



Hibrit Takviyeli Bakır Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Mekanik Özellikleri Üzerine Bir Derleme

Serhat Şap^{1*}, Ünal Değirmenci², Üsame Ali Usca³, Mahir Uzun⁴

^{1*} Bingöl Üniversitesi, Elektrik ve Enerji Bölümü, Bingöl/Türkiye;
ssap@bingol.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-5177-4952>

² Bingöl Üniversitesi, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Bingöl/Türkiye;
udegirmenci@bingol.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-1480-2488>

³ Bingöl Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bingöl/Türkiye;
ausca@bingol.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-5160-5526>

⁴ İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Malatya/Türkiye; mahir.uzun@inonu.edu.tr,
<https://orcid.org/0000-0002-0907-6875>

(Alınış/Arrival: 23.11.2021, Kabul/Acceptance: 28.12.2021, Yayınlanma/Published: 31.12.2021)

Öz

Dünyanın her yerinde teknolojik gelişmelere paralel olarak kompozit malzemelere olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Kompozit malzemeler havacılık, otomotiv, uzay ve metal endüstrilerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler arasında bakır ana matrisli kompozit malzemeler; düşük yoğunluk, gelişmiş yorulma mukavemeti, yüksek sertlik ve yüksek özgül mukavemeti gibi üstün özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. Literatürde tek bir takviye ile güçlendirilmiş kompozit malzemeler üzerine birçok araştırmalar mevcuttur. Fakat yapılan çalışmalarda kompozit malzemeleri güçlendirmede tek bir takviyenin belirli bir oranda etkiye sahip olduğu görülmektedir. Bu bağlamda metal matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin daha fazla geliştirilmesine yönelik olarak birden fazla takviye malzemesi kullanılmasıyla hibrit takviyeli kompozit malzemeler üretilmesi birçok araştırmacının dikkatini çekmektedir. Tek bir takviye elemanına nazaran hibrit kompozitlerin daha iyi mekanik özellikler sergilediği son zamanlarda yapılan çalışmalarda açıkça görülmektedir. Literatürde hibrit kompozit malzemeler üzerine birçok araştırma mevcuttur. Bu çalışmada hibrit takviyeli bakır matrisli kompozit malzemelerin üstün özelliklerine dikkat çekmek amacıyla kapsamlı bir araştırma yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hibrit takviyeli kompozitler, Bakır, Mikroyapı, Mekanik özellikler

A Review on The Fabrication and Mechanical Properties of Hybrid Reinforced Copper Matrix Composites

Abstract

In parallel with technological developments all over the world, the interest in composite materials is increasing day by day. Composite materials are frequently used in the aerospace, automotive, space and metal industries. Composite materials include copper main matrix composite materials; It stands out with its superior properties such as low density, enhanced fatigue strength, high hardness and high specific strength. In the literature, there are many studies on composite materials reinforced with a single reinforcement. However, studies have shown that a single reinforcement has a certain effect on reinforcing composite materials. In this context, the fabrication of hybrid reinforced composite materials by using more than single reinforcement material in order to further improve the mechanical properties of metal matrix composites attracts the attention of many researchers. It has been clearly seen in recent studies

that hybrid composites exhibit better mechanical properties compared to a single reinforcement element. There are many studies on hybrid composite materials in the literature. In this study, a comprehensive research was carried out to draw attention to the superior properties of hybrid reinforced copper matrix composite materials.

Keywords: Hybrid reinforced composites, Copper, Microstructure, Mechanical properties

1. GİRİŞ

Metal matrisli kompozit malzemeler bir ana matris ile bir ya da birden fazla takviye malzemesinden oluşan bir üründür [1-3]. Oluşturulan bu malzemenin özellikleri ilave edilen takviyenin şekline, boyutuna ve hacmine büyük oranda bağlıdır. Metal matrisli kompozitler geleneksel yöntemlerle imal edilen alaşımlardan daha iyi iletkenlik ve dayanım özellikleri sunabilmektedir [4-7]. Avantajları açısından değerlendirildiğinde, kompozit malzemelerin küresel pazarda önemli bir yere sahip olması beklenmektedir [8]. Yüksek mukavemet, aşınma, korozyon direnci, yüksek termal direnç ve üstün kırılma tokluğu gibi üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde endüstrinin çeşitli alanlarında kompozit malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır [9-11]. Metal matrisli kompozit malzemeler geçmişten bugüne kadar birçok araştırma ve uygulama alanlarında önemli bir yere sahip olmakla birlikte havacılık, otomotiv ve savunma sanayisinde sıklıkla kullanılmaktadır [12, 13]. Metal matrisli kompozit malzemeleri diğer malzemelerden ayıran en önemli özelliği farklı ihtiyaçlara göre istenilen özellikte ürünlerin elde edilebilmesidir [14, 15]. Bu üstün özelliklerinden dolayı metal matrisli kompozit malzemeler geleneksel malzemelere göre daha fazla tercih edilmektedir [16].

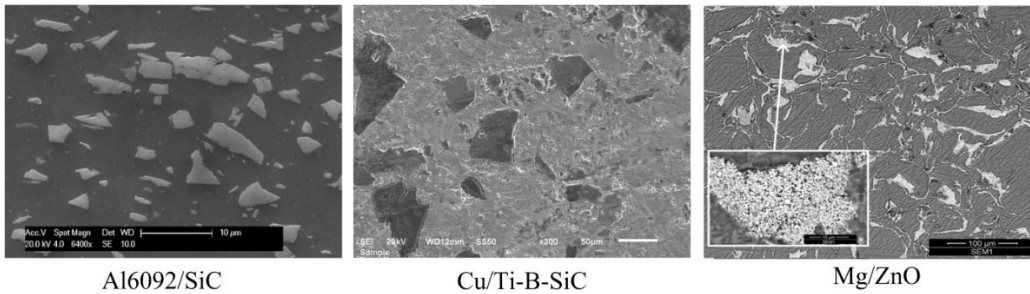
Metal matrisli kompozit malzemeler içerisinde bakır matrisli kompozitler son yıllarda daha popüler olmaktadır. Saf bakır düşük mukavemeti ve çok iyi olmayan fiziksel özellikleri ile tek başına uygulamalarda kullanılamamaktadır [17, 18]. Saf bakıra bir ya da birden fazla takviye malzemesinin ilave edilmesiyle ana matrisin termal ve iletkenlik özelliklerinde çok büyük değişiklikler olmadan, yüksek sıcaklıklarda bile mekanik ve fiziksel özelliklerin kayda değer şekilde iyileştirilebilmektedir [19-21]. Daha iyi mekanik özelliklere sahip malzemelerin korozyon dirençleri de aynı oranda arttığı için uygulama alanlarında daha fazla kabul görmektedir [22-25]. Bakır matrisli kompozit malzemeler aynı zamanda fren disklerinde, elektrik kontaklarında, elektrotlarda, elektronik malzeme yapımında, rulmanlarda, kesici aletlerde ve yüksek performans gerektiren yapısal uygulama alanlarında da kullanılmaktadır [26]. Tüm bu kullanımlarının yanı sıra yüksek özgül mukavemeti nedeniyle bakır matrisli kompozitler her geçen gün daha fazla tercih edilmektedir.

Hibrit kompozit malzemeler, yüksek mukavemet/ağırlık oranı sayesinde daha popüler olabilmektedir [27-31]. Hibrit kompozitler iki ya da daha fazla güçlendirme oranına sahip malzemelerdir [32]. Sertlik ve aşınma direnci yüksek olan güçlendirme elemanları (B_4C , Al_2O_3 , SiC , TiB_2 , ve WC) takviye olarak kullanılabilir [33, 34]. Hibrit kompozitler, tek takviyeli kompozit malzemelere alternatif olarak geliştirilmiştir. Farklı tasarım ihtiyaçlarını geleneksel kompozitlere nazaran daha mükemmel bir şekilde karşılayabilen hibrit kompozitler benzersiz özelliklere sahiptirler [35].

Bu çalışmada, metal matrisli kompozit malzemeler hakkında detaylı bilgiler verilmiş ve tek takviyeli kompozit malzemelere göre hibrit kompozitlerin daha üstün özellikler sergilediğinin önemi vurgulanmaya çalışılmıştır. Çalışmamızda ayrıca hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinden ayrıntılı olarak bahsedilmiş ve gelecekte yapılacak olan çalışmalara rehber olacağı düşünülmektedir.

2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

Birçok pozitif özelliği sayesinde öne çıkan kompozit malzemeler endüstride çeşitli alanlarda tercih edilmektedir. Ana matrislerine göre gruplandırılan birkaç çeşit kompozit malzeme türü bulunmaktadır. Bunlardan biri de metal matrisli kompozitlerdir. Kompozit malzemelerde matris olarak kullanılan yapının amacı takviye liflerini ya da partiküllerini istenen form ve boyutlarda şekillendirmek suretiyle bir malzeme ile birleştirmek ve aynı zamanda matris üzerine gelebilecek yükleri tüm malzeme üzerine orantılı bir şekilde dağıtmaktır [36]. Aynı zamanda matris yapı, takviye elemanlarını dış etkilerden korumaktadır. Matrisin amacına uygun bir şekilde gerekli teknolojik özelliklere sahip takviye elemanları seçilmelidir [37]. Ana matrise göre seçilebilen birkaç malzeme gurubu bulunmaktadır. Bunlar Al (Alüminyum), Cu (Bakır), Mg (Magnezyum), Ni (Nikel), Bi (Bizmut), Fe (Demir) gibi malzemelerden oluşmaktadır. Şekil 1’de farklı ana matrislere sahip SEM (Scanning Electron Microscope) fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 1. Farklı ana matrislere sahip kompozitlerin SEM fotoğrafları [38-40].

2.1. Bakır Matrisli Kompozit Malzemeler

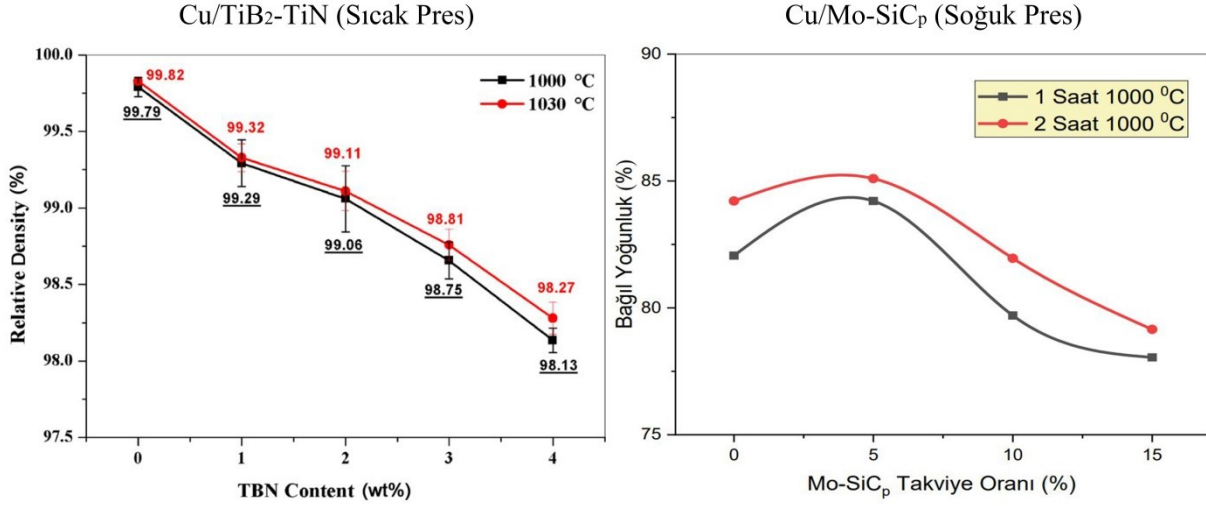
Bakır saf veya diğer metallerle güçlendirilmiş halde olsa bile çok yaygın kullanılması sebebiyle önemli bir mühendislik malzemesidir [41]. Güçlendirilmemiş halde bile mükemmel özelliklere sahip bir malzemedir. Üstün iletkenlik özelliği sayesinde elektrik endüstrisinde vazgeçilmez bir ürün olarak bilinmektedir. Tablo 1’de saf metallerin bazı özellikleri görülmektedir.

Tablo 1. Saf metallerin ısı ve elektrik iletkenlikleri tablosu [42].

Metal	Elektriksel iletkenlik ($\Omega.m$) ⁻¹	Isıl İletkenlik W.(m.K) ⁻¹
Gümüş	106	108
Bakır	100	100
Altın	72	76
Alüminyum	62	56
Magnezyum	39	41
Çinko	29	29
Nikel	25	15
Kadmiyum	23	24
Kobalt	18	17
Demir	17	17
Çelik	13-17	13-17
Platinyum	16	18
Kalay	15	17
Kurşun	8	9

Bakır matrisli kompozit malzemeler iki farklı yöntem ile üretilebilmektedir. Bunlardan birincisi soğuk pres yöntemidir. Bu yöntemde tozlar mekanik olarak karıştırıldıktan sonra belirli bir

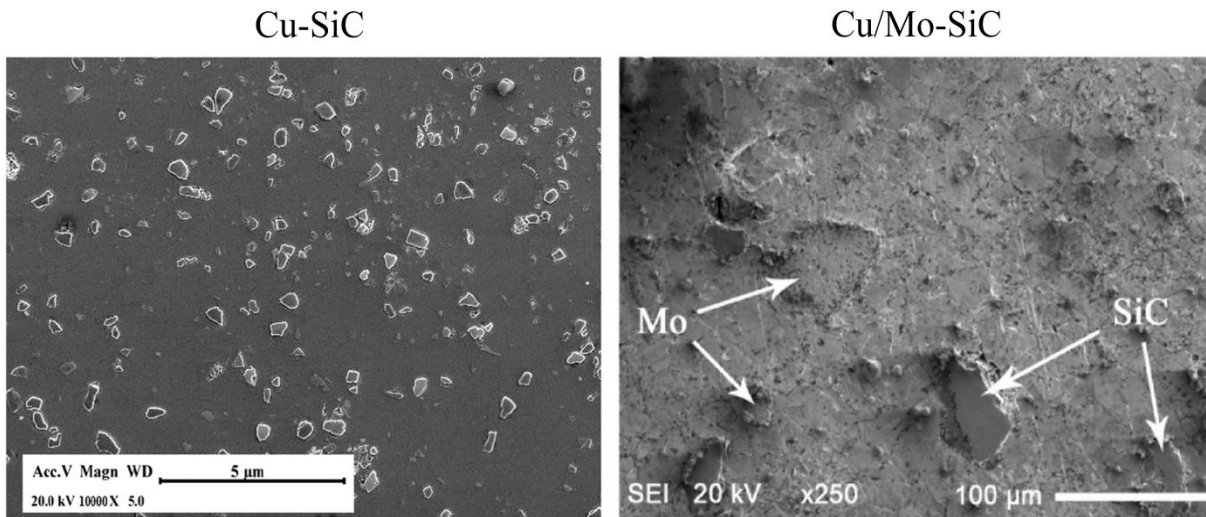
basınç altında bir kalıpta şekillendirilerek sinterlemeye hazır hale getirilir. Daha sonra matris malzemesinin erime sıcaklığının altında bir sıcaklık seçilerek sinterleme işlemi yapılmaktadır. Sıcak presleme yönteminde ise karıştırılan tozlar özel bir fırında belirlenen sıcaklık uygulanırken presleme işlemi gerçekleştirilir. Sıcak pres yöntemiyle üretilen kompozitlerin yoğunlukları soğuk pres ile üretilen kompozitlerden daha yüksek olabilmektedir. Şekil 2’de iki farklı yöntemle üretilen kompozit malzemelerin yoğunluk grafikleri görülmektedir.



Şekil 2. Sıcak ve soğuk presleme yöntemiyle üretilen bakır kompozitlerin bağıl yoğunluk grafikleri [43, 44].

Şekil 2.2’de görüldüğü gibi sıcak pres yöntemiyle üretilen bakır kompozitleri çok yüksek bağıl yoğunluklara ulaşabilmektedir. Sıcak presleme yönteminde şekillendirme ve sinterleme basamakları aynı anda yapıldığı için oldukça yüksek yoğunluklar elde edilebilmektedir.

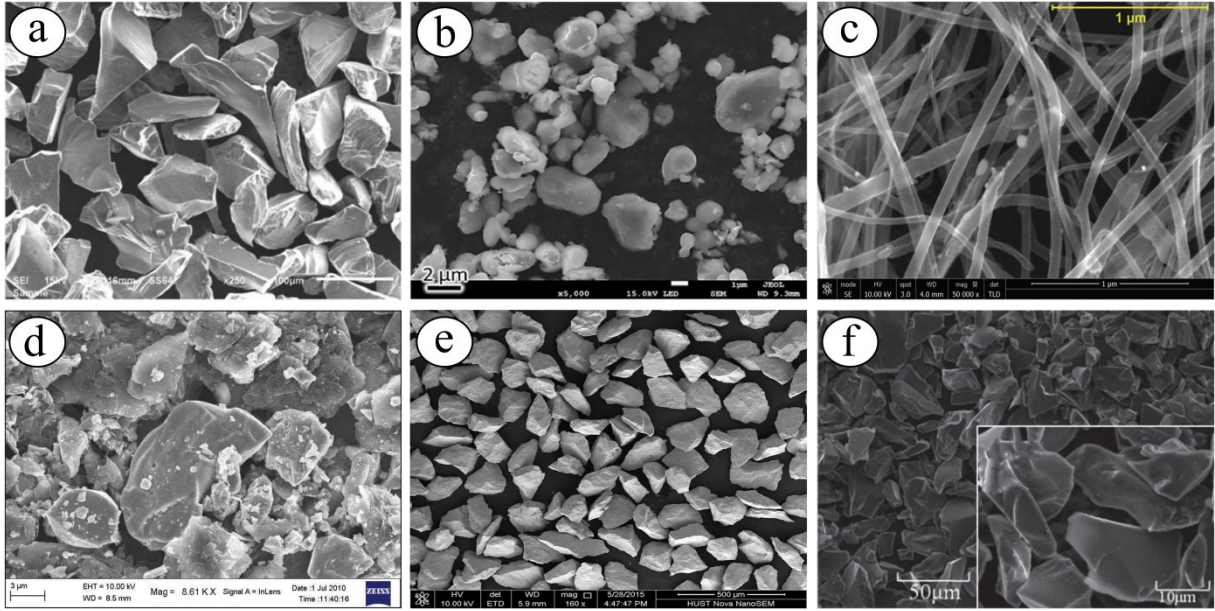
Şekil 3’te bakır ana matris içerisine ilave edilen tek ve hibrit takviyeli kompozitlerin SEM fotoğrafları görülmektedir. Matris yapı içerisinde gömülü halde bulunan takviye elemanları (SiC ve Mo) net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3. Bakır ana matris içerisine ilave edilen tek ve hibrit takviyeli kompozitlerin SEM görüntüleri [45, 46].

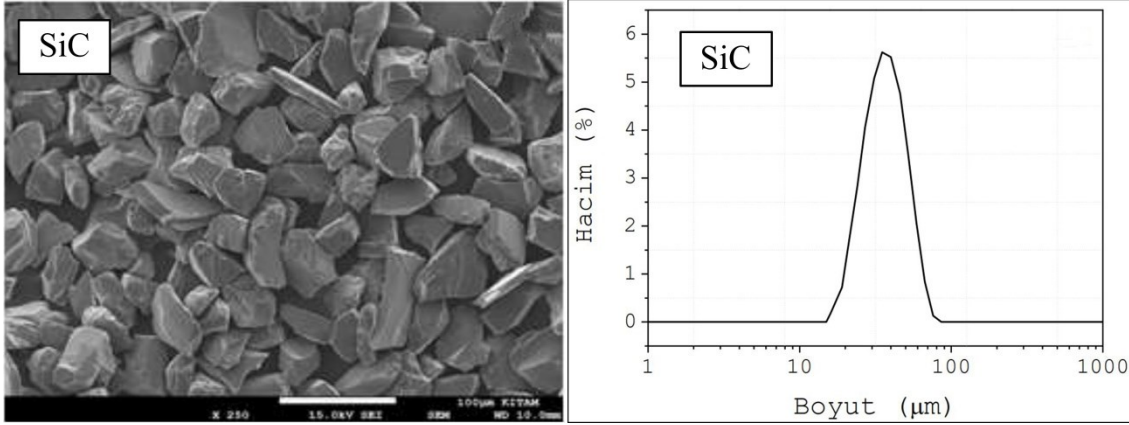
3. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERDE KULLANILAN HİBRİT TAKVİYELER

Metal matrisli kompozit malzemelerde matris fazını güçlendirmek amacıyla birçok takviye malzemesi kullanılmaktadır. Bunlar; SiC (silisyum karbür), TiC (titanyum karbür), Ti₂B (titanyum diborür), WC (tungsten karbür), Al₂O₃ (alüminyum oksit), B₄C (bor karbür), Z₂B (zirkonyum diborür), TaC (tanatal karbür) ve KNT (karbon nanotüp, CNT) olarak sıralanabilir. Bu malzemeler yapı itibarıyla birbirinden farklı türde olabilmektedir. Takviye malzemesi olarak kullanılan toz partiküllerinin boyutu ve geometrik yapısı matris yapının mukavemeti açısından oldukça önem arz etmektedir [47]. Hassan ve Gupta [48] yaptıkları bir çalışmada Mg bazlı kompozitlere hacimce % 1,1 Al₂O₃ partikül takviyelerini üç farklı boyutta (50 nm, 0,3 µm, 1,0 µm) ilave ederek kompozit malzemeler üretmişlerdir. Deneyler sonucunda Al₂O₃ takviye partikülünün boyutunun azaldıkça mekanik özelliklerin arttığını tespit etmişlerdir. Keskin ve köşeli forma sahip takviye malzemelerinin matris içerisinde tutunması daha kolay olabilmektedir. Farklı geometrik şekillere sahip olan takviye malzemelerinin bazılarında ait SEM fotoğrafları Şekil 4’de görülmektedir.



Şekil 4. Takviye tozları; a) SiC [49], b) TiB₂ [50], c) CNT [51], d) TiC [52], e) WC [53], f) B₄C [54].

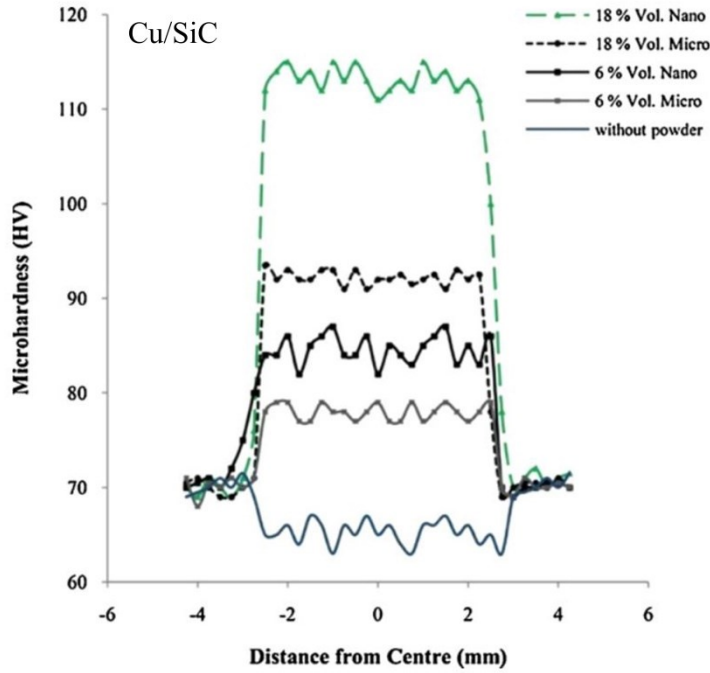
Kompozit malzeme üretimi sırasında takviye elemanları, matris yapı içerisine nüfuz edebilmeli, ana matris ile bir bağ oluşturabilmeli ve matris yapı malzemesi tarafından ıslatılabilmelidir [55]. Matris yapı, takviye elemanlarını sarmak suretiyle bir arada tutabilmeli ve mümkün olan en kısa süre içerisinde katılaşmayı sağlayabilmelidir [56]. Takviye elemanları genel olarak sert bir yapıya sahip olmaları sebebiyle kırılğan ve gevrek olabilmektedir [57]. Matris yapı, takviye elemanlarının yüzeylerini çevresel etkenlere karşı koruyarak dirençlerini en üst seviyeye çıkarabilmektedir [58]. Şenel vd. [59] yaptıkları bir çalışmada SiC toz partiküllerinin SEM ve tane boyutlarını belirlemişlerdir (Şekil 5).



Şekil 5. SiC toz partikülünün SEM görüntüsü ve tane boyut grafiği [59].

4. BAKIR MATRİSLİ HİBRİT KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Metal matrisli kompozit malzemelerde mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla sertlik, aşınma, çekme, üç nokta eğme, darbe, kırılma ve yorulma gibi birçok deney yapılabilmektedir. Yapılan mekanik deneyler sonucunda üretilen kompozit malzemenin mekanik özellikleri hakkında detaylı bilgilere ulaşmak mümkün olabilmektedir. Barmouz vd. [26] yaptıkları bir çalışmada bakır ana matris içerisine tek takviye elemanı olarak SiC ilave ederek Cu/SiC kompozitleri üretmişlerdir. Yaptıkları sertlik deneyi sonucunda en yüksek sertlik değerinin ortalama 115 HV olduğunu tespit etmişlerdir (Şekil 6).



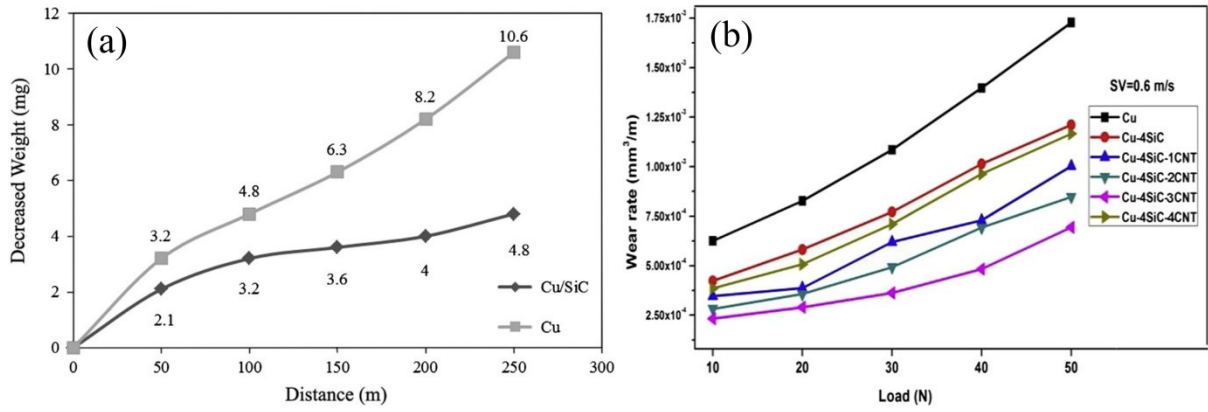
Şekil 6. Cu/SiC kompozitlerinin mikrosertlik grafiği [26].

Mallikarjuna vd. [60] yaptıkları bir çalışmada ise bakır ana matrisi içerisine belirli oranlarda SiC-CNT takviye elemanları ilave ederek Cu/4SiC-xCNT kompozitlerini üretmişlerdir. Sertlik deneyi sonuçlarına göre en yüksek sertlik değerinin 175 HV olduğunu tespit etmişlerdir (Tablo 2). Buradan yola çıkarak hibrit takviyeli kompozitlerin daha iyi sertlik sonuçları verdiği söylenebilir.

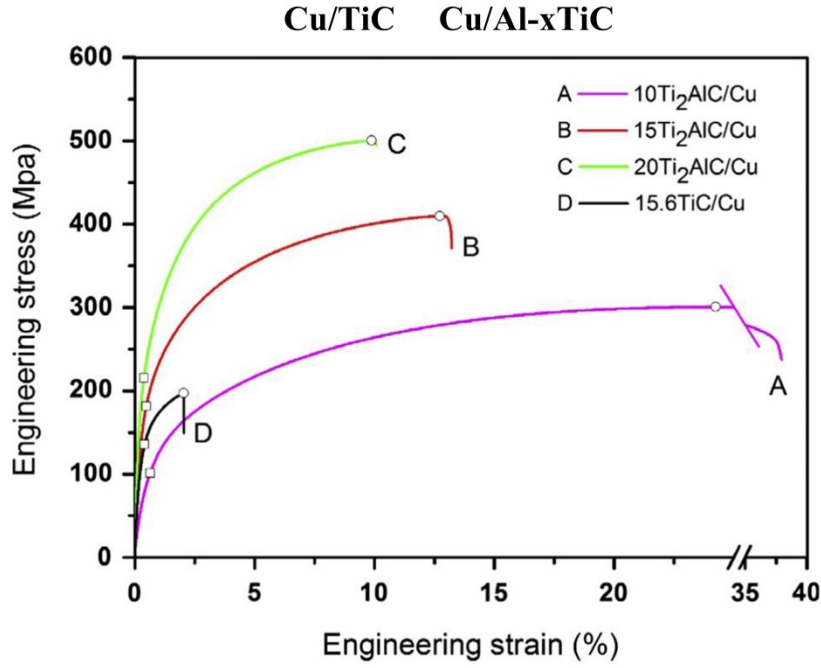
Tablo 2. Cu/4SiC-xCNT kompozitlerinin sertlik deneyi sonuçları [60].

Sl. No.	Materials	Vickers microhardness (VH)	Nanoindentation hardness (GPa)
1	Copper	94 ± 4	0.96 ± 0.08
2	Cu-4SiC	131 ± 5	1.34 ± 0.08
3	Cu-4SiC-1CNTs	142 ± 4	1.53 ± 0.1
4	Cu-4SiC-2CNTs	161 ± 5	1.73 ± 0.1
5	Cu-4SiC-3CNTs	175 ± 3	1.86 ± 0.1
6	Cu-4SiC-4CNTs	158 ± 5	1.61 ± 0.1

Şekil 7’de sırasıyla Cu/SiC ve Cu/4SiC-xCNT kompozitlerinin aşınma testi sonuçlarına ait ağırlık kaybı ve aşınma oranı grafikleri görülmektedir. Cu/SiC kompozitlerinin ağırlık kaybı grafiğinde aşınma mesafesi arttıkça SiC takviyesi içeren numunelerin aşınma dirençlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir [61]. Cu/4SiC-xCNT kompozitlerinde uygulanan yükün artmasıyla birlikte SiC-CNT içeren numunelerde aşınma direncinin daha fazla olduğu görülmektedir [60].

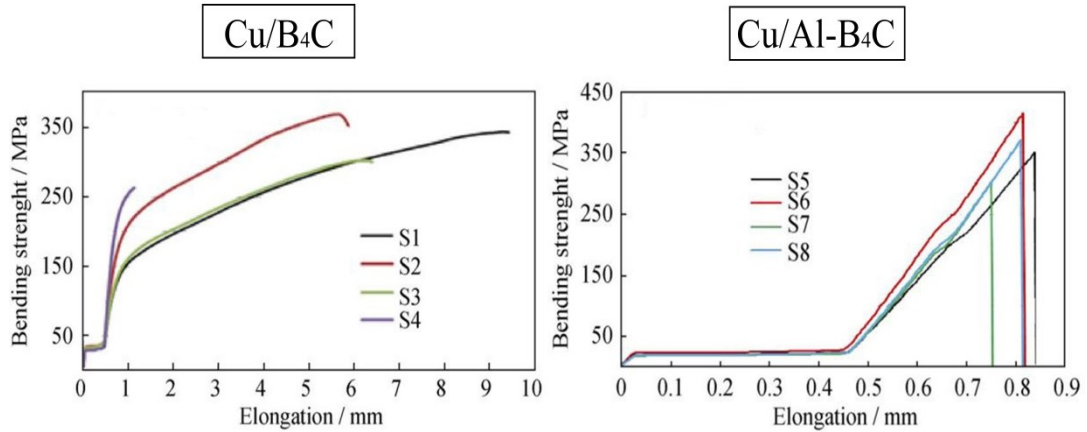
**Şekil 7.** Cu ana matrisli kompozitlerin ağırlık kaybı grafikleri; a) Cu/SiC [61], b) Cu/4SiC-xCNT [60].

Li vd. [62] yaptıkları bir çalışmada bakır içerisine ilk önce TiC daha sonra Al-TiC ilave ederek tek ve hibrit takviyeli kompozitler üretmişlerdir. Ürettikleri kompozitlerin çekme gerilme deneyi neticesinde, tek takviyeli kompozit numunesine nazaran hibrit takviyeli numunelerde çekme mukavemetinin çok daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. En yüksek çekme mukavemetinin 498 MPa ile Cu/Al-0.5TiC kompozitinde görüldüğünü rapor etmişlerdir. Cu/TiC ve Cu/Al-xTiC kompozitlerinin çekme gerilme grafiği Şekil 8’de görülmektedir.



Şekil 8. Cu/TiC ve Cu/Al-xTiC kompozitlerinin çekme gerilme diyagramı [62].

Balalan and Gulan [63], bakır içerisine önce B₄C toz partikülleri daha sonra Al toz partikülleri ilave ederek sıcak pres yöntemiyle kompozit malzemeler üretmişlerdir. Ürettikleri kompozit numunelere eğilme deneyi uygulayarak tek ve hibrit takviyeli kompozit malzemeleri kıyaslamışlardır. Elde ettikleri eğilme deneyi sonuçlarına göre bakır içerisine ilave edilen tek takviyeli kompozitlere nazaran hibrit takviyeli kompozitlerin eğilme mukavemetlerinin daha yüksek olduğunu rapor etmişlerdir. En yüksek eğilme mukavemetinin 415.16 N.mm⁻² olarak tespit edildiğini bildirmişlerdir [63]. Cu/B₄C ve Cu/Al-B₄C kompozit numunelerine ait üç nokta eğilme deneyi sonuçlarını gösteren grafikler Şekil 9’da görülmektedir. Buradan yola çıkarak tek takviyeli kompozit numunelere nazaran hibrit takviyeli kompozitlerin eğilme mukavemetlerinin daha yüksek olduğu söylenebilir.



Şekil 9. Cu/B₄C ve Cu/Al-B₄C kompozitlerinin üç nokta eğilme deneyi sonuçlarını gösteren grafikler [63].

5.SONUÇLAR

Bu çalışmada, bakır ana matrisli kompozitlerin üretimi ve mekanik özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Tek takviyeli bakır kompozitler ile hibrit takviyeli kompozit malzemeler detaylı bir literatür araştırması yapılarak karşılaştırmalı olarak kıyaslanmıştır. Birçok bakır

kompozitlerin sertlik, aşınma, çekme ve üç nokta eğilme deneylerinde elde edilen mekanik özellikler karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar neticesinde hibrit takviyeli bakır kompozitlerin, tek bir takviye ile elde edilen bakır kompozitlerine göre daha üstün mekanik özellikler sergilediği görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Uzun M, Munis MM, Usca ÜA. Different ratios CrC particle-reinforced Cu matrix composite materials and investigation of wear performance. *Int J Eng Res Appl.* 2018;8(7):1-7.
- [2] Usca ÜA, Uzun M, Kuntoğlu M, Şap S, Giasin K, Pimenov DY. Tribological Aspects, Optimization and Analysis of Cu-B-CrC Composites Fabricated by Powder Metallurgy. *Materials.* 2021;14(15):4217.
- [3] Şap S, Uzun M, Usca ÜA, Pimenov DY, Giasin K, Wojciechowski S. Investigation on microstructure, mechanical, and tribological performance of Cu base hybrid composite materials. *J Mater Res Technol.* 2021;15:6990-7003.
- [4] Sap E. Microstructural and Mechanical Properties of Cu-Based Co-Mo-Reinforced Composites Produced by the Powder Metallurgy Method. *J Mater Eng Perform.* 2020;29(12):8461-72.
- [5] Uzun M, Çetin MS. Investigation of characteristics of Cu based, Co-CrC reinforced composites produced by powder metallurgy method. *Adv Powder Technol.* 2021;32(6):1992-2003.
- [6] Akbarpour M, Salahi E, Hesari FA, Yoon E, Kim H, Simchi A. Microstructural development and mechanical properties of nanostructured copper reinforced with SiC nanoparticles. *Mater Sci Eng A.* 2013;568:33-9.
- [7] Uzun M, Münis MM, Usca ÜA. Farklı oranlarda CrC partikül takviyesi kullanılarak toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş Cu matrisli kompozit malzemelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.* 2018;22(2):495-501.
- [8] Kilic M, Imak A, Kirik I. Surface Modification of AISI 304 Stainless Steel with NiBSi-SiC Composite by TIG Method. *J Mater Eng Perform.* 2021;30:1411-9.
- [9] Usca ÜA, Uzun M, Kuntoğlu M, Sap E, Gupta MK. Investigations on tool wear, surface roughness, cutting temperature, and chip formation in machining of Cu-B-CrC composites. *Int J Adv Manuf Technol.* 2021;116(9):3011-25.
- [10] Uzun M, Usca UA. Effect of Cr particulate reinforcements in different ratios on wear performance and mechanical properties of Cu matrix composites. *J Braz Soc Mech Sci & Eng.* 2018;40(4):197.
- [11] Sap E. Microstructure and Mechanical Effects of Co-Ti Powder Particles on Cu Matrix Composites. *Russ J Non-ferrous Metals.* 2021;62(1):107-18.
- [12] Jamwal A, Seth PP, Kumar D, Agrawal R, Sadasivuni KK, Gupta P. Microstructural, tribological and compression behaviour of Copper matrix reinforced with Graphite-SiC hybrid composites. *Mater Chem Phys.* 2020;251:123090.
- [13] Usca ÜA, Uzun M, Sap S, Kuntoğlu M, Giasin K, Pimenov DY, et al. Tool wear, surface roughness, cutting temperature and chips morphology evaluation of Al/TiN coated carbide cutting tools in milling of Cu-B-CrC based ceramic matrix composites. *J Mater Res Technol.* 2021:1-35.
- [14] Jha P, Gautam RK, Tyagi R. Friction and wear behavior of Cu-4wt.%Ni-TiC composites under dry sliding conditions. *Friction.* 2017;5(4):437-46.
- [15] Şap E, Usca ÜA, Gupta MK, Kuntoğlu M, Sarıkaya M, Pimenov DY, et al. Parametric Optimization for Improving the Machining Process of Cu/Mo-SiC_p Composites Produced by Powder Metallurgy. *Materials.* 2021;14(8):1921.

- [16] Chen X, Bao R, Yi J, Fang D, Tao J, Li F. Enhancing mechanical properties of pure copper-based materials with Cr_xO_y nanoparticles and CNT hybrid reinforcement. *J Mater Sci.* 2021;56(4):3062-77.
- [17] Chmielewski M, Nosewicz S, Wyszowska E, Kurpaska Ł, Strojny-Nędzka A, Piątkowska A, et al. Analysis of the micromechanical properties of copper-silicon carbide composites using nanoindentation measurements. *Ceram Int.* 2019;45(7):9164-73.
- [18] Uzun M, Usca ÜA. Farklı oranlarda Cr partikül takviyesinin Cu matrislikompozitlerin mekanik özelliklerine ve mikroyapısına etkisi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi.* 2017;8(4):797-803.
- [19] Çelik E, Aslan AK. The effect of porosity and Cu rate on microstructure and mechanical properties of Co alternative powder metallurgy compound. *Sci Sinter.* 2017;49(3):225-34.
- [20] Cui G, Ren J, Lu Z. The Microstructure and Wear Characteristics of Cu-Fe Matrix Friction Material with Addition of SiC. *Tribol Lett.* 2017;65(3):108.
- [21] Islak S, Çalgülü U, Hraam HRH, Özorak C, Koç V. Electrical conductivity, microstructure and wear properties of Cu-Mo coatings. *Res Eng Struct Mater.* 2019;5(2).
- [22] Bai GZ, Li N, Wang XT, Wang JG, Kim MJ, Zhang HL. High thermal conductivity of Cu-B/diamond composites prepared by gas pressure infiltration. *J Alloys Compd.* 2018;735:1648-53.
- [23] Şap S, Şap E, Kırık İ. Biyomalzeme Olarak Kullanılan Mühendislik Ürünleri. III. Uluslararası Battalgazi Bilimsel Çalışmalar Kongresi; 2019; Malatya; s. 200-207.
- [24] Şap S, Şap E, Kırık İ. Titanyum ve Alaşımlarının Biyomalzeme Olarak Kullanılması. III Uluslararası Battalgazi Bilimsel Çalışmalar Kongresi; 2019;Malatya; s. 1052-1059.
- [25] Şap S. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Titanyumun Biyomedikal Uygulamalarda Kullanımı. I. Uluslararası Malatya Uygulamalı Bilimler Kongresi; 2019; Malatya; s. 385-392.
- [26] Barmouz M, Asadi P, Besharati Givi MK, Taherishargh M. Investigation of mechanical properties of Cu/SiC composite fabricated by FSP: Effect of SiC particles size and volume fraction. *Mater Sci Eng A.* 2011;528(3):1740-9.
- [27] Cao F, Dong G, Jiang Y, Xiao P, Wang T, Liang S. Effect of La addition on microstructures and properties of $(TiB_2-TiB)/Cu$ hybrid composites prepared by in situ reaction. *Mater Sci Eng A.* 2020;789:139605.
- [28] Jamwal A, Prakash P, Kumar D, Singh N, Sadasivuni KK, Harshit K, et al. Microstructure, wear and corrosion characteristics of Cu matrix reinforced SiC-graphite hybrid composites. *J Compos Mater.* 2019;53(18):2545-53.
- [29] Kannan A, Mohan R, Viswanathan R, Sivashankar N. Experimental investigation on surface roughness, tool wear and cutting force in turning of hybrid $(Al7075+SiC+Gr)$ metal matrix composites. *J Mater Res Technol.* 2020;9(6):16529-40.
- [30] Karthik K, Rajamani D, Manimaran A, Prakash JU. Wear behaviour of hybrid polymer matrix composites using Taguchi technique. *Mater Today Proc.* 2020;33(7):3186-90.
- [31] Degirmenci U, Kirca M. Design and mechanical characterization of a novel carbon-based hybrid foam: A molecular dynamics study. *Computational Materials Science.* 2018;154:122-31.
- [32] Şap S, Şap E. Döküm Yöntemiyle Üretilen Co Esaslı Cr-Mo Alaşımlarının Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. III. Uluslararası Mesleki ve Teknik Bilimler Kongresi; 2018; Gaziantep; s. 1067.

- [33] Long F, Guo X, Song K, Jia S, Yakubov V, Li S, et al. Synergistic strengthening effect of carbon nanotubes (CNTs) and titanium diboride (TiB₂) microparticles on mechanical properties of copper matrix composites. *J Mater Res Technol.* 2020; 9(4):7989-8000.
- [34] Mittal P, Paswan MK, Sadasivuni KK, Gupta P. Structural, wear and thermal behaviour of Cu-Al₂O₃-graphite hybrid metal matrix composites. *Proc Inst Mech Eng L.* 2020;234(8):1154-64.
- [35] Degirmenci U, Erturk AS, Yurtalan MB, Kirca M. Tensile behavior of nanoporous polyethylene reinforced with carbon-based nanostructures. *Computational Materials Science.* 2021;186:109971.
- [36] Naghikhani M, Ardestani M, Moazami-Goudarzi M. Microstructure, Mechanical Properties and Wear Performance of WC/Brass Composites Produced by Pressureless and Spark Plasma Sintering Processes. *Met Mater Int.* 2019;27:1639-48.
- [37] Natrayan L, Kumar MS. Influence of silicon carbide on tribological behaviour of AA2024/Al₂O₃/SiC/Gr hybrid metal matrix squeeze cast composite using Taguchi technique. *Mater Res Express.* 2020;6(12):1265f9.
- [38] Gatea S, Ou H, McCartney G. Deformation and fracture characteristics of Al6092/SiC/17.5p metal matrix composite sheets due to heat treatments. *Mater Charact.* 2018;142:365-76.
- [39] Şap S, Turgut A, Uzun M. Investigation of microstructure and mechanical properties of Cu/Ti-B-SiC_p hybrid composites. *Ceram Int.* 2021;47(21):29919-29.
- [40] Lei T, Tang W, Cai S-H, Feng F-F, Li N-F. On the corrosion behaviour of newly developed biodegradable Mg-based metal matrix composites produced by in situ reaction. *Corrosion Science.* 2012;54:270-7.
- [41] Nautiyal H, Kumari S, Khatri OP, Tyagi R. Copper matrix composites reinforced by rGO-MoS₂ hybrid: Strengthening effect to enhancement of tribological properties. *Compos Part B-Eng.* 2019;173:106931.
- [42] Erdoğan M. Mühendislik Alaşımalarının Yapı ve Özellikleri. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım; 2001. s. 602.
- [43] Jinwei Yin PZ, Hanqin Liang, Dongxu Yao, Yongfeng Xia, Kaihui Zuo, YuPing Zeng. Microstructure and Mechanical Properties of Cu Matrix Composites Reinforced by TiB₂/TiN Ceramic Reinforcements. *Acta Metall Sin.* 2020;33(12):1609-17.
- [44] Şap E. Güçlendirilmiş Bakır Esaslı Kompozit Malzemelerin Mikroyapı ve Sertlik Özellikleri. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.* 2021;11(1):590-8.
- [45] Abd El Aal MI. Effect of high-pressure torsion processing on the microstructure evolution and mechanical properties of consolidated micro size Cu and Cu-SiC powders. *Adv Powder Technol.* 2017;28(9):2135-50.
- [46] Şap E. Investigation of mechanical properties of Cu/Mo-SiC_p composites produced with P/M, and their wear behaviour with the Taguchi method. *Ceram Int.* 2021;47(18):25910-20.
- [47] Şap S. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Sinterlenen Sert Metallerin Üretimi ve Mekanik Özellikleri. 1 Uluslararası Malatya Uygulamalı Bilimler Kongresi; 2019; Malatya: İzdaş; s. 393-400.
- [48] Hassan SF, Gupta M. Effect of particulate size of Al₂O₃ reinforcement on microstructure and mechanical behavior of solidification processed elemental Mg. *J Alloys Compd.* 2006;419(1):84-90.
- [49] Şap E, Usca UA, Gupta MK, Kuntoğlu M. Tool wear and machinability investigations in dry turning of Cu/Mo-SiC_p hybrid composites. *Int J Adv Manuf Technol.* 2021;114(1):379-96.
- [50] Bahador A, Umeda J, Yamanoglu R, Ghandvar H, Issariyapat A, Abu Bakar TA, et al. Deformation mechanism and enhanced properties of Cu-TiB₂ composites evaluated by

- the in-situ tensile test and microstructure characterization. *J Alloys Compd.* 2020;847:156555.
- [51] Milowska KZ, Burda M, Wolanicka L, Bristowe PD, Koziol KKK. Carbon nanotube functionalization as a route to enhancing the electrical and mechanical properties of Cu–CNT composites. *Nanoscale.* 2019;11(1):145-57.
- [52] Mohapatra S, Mantry S, Singh SK. Performance Evaluation of Glass-Epoxy-TiC Hybrid Composites Using Design of Experiment. *Journal of Composites.* 2014;2014:670659.
- [53] Liu J, Yang S, Liu K, Gui C, Xia W. Effect of Age-Hardening Treatment on Microstructure and Sliding Wear-Resistance Performance of WC/Cu-Ni-Mn Composite Coatings. *Metall Mater Trans A.* 2017;48(6):3017-26.
- [54] Chen H-s, Zhang Y-y, Nie H-h, Wang J-f, Wang W-x, Zhou J, et al. The microstructure and mechanical properties of the B₄C/Cu matrix composite fabricated by SPS-HR. *Mater Sci Technol.* 2018;34(12):1460-7.
- [55] Özgün Ö, Bulut C. A novel mixing method for powder metallurgy copper-carbon nanotube composites. *Materwiss Werksttech.* 2020;51(7):982-91.
- [56] Şap S, Şap E. Co Bazlı İmplant Malzemelere Ti Ve Mn İlavesinin Etkisi. III. Uluslararası Mesleki ve Teknik Bilimler Kongresi; 2018; Gaziantep; s. 1066.
- [57] Prosviryakov A. SiC content effect on the properties of Cu–SiC composites produced by mechanical alloying. *J Alloys Compd.* 2015;632:707-10.
- [58] <https://uslularhadde.com/metalmatrislikompozitmalzemeler> (erişim tarihi:01.11.2021).
- [59] Şenel MC, Gürbüz M, Koç E. SiC Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Ve Mikro Yapısının İncelenmesi. *J Technological Applied Sciences.* 2018;13(2):122-33.
- [60] Mallikarjuna HM, Ramesh CS, Koppad PG, Keshavamurthy R, Sethuram D. Nanoindentation and wear behaviour of copper based hybrid composites reinforced with SiC and MWCNTs synthesized by spark plasma sintering. *Vacuum.* 2017;145:320-33.
- [61] Akramifard HR, Shamanian M, Sabbaghian M, Esmailzadeh M. Microstructure and mechanical properties of Cu/SiC metal matrix composite fabricated via friction stir processing. *Materials & Design (1980-2015).* 2014;54:838-44.
- [62] Li M, Zhai H, Huang Z, Liu X, Zhou Y, Li S, et al. Tensile behavior and strengthening mechanism in ultrafine TiC_{0.5} particle reinforced Cu–Al matrix composites. *J Alloys Compd.* 2015;628:186-94.
- [63] Balalan Z, Gulan F. Microstructure and mechanical properties of Cu-B₄C and CuAl-B₄C composites produced by hot pressing. *Rare Metals.* 2019;38(12):1169-77.