



Al6061 Matrisli SiC, Al₂O₃ ve Kömür Cürufu Tozu Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Sertlik ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi

Investigation of Hardness and Wear Behavior of Al6061 Matrix SiC, Al₂O₃, and Coal Slag Powder Reinforced Hybrid Composites

Rahmi Kocaman¹, Serkan Ateş²

¹Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü, 06560 Ankara, TÜRKİYE

²Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 15030 Burdur, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 25/04/2023

Kabul / Accepted: 07/05/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 30/06/2023

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2023

Öz

Bu çalışmada Metal Matrisli Kompozitlerde (MMK), termik santralde yakıt olarak kullanılan kömürün yanması sonucunda kazan altında oluşan atık kömür cürufunun takviye olarak kullanılabilirliğine ve SiC, Al₂O₃ ile uyumuna odaklanılmıştır. Matris olarak otomobil ve havacılık endüstrisinde sıklıkla kullanılan Al6061 alaşımı seçilmiştir. Kompozitler ağırlıkça % 1, 3, 5, ikili hibrit kompozitler ağırlıkça % 4, 6, 8 ve üçlü hibrit kompozitler ise ağırlıkça % 7, 9, 11 takviye-hacim oranlarında 22-59µm toz boyutuna sahip takviyeler kullanılarak üretilmiştir. Kompozitlerin üretiminde sıvı hal üretim yöntemlerinden olan iki kademeli karıştırılmalı döküm yöntemi kullanılmıştır. Üretilen kompozitlerin mikro yapıları taramalı elektron mikroskobu ile görüntülenerek takviyelerin varlığı ve takviyenin içyapıda homojen dağılımı tespit edilmiştir. Kompozitlerin sertlikleri Brinell sertlik ölçüm yöntemi ile belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında üretilen kompozitlerin aşınma davranışını ölçmek ve kuru sürtünmeli aşınma testlerini yapmak için kullanılan standart testlerden Pin on Disk yöntemi kullanılmıştır. Kömür cürufu tozu takviyeli kompozitler başarı ile üretilmiştir. Sertlik ölçümlerinde kömür cürufu tozunun da kompozitin sertliğini arttırmada neredeyse SiC ve Al₂O₃ kadar etkili olabildiği belirlenmiştir. Kömür cürufu tozu takviyesi de diğer takviye elemanları gibi kompozitlerin aşınma dayanımını artırmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Kompozit, Aşınma, Sertlik, Al6061, Kömür Cürufu Tozu”

Abstract

In this study, we have focused on the use of waste coal slag, which is formed under the boiler due to the combustion of coal used as fuel in thermal power plants, as reinforcement in Metal Matrix Composites (MMC), and its compatibility with SiC and Al₂O₃. Al6061 alloy, frequently used in the automobile and aerospace industry, was chosen as the matrix. Composites were fabricated using reinforcements with 22-59 µm powder size at reinforcement-to-volume ratios of 1, 3, 5 wt%, binary hybrid composites at 4, 6, 8 wt%, and ternary hybrid composites at 7, 9, 11 wt%. Two-stage stir casting method, which is one of the liquid-state production methods, was used in the production of composites. The microstructures of the composites were investigated by scanning electron microscopy to determine the presence of reinforcements and the homogeneous distribution of the reinforcement in the microstructure. The hardness of the composites was determined by the Brinell hardness measurement method. Pin on Disk method, one of the standard tests used to measure the wear behavior of the composites produced within the scope of this study and to perform dry friction wear tests, was used. Coal slag powder-reinforced composites were successfully produced. Hardness tests revealed that coal slag powder can increase the composite's hardness almost as effectively as SiC and Al₂O₃. Coal slag powder reinforcement also increased the abrasion resistance of composites like other reinforcement elements.

