

Farklı Seramik Takviyeli Al Alaşım Matrisli Nanokompozitlerin Mekanik ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi

Abdullah Hasan KARABACAK^{1*} , Aykut ÇANAKÇI² 

Öz

Alüminyum metal matrisli kompozitler uçak, uzay, otomotiv ve savunma sanayi gibi birçok dalda kullanılan malzemelerdir. Araştırmacılar birçok çalışmada metal matrisli kompozitlere farklı takviyeleri mikro boyutta ekleyerek araştırmışlardır. Bu çalışmada ise, nano boyutta B₄C ve SiC takviyeleri ayrı ayrı ve birlikte alüminyum metal matrisli kompozitlere ilave edilerek nanokompozit ve hibrit nanokompozit numuneler toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiştir. B₄C ve SiC takviye türünün nanokompozitlerin ve hibrit nanokompozitin mekanik ve korozyon davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Mekanik testler sonucu takviye türü ne olursa olsun sertlik ve eğme mukavemeti değerleri artmıştır. En yüksek sertlik (209.9 HB) ve eğme mukavemeti (799.2 MPa) değerleri ağırlıkça %5 B₄C takviyeli nanokompozit numune göstermiştir. En düşük porozite değeri ise takviyesiz Al 2024 alaşım numunesine aittir. Korozyon testi sonuçlarına göre ise en düşük akım yoğunluğuna sahip numune Al 2024-B₄C (0.53 A/cm²x10⁻⁶) nanokompozitidir ve ayrıca takviyesiz Al 2024 numunesinin (46.12 A/cm²x10⁻⁶) akım yoğunluğundan yaklaşık 87 kat daha düşüktür.

Anahtar Kelimeler: Metal Matris Kompozit, B₄C, SiC, Korozyon.

Investigation of Mechanical and Corrosion Properties of Different Ceramic Reinforced Al Alloy Matrix Nanocomposites

Abstract

Aluminum metal matrix composites are materials used in many branches such as aircraft, space, automotive and defense industries. Researchers have investigated metal matrix composites by adding different reinforcements in micro size in many studies. In this study, nanocomposite and hybrid nanocomposite samples were produced by powder metallurgy method by adding nano-sized B₄C and SiC reinforcements separately and together to aluminum metal matrix composites. The effect of B₄C and SiC reinforcement type on the mechanical, physical and corrosion behavior of nanocomposites and hybrid nanocomposites was investigated. As a result of mechanical tests, hardness and bending strength values increased regardless of reinforcement type. The highest hardness (209.9 HB) and bending strength (799.2 MPa) values showed 5% by weight B₄C reinforced nanocomposite sample. The lowest porosity value belongs to the unreinforced Al 2024 alloy sample. According to the corrosion test results, the sample with the lowest current density was Al 2024-B₄C (0.53 A/cm²x10⁻⁶) nanocomposite, and it was approximately 87 times lower than the current density of the unreinforced Al 2024 sample (46.12 A/cm²x10⁻⁶).

Keywords: Metal Matrix Composite, B₄C, SiC, Corrosion.

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye, hasankarabacak@ktu.edu.tr

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye, aykut@ktu.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0003-4551-5254> ²<https://orcid.org/0000-0001-5244-6467>

1. Giriş

Alüminyum esaslı kompozitler en yaygın kullanılan metal esaslı kompozitlerden biridir ve çok dikkat çekmiştir, bu nedenle metal esaslı kompozitler alanında çok sayıda çalışma bu alana aittir (Onoro ve ark., 2009; Mula ve ark., 2009). Dövme alüminyum alaşımları, metal esaslı kompozitlerin üretiminde uzun süredir matris alaşımı olarak kullanılmaktadır. Bunun ana nedeni alüminyumun düşük yoğunluklu olmasıdır (Dutkiewicz ve ark., 2005; Torralba ve ark., 2003). Mükemmel sertlik-ağırlık ve mukavemet-ağırlık oranları nedeniyle, yapısal uygulamalarda alüminyum bazlı metal matrisli kompozitlerin (MMK 'ler) kullanılması çekicidir (Tang ve ark., 2004; Ceschini ve ark., 2007). Ancak bu kompozitlerin dezavantajı yüksek üretim maliyetleridir (Torralba ve ark., 2003; Rahimiana ve ark., 2009). Alüminyuma seramik parçacıkların (B_4C , SiC , Al_2O_3 gibi) eklenmesinin alüminyumun mukavemetini, aşınma direncini ve korozyon direncini iyileştirdiği belirlenmiştir (Torres ve ark., 2002; Sahin ve ark., 1996). B_4C 'yi bir takviye partikülü olarak kullanan nanokompozitler, yüksek sertlik ve modülün yanı sıra mükemmel korozyon direnci ve aşınma direnci sağlar. Silisyum karbür parçacıkları, yüksek elastik modül, özel mukavemet, daha yüksek mikro sertlik ve daha iyi aşınma direnci gibi özelliklerin elde edilmesi için kullanılır. Bununla birlikte, B_4C ve SiC seramik takviyeleri birlikte kullanıldığında, kompozitler daha iyi oksidasyon direnci, daha yüksek mukavemet, kırılma tokluğu ve sertliği ile korozyona dayanıklı malzemeler olarak kullanılabilir (Zhang ve ark., 2021; Çevik ve ark., 2021).

