kompozitlerin toz metalürjisi yöntemiyle üretimine ait akış diyagramı Şekil 1'de verilmiştir. Bu yöntemde, ilk olarak Al tozları etanol içerisinde mekanik karıştırıcıyla 1 saat süresince karıştırılır. Eş zamanlı olarak KNT partikülleri, etanol içerisinde ultrasonik karıştırıcıyla dağıtılır. KNT-etanol çözeltisi Al-etanol çözeltisine eklenerek 1 saat süresince yüksek enerjili bilyalı değirmende karıştırma işlemine tabi tutulur. Karışımdan etanolü ayırmak için karışım süzülür ve 50°C sıcaklıkta vakum altında bir etüv içerisinde 12 saat süresince kurutulur. Kurutulan toz karışımı, bir kalıp içerisinde tek eksenli preste 650 MPa basınç altında şekillendirilerek ham kompozit numuneler üretilir. Şekillendirme sonrası numuneler, bir tüp fırında vakum altında 180 dk süresince ve 630°C sıcaklıkta sinterlenir. Sinterlenen kompozit malzemeler 600 ve 1500 gritlik zımpara kağıtlarıyla zımparalanıp 1 µm'lik elmas solüsyon emdirilmiş çuha üzerinde parlatılır. Böylece, 10x10x5 mm boyutlarında kare kesitli numunelerin üretim süreci tamamlanır.



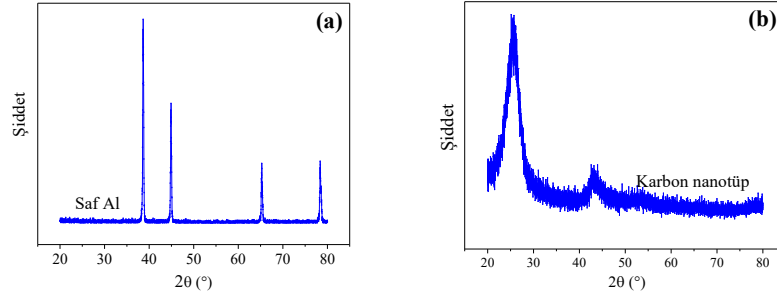
Şekil 1. Al-%0.3KNT kompozitlerin üretim şeması [18 ve 19]
(Figure 1. Fabrication scheme of Al-0.3%CNT composites)

Tozların ve kompozitlerin mikroyapısı taramalı elektron mikroskopuyla (SEM, Jeol JSM 7001F) incelenmiştir. Rigaku Smartlab model X-ışını kırınımı (XRD) cihazı kullanılarak kompozitlerin faz analizi ($20-80^{\circ}$ kırınım açısı aralığında) gerçekleştirilmiştir. Arşimet yoğunluk ölçüm aletiyle numunelerin yoğunluğu, Vickers sertlik ölçüm cihazıyla (HV1000B) sertliği belirlenmiştir. Vickers sertlik değeri, 15 s süresince ve 200 gf yük altında gerçekleştirilmiş olup numune yüzeyinin farklı noktalarından en az 5 sertlik verisinin ortalaması alınarak tespit edilmiştir. Numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla basma testi gerçekleştirilmiş olup numunelerin basma dayanımı, 5mm/dk basma hızında Mares Test-10t universal test makinasıyla belirlenmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSIONS)

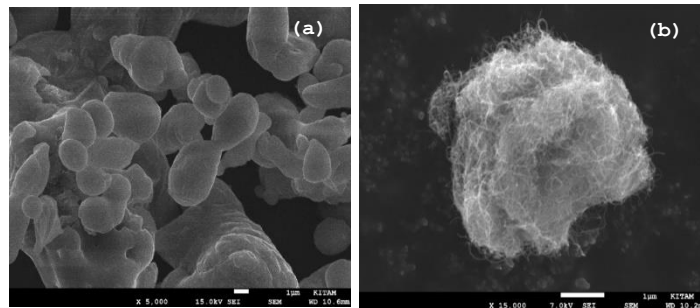
4.1. Toz Karakterizasyonu (Powder Characterization)