Key Words

“Composite, Wear, Hardness, Al6061, Coal Slag Powder”

*Sorumlu Yazar: sates@mehmetakif.edu.tr

1. Giriş

Günümüzde teknoloji alanındaki gelişmeler, artan enerji ihtiyacını özellikle de elektrik enerjisine olan bağımlılığı beraberinde getirmektedir. Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumunun 2021 yılı kömür “linyit” sektör raporuna göre ülkemizde elektrik kurulu gücünün %31.5’ini hidroelektrik santralleri, %25.6’sını doğalgaz ile çalışan santraller oluştururken %20.4’ünü de kömürle çalışan santraller oluşturmaktadır (Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu [TKİK], 2021). Ülkemizdeki kömür sadece termik santrallerde değil aynı zamanda sanayi tesislerinde ve konutların ısıtılmasında kullanılmaktadır. 2022 TÜİK verilerine göre Kömür tüketiminin %82’si elektrik üretiminde, %10,8’i sanayi sektörlerinde, %7,5’i ise konut ve işyerlerinde gerçekleşmiştir (Türkiye İstatistik Kurumu [TÜİK], 2022). Gerek enerji üretiminde gerekse ısıtmada kömür tüketimi oldukça fazladır. Söz konusu tüketim beraberinde atıkları ve bunların nasıl bertaraf edileceği sorusunu akla getirmektedir. TÜİK verilerine göre ülkemizde katı yakıtlı termik santrallerden 2021 yılında 19362267 ton kül ve cüruf atığı ortaya çıkmıştır (TÜİK, 2020). Termik santrallerde kömürün yakılması sonucunda, baca gazlarına karışarak yukarı çıkan ve filtreler tarafından yakalan uçucu kül termik santral atıklarının yaklaşık %75-80’ini oluştururken, fırının tabanındaki su dolu bir haznede toplanan, parçacık boyutu 12,7mm’nin altında, koyu gri, granüler ve gözenekli bir malzeme olan taban cürufu ise %20-25’ini oluşturur (Annual Book of ASTM Standards, 1992). Dünya genelinde taban cürufunun %85’inden fazlası açık barajlarda ve düzenli depolama alanlarında depolanmaktadır (Coal Combustion by Products, 2020). Taban cürufunun uygun olmayan şekilde saklanması ve imha edilmesi devasa çevresel tehlikeler yaratır. Taban cürufu depolama alanlarının yakınında yaşayan insanlarda arsenik kontaminasyonundan dolayı kanser gelişme ihtimali %2’dir (USEPA, 2010). Söz konusu sağlık tehlikeleri, taban cürufunun bertaraf edilmesi için başka yöntemler bulmayı zorunlu kılmıştır (Singh et al., 2018). Bu zorunluluk nedeniyle, endüstrinin farklı dallarında ortaya çıkan atık yan ürünleri atık olarak kabul edilmiş ve bir dizi yeni ve yenilikçi geri dönüşüm çözümü ortaya çıkmıştır (Panagopoulos ve diğerleri, 2019; Panagopoulos & Haralambous, 2020; Gao et al., 2021). Böylelikle atıkların yeniden kullanılması gibi atık yönetimi konuları giderek önem kazanmaya başlamış ve araştırmacılar atıkların kompozit üretiminde takviye elemanı olarak kullanılabilirliği üzerine odaklanmışlardır.

Kompozit malzemeler iki veya daha çok malzemenin, en iyi özelliklerinin yeni oluşturulan malzemede bir araya getirilmesi amacıyla makro düzeyde birleştirilmesi ile elde edilir (Lloyd, 1994). Kompozit malzeme matris ana fazı ve bunun içine dağılmış takviye elemanlardan oluşur (Hahn & Tsai, 1980). Kompozitin matris fazında kullanılan malzeme metal ve alaşımları ise bu durumda metal matrisli kompozit olarak isimlendirilir. Metal matrisli kompozitler de sıklıkla kullanılan matris malzemeleri alüminyum alaşımlarıdır. Bunun nedeni, alüminyum alaşımlarının hafif olmasının yanı sıra bakır, titanyum ve magnezyum gibi diğer matris malzemelerine göre daha ekonomik olmasıdır (Rohatgi, 1991). SiC, Al₂O₃, TiO₂, B₄C, TiC, MgO, Zirkon vb. sert seramik partiküllerin alüminyum alaşımlarına eklenmesi ile partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozitler üretilmiştir. Bu partiküllerin eklenmesi kompozitin sertliği ve mukavemetini artırırken sünekliliğini önemli ölçüde düşürmektedir (Kaczmar et al. 2000; Prasad and Asthana 2004; Pawar and Utpat 2014; Lokesh et al. 2013; Gündoğan ve Özseri 2019; Prashanth et al. 2017; Robin et al. 2015). Alüminyum matrisli kompozitler, izotropik malzeme özellikleri nedeniyle monolitik metallere göre daha yüksek mukavemet, sertlik ve yorulma dayanımına sahip olmalarının yanı sıra daha hafif olmaları nedeni ile endüstride geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Partikül takviyeli Al6061 matrisli kompozitler geniş bir sıcaklık aralığında iyi mekanik ve fiziksel özellikler gösterdiklerinden, otomotiv bileşenleri ve uçak gövdelerinde kullanılabilirler (Mahendra et al. 2013; Kumar et al. 2011).