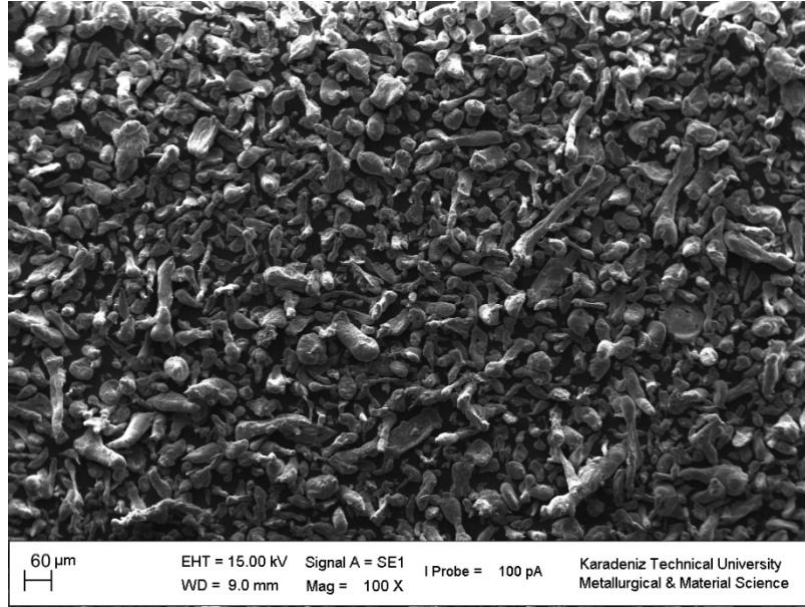
MMK 'ler, geleneksel döküm teknikleri, toz metalurjisi, sprey biriktirme ve difüzyon bağlama yaklaşımı gibi yöntemlerle sentezlenebilir (Varol ve ark., 2013). Toz metalurjisi yöntemi, MMK 'leri yapmak için en uygun yöntemdir. Toz metalurjisi yönteminin ergitme yöntemlerine göre en önemli avantajı düşük işlem sıcaklığıdır. Ayrıca, takviye parçacıkları da matris içinde iyi bir şekilde dağılmıştır (Canakci ve ark., 2012). Karakoç et al. (Karakoç ve ark., 2019), toz metalurjisi yöntemiyle üretilen B_4C - SiC takviyeli Al6061 matrisli kompozit ve hibrit kompozitlerin yoğunluğunu, sertliğini, çekme mukavemetini ve aşınmasını incelemiştir. Sonuçlara göre en düşük yoğunluk değerini (%99.02) ve en yüksek sertlik değerini (76 HB) ağırlıkça %12 B_4C kompozit numunesinden elde etmişlerdir. Takviye oranı arttıkça yoğunluk azaldı ve sertlik arttı. Ancak en yüksek çekme mukavemeti değeri (185.1 MPa), B_4C içeren numunelere kıyasla ağırlıkça %12 SiC içeren numuneden elde edilmiştir.

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında, birçok araştırmacı metal matrisli kompozitlere tek bir takviye elemanı ilave ederek bazı özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada ise literatürdeki çalışmalardan farklı olarak iki farklı takviye hem ayrı ayrı eklenerek kompozit numuneler hem de birlikte katılarak hibrit nanokompozit numune üretilmiştir. Bu sayede farklı takviye türünün metal matrisli kompozitlerin özelliklerine etkisi tek bir çalışmada karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ayrıca

takviye parçacıkları nano boyutta eklenerek literatürde çalışma miktarı az olan bir alana da katkı sağlanmıştır. Çalışmanın bir diğer yenilikçi yanı ise, metal matrisli nanokompozitlerin hem fiziksel ve mekanik hem de korozyon özellikler tek bir çalışma içerisinde incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Matris malzemesi olarak Al 2024 alaşım tozları, nanokompozitlerin ve hibrit nanokompozitlerin üretiminde takviye malzemesi olarak ise nano B₄C ve nano SiC parçacıkları kullanılmıştır. Gaz atomizasyonu yöntemi ile üretilmiş Al 2024 tozları (Gündoğdu Ekzoterm Şirketi) ticari olarak, 4.85 Cu, 1.78 Mg, 0.385 Si, 0.374 Fe, 0.312 Mn, 0.138 Zn, 0.042 Cr, 0.005 Ti ve Al (denge) kimyasal bileşimine sahiptir (Şekil 1). Al 2024 alaşım tozlarını Matris malzemesinin ortalama partikül boyutu 50 µm, takviye malzemelerinin (B₄C; %99.8 saflık ve SiC; %99.7 saflık) (Alfa Aesar, Almanya) ortalama partikül boyutu sırasıyla 50 nm ve 40 nm'dir. Al 2024 matris tozları B₄C ve SiC tozları ile ayrı ayrı nanokompozit ve birlikte hibrit nanokompozit numuneler oluşturmak için karıştırıldı. Karıştırma işlemleri ağırlıkça %5 takviye içeriği ile bir gezegen bilyeli değirmende (Fritsch GmbH, model "Pulverisette 7 Premium line") oda sıcaklığında bir tungsten karbür haznede ve yüksek argon atmosferi altında 8 saat karıştırıldı. Öğütme haznesi içerisinde 10 mm çapa sahip tungsten karbür bilyeler kullanılmıştır. Bilye-toz ağırlık oranı olarak 5:1 oran ve 400 rpm öğütme hızı seçilmiştir. Ayrıca öğütme işlemi esnasında tozlar değirmende iki dakika çalışıp bir dakika dinlendirilmiştir ve kontrol ajanı olarak hazneye direkt ağırlıkça %2 oranında metanol eklenmiştir. Al 2024-B₄C ve Al 2024-SiC nanokompozitlerin ve Al 2024-B₄C hibrit nanokompozitin kalıpta hazırlanmasında sıcak presleme yöntemi kullanılmıştır. Numuneler ilk olarak 250 MPa ön presle sıkıştırıldı. Ardından 3 saat boyunca vakum altında 560 °C sıcaklıkta sinterlendi ve son olarak 500 MPa son basınçla preslenerek üretildi.

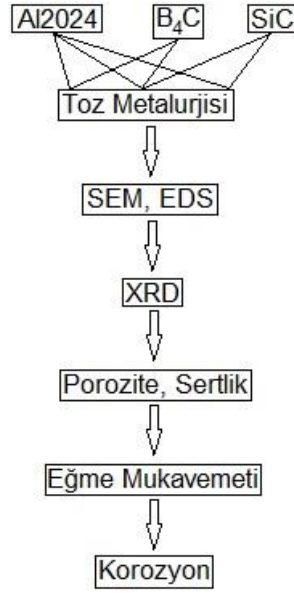


Şekil 1. Al 2024 alaşımı tozları

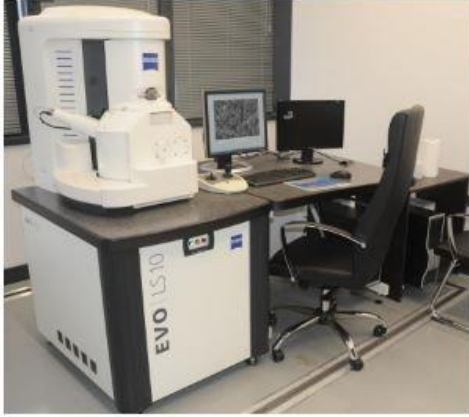
Tablo 1. Numunelerin kodlanması ve takviye oranları

Numune Kodu	B ₄ C (% ağı.)	SiC (% ağı.)	Al 2024	Öğütme Zamanı(s)
M0	-	-	100	8
M1	5	-	95	8
M2	-	5	95	8
M3	2.5	2.5	95	8

Numunelerin mikroyapı incelemeleri için 600, 800, 1000, 1200 ve 1500 numaralı su zımparaları ile zımparalanıp, ardından 1 mikrometre boyutlu alümina solüsyonu ile parlatılmıştır. Parlatma işleminden sonra 20 saniye keller ayırıcı ile dağlama işlemi yapılmıştır. Dağlama yapılan numunelerin mikroyapı analizleri, elementel analizleri ve korozyon testi sonrası hasar gören yüzeyleri Zeiss Evo LS10 taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Nanokompozitlerin faz analizi, Cu K α radyasyonu (1.541874 Å) tarafından kullanılan X-ışını kırınımı (XRD, PANalytical - X'Pert3 Pro) ile 20° ila 90° arasında ve 0.01°'lik bir tarama adımı boyutuyla tarif edilmiştir. Nanokompozitlerin yoğunluğu Arşimet yöntemi ile belirlenip porozite oranları hesaplanmıştır. Bu nanokompozitlerin sertlik ölçümleri Nemesis 9000 Brinell sertlik cihazında 31.25 kg yük altında 10 saniye uygulanmıştır. Ayrıca tüm numunelerin eğme testleri MTS marka universal malzeme test cihazında 0.5 mm/dakika test hızında gerçekleştirilmiştir. Eğme numunelerinin boyutları 6*10*80 mm'dir. Korozyon testi, oda sıcaklığında ağırlıkça %3,5 NaCl sulu çözeltisinde üç elektrotlu sistem (karşı elektrot, referans elektrot ve çalışma elektrotu) ile potansiyodinamik polarizasyon ölçümü kullanılarak yapılmıştır. Her korozyon testi, 1 mVs⁻¹ tarama hızında, -0.5 V 'tan (E_{kor}) +0.5 V_{Ag/AgCl} 'ye kadar gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Deneysel çalışmalar akış şeması



(a)



(b)



(c)



(d)



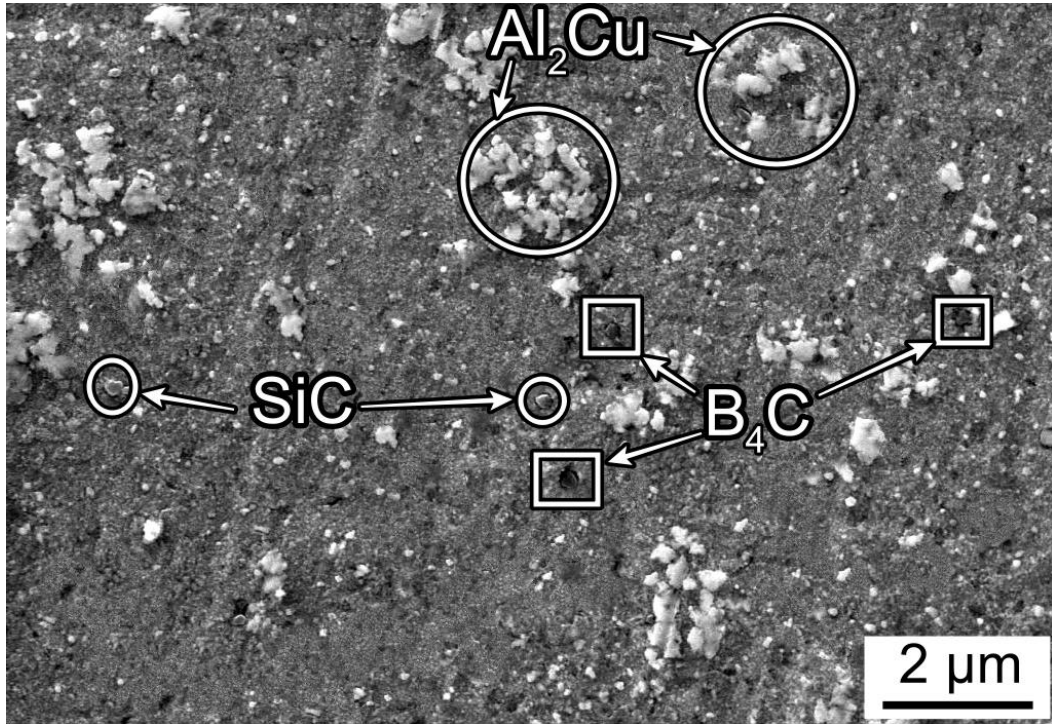
(e)

Şekil 3. Çalışmada kullanılan cihazların makro görüntüleri: (a) SEM ve EDS, (b) XRD, (c) Üniversal çekme ve eğme, (d) Korozyon ve (e) Sertlik cihazları

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Mikroyapı

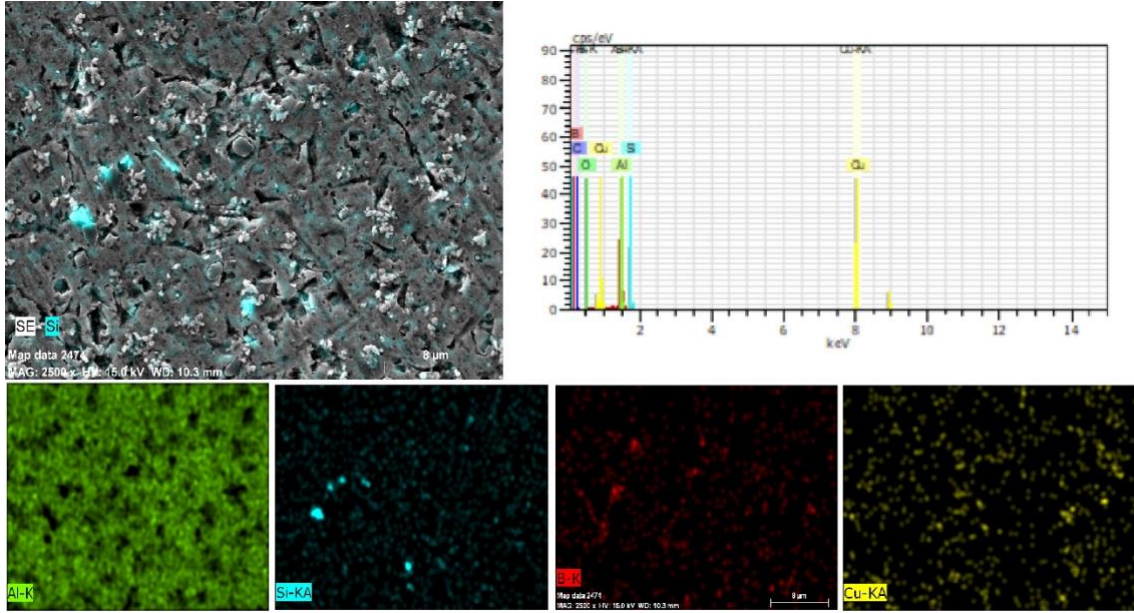
Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen M3 kodlu hibrit nanokompozitin mikroyapısal görünümü Şekil 4'de gösterilmektedir. Bu şekilde gri alanlar Al 2024 alaşımını, beyaz alanlar Al_2Cu intermetalik fazlarını temsil etmektedir. Şekil 4 de işaretlenmiş B_4C ve SiC parçacıkları görülmektedir. Elde edilen görüntüden anlaşılacağı gibi numunede B_4C ve SiC tanecikleri homojen dağılmıştır. Sinterleme dönemlerinde elde edilen iç yapılarda tane sınırlarının tamamen ortadan kalktığı ve gözeneklerin küreselleştiği görülmektedir. Ayrıca oluşan intermetaliklerin tüm yüzeyde olduğu ve homojen dağıldığı görülmektedir. B_4C ve SiC seramik parçacıkları, sıcak presleme ile sıvı faz sinterleme sırasında erimiş alaşımın önceki soğuk bölgeleriyle çevrelenebilir. Takviye edici seramikler ve matris parçacıkları arasındaki kafes düzensizliği nedeniyle, B_4C ve SiC seramik parçacıklarının Al matrisinin hareketli sıvı/katı arayüzü tarafından yutulması çok zordur. Al_2Cu intermetalik fazın çekirdeklenmesi ve büyümesi, seramikler ve Al parçacıkları arasındaki ara yüzeyin yakınında gerçekleşir (Wu ve ark., 1999).



Şekil 4. M3 numunesinin mikroyapısı

Şekil 5, ağırlıkça %5 Al 2024- B_4C -SiC (M3) hibrit kompozit numunenin EDS element haritalama kimyasal analizinin sonuçlarını gösterir. Şekil 5, takviyelerin ve intermetaliklerin dağılımını gösterir. M3 numunesi için Al 2024 matrisinde B_4C -SiC partiküllerinin yakından homojen

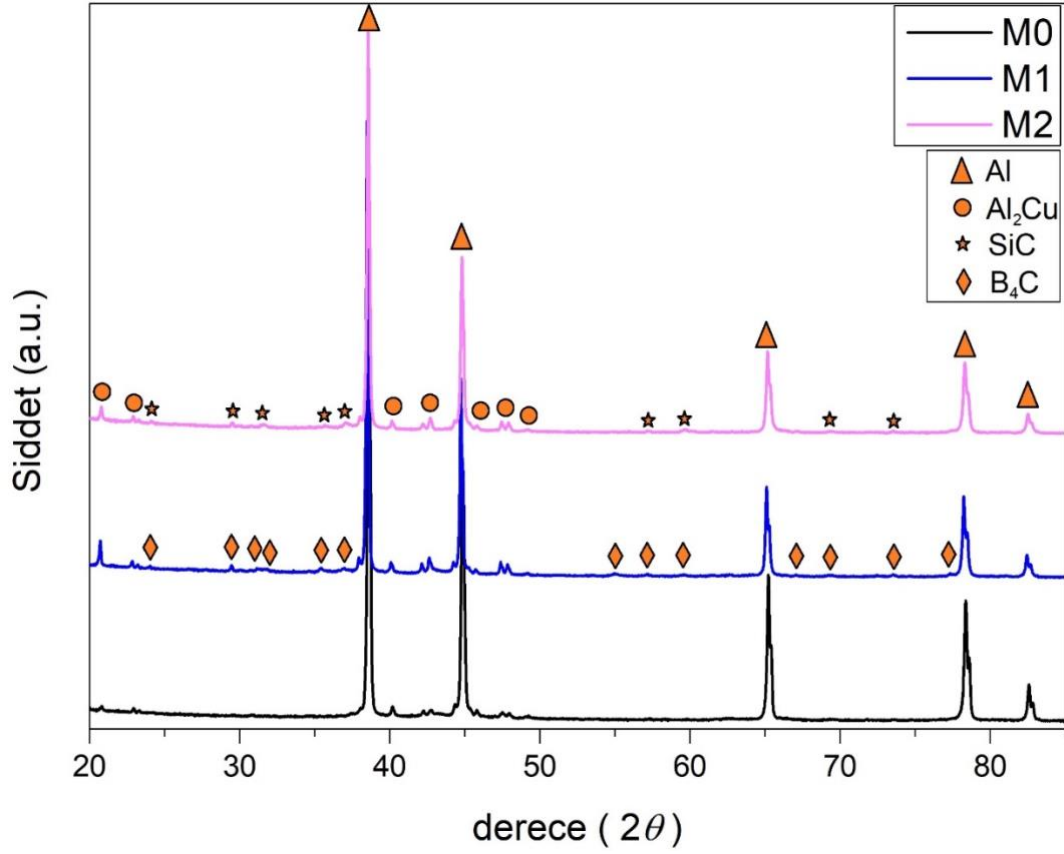
olarak dağıldığı görülmektedir. EDS eleman eşleme görüntüsünde matris tane sınırında B_4C -SiC parçacıklarının varlığına dair hiçbir açık kanıt incelenmemiştir. Ek olarak, özellikle Al 2024 matrisi içindeki SiC için takviye partiküllerinin aglomerasyonunun tamamen önlenemediği de fark edilmiştir.



Şekil 5. M3 hibrit nanokompozitin EDS haritalama analizi.

3.2. XRD Analizi

M0 alaşımı ve M1 ve M2 nanokompozit numunelerin XRD analiz grafikleri Şekil 6 'de gösterilmiştir. XRD grafikleri; Al (JCPDS No: 00-004-0787), B_4C (JCPDS No: 00-035-0798) ve SiC (JCPDS No: 00-029-1129) ile Al_2Cu bileşiğinin varlığını desteklemektedir. M0 kodlu numune için Al_2Cu 'nun kırınım pikleri, M1 ve M2 numunelerine kıyasla çok zayıftır. Bu tepe noktalarının bir örneği, yaklaşık 21° derecedeki Al_2Cu (JCPDS No: 96-901-2197) intermetalik faz tepe noktasıdır. Al-Cu sistemlerinde $AlCu$, Al_3Cu_4 , Al_4Cu_9 gibi oluşma ihtimali bulunan bileşiklerin varlığına rastlanmamıştır (Aravind ve ark., 2004). Bu durum bakır içeriğinin yetersiz olması veya Al_2Cu intermetalik faz oluşumunun daha düşük serbest enerjisi ile açıklanabilir. Bileşik tepe noktalarının olmaması Al_2Cu intermetalik fazın reaksiyon süresi boyunca bozunma yoluyla diğer bileşiklere dönüşmediğini gösterir (Chen ve ark., 2011). Al_4C_3 intermetalik fazı, düşük sinterleme sıcaklığı nedeniyle Al 2024, B_4C ve SiC tozları arasında herhangi bir reaksiyon gözlemlenmediği için XRD analizlerinde gözlemlenmemiştir. Sonuçlar ayrıca matris ve takviye partikülleri arasında herhangi bir kimyasal etkileşim olmadığını göstermiştir.



Şekil 6. Takviyeli ve takviyesiz numunelerin XRD analizi

3.3. Porozite ve Sertlik

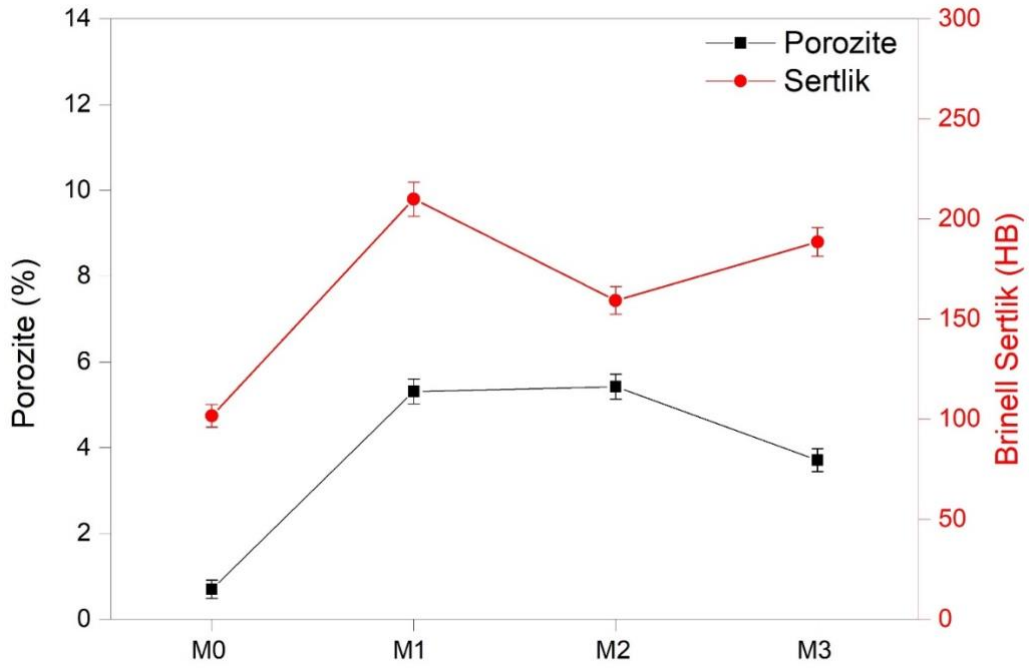
Al 2024 alaşımı ve tüm nanokompozitlerin mekanik ve fiziksel özellikleri ile ilgili çalışmaların sonuçları Tablo 2 'de verilmiştir. Her bir numune için üç ayrı porozite ölçümü ve sertlik testleri yapılmıştır. Şekil 7'de verilen grafikte porozite ve sertlik değerlerindeki değişim gösterilmiştir. Porozite değerlerine bakıldığında en düşük porozite değeri Al 2024 (M0) numunesine ait olduğu görülmektedir. Sonuçlarda, B₄C ve SiC takviye partiküllerinin ilavesi ile nanokompozitlerin porozite değerlerinde artış olduğunu göstermektedir. En yüksek porozite değeri ise SiC takviyeli M2 numunesi ait olduğu belirlenmiştir. Matris içerisinde sert partiküllerin varlığı boşluk ve çukur oluşumuna sebebiyet verdiğinden porozite değerlerinde yükselme olduğu sonucuna varılabilir.

Nanokompozitlerin sertliğinin Al 2024 alaşımından daha yüksek olduğu değerler Şekil 7 'de verilmiştir. En yüksek sertlik değerine M1 (209.9 HB) numunesi sahip olup, buna sebep olarak ise B₄C partiküllerinin SiC partiküllerinden daha sert olması gösterilebilir. Ayrıca M1 numunesi M0 numunesinden yaklaşık 2 kat daha yüksek sertliğe sahiptir. Nanokompozitlerin sertliğindeki artışın kritik gerekçesi, Al 2024 partikülünden çok daha sert partikül ile takviye edilmesinden ve plastik deformasyondan kaynaklanan sertleşmeden oluşmaktadır. Bahsedilen sebebe ek olarak, Hall Petch

etkisi ve partiküllerin nanokompozitlerin güçlendirilmesi üzerindeki etkisine atfedilmiştir. B₄C/SiC çift partikülleri, dislokasyonun ilerlemesine engel teşkil eder (Baradeswaran ve ark., 2014).

Tablo 2. Al 2024 alaşım ve nanokompozitlerinin mekanik ve fiziksel özellikleri

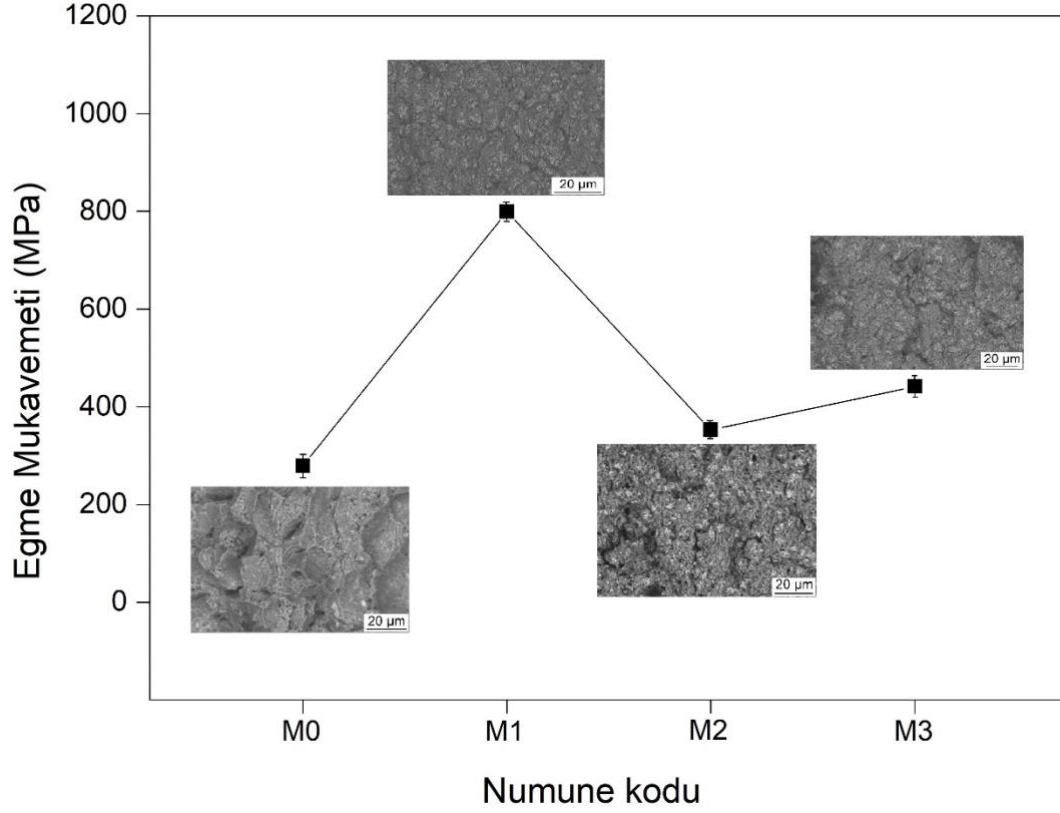
Numune Kodu	Porozite (%)	Brinell Sertlik (HB)	Eğme Mukavemeti (MPa)
M0	0.7 ±0.21	101.6 ±5.6	279.2 ±15.5
M1	5.31 ±0.29	209.9 ±8.5	799.2 ±21.6
M2	5.42 ±0.29	159.3 ±6.9	352.8 ±16.8
M3	3.71 ±0.27	188.5 ±7.2	441.5 ±18.3



Şekil 7. Porozite ve Sertlik sonuçları

3.4. Eğme Mukavemeti

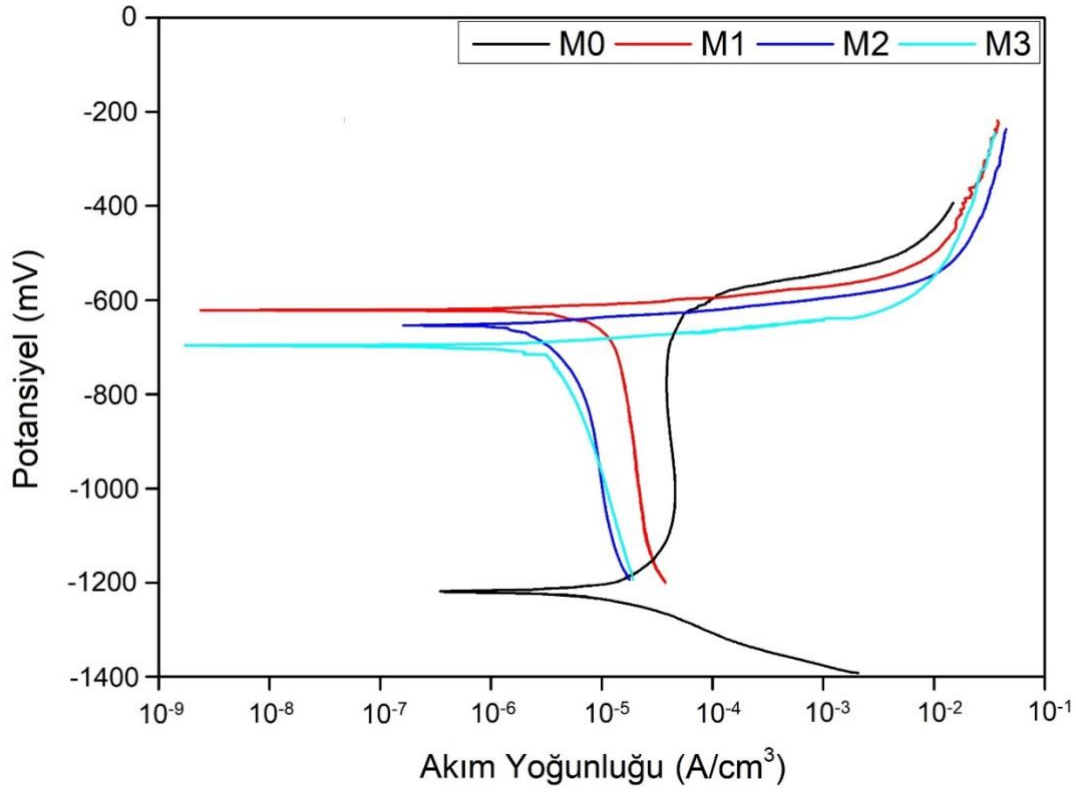
Şekil 8, sırasıyla Al 2024 alaşımının, Al 2024-B₄C, Al 2024-SiC nanokompozitlerin ve Al 2024-B₄C-SiC hibrit nanokompozitin eğme mukavemetini göstermektedir ve aynı grafik üzerinde eğme testleri sonu elde edilen kırılma yüzeyleri de sunulmuştur. Ayrıca numunelerin eğme mukavemeti değerleri Tablo 2 'de özetlenmiştir. Her bir numune için üç ayrı eğme mukavemeti testi yapılmıştır. Grafikte görüldüğü gibi takviyelerle beraber eğme mukavemeti değerleri artmıştır. Fakat en yüksek eğme mukavemeti değeri M1 (799.2 MPa) numunesine aittir. M1 numunesinin eğme mukavemeti değeri takviyesiz Al 2024 alaşımına kıyasla 2.5 kattan daha yüksek çıkmıştır. Sert B₄C ve Al₂Cu intermetalik parçacıkların dağılımı, parçacık boyutları ve miktarlarındaki azalma veya artma dayanımın değişimine sebep olmaktadır (Dinaharan ve ark., 2019). Kırılma yüzeyleri de incelendiği zaman oluşan yarıkların eğme mukavemeti arttıkça azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 8. Eğme deneyi sonucu oluşan eğme mukavemeti değerleri

3.5. Korozyon

Takviyesiz Al 2024 alaşımının ve tüm nanokompozitlerin %3.5 NaCl çözeltisi içindeki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri Şekil 9 'da verilmiştir. Tüm numuneler genellikle benzer polarizasyon eğrileri ve pasiflik türleri sergilemiştir. Tüm potansiyodinamik polarizasyon eğrilerindeki akımın, anodik ve katodik Tafel davranışı sergileyen dinlenme potansiyeli etrafında doğrusal ve düzgün bir şekilde değiştiği görülür. Nanokompozit numunelerin polarizasyon eğrileri, Al 2024 ile karşılaştırıldığında, seramik nano parçacıkların (B_4C -SiC) eklenmesi nedeniyle daha düşük bir korozyon hızı ile sonuçlandığını göstermiştir (Mishra ve ark., 2007). Nanokompozitlerin korozyon potansiyelleri (E_{kor}) -621 ile -703 mV arasında karakterize edilmesine rağmen, Al 2024 alaşımının E_{kor} değeri -1220 mV'dur.



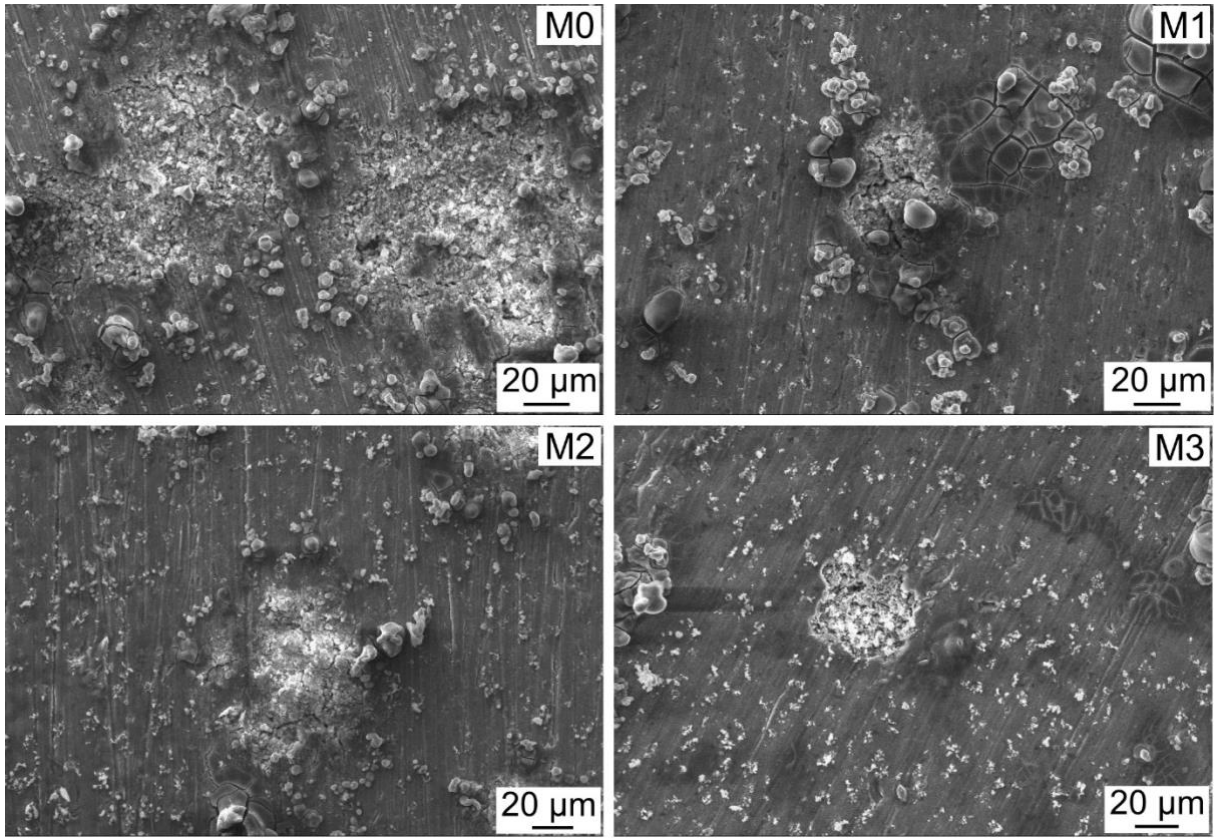
Şekil 9. Al 2024 alaşımının, nanokompozitlerin ve hibrit nanokompozitin %3,5 NaCl çözeltisi içinde potansiyodinamik polarizasyon eğrileri

Tafel potansiyodinamik yöntemi kullanılarak Şekil 9 'dan elde edilen E_{kor} , akım yoğunluğu (I_{kor}) ve korozyon hızı değerleri Tablo 3'te gösterilmektedir. Elde edilen veriler ışığında en iyi korozyon direncine sahip numuneler hem akım yoğunluk değerleri hem de korozyon hız değerleri birine çok yakın olan M1 ($I_{kor}=0.53 \text{ A/cm}^2 \times 10^{-6}$) ve M3 ($0.54 \text{ A/cm}^2 \times 10^{-6}$) numuneleridir.

Tablo 3. Korozyon potansiyeli (E_{kor}), korozyon akım yoğunluğu (I_{kor}), ve numunelerin korozyon oranları değerleri

Numune Kodu	I_{kor} ($\text{A/cm}^2 \times 10^{-6}$)	E_{kor} (mV)	Korozyon Hızı (mpy)
M0	46.12	-1220	31.87
M1	0.53	-703	0.37
M2	5.35	-621	3.91
M3	0.54	-679	0.38

Korozyon testleri sonrası tüm numunelerde oluşan korozyon yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 10 'de verilmiştir. Numunelerin tüm yüzeylerinde farklı boyutlarda yarım küre çukurlar gelişmiş ve her çukurun çevresinde Al 2024 alaşım matrisinin korozyonu nedeniyle bir korozyon ürünü toplanmıştır. Destekleyici bir korozyon mekanizması olduğu sonucuna varılabilir. Korozyon değerlerine bakılacak olursa Al 2024 alaşım numunesinin yüzeyinde oluşan çözünme miktarının nanokompozitlere kıyasla daha fazla olduğu görülür.



Şekil 10. Tüm numunelerin korozyon yüzeyleri

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, Al 2024 matrisli ağırlıkça %5 B₄C, SiC ve her ikisinin takviye edildiği nanokompozitler toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiştir. Elde edilen sonuçlar sayesinde, literatürde az rastlanan bir çalışma örneği ortaya koyulmuştur. Çalışma sayesinde, hem B₄C ve SiC takviyeleri ayrı ayrı Al2024 alaşımına eklenerek nanokompozitler hem de B₄C ve SiC takviye elemanları birlikte eklenerek hibrit nanokompozit numuneler üretilmiştir. Ayrıca tüm farklı türde nanokompozitlerin tek bir çalışma içerisinde fiziksel, mekanik ve korozyon özellikleri bir arada incelenip karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1- XRD analiz sonuçları Al, B₄C, SiC ve Al₂Cu'nun varlığını ortaya koymuştur. EDS analizi ile de B₄C ve SiC parçacıklarının yapıda homojen dağıldığından bahsedebiliriz. Ayrıca SEM görüntüsü ile yapıdaki B₄C, SiC ve Al₂Cu bileşiklerinin nasıl bir yapıya sahip olduğu görülmüştür.

2- Takviye parçacıklarının eklemesi ile porozite de artış olduğu anlaşılmaktadır. En düşük porozite değeri M0 (%0.7) numunesine ait iken en yüksek porozite değeri ise M2 (%5.42) numunesine aittir. Nanokompozitler arasındaki en iyi porozite değeri M3 (%3.71) numunesine aittir.

3- Sertlik değerlerine göre ise en yüksek sertlik değere M1 (209.9 HB) numunesi, en düşük sertlik değerine ise takviyesiz M0 (101.6 HB) numunesi sahiptir. Aynı zamanda eğme mukavemeti

sonuçlarına göre de en yüksek değere M1 (799.2 MPa) numunesi, en düşük eğme mukavemeti değerine ise M0 (279.2 MPa) numunesi sahiptir.

4- Nanokompozitlerin korozyon direnci, B₄C-SiC nano parçacıklarının eklenmesiyle önemli ölçüde arttırılmıştır. Korozyon akım yoğunlukları karşılaştırıldığında, takviyesiz Al 2024 alaşımının korozyon akım yoğunluğunun M1 ve M3 numunesinden 87 kat daha fazla olduğuna karar verildi.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Aravind, M., Yu, P., Yau, M.Y., Ng, DHL., (2004). Formation of Al₂Cu and AlCu intermetallics in Al(Cu) alloy matrix composites by reaction sintering. *Materials Science and Engineering: A*, 380, 384-393.
- Baradeswaran, A., Vettivel, S.C., Elaya, P. A., (2014). Experimental investigation on mechanical behaviour, modelling and optimization of wear parameters of B₄C and graphite reinforced aluminium hybrid composites. *Materials & Design*, 63, 620-632.
- Canakci, A., Ozsahin, S., Varol, T., (2012). Modeling the influence of a process control agent on the properties of metal matrix composite powders using artificial neural networks. *Powder Technology*, 228, 26-35.
- Ceschini, L., Boromei, I., Minak, G., Morri, A., Tarterini, F., (2007). Effect of friction stir welding on microstructure, tensile and fatigue properties of the AA7005/ 10 vol.% Al₂O₃p composite. *Composites Science and Technology*, 67, 605-615.
- Chen, J., Lai, Y.S., Wang, Y.W., Kao, C.R., (2011). Investigation of growth behavior of Al-Cu intermetallic compounds in Cu wire bonding. *Microelectronics Reliability*, 51, 125-129.
- Çevik, Z.A., Karabacak, A.H., Kök, M., Çanakçı, A., Kumar, S.S., Varol, T., (2021). The effect of machining precesses on the physical and surface characteristics of AA2024-B₄C-SiC hybrid nanocomposites fabricated by hot pressing method. *Journal of Composites Materials*, 55, 2657-2671.
- Dinaharan, I., Balakrishnan, M., David, R. S. J., Akinlabi, E.T., (2019). Microstructural characterization and tensile behavior of friction stir processed AA6061/Al₂Cu cast aluminum matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 781, 270-279.
- Dutkiewicz, J., Litynska, L., Maziarz, W., Haberko, K., Pyda, W., Kanciruk, A., (2005). Structure and properties of nanocomposites prepared from ball milled 6061 aluminium alloy with ZrO₂ nanoparticles. *Crystal Research and Technology*, 44, 1163-9.
- Karakoç, H., Ovalı, İ., Dündar, S., Çıtak, R., (2019). Wear and mechanical properties of Al6061/SiC/B₄C hybrid composites produced with powder metallurgy. *Journal of Materials Research and Technology*, 8, 5348-5361.
- Mishra, A.K., Balasubramaniam, R., Tiwari, S., (2007). Corrosion inhibition of 6061-SiC by rare earth

- chlorides. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 54, 37-46.
- Mula, S., Padhi, P., Panigrahi, S. C., Pabi, S. K., Ghosh, S., (2009). On structure and mechanical properties of ultrasonically cast Al-2% Al₂O₃ nanocomposite. *Materials Research Bulletin*, 44, 1154-60.
- Onoro, J., Salvador, M. D., Cambronero, L. E. G., (2009). High-temperature mechanical properties of aluminum alloys reinforced with boron carbide particles. *Materials Science Engineering A*, 499, 421-426.
- Rahimiana, M., Ehsania, N., Parvin, N., Baharvandi, H. R., (2009). The effect of particle size, sintering temperature and sintering time on the properties of Al-Al₂O₃ composites made by powder metallurgy. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 5387-5393.
- Sahin, Y., Murphy, S., (1996). The effect of fiber orientation of the dry sliding wear of borsic-reinforced 2014 aluminum alloy. *Journal of Materials Science*, 34, 5399-5407.
- Tang, F., Anderson, E. I., Herold, T.G., Prask, H., (2004). Pure Al matrix composites produced by vacuum hot pressing: tensile properties and strengthening mechanisms. *Materials Science Engineering A*, 383, 362-373.
- Torralba, J. M., Costa, C. E., Velasco, F., (2003). P/M aluminum matrix composites: an overview. *Journal of Materials Processing Technology*, 133, 203-206.
- Torres, B. H., Ibanez, L., Garcia-Escorial, J. A., (2002). Mechanical properties of some PM aluminize and silicate reinforced 2124 aluminum matrix composites. *Scripta Materialia*, 47, 45-49.
- Varol, T., Canakci, A., Ozsahin, S., (2013). Artificial neural network modeling to effect of reinforcement properties on the physical and mechanical properties of Al2024-B₄C composites produced by powder metallurgy. *Composites Part B: Engineering*, 54, 224-233.
- Wu, S., Nakae, H., (1999). Nucleation effect of alumina in Al-Si/Al₂O₃ composites. *Journal of Materials Science Letters*, 18, 321-323.
- Zhang, W., Yamashita, S., Kita, H., (2021). A study of B₄C-SiC composite for self-lubrication. *Journal of the American Ceramic Society*, 104, 2325-2336.