Saf Al ve KNT tozlarına ait X-ışını kırınımı (XRD) analizi Şekil 2'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere kırınım açılarının; karbon nanotüp için $2\theta \sim 25.8^{\circ}$, 44.1° ve saf alüminyum için $2\theta \sim 39^{\circ}$, 45° , 65° , 78° olduğu tespit edilmiştir. Bu analiz, sinterlenen kompozitlerin fazlarını tespit etmek amacıyla gerçekleştirilmektedir. Ayrıca bu analiz, sinterleme sonrası metal matrisli kompozitlerde takviye elemanı ve matris malzeme arasında oluşabilecek ikincil fazlar (Al_4C_3) hakkında da bilgi vermektedir



Şekil 2. Saf Al (a) ve KNT (b) tozlarının XRD faz analizi
(Figure 2. XRD phase analyses of pure Al (a) and CNT (b) powders)

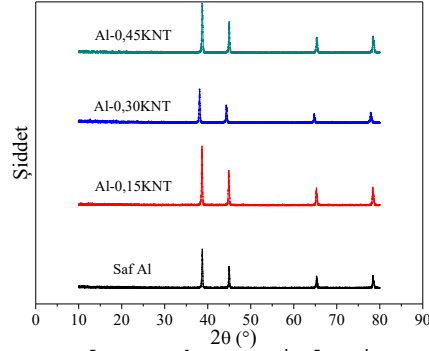
Saf Al ve karbon nanotüplere ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 3'de verilmiştir. Şekil 3a incelendiğinde alüminyum taneciklerinin ortalama $\sim 10 \mu m$ tane boyutunda ve düzensiz bir morfolojiye olduğu görülmüştür. Karbon nanotüp tozlarının ise kolay topaklanabilen bir yapıda olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3b). Bu yüzden, çok katmanlı karbon nanotübü etanol çözeltisi içerisinde dağıtmak oldukça güçtür.



Şekil 3. Saf alüminyum ve karbon nanotüp tozlarının taramalı elektron mikroskobu görüntüleri
(Figure 3. Scanning electron microscope images of pure aluminum (a) and carbon nanotube (b) powders)

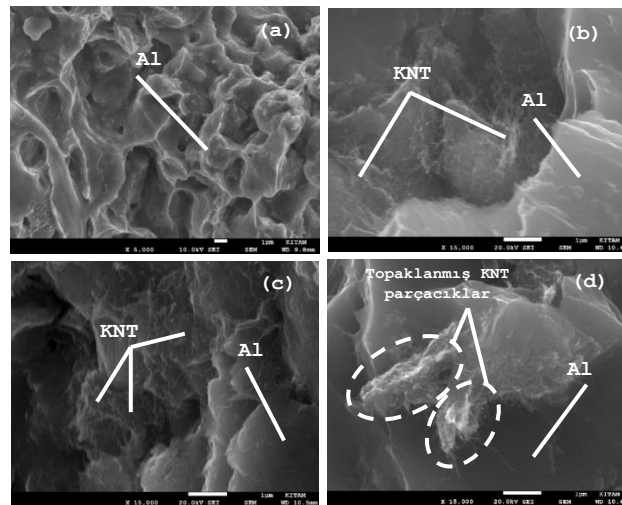
4.2. Üretilen Kompozitlerin Karakterizasyonu (Characterization of Fabricated Composites)

Saf Al ve Al-KNT kompozitlerin faz analizi Şekil 4'de verilmiştir. Al-KNT kompozitlerde alüminyumun varlığı kırınım açılarından ($2\theta \sim 39^\circ, 45^\circ, 65^\circ, 78^\circ$) doğrulanmıştır. Şekilden görüldüğü üzere Al-KNT kompozit yapılarda herhangi bir karbon nanotüp pikine ($2\theta \sim 25.8^\circ$ and 44.1°) rastlanmamıştır. Bu durum, X-ışını kırınımı cihazının düşük hassasiyetinden ve çok katmanlı karbon nanotübün düşük katkı oranından kaynaklanmaktadır. Ayrıca Al-KNT kompozit yapılarda Al_4C_3 ($2\theta \sim 37^\circ, 41^\circ, 43^\circ, 48^\circ, 51^\circ, 56^\circ, 61^\circ, 67^\circ$) gibi istenmeyen ikincil bir faza rastlanmamıştır [20].



Şekil 4. Saf Al ve Al-KNT kompozitlerin XRD faz analizi
(Figure 4. XRD phase analyses of pure Al and Al-CNT composites)

Saf Al, Al-0.15KNT, Al-0.30KNT ve Al-0.45KNT kompozitlerin kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 5'de sunulmuştur. Kırık yüzey SEM incelemelerinden, tüm numunelerin boyun vererek iyi bir şekilde sinterlendiği belirlenmiştir. Al-KNT kompozit yapılarda karbon nanotüpler hem tane içlerinde hem de tane sınırlarında bulunmasına karşın daha çok tane sınırlarında yer aldığı tespit edilmiştir. Karbon nanotüp parçacıkların Al-0.30KNT ve Al-0.15KNT kompozit yapı içerisinde iyi bir şekilde dağıtıldığı görülmüştür. Al-0.45KNT kompozit yapı içerisinde ise karbon nanotüp parçacıkların topaklandığı gözlemlenmiştir. Bu topaklanmalar etkisiyle de mikroyapı içerisinde gözeneğin oluştuğu analiz edilmiştir.



Şekil 5. Saf Al (a), Al-0.15KNT (b), Al-0.30KNT (c), Al-0.45KNT (d) kompozitlerin SEM görüntüleri
(Figure 5. SEM images of pure Al (a), Al-0.15CNT (b), Al-0.30CNT (c) and Al-0.45CNT (d) composites)

4.3. Üretilen Kompozitlerin Mekanik Özellikleri (Mechanical Properties of Fabricated Composites)

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen saf alüminyum ve Al-KNT kompozitlerin basma dayanımı, yoğunluğu ve Vickers sertliği bu bölümde incelenmiştir. Numunelerin yoğunlukları, Arşimet yoğunluk ölçüm cihazı yardımıyla belirlenmiştir. Deneysel yoğunluk değeri en az beş yoğunluk ölçümünün ortalaması alınarak tespit edilmiştir. Deneysel yoğunluk Eşitlik 1'de verilmiş olup burada ρ_w suyun yoğunluğu (g/cm^3), m_K numunenin kuru kütlesi (g), m_D numunenin suya doğmuş kütlesi (g) ve m_A numunenin suda asılı kütlesidir (g) [11].

$$\rho_D = [m_K / (m_D - m_A)] \rho_w \quad (1)$$

Kompozitlerin teorik yoğunluğu, Eşitlik 2'den faydalanılarak tespit edilebilmekte olup bu eşitlikte $\%m_{Al}$ ve $\%m_{KNT}$ saf alüminyum ve karbon nanotüpün ağırlıkça katkı oranları, ρ_{Al} (2.7g/cm^3) ve ρ_{KNT} (2.41g/cm^3) ise saf alüminyumun ve karbon nanotüpün teorik yoğunluklarıdır.

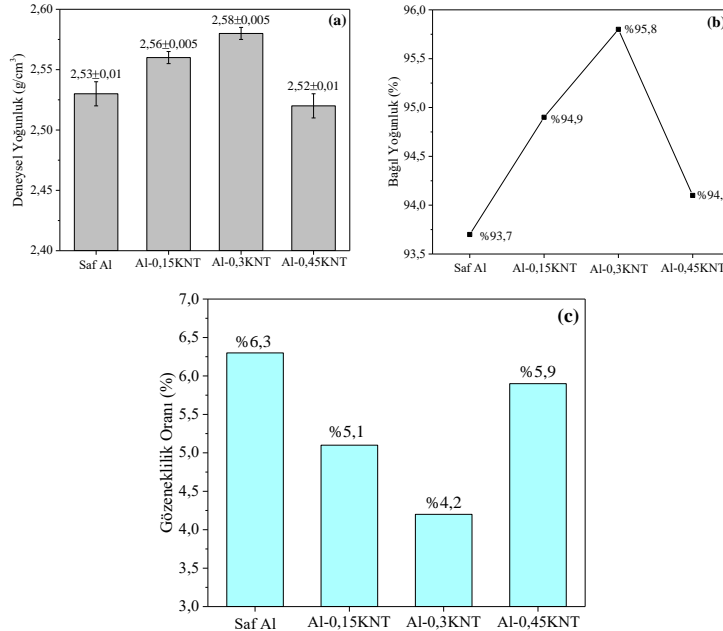
$$\rho_T = (\%m_{Al} \times \rho_{Al}) + (\%m_{KNT} \times \rho_{KNT}) \quad (2)$$

Kompozitlerin bağıl yoğunluğu ($\% \rho_D$) ve gözeneklilik oranı ($\%G$) Eşitlik 3 ve 4 yardımıyla belirlenebilmektedir [10, 11].

$$\% \rho_D = (\rho_D / \rho_T) \times 100 \quad (3)$$

$$\%G = (1 - \rho_D / \rho_T) \times 100 \quad (4)$$

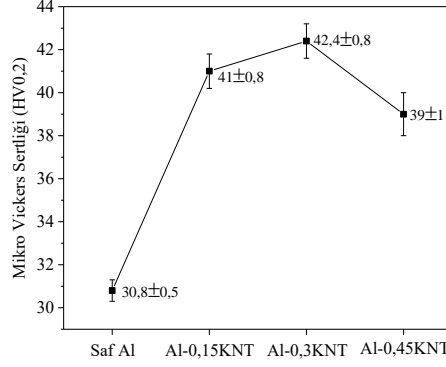
Saf alüminyum ve Al-KNT kompozitlerin deneysel yoğunluğu, bağıl yoğunluğu ve gözeneklilik oranı Şekil 6'da verilmiştir. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen malzemeler içerisinde en yüksek yoğunluğa ($\sim 2.58\text{g/cm}^3$), en yüksek bağıl yoğunluğa ($\sim \%96$) ve en düşük gözeneklilik oranına ($\sim \%4$) Al-0,3KNT kompozit yapıda ulaşılmıştır. Ağırlıkça $\%0.30$ KNT katkı oranından sonra ise yoğunluğun hızla düştüğü, gözeneklilik oranının ise hızla arttığı görülmüştür. Gözenekliliğin artmasında karbon nanotübün en/boy oranı, karbon nanotübün dış çapı, alüminyumun tane boyutu ve arayüzeyde oksit oluşumu etkili olabilmektedir [21 ve 22]. Bu belirtilen parametreler arasında gözenek oluşumuna en fazla karbon nanotüp taneciklerin topaklanması etkimektedir.



Şekil 6. Saf Al ve Al-KNT kompozitlerin deneysel yoğunluk (a), bağıl yoğunluk (b) ve gözeneklilik oranı (c) değişimi

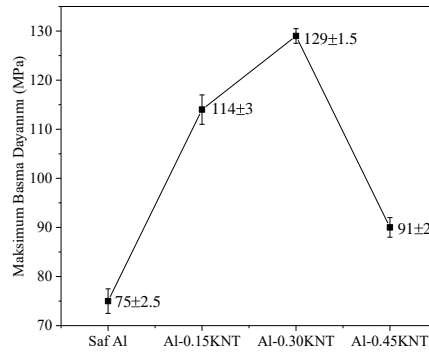
(Figure 6. Apparent density (a), relative density (b) and porosity ratio (c) variations of pure Al and Al-CNT composites)

Şekil 7'de saf alüminyum ve Al-KNT kompozitlerin mikro Vickers sertlik değerleri gösterilmiştir. Maksimum Vickers sertlik değeri (~42 HV) Al-0.3KNT kompozit yapıda elde edilmiştir. Saf alüminyumun sertliğine kıyasla Al-0.3KNT kompozitlerin mikro Vickers sertliği ~%38 oranında artmıştır. Ağırlıkça %0.3KNT katkı oranından sonra Vickers sertliğinin muhtemelen topaklanma sebebiyle aniden düştüğü tespit edilmiştir. Bu durum, karbon nanotüpün topaklanmasıyla ilgili makalelerin derlendiği çalışmayla da doğrulanmıştır [21].



Şekil 7. Saf Al ve Al-KNT kompozitlerin mikro Vickers sertlik değerleri
(Figure 7. Micro Vickers hardness values of pure Al and Al-CNT composites)

Saf Al ve Al-KNT kompozitlerin maksimum basma dayanımı değerleri Şekil 8'de verilmiştir. En yüksek basma dayanımı Al-0.3KNT kompozit (~129 MPa) yapıda elde edilmiştir. Al-0.3KNT kompozitin basma dayanımının, saf alüminyumun basma dayanımına kıyasla ~%72 oranında arttığı tespit edilmiştir. Ağırlıkça %0.3'ün üzerindeki katkı oranında karbon nanotüp tanecikler alüminyum matris içerisinde homojen dağıtılamadığı için karbon nanotüp tanecikler ile matris malzemeler arasındaki arayüzeyi zayıflatmaktadır. Karbon nanotüplerin bir metal matris içerisinde dağılımını; karbon nanotüplerin yönelimi, karbon nanotüp/matris malzeme arasındaki adezyon kuvvetleri, karbon nanotübün en/boy oranı, matristeki karbon nanotüplerin hacim veya ağırlık oranı gibi birçok faktör etkilemektedir [22]. Bahsedilen sebep veya sebepler nedeniyle topaklanan karbon nanotüpler de daha düşük mekanik özelliklerin elde edilmesine neden olmaktadır. Yürütülen mekanik testler ve mikro yapı incelemeleri neticesinde, Al-KNT kompozitlerin mekanik özelliklerinin mikroyapı incelemelerini doğruladığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 8. Saf Al ve Al-KNT kompozitlerin basma dayanımı değerleri
(Figure 8. Compressive strength values of pure Al and Al-CNT composites)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, saf alüminyum ve ağırlıkça farklı katkı oranlarına (KNT: %0.15, 0.30 ve 0.45) sahip Al-KNT kompozitler toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiştir. Bu çalışmadan ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Kırık yüzey SEM incelemelerinden tüm numunelerdeki alüminyum taneciklerin iyi bir şekilde boyun vererek sinterlendiği belirlenmiştir. Al-0.15KNT ve Al-0.30KNT kompozitlerin kırık yüzey SEM analizlerinden KNT parçacıkların homojene yakın bir şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir. Al-0.45KNT kompozit yapıda ise KNT parçacıkların topaklandığı ve bu durumun kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği sonucuna varılmıştır.
- Üretilen numuneler içerisinde en düşük gözeneklilik oranına, en yüksek bağıl yoğunluğa, deneysel yoğunluğa, Vickers sertliğine ve basma dayanımına Al-0.3KNT kompozit yapıda ulaşılmıştır. Saf alüminyuma kıyasla Al-0.3KNT kompozitin deneysel yoğunluğunun ~%2, Vickers sertliğinin ~%38 ve basma dayanımının ~%72 oranında arttığı tespit edilmiştir. Ağırlıkça %0.3'ün üzerindeki KNT katkı oranlarında ise topaklanma etkisiyle Al-KNT kompozitlerin mekanik dayanımının düştüğü tespit edilmiştir.
- X-ışını kırınımı (XRD) faz analizinden Al-KNT kompozit yapılarda herhangi bir karbon nanotüp pikine rastlanmamıştır. Bu durum, XRD cihazının düşük hassasiyetinden ve karbon nanotüpün düşük katkı oranından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Şenel, M.C., Gürbüz, M. ve Koç, E., (2015). Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Yeni Nesil Kompozitler. Mühendis ve Makina Dergisi, 56(669):36-47.
- [2] Şahin, İ., (2014). Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Matkap ile Delinmesi Konusunda Yapılan Çalışmaların İncelenmesi. Mühendis ve Makina Dergisi, 55(649):9-16.
- [3] Şahin, Y., (2006). Kompozit Malzemelere Giriş. Ankara: Seçkin Yayınevi.
- [4] Şenel, M.C, Gürbüz, M. ve Koç, E., (2017). Grafen Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(8):974-978, DOI:10.5505/pajes.2017.65902.
- [5] Öztıp, B. ve Gürbüz, M., (2018). Investigation of Properties of Composites Produced from Waste Aluminum with Si₃N₄ Reinforcement. Technological Applied Sciences, 13(1):57-66.
- [6] Gürbüz, M., (2018). Atık İçecek Kutularından Üretilmiş Alüminyumun Mekanik Özelliklerine Soğuk İşlemin Etkisi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 20(58):28-35, DOI:10.21205/deufmd. 2018205803.
- [7] Chawla, K.K., (2006). Composite Materials, New York: Springer.
- [8] 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, DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.290.
- [9] 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, vol:170, pp:19-23.
- [10] German, R.M., (2005). Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing. New Jersey:Princeton University Press, pp:221.
- [11] Dieter, G.E., (1988). Mechanical Metallurgy, London: McGraw-Hill, pp:376.

- [12] Topcu, I., (2018). Karbon Nanotüp Takviyeli Alüminyum Matriksli AlMg/KNT Kompozitlerinin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 4:99-109, DOI: 10.28979/comufbed.359796.
- [13] Agnew, S.R., Horton, J.A., Lillo, T.M., and Brown, D.W., (2004). Enhanced Ductility in Strongly Textured Magnesium Produced by Equal Channel Angular Processing. Scripta Materialia, 50(3):377-381, DOI: 10.1016/j.scriptamat.2003.10.006.
- [14] 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, DOI: 10.1016/j.jart.2016.05.002.
- [15] Mohammed, S.M.A.K. and Chen, D.L., (2019). Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Matrix Composites. Advanced Engineering Materials, number:1901176, pp:1-26, DOI: 10.1002/adem.201901176.
- [16] Sridhar, I. and Narayanan, K.R., (2009). Processing and Characterization of MWCNT Reinforced Aluminum Matrix Composites, Journal of Materials Science, 44(1750-1756), DOI: 10.1007/s10853-009-3290-5.
- [17] 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, Volume:43, pp:1061-1072, DOI: 10.1016/j.compositesa.2012.02.008.
- [18] Şenel M.C. and Gürbüz, M., (2020). Investigation on Mechanical Properties and Microstructure of B₄C/Graphene Binary Particles Reinforced Aluminum Hybrid Composites. Metals and Materials International, DOI: 10.1007/s12540-019-00592-w.
- [19] 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, DOI: 10.1080/02670836.2018.1501839.
- [20] Ma, B., Wang, J., Lee, T.H., Dorris, S.E., Wen, J., and Balachandran, U., (2018). Microstructural Characterization of Al₄C₃ in Aluminum-Graphite Composite Prepared by Electron-Beam Melting. Journal of Materials Science, Volume:53, pp:10173-10180, DOI: 10.1007/s10853-018-2336-y.
- [21] Rubel, R.I., Ali, H., Jafor, A., and Alam, M., (2019). Carbon Nanotubes Agglomeration in Reinforced Composites: A Review. Materials Science, 6(5):756-780, DOI: 10.3934/matensci.2019.5.756.
- [22] Esawi, A.M.K., Morsi, K., Sayed, A, Gawas, A.A., and Borah, P., (2009). Fabrication and Properties of Dispersed Carbon Nanotube-Aluminum Composites. Materials Science and Engineering. 508(1-2):167-173, DOI: 10.1016/j.msea.2009.01.002.