Alüminyum matrisli kompozitlerin üretimi için çeşitli yöntemler mevcuttur (Ünlü 2008; Mondal et al. 2008; Ramesh and Safiulla 2007). Bu üretim yöntemleri arasında, sıvı hal üretim yöntemleri, basitliği ve büyük miktarlarda üretime uygunluğu nedeni ile endüstride sıklıkla kullanılmaktadır (Ramesh and Safiulla 2007; Hashim et al. 1999). Karıştırmalı döküm yöntemi 1981 yılında Surappa & Rohatgi tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemde seramik partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin hazırlanması için girdap karıştırma tekniği kullanılmıştır (Surappa and Rohatgi 1981).

Literatür incelendiğinde Al6061 matrisli, SiC ve Al₂O₃ takviyeli kompozitlerin üretimi ve incelenmesi ile ilgili çok sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Umanath ve arkadaşları (2013), karıştırmalı döküm tekniği kullanarak Al6061 alaşımına ağırlıkça %5, 10 ve 15 oranlarında SiC ve Al₂O₃ ilave ederek kompozit üretmişler ve takviyenin artan oranlarında aşınma miktarında azalmanın yanı sıra aşınan yüzeyde daha fazla yüzey pürüzlülüğü meydana geldiğini tespit etmişlerdir (Umanath et al. 2013). Seshappa ve Prasad (2022), çalışmalarında karıştırmalı döküm yöntemi kullanarak, Al7075 alaşımına ağırlıkça % 2, 4, 6 ve 8 oranlarında SiC ve Al₂O₃ ilave ederek hibrit kompozit üretmişler ve SiC ve Al₂O₃’ün artan oranlarında sertliğin artarak maksimum sertlik değerinin 199 Vickers değeri ile %8 oranında takviye içeren hibrit kompozitte meydana geldiğini, aşınma değerlerinin ise artan takviye miktarı ile azaldığını bildirmişlerdir (Seshappa and Prasad 2022). Sharma ve arkadaşları (2022), ise çalışmalarında karıştırmalı döküm yöntemi ile ağırlıkça %4, 8 ve 12 oranlarında SiC’ü Al6061 alaşımına ilave ederek kompozit üretmişler ve takviyenin artan oranlarında kompozitin sertliğinin 150 Vickers değerine kadar arttığını belirlemişlerdir (Sharma et al. 2022). Ayrıca Kumar ve arkadaşları (2010), sıvı hal üretim yöntemi kullanarak, Al6061 alaşımına ağırlıkça % 2, 4 ve 6 oranlarında SiC, Al7075 alaşımına ise benzer oranlarda Al₂O₃ ilave ederek kompozit ürettirler. Ürettikleri kompozitlerde hem SiC hem de Al₂O₃ ilavesinin sertliği artırırken, aşınma oranında azalmaya neden olduğunu belirlediler (Kumar et al. 2010).

Bunların yanı sıra literatür taramasında taban cürufunun inşaat endüstrisinde belirli bir dereceye kadar potansiyel bir çimento ikamesi haline getirilebileceğini öne süren çalışmaların (Singh et al. 2018; Hooton and Bickley 2014; Kim and Lee 2015; Muthusamy et al.

2020) yanı sıra taban cürufunun içeriğinde bulunan SiO_2 , Al_2O_3 , CaO ve Fe_2O_3 gibi sert oksitlerin varlığı nedeni ile seramik endüstrisinde hammadde olarak kullanım olanaklarını araştıran çalışmalar da mevcuttur (Benavidez et al. 2003; Villanova and Bergmann 2007; Bayca vd. 2008). Ancak literatürde metal matrisli kompozit üretiminde taban cürufunun takviye elemanı olarak kullanımı ile ilgili çalışmalar çok nadirdir. Taban cürufunun içeriğinde bulunan SiO_2 , Al_2O_3 , CaO ve Fe_2O_3 gibi sert oksitlerin varlığı, takviye elemanı olarak kullanımında umut vericidir. Bu nedenle metal matrisli kompozit üretiminde katma değerli bir ürün olarak ortaya çıkması olasıdır.

Bu çalışmada otomotiv ve havacılık endüstrisinde sıklıkla kullanılan Al6061 alaşımına partikül takviyeli kompozit üretiminde sıklıkla kullanılan SiC ve Al_2O_3 seramiklerinin yanı sıra taban cürufu tozu ilave edilerek metal matrisli hibrit kompozitler üretilmiştir. Otomotiv endüstrisinde eş çalışan parçaların sayısı oldukça fazla olup, eş çalışan parçalarda meydana gelen aşınmaların parça ömrünü etkileyen en önemli faktörlerden biri olduğu göz önüne alındığında üretilen kompozitlerde elde dillecek sertlik artışı ve aşınma miktarındaki azalma direk olarak ömür artışında önemli bir etken olacaktır. Bunun yanı sıra kompozitlerde kullanılan karbür ve sert seramik takviye elemanlarının üretimi çok teknolojik ve pahalı bir süreç olduğundan, bunları üretebilen ülke sayısı oldukça sınırlıdır. Bu yüzden ülkeler ihracata yönelmekte bu da hem ekonomik kayıplara hem de daha fazla enerji tüketimine neden olmaktadır. Böylece geleneksel takviye elemanları yerine atıkların kullanımı çok daha önemli hale gelmektedir. Taban cürufu tozu da hem bertaraf edilmesindeki zorluklar hem de içeriği nedeni ile önemli bir takviye elemanı olmaya aday bir atık olarak değerlendirilerek bu çalışma da kompozitin sertlik ve aşınma değerlerine etkisi ve SiC ve Al_2O_3 seramikleri ile uyumuna odaklanılmıştır.

2. Gereç ve Yöntemler

Bu çalışmada matris malzemesi olarak Al6061 alaşımı, geleneksel takviye elemanlarından otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılan SiC ve Al_2O_3 seramikleri ve atık takviye malzemesi olarak ise Zonguldak Eren Termik Santralinden temin edilen taban cürufuları kullanılmıştır. SiC ve Al_2O_3 seramikleri 22-59 μm arası tane boyutunda toz olarak piyasadan temin edilmiştir. Taban cürufuları ise öncelikle bilyalı değirmende toz haline getirilip, daha sonra 250 ve 500 meshlik elekler kullanılarak elek analizinde 250 meslik elekten geçen, 500 meslik elekten geçmeyen tozlar toplanarak 22-59 μm tane boyutuna sahip taban cürufu tozları elde edilmiştir. Al6061 alaşımının kimyasal kompozisyonu Tablo I'de, Al6061 ve geleneksel takviye elemanlarının fiziksel, mekanik özellikleri Tablo II'de, literatürden alınan taban cürufuna ait farklı kimyasal kompozisyonlar ağırlıkça % olarak Tablo III 'de verilmiştir.

Tablo I. Al 6061'in Kimyasal Bileşimi (ağırlıkça %) (<https://asm.matweb.com>, 03.04.2023)

Fe	Si	Cr	Mn	Mg	Zn	Cu	Ti	Diğer	Al
0,5	0,6-1,0	0,1	0,2-0,8	0,8-1,2	0,25	0,6-1,1	0,1	0,15	Kalan

Tablo II. Al6061, Al_2O_3 ve SiC 'ün Fiziksel ve Mekanik Özellikleri (<https://asm.matweb.com>, 03.04.2023)

Özellik	Al6061	Al_2O_3	SiC
Yoğunluk (g/cm^3)	2,7	3,9	3,2
Maksimum kullanım sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)	582	1700	1500
Eğme mukavemeti (MPa 20 $^\circ\text{C}$ 'de)	386	350	450
Basma mukavemeti (MPa 20 $^\circ\text{C}$ 'de)	607	2400	2650
Elastik modül (GPa)	68,9	395	425
Poission oranı	0,33	0,25	0,27
Sertlik (HV)	107	1750	2200

Tablo III. Taban Cürufunun Kimyasal Kompozisyonları (ağırlıkça %)

Kaynak	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	CaO	MgO	SO_3	TiO_2
Sanjith et al. 2015	48,71	29,23	4,29	0,55	1,45	7,56	1,84	3,96	2,41
Sani et al. 2010	54,80	28,50	8,49	0,75	0,08	4,20	0,35	0,12	2,71
Aydın 2016	55,10	28,10	8,30	1,50	1,90	1,10	0,85	1,40	1,75
Argiz et al. 2017	52,20	27,95	7,00	0,60	1,30	5,90	1,72	0,80	2,53
Martins et al. 2010	52,02	25,23	9,11	1,14	1,45	6,00	2,17	0,65	2,23

Kompozitler iki aşamalı bir karıştırma işlemi ihtiva eden, metal kalıba döküm yöntemi ile üretilmişlerdir. Yöntemin ilk aşamasında matris malzemesinin sıcaklığı elektrikli fırın kullanılarak 700 $^\circ\text{C}$ 'ye yükseltildikten sonra 600 $^\circ\text{C}$ ye düşürülmüştür. Karıştırma işleminin ilk aşamasında bu sıcaklıkta yarı ergimiş halde bulunan matrise, sıcaklığı 250 $^\circ\text{C}$ ye çıkarılmış ve bu sıcaklıkta belli bir süre beklemiş takviye elemanları ilave edilerek elle karıştırılır. İkinci aşamada, takviye elemanları ilave edilmiş matris tekrar ısıtılarak sıcaklığı 800 $^\circ\text{C}$ 'ye yükseltilir. Bu sıcaklıkta 10 dk boyunca 250d/d hızla karıştırılır. Bu aşamaya mekanik karıştırma adı verilir. Bu

esnada erimiş halde bulunan karışıma azot gazı püskürtülerek, ortamdaki oksijenin uzaklaştırılması ve karbür oluşumu engellenmiş olur. Daha sonra önceden 250°C'ye ısıtılmış çapı 14mm, boyu 300mm olan üç kollu metal kalıplara oda sıcaklığında döküm yapılır. Soğuyan numuneler metal kalıptan çıkarılarak, deneyler için boyutlandırılır. Şekil 1'de karıştırma ünitesi ve metal kalıba döküm verilmiştir.

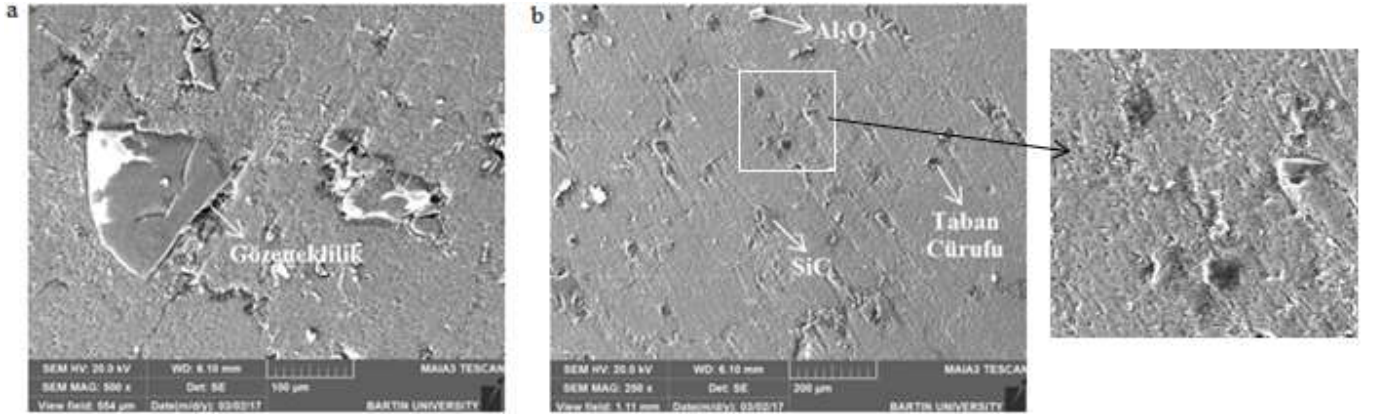


Şekil 1. Karıştırma Ünitesi ve Metal Kalıba Döküm

Kompozit üretiminde %1, %3 ve %5 oranında takviye malzemeleri kullanılmıştır. %4 - %6 ve %8 takviye oranları kullanılarak ikili hibrit kompozitler ve %7 - %9 ve %11 takviye oranları ile üçlü hibrit kompozitlerin üretimi yapılmıştır. Kompozitlerin mikro yapıları görüntülemeleri için ise 6-1000000 x büyültme özelliğine sahip FEI Quanta FEG 450 marka elektron mikroskobu, sertlik ölçümlerinde ise Brinell sertlik ölçüm metodu kullanılmıştır. Aşınma deneyleri sabit kayma mesafesi, sabit dönme hızında 1N, 3N ve 5N yük değerleri uygulanarak Pin-On Disk cihazı ile yapılmıştır. Ayrıca sertlik ve aşınma ölçümlerinde meydana gelebilecek hataları bertaraf etmek için her bir numuneden 3 adet üretim yapılarak tüm ölçümler bu 3 numune için de aynı şartlarda tekrarlanmıştır.

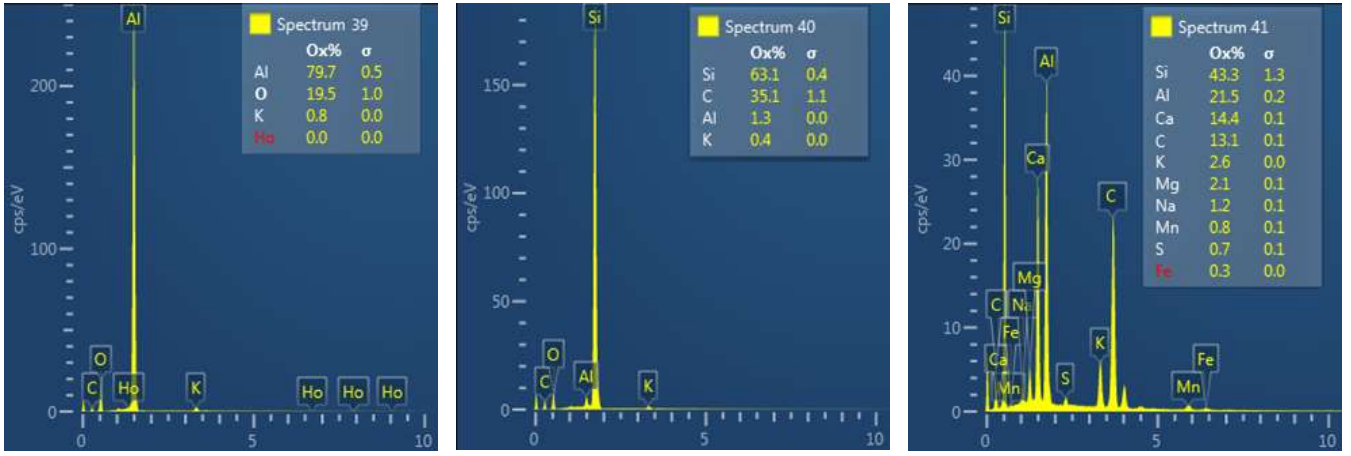
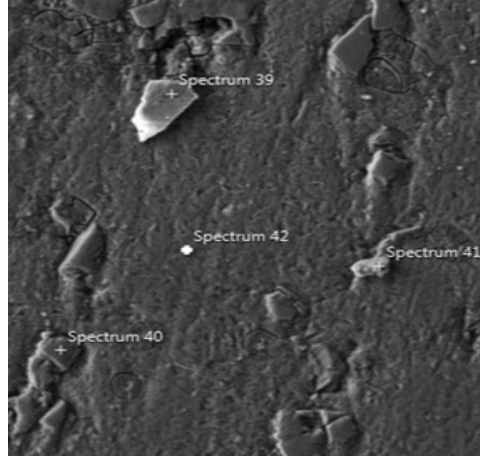
3. Bulgular ve Tartışma

Hassas kesme cihazında kesilen kompozitler bakalite alındıktan sonra mikro yapı incelemeleri için otomatik yüzey parlatma ve numune hazırlama cihazında sırasıyla 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh numarasına sahip zımparalar kullanılarak 400 d/d hızda 5 dakika süreyle zımparalanıp daha sonra keçe ile parlatılmıştır.



Şekil 2. (a) TEM 500 Büyütme; (b) TEM 250 Büyütme

Şekil 2'de verilen mikro yapı fotoğrafları incelendiğinde takviye elemanlarının içyapıda homojen dağıldıkları gözlemlenmiştir. Genel olarak takviye ile matris arasında iyi bir yapılaşma olduğu belirlense de bazı bölgelerde gözeneklilik meydana geldiği tespit edilmiştir. Eriyik haldeki Al6061 alaşımına eklenmeden takviye elemanları önce ön ısıtmaya tabi tutulduklarından genel olarak toplanma gözlenmemiştir. Benzer bir durumu Ramachandra ve Radhakrishna (2006), karıştırma döküm tekniği ile ürettikleri Al (LM25) alaşımına, 500°C sıcaklığında ön ısıtmaya tabi tuttukları SiC takviyeyi ağırlıkça %5-10 oranında ekleyerek ürettikleri kompozit de gözlemlemişlerdir (Ramachandra and Radhakrishna 2006). Sharma ve arkadaşları (2020) ise takviyeyi 200°C sıcaklıkta ön ısıtmaya tabi tutarak ürettikleri kompozitin içyapısında toplanma gözlemlememişlerdir (Sharma et al. 2020). Buna rağmen mikro yapı fotoğraflarından bazı bölgelerde toplanma meydana geldiği görülmekte ve bunun da karıştırıcının geometrisi, karıştırma süresi vb. parametrelerin değiştirilmesi ile ileriki çalışmalarda giderilebileceği düşünülmektedir.

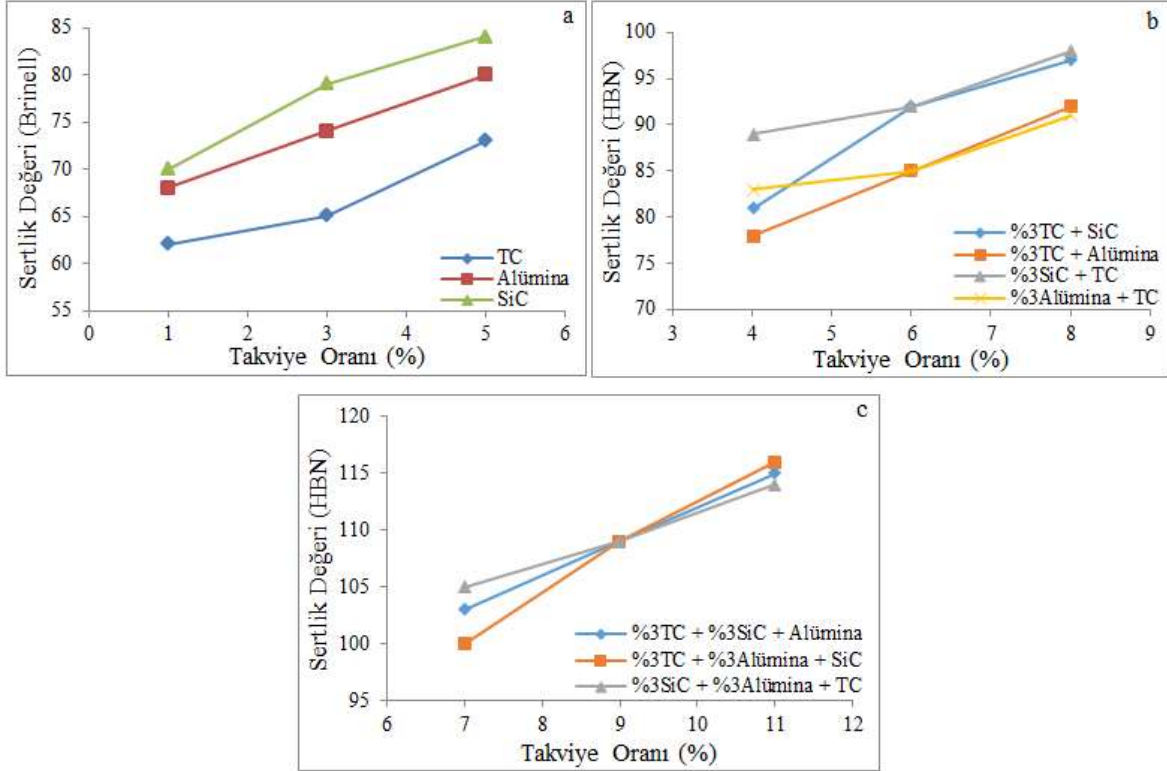


Şekil 3. Mikroyapı ve EDS Analizleri

Şekil 3’de verilen mikro yapı fotoğrafında da hem homojen dağılım hem de matris takviye arasında iyi bir yapışma görülmektedir. EDS analizleri incelendiğinde ise içyapıda SiC, Al₂O₃ ve taban cürufunun varlıkları belirlenmiştir.

3.1. Sertlik

Kompozitlerin sