



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

## Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Takviyeli Düzenli/ Düzensiz Şekilli Ti-6Al-4V Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi

 İsmail TOPCU<sup>a,\*</sup>,  Efecan KARAMAN<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Alanya, TÜRKİYE

<sup>b</sup> Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Alanya, TÜRKİYE

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: ismail.topcu@alanya.edu.tr

DOI : 10.29130/dubited.545434

### ÖZET

Bu çalışmada toz metalurjisinde yaygın olarak kullanılmakta olan mekanik alaşımlama yöntemi ile düzenli ve düzensiz şekilli Ti-6Al-4V tozlara farklı oranlarda ilave edilen çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) tozlarının, farklı üretim şartları ve sinterleme ortamında üretilmesinin mikroyapı, yoğunluk ve aşınma davranışları incelenmiştir. Mekanik olarak karıştırılan kompozit tozlar, tek eksenli pres yardımı ile 100 MPa basınç altında sıkıştırılarak, silindirik kompozit numuneler elde edilmiştir. Elde edilen silindirik numuneler, 1200°C'de 120 dakika süre ( $10^{-3}$  mbar) vakum ve Argon (Ar) ortamında sinterlenmiştir. Üretilmiş olan kompozitlerin aşınma davranışları, pin-on-disk aşınma test cihazı kullanılarak incelenmiştir. Uygun koşullar altında çok duvarlı karbon nanotüp takviyeli kompozit malzemelerin aşınma oranları sırasıyla aynı mesafede ( $\text{mm}^3/\text{Nm}$ ), takviyesiz Ti-6Al-4V'de  $9.10^{-8}$ ,  $5.10^{-8}$ ,  $3.10^{-9}$ ,  $3.10^{-8}$ ,  $2.10^{-8}$ ,  $1,87.10^{-8}$  azaldığı görülmüştür. Geliştirilen aşınma özelliklerine ilave olarak, ÇDKNT oranlarının detaylandırılması ile ilgili çalışmalar yürütülmüştür. Aşınma test sonuçları, üretilmiş olan kompozit malzemeden Ti-6Al-4V aşınma modlarına geçişin pozitif ilerleme gösterdiği tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışmada, aşınma direncinin, direkt hacimce ilave edilen % v/v ÇDKNT oranına göre aynı ağırlıkta ( $\text{Nm}/\text{mm}^3$ ) sırasıyla, takviyesiz Ti-6Al-4V'de  $1.10^7$ ,  $1,8.10^7$ ,  $2,7.10^7$ ,  $2,82.10^7$ ,  $3,35.10^7$ ,  $5,4.10^7$  azaldığı görülmüştür. Artan takviye ÇDKNT oranı ile birlikte aşınma özelliklerinin iyileştiği sonucu elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Toz metalurjisi, Çok duvarlı karbon nanotüp, Ti-6Al-4V, Aşınma

## Investigation of Wear Behavior of Multi-Walled Carbon Nanotube Reinforced Regular / Irregularly Shaped Ti-6Al-4V Composites

### ABSTRACT

In this study, microstructure, density and wear behavior of multi-walled carbon nanotube (MWCNT) powders in different production conditions and sintering environment, which are added to regular and irregularly shaped Ti-6Al-4V powders by mechanical alloying method, are widely used in powder metallurgy. The mechanically

stirred composite powders were compressed under a pressure of 100 MPa with the help of the uniaxial press to obtain cylindrical composite samples. The cylindrical samples obtained were sintered at 1200°C in a vacuum and Argon (Ar) medium for 120 minutes ( $10^{-3}$  mbar). The wear behavior of the produced composites was examined using a pin-on-disc wear tester. Wear rates of multi-walled carbon nanotube reinforced composite materials under the same conditions at the same distance ( $\text{mm}^3/\text{Nm}$ ), respectively, in non-reinforced Ti-6Al-4V  $9.10^{-8}$ ,  $5.10^{-8}$ ,  $3.10^{-9}$ ,  $3.10^{-8}$ ,  $2.10^{-8}$ ,  $1,87.10^{-8}$  was observed to decrease. Further studies were carried out to elaborate the additional MWCNTs ratios of the developed abrasion properties. The wear test results showed a very positive progression from the composite material produced to the Ti-6Al-4V wear modes. In this study, the wear resistance, according to the direct volume added v/v% MWCNT ratio of the same weight ( $\text{Nm}/\text{mm}^3$ ), respectively,  $1.10^7$ ,  $1,8.10^7$ ,  $2,7.10^7$ ,  $2,82.10^7$ ,  $3,35.10^7$ ,  $5,4.10^7$ . It was obtained that improved abrasion properties improved with increasing reinforcement MWCNT ratio.

*Keywords: Powder metallurgy, Multi-wall carbon nanotube, Ti-6Al-4V, Wear*

## I. GİRİŞ

Toz metalürjisi (T/M) yöntemi eski bir üretim yöntemi olmasına rağmen artan ihtiyaçlar doğrultusunda yirminci yüzyılın başlarında tercih edilmeye başlanmıştır. Birçok gelişmiş ülkede sıklıkla tercih edilen bir üretim yöntemi olup, endüstride oldukça fazla uygulama alanına sahiptir. T/M ile seri üretimde ilk malzemenin neredeyse tamamı kullanılmaktadır [1]. Titanyum alaşımlarının havacılık, otomotiv ve biyomedikal endüstrilerinde çok çeşitli uygulamaları mevcuttur. Ağırılıkça % 6 Alüminyum ve %4 Vanadyum içeren Ti-6Al-4V alaşımı, ısıl işlem kabiliyeti, yeterli mekanik dayanımı, iyi korozyon direnci ve biyouyumluluk gibi özellikleri nedeniyle uçak, türbin ve cerrahi implantlarda kullanılmaktadır [2,3]. Titanyum alaşımları, mükemmel mekanik özelliklere, paslanmaz çelikten daha yüksek özgül mukavemete ve paslanmaz çelikten daha iyi korozyon direncine sahip oldukları için birçok endüstriyel alanda tercih sebebi olmaktadır [4]. Metal Matrisli Kompozitler (MMK) gibi çeşitli kompozit malzemelerin üretiminde de toz metalürjisi yöntemi kullanılmaktadır [5,6]. Metal matris kompozitlere takviye edilen farklı elementlerce, özelliklerin iyileştirilmesi mümkündür. Ancak kompozitlerin özelliklerinin iyileştirilebilmesi için boyut ve takviye oranlarının iyi kontrol edilmesi gerekmektedir [7].

Uçakların keşfi ile hafif ve yüksek dayanımlı malzemelere olan ilgi gittikçe artmaya başlamıştır. Bu malzemelerin başında Titanyum alaşımları vb. malzemeler gelmektedir. Bu tip malzemelerin kullanımı yüksek mukavemetinin yanı sıra araçlarda yakıt verimliliği gibi avantajlara da yol açmaktadır [8,9]. Titanyum alaşımının matrislere olan uyumluluğu nedeniyle bu tip malzemelerde karbür oluşturuca takviyeler kullanılmaktadır [10]. Titanyum alaşımlarına karbon eklenmesiyle, titanyum bileşimindeki aşırı karbon kırılğan titanyum karbit oluşturur ve mekanik mukavemet üzerinde etkindir. Karbon nanotüp (KNT), birçok araştırmacıya bileşik olağanüstü termal iletkenlik, mekanik ve elektriksel özelliklerinden dolayı malzeme veya dolgu malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır [11-13]. Çok Duvarlı Karbon nanotüp (ÇDKNT), yüksek termal iletkenlik, mekanik ve elektriksel özellikleri sebebiyle ilgi duyulan bir malzeme olmuş ve birçok araştırmacı tarafından çalışmakta olan konuların başında gelmektedir. Karbon nanotüp yüksek mekanik özellikleri sebebiyle malzeme veya dolgu malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır [13,14]. Küresel petrol rezervlerin azalması ile, motorların yakıt verimliliğinde artış arzu edilmektedir. Bir yapıya hem mukavemet hem de sertlik kazandırmada metallerin ve alaşımların yetersizliği Metal Matris Kompozitlerinin gelişimine yol açmıştır. Bundan dolayı mukavemet ve süneklik metal matris tarafından sağlanır; mukavemet ve/veya sertlik, takviye, ya seramik ya da yüksek sertlikte metal esaslı parçacık ya da fiberden sağlanmaktadır. Metal matris kompozitler, düşük termal genleşme katsayısı ve yüksek termal

iletkenlik özelliklerine sahip olacak şekilde tasarlanabilir ve bu da onları çeşitli yeni malzeme uygulamalarında kullanıma uygun hale getirir [15,16].

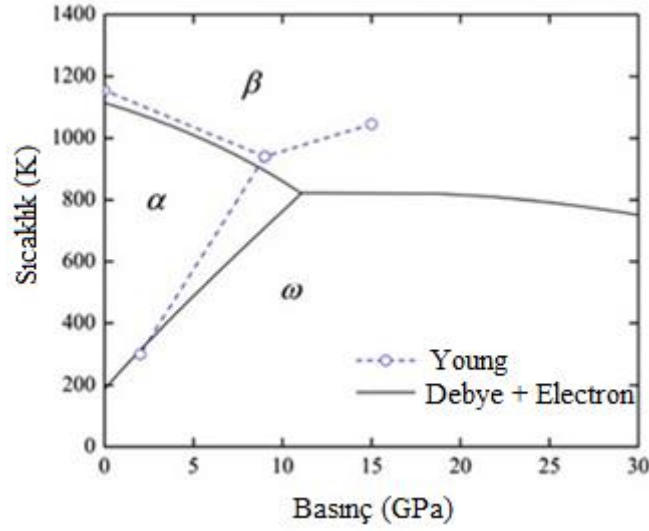
Bu çalışmanın amacı, % 0.5 -% 5 ÇDKNT ilavelerinin Ti6Al4V alaşımının aşınma özelliklerine etkisini araştırmaktır. Karakterizasyon işlemi için metalografik teknikler kullanılmıştır. ÇDKNT'li sinterlenmiş her örnekte, disk üzerinde ve diskle aşınma testleri yapılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM), optik mikroskopi, X-ray ile karakterize edilmiştir. Sertlik ve yoğunluk testleri yapılarak bu numunelerin yıpranmış yüzeyleri tarama altında analiz edilmiştir.

## II. DENEYSEL DETAYLAR

Bu çalışmada, Phelly Materials firması tarafından % 99,99 saflık, 4,43 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk ve 45-180 µm nominal boyuta sahip atomize yöntemle üretilmiş düzgün şekilli küresel ve küresel olmayan farklı oranlarda Ti-6Al-4V tozları ana matris olarak kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak Chep Tüpleri Şirketi ve Choggo Şirketi tarafından 2,31 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk ortalama boyutu yaklaşık 10-30 nm olan ÇDKNT'ler kullanılmıştır. Farklı malzeme içeriklerinde deney numuneleri üretilmiş ve sinterlenen numunelerin toz morfolojileri ve mikroyapıları, JEOL Ltd., JSM-5910LV taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Saf Ti-6Al-4V tozu ve ÇDKNT tozuna sahip fazların tanımlanması Rigaku X Ray difraktometre (XRD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cu/Kα radyasyonu, 2°'lik bir ışın açısı ile, kırınım açısı 10-90° arasında, adım artışı 0.02° ve sayma süresi 1 s şartlarında gerçekleştirilmiştir.

### *A. Ti6Al4V/ÇDKNT Kompozitlerinin Üretimi*

Satın alma süreci sonrası, sırası ile Ti-6Al-4V ve farklı oranlarda (%0,5 - 5 v/v) ÇDKNT takviyesi ile toz metalürjisi yöntemi kullanılarak farklı içerikli farklı kompozit numuneler imal edilmiştir. Kompozitlerin üretimi sırasında hacimce % 0,5, 1, 2, 3, 4, 5 v/v ÇDKNT tozları Ti6Al4V matrisine takviye edilmiştir. Mekanik alaşımlama zamanı, yaklaşık dört saat olarak öngörülmüştür. Ti-6Al-4V / ÇDKNT kompozit tozu ağırlığının ana kütleyle oranı 1: 5 ve devir hızı 500 rpm, kullanılan alümina bilye çapı 8 mm'dir. İşlem sırasında ÇDKNT' nin seramik davranışından dolayı toz parçaları, tek eksenli pres (UAP) ile 100 MPa basınç altında preslenmiştir. Sinterleme atmosferi olarak yüksek vakum (1x10<sup>-3</sup> mbar) ortamı seçilmiştir. Ti-6Al-4V alaşımı, 845 °C de alfa (α), 950 °C'de beta (β) fazına geçmektedir. İkincil fazın maksimum %9'da çözünebilir olması ve beta fazının %0.5 oranındaki faz dönüşüm sıcaklığı 1130°C olması ve yüksek mukavemet elde etmek amacıyla sinterleme sıcaklığı ve süresi, 1200 °C ve 120 dk olarak seçilmiştir. Ti6Al4V alaşımının alfa ve beta faz geçiş sıcaklıkları Şekil'1 de bulunan faz diyagramında gösterilmiştir [17].



Şekil 1. Ti-6Al-4V Ti6Al4V alaşımının alfa ve beta faz geçiş sıcaklıkları

### B. Mikrosertlik ve Yoğunluk Deneyleri

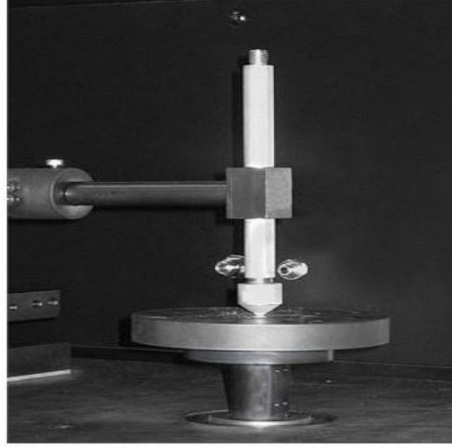
Üretilen tüm kompozit numunelerde sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik testleri, Mikro-sertlik Test Makinesi (FM-700, Future Tech Corp.) kullanılarak, metalografik işlemler sonucu hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kompozitlerin sertliği Vickers (136°) sertlik ölçme yöntemi kullanılarak, 300 gr yükte HV(0.3) ölçülmüştür. Ayrıca sinterlenmiş numunelerin, Arşimet prensibi ile yoğunlukları ölçülmüştür.

### C. Mikroyapı incelenmesi

Metalografik muayene için kullanılan numunelerin her biri TM ile üretilerek sinterlenmiş numunelerdir. Optik inceleme için numunelerin dağlanması aşamasında titanyum alaşımlarında en çok kullanılan Kroll ayıracağı (3 mL HF, 1000 mL H<sub>2</sub>O içinde 6 mL HNO<sub>3</sub>) kullanılmıştır [18]. İncelenen kompozitlerin aksel kesitlerinden metalografik numuneler hazırlanmıştır. Tüm numuneler, 240, 500, 800 ve 1000 gözlü SiC zımpara kağıtları ile hafifçe zımparalanıp ardından Kroll solüsyonları ile dağlanmıştır. Kompozitlerin mikroyapıları, optik mikroskop ile incelenmiştir. Numune hazırlama işlemi sonrası her bir numune için metalografik farklı büyütme (X50 ve X100), görüntü yönündeki kesitler incelenmiştir.

### D. Pin on Disk Aşınma Testi

Aşınma testleri, oda sıcaklığında bir kayganlaştırıcı olmadan, karşı yüzey olarak 62 HRC sertlik derecesinde sürekli olarak dönen bir D2 takım çeliği plakasına sahip standart bir pin-on-disk makinesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Aşınma testi için numune pimi Ø10x10 mm boyutlarında ve aşınma yüzeyi 0.159 µm Ra'lık bir pürüzlük derecesine kadar parlatılmıştır. Test, her numune için üçer defa gerçekleştirilmiştir. Disk yüzeyi zımparalanmış ve 0.830 µm Ra'lık bir pürüzlülüğe kadar cilalanmıştır. Kayma hızı, kayma mesafesi ve yük, tüm testler için sırasıyla 1.04 m/s, 1000 m ve 9.8 N olarak sabit tutulmuştur. Örnek aşınma test düzeneği Şekil 2'de verilmiştir.



**Şekil 2.** Ti-6Al-4V/ÇDKNT MMK numunelerin aşınma test düzeneği

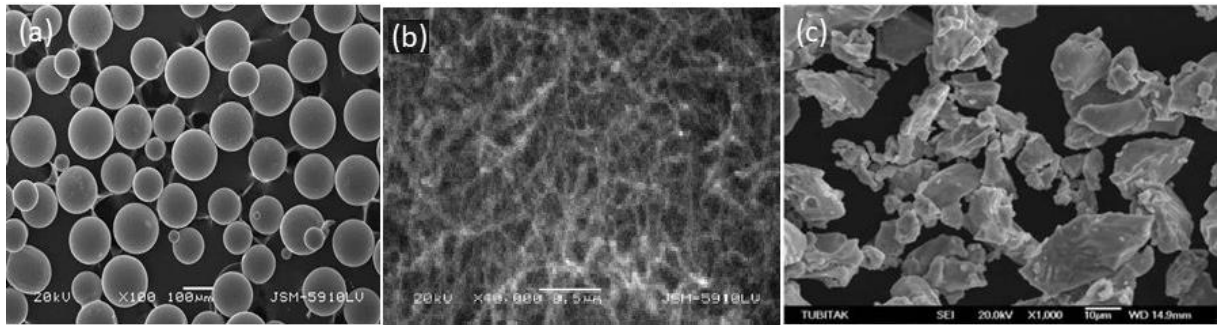
Deney sonuçlarında aşınma oranları Eşt. 1’de verilen denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_s = \frac{\Delta m}{\rho \cdot L \cdot F_N} 10^9 \quad (1)$$

Eşt. 1’de belirtilen  $W_s$ : Aşınma oranı ( $\text{mm}^3/\text{Nm}$ ),  $\Delta m$ : N devirlerinin aşınma testi sırasında test örneklerinin kütle kaybı (g),  $\rho$ : Test materyallerinin yoğunluğu ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $L$ : Toplam kayma mesafesi (m) ve  $F_N$ : Pimin üzerindeki normal kuvvet (N)’tir. Tüm deneylerde 3’er adet numune üretilmiş ve deneysel sonuçların güvenilirliği için 2 tekrar sayısında deneyler gerçekleştirilmiştir.

### III. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

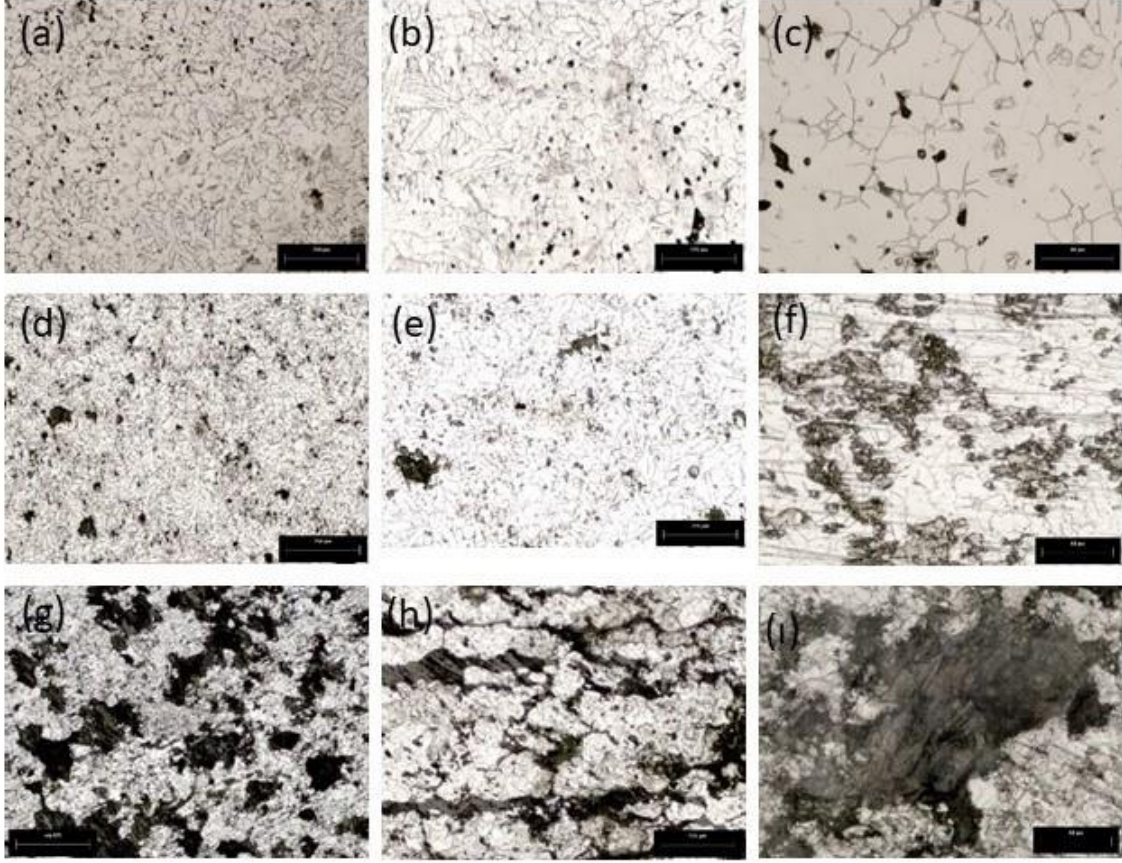
Farklı oranlarda, takviyeli Ti-6Al-4V ve ÇDKNT tozlarına ait SEM görüntüleri Şekil 3’te verilmiştir. SEM görüntülerinden kullanılmış olan Ti-6Al-4V alaşımı tozlarının düzgün şekilli ve düzensiz şekilli olduğu ve tane boyut dağılımının ortalama 145 mikron civarında olduğu görülmektedir.



**Şekil 3.** Ti-6Al-4V ve ÇDKNT tozlarının SEM görüntüsü, (a)Düzenli küresel şekilli Ti-6Al-4V (X100), (b)ÇDKNT (X40000) ve (c) Düzensiz şekilli Ti-6Al-4V tozları (X1000)

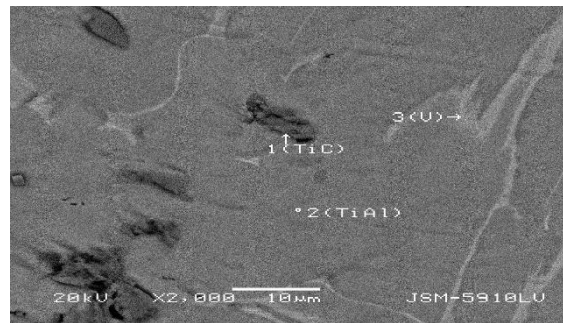
Numune hazırlama işlemi sonrasında üretilen her bir kompozit numune için ayrı ayrı farklı büyütme oranlarında, kesitlerden elde edilen görüntüler Şekil 4’te verilmiştir. Görüntülerde, takviye oranına bağlı olarak özellikle düşük takviye oranına sahip numunelerde Ti-6Al-4V’un alfa ve beta fazları net olarak görülmektedir. Ayrıca yapıda gri renkte ve daha koyu renkte alanlar mevcuttur. Burada, gri

renkteki alanlar oluşan karbür yapılarını, nispeten daha koyu renkte olan bölgeler ise artan ÇDKNT miktarı ile birlikte aglomerasyon ve porozitenin yoğun olduğu bölgeleri göstermektedir. Şekil 4'te görüleceği üzere farklı oran (%0,5,3,5) ve farklı büyütmelerde (50x,100x,200x) elde edilmiş olan mikro yapılarda artan ÇDKNT oranlarının, yapıda heterojen bir yapı oluşturduğunu açıkça göstermektedir.



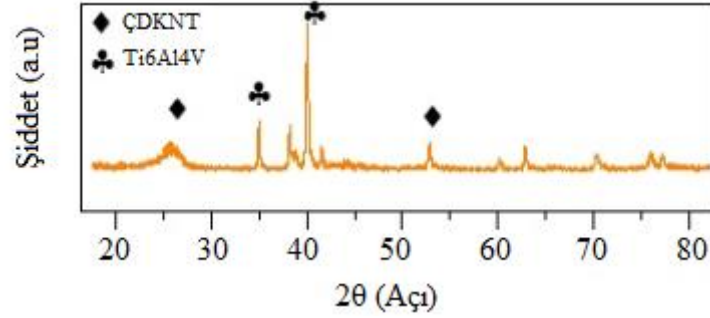
**Şekil 4.** (a)%0,5 ÇDKNT takviyeli MMK 50x, (b) % 0,5 ÇDKNT takviyeli MMK 100x, (c) %0,5 ÇDKNT takviyeli MMK 200x, (d) %3 ÇDKNT takviyeli MMK 50x, (e) %3 ÇDKNT takviyeli MMK 100x , (f) %3 ÇDKNT takviyeli MMK 200x , (g) %5 ÇDKNT takviyeli MMK 50x, (h) %5 ÇDKNT takviyeli MMK 100x ,(i) %5 ÇDKNT takviyeli MMK 200x farklı takviyeli malzemelerin optik mikroskop görüntüleri

Sadece gri renkli bölgelerde TiC yapıları bulunmaktadır. Bu bölgeler, artan ÇDKNT oranına bağlı olarak arttığı Şekil 5'te görülmektedir.



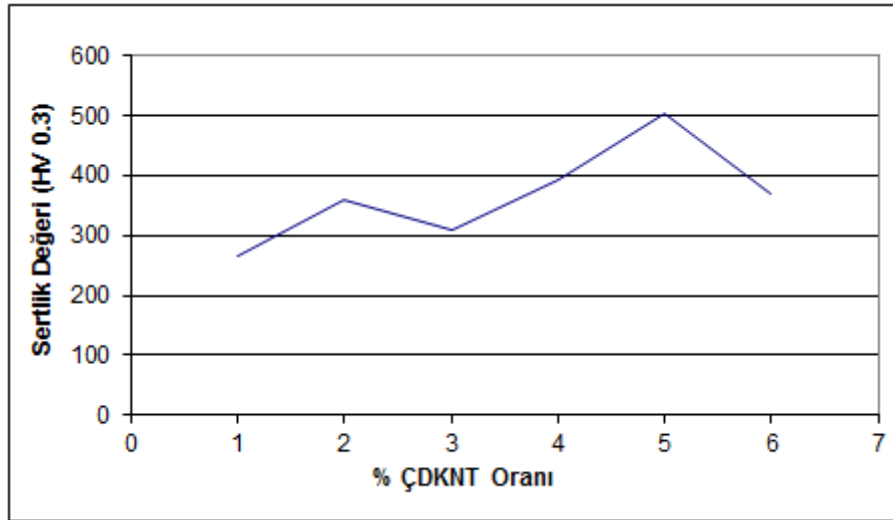
**Şekil 5.** Ti-6Al-4V/ÇDKNT kompozit numunelerinde mikroyapı içindeki titanyum karbür yapıları

Farklı oranlarda takviyeli MMK numunelerden %3 v/v takviye edilmiş Ti-6Al-4V/ÇDKNT numunesi X-ışını kırınımları Şekil 5'de gösterilmiştir. Şekil 6'da görüleceği üzere, 36.4° ve 40.7° açılarındaki pikler Ti-6Al-4V'ye, 25,42° ve 53° açılarında oluşan pikler ise ÇDKNT'ye aittir.



Şekil 6. %5 v/v oranında ÇDKNT ile takviye edilmiş Ti-6Al-4V/ÇDKNT tozunun XRD analizi

Üretilmiş ve metalografik olarak hazırlanmış olan kompozit numunelerin sertlik testlerinde baskılayıcı iz, hem matris hem de takviye malzemesini kapsadığı için sık aralıklarla 10 ardışık ölçüm yapılmış ve değerlerin ortalaması dikkate alınmıştır. Elde edilmiş olan sertlik değeri kompozitin ortalama sertliğini belirtmektedir. Kompozit sertliği, takviye ÇDKNT'lerin titanyum ile oluşturmuş oldukları Şekil 5'de görülebilen karbür (TiC) fazı ve buna karşılık nispeten daha düşük sertlik değerleri de ana matrise denk gelen ve artan ÇDKNT miktarı ile birlikte aşırı doymuş aglomerasyona uğramış aşırı poroziteli yapıdan kaynaklanmaktadır. Sertlik ölçümleri Şekil 7'de verilmiştir [19].

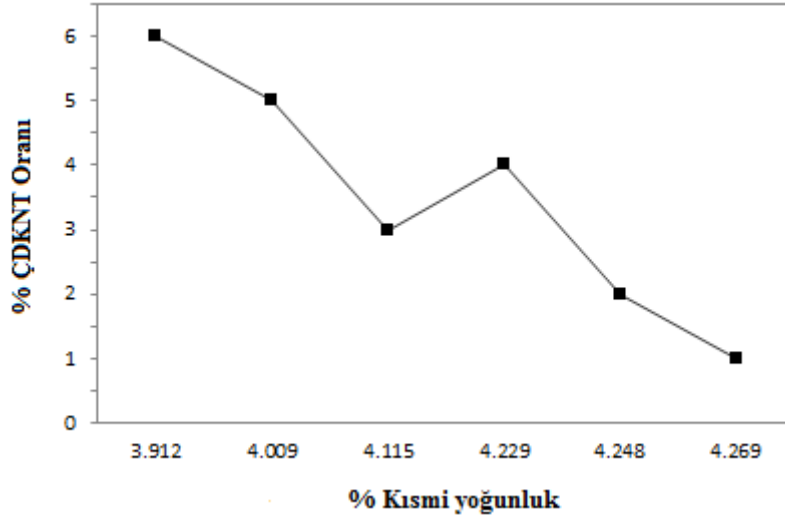


Şekil 7. % 0,5-5 v/v oranlarında ÇDKNT ile takviye edilerek üretilen Ti-6Al-4V/ÇDKNT kompozit numunelerinin sertlik değerleri

Üretilmiş olan Ti-6Al-4V/ÇDKNT numunelerinin yoğunlukları ölçülüp literatürle karşılaştırıldığında % 90 ile % 98,5 oranları arasında uyumlu olduğu görülmüştür. Oranlardaki farkın başlıca nedeni, ÇDKNT'nin hem oran olarak artması hem de yoğunluğunun düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yoğunluk hesaplamaları Eş. 2'de verilen denklem esas alınarak yapılmıştır.

$$C_R = \frac{V_L}{V_C} = \frac{\rho_G}{\rho_A} \quad (2)$$

Eşt. 2'de,  $V_L$ : gevşek tozun hacmi ( $\text{cm}^3$ ),  $V_C$ : sıkıştırılmış tozun hacmi ( $\text{cm}^3$ ),  $\rho_G$ : ham yoğunluk ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) ve  $\rho_A$ : görünür yoğunluktur ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ). Ti-6Al-4V/ÇDKNT kompozit numunelerinin en düşük yoğunluğu, hacimce en yüksek ÇDKNT oranına sahip olan %5 içerikli numunede elde edilmiştir. Farklı oranlarla takviye edilerek üretilen kompozitlerin yoğunluk değerleri Şekil 8'de gösterilmiştir. Üretilen numunelerin yoğunluğunun, %0,5-5 v/v farklı ÇDKNT içeriklere sahip kompozit numunelerin artan % ÇDKNT oranları ve sinterleme sıcaklığının da etkisiyle düştüğü görülmektedir.



**Şekil 8.** % 0,5-5 v/v oranlarında ÇDKNT ile takviye edilerek üretilen numunelerin yoğunluk değerleri

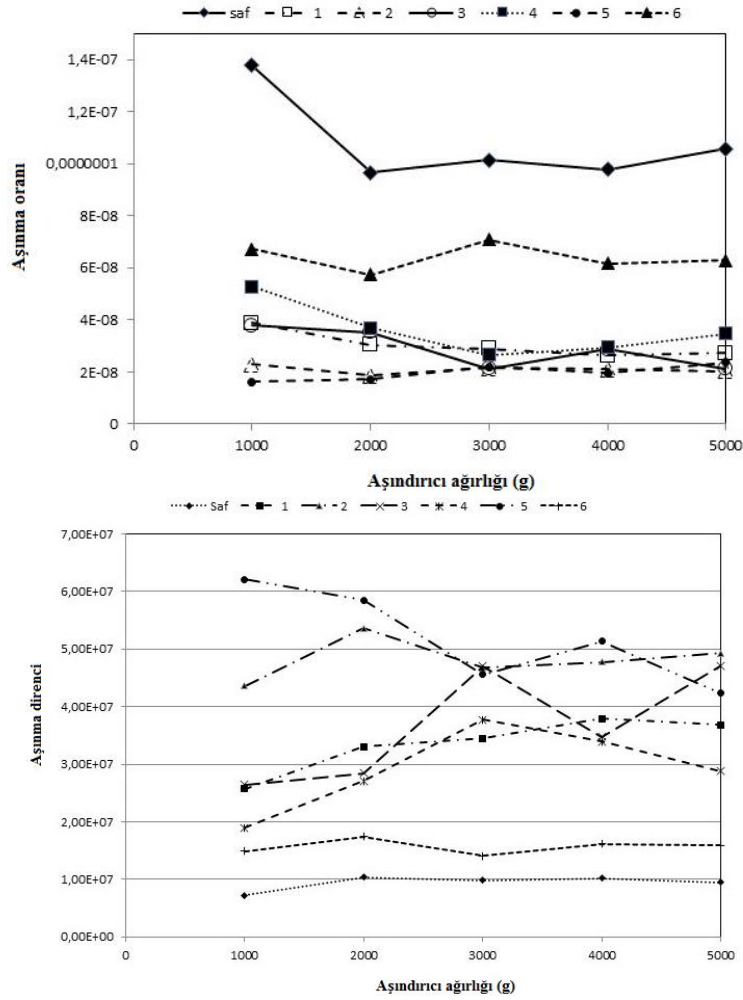
Çalışmada toz metalürjisi yöntemi ile Ti-6Al-4V ve % 0,5-5 v/v farklı oranlarda ÇDKNT takviyesi ile metal matrisli kompozit numuneler üretilmiştir. Deney sonucunda üretilen numunelerden beklenti artan sinterleme sıcaklığı ve artan ÇDKNT oranı ile yoğunluğun literatürle paralel bir şekilde (%97,5) istenilen seviyeye ulaşmasıdır. Vickers sertlik değerleri, 1200 °C'de sinterlenen numuneler test edilerek elde edilmiştir. Örneklerin ortalama sertlik değerleri, Şekil 6'da verilmiştir. ÇDKNT'nin hacimce yüzdesinin artması, bileşiğin sertliğini arttırmıştır. Ancak numunelerin sertlik değeri ÇDKNT'nin % 5 oranlarından sonra düşmüştür. Farklı takviye oranlarına sahip numunelerin sertlik ölçümlerinde farklı sonuçlar elde edilmiştir. Sertlik değerlerinin artmasının temel nedeni sinterleme prosesi sonucu oluşan TiC fazlarıdır. Sertlik değerlerindeki azalmanın nedeni ise, artan ÇDKNT miktarı ile yapıda aglomerasyon oluşumu sonucu porozite miktarının artmasına bağlı olmaktadır. Faz farklılıklarındaki bu dağılım, ÇDKNT materyalinin oluşturduğu matristen kaynaklandığı öngörülmektedir. Yapılan pin on disk bilyalı aşınma testlerinde farklı yöntemler izlenmiştir. Bu yöntemde öncelikle uygulanan farklı ağırlıklar ile kat edilen mesafe sonucunda veriler elde edilmiştir.

Tüm numuneler için kayma mesafeli aşınma oranı numunelerin aşınma oranı ÇDKNT oranı arttıkça azalmaktadır. Alaşımındaki % ÇDKNT konsantrasyonu, kayma mesafesindeki artışla aşınma kaybı doğru orantılı olarak kendi içerisinde artar ancak birbirleri ile yapılan kıyaslamada aşınma oranını azalttığı görülmektedir. Genel olarak, artan sertlik değeri ile ÇDKNT % 4 ilavelerine kadar aşınma oranı dramatik bir şekilde azaltmıştır. En düşük aşınma oranı % 4 ÇDKNT ilavesi ile elde edilmiştir. En ilginç sonuç ise %5'lik ÇDKNT takviye edilmiş olan kompozitlerin en yüksek sertlik değerleri yanı sıra en yüksek aşınma oranına sahip olmasıdır. Bu çelişki olarak gözüksede takviye oranının artması mikroyapıda çözünemeyen ÇDKNT'lerin aglomerasyon oluşturup heterojen bir yapı oluşturması ile açıklanabilir. Bu gözlemlerden, sertliğin araştırılan malzemelerdeki aşınma davranışı



üzerinde önemli bir etkisi olduğu çok açıktır. Aşınma testleri, ÇDKNT ilavesinin aşınma direncini ortalama% 4 artırdığını göstermektedir.

Aşınma; yapışma ve oksidasyonun neden olduğu sertleştirilmiş parçacıklardan oluşan bir transfer katmanıdır. Beklendiği gibi, donatıların ÇDKNT ilavesi, titanyumun aşınma direncini ve sürtünme özelliklerini arttırmada etkili olmuştur. Aşınma mekanizması %4 ÇDKNT'den sonra değişmiştir. Bu nedenle, %5 ÇDKNT takviyesi ile en yüksek sertliğe sahip kompozitten, yüksek aşınma direnci elde edilememiştir. Bu, katkı maddelerinin eklenmesinin belirli bir oranda olması gerektiğini gösterir. Dolayısıyla çözünemeyen takviye malzemesi mikroyapı içerisinde topaklanmaya neden olarak segregasyon oluşturmuş ve aşınma testlerinde kütle kaybının fazla olmasına neden olmuştur.

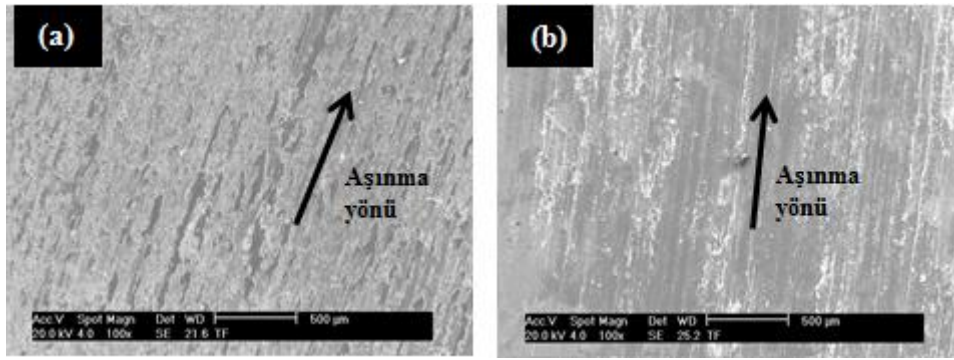


**Şekil 9.** Ti-6Al-4V ve Farklı % (%0,5-5 v/v) ÇDKNT takviyesi ile değişik aşınma ağırlıkları ile ölçülen (a) Aşınma oranı, (b) aşınma direnci

Yapılan aşınma testlerine ait iki farklı numunenin aşınma izleri Şekil 10'da gösterilmiştir. Burada şekilde de görüleceği gibi takviyesiz malzemenin aşınma izleri net bir şekilde görülmekle birlikte takviye oranının artmasıyla (%2) aşınma izlerinin azaldığı, dolayısıyla aşınma direncinin yüksek olduğu aşınma izlerinden görülmektedir. Aşınma izlerinin sürtünme katsayıları Tablo 1 'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Farklı aşındırıcı ağırlıklarında aşınma izleri sürtünme katsayıları

| ÇDKNT<br>%  | 1000<br>(g)          | 2000<br>(g)          | 3000<br>(g)          | 4000<br>(g)          | 5000<br>(g)          |
|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Saf Ti6Al4V | $1,38 \cdot 10^{-7}$ | $9,67 \cdot 10^{-8}$ | $1,01 \cdot 10^{-7}$ | $9,78 \cdot 10^{-8}$ | $1,06 \cdot 10^{-7}$ |
| %0,5 ÇDKNT  | $3,88 \cdot 10^{-8}$ | $3,03 \cdot 10^{-8}$ | $2,90 \cdot 10^{-8}$ | $2,64 \cdot 10^{-8}$ | $2,72 \cdot 10^{-8}$ |
| %1 ÇDKNT    | $2,29 \cdot 10^{-8}$ | $1,87 \cdot 10^{-8}$ | $2,14 \cdot 10^{-8}$ | $2,10 \cdot 10^{-8}$ | $2,03 \cdot 10^{-8}$ |
| %2 ÇDKNT    | $3,78 \cdot 10^{-8}$ | $3,51 \cdot 10^{-8}$ | $2,13 \cdot 10^{-8}$ | $2,88 \cdot 10^{-8}$ | $2,12 \cdot 10^{-8}$ |
| %3 ÇDKNT    | $5,28 \cdot 10^{-8}$ | $3,70 \cdot 10^{-8}$ | $2,65 \cdot 10^{-8}$ | $2,94 \cdot 10^{-8}$ | $3,48 \cdot 10^{-8}$ |
| %4 ÇDKNT    | $1,61 \cdot 10^{-8}$ | $1,71 \cdot 10^{-8}$ | $2,19 \cdot 10^{-8}$ | $1,95 \cdot 10^{-8}$ | $2,36 \cdot 10^{-8}$ |
| %5 ÇDKNT    | $6,72 \cdot 10^{-8}$ | $5,75 \cdot 10^{-8}$ | $7,08 \cdot 10^{-8}$ | $6,18 \cdot 10^{-8}$ | $6,29 \cdot 10^{-8}$ |



**Şekil 10.** %2 Ti-6Al-4V/ÇDKNT kompozit numunelerinde (a), takviyesiz Ti-6Al-4V numunelerde (b) aşınma izleri

Özellikle, farklı ağırlıklar altında saf Ti6Al4V ve % 0,5 v/v ÇDKNT takviyeli kompozit malzemenin aşınma performansı pekiyi olmamasına rağmen, artan % ÇDKNT miktarı ile aşınma kaybının gözle görülür biçimde azaltıldığı tespit edilmiştir [20-22].

#### IV. SONUÇ

Bu çalışmada, farklı karbon nanotüp oranlarıyla takviye edilerek üretilmiş kompozit (Ti-6Al-4V/ÇDKNT) numunelerin yoğunluğu, sertliği ve metalografik özellikleri sinterleme sıcaklığının bir fonksiyonu olarak araştırılmıştır. Bu çalışmanın bulgularında; numunelerin yoğunluğu, teorik yoğunluğa göre artan % ÇDKNT oranı ile istenen seviyelere (% 89,7 – 97,1) yaklaşmıştır. SEM görüntüleri, karbon nanotüp tozlarının ana matriste belli oranlarda iken (% 4'e kadar) homojen olarak dağıldığını ve belirli bir bölgede ayrışma olmadığını göstermiştir. Bununla birlikte, % 4 oranı aşıldığında ise karbon nanotüp tozlarının sebep olduğu gözenekli yapının oluşumu gözlenmiştir. Artan karbon nanotüp içeriği ile karbon nanotüpün ana pik alanında artış olduğu görülmüştür. Karbon nanotüpün hacimce yüzdesinin artması ve yüksek sinterleme sıcaklığının etkisi ile metal matrisli kompozitin sertliği artmıştır. Fakat ÇDKNT'nin hacimce %5 oranına sahip kompozit numunede aşırı doymuş bir yapıdan ve aglomerasyondan dolayı oluşan gözenekli yapı ile sertlik ve aşınma direnci artışı kaybolmaktadır. Karbon nanotüp eklenerek sertliğin artması dispersiyon güçlendirme etkisine bağlanabilir. Literatürde yapılmış çalışmalara da refere edilerek yapılan aşınma testinde, takviye edilen

ÇDKNT'lerin aşınma direnci üzerinde olumlu bir etkiye neden olduğu ve aşınma direncini iyileştirdiği düşünülmektedir.

**TEŞEKKÜR:** Bu çalışma, Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Programı (FEN-K-070317-0107) tarafından desteklenmiştir.

## V. KAYNAKLAR

- [1] M. A. Erden, S. Barlak, B. Adalı, Ö. Çelikkıran, "Toz Metalurjisi İle Üretilen Nb-V Mikroalaşım Çeliğine Vanadyum İlavesinin Mikroyapı Mekaniksel Özellikleri Üzerine Etkisi," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 6, s. 3, ss. 629-636, 2018.
- [2] A. G. Jackson, J. Moteff and F. H. Froes, "Advanced Titanium Alloy Development via Powder Metallurgy," *Powder Metallurgy of Titanium Alloys*, pp. 229-241, 1980.
- [3] D. E. Alman and J. A. Hawk, "The abrasive wear of sintered titanium matrix-ceramic particle reinforced composites," *Wear*, vol. 225, pp. 629-639, 1999.
- [4] J. Q. Jiang, T. S. Lim, Y. J. Kim, B. K. Kim and H. S. Chung, "In situ formation of TiC-(Ti-6Al-4V) composites," *Materials science and technology*, vol. 12, no.4, pp. 362-365, 1996.
- [5] K. G. Budinski, "Tribological properties of titanium alloys," *Wear*, vol. 151, no. 2, pp. 203-217, 1991.
- [6] S. Anzawa, H. Takizawa, T. Tanimoto and A. Ogawa, "Development of high strength MWCNT reinforced titanium alloy matrix composites," In The 11th world conference on titanium program-149, 2007.
- [7] L. Wang, Z. B. Lang and H. P. Shi, "Properties and forming process of prealloyed powder metallurgy Ti-6Al-4V alloy," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol 17, pp. 639-643, 2007.
- [8] M. Hagiwara, Y. Kaieda, Y. Kawabe and S. Miura, "Property enhancement of alpha-beta titanium alloys by blended elemental P/M method," *Titanium'92: Science and technology*, pp. 887-894, 1993.
- [9] M. Yamada, "An overview on the development of titanium alloys for non-aerospace application in Japan," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 213, nos. 1-2, pp. 8-15, 1996.
- [10] R. B. Waterhouse and A. Iwabuchi, "High temperature fretting wear of four titanium alloys," *Wear*, vol. 106, nos. 1-3, pp. 303-313, 1985.
- [11] W. Cai, X. Feng and J. Sui, "Preparation of multi-walled carbon nanotube-reinforced TiNi matrix composites from elemental powders by spark plasma sintering," *Rare Metals*, vol. 31, no. 1, pp. 48-50, 2012.

- [12] H. Ö. Gülsoy, N. Gülsoy and R. Calışıcı, "Particle morphology influence on mechanical and biocompatibility properties of injection molded Ti alloy powder," *Bio-medical materials and engineering*, vol. 24, no. 5, pp. 1861-1873, 2014.
- [13] S. Ranganath, "A review on particulate-reinforced titanium matrix composites," *Journal of Materials Science*, vol. 32, no.1, pp. 1-16, 1997.
- [14] S. L. Rice, S. F. Wayne and H. Nowotny, "Material transport phenomena in the impact wear of titanium alloys," *Wear*, vol. 65, no. 2, pp. 215-226, 1980.
- [15] H. Yamanaka, G. Ken-ichiro and S. Munetaka, "Clinical results of Hi-tech Knee II total knee arthroplasty in patients with rheumatoid arthritis: 5-to 12-year follow-up," *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, vol. 7, no. 1, pp. 9, 2012.
- [16] M. Pul, "Alüminyum 7075 Matrisli Kompozitlerde SiC, B4C Ve TiB2 Takviye Elemanlarının Mekanik Özelliklere Etkilerinin Karşılaştırılması," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 7, s. 1, ss. 180-193, 2019.
- [17] S. R. Nutt and A. W. Ruff, "A study of the friction and wear behavior of titanium under dry sliding conditions," *Wear of Materials*, pp. 426-433, 1983.
- [18] H. Üçışık, "Metalografik numune hazırlama tekniğinde dağlama ve dağlama reaktifleri," *İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi*, İstanbul, 1981.
- [19] Z. Y. Ma, R. S. Mishra and S. C. Tjong, "High-temperature creep behavior of TiC particulate reinforced Ti-6Al-4V alloy composite," *Acta materialia*, vol. 50, no. 17, pp. 4293-4302, 2002.
- [20] K. S. Prakash, P. M. Gopal, D. Anburose and V. Kavimani, "Mechanical, corrosion and wear characteristics of powder metallurgy processed Ti-6Al-4V/B4C metal matrix composites," *Ain Shams Engineering Journal*, 2016.
- [21] H. Ö. Gülsoy, M. K. Bilici, Y. Bozkurt and S. Salman, "Enhancing the wear properties of iron based powder metallurgy alloys by boron additions," *Materials and Design*, vol. 28, no.7, pp. 2255-2259, 2007.
- [22] İ. Topcu, A. N. Güllüoğlu, M. K. Bilici ve H. Ö. Gülsoy, "Karbon nanotüp takviyeli Ti-6Al-4V/KNT kompozitlerin aşınma davranışlarının incelenmesi," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 34, s.3, ss. 1441-1449, 2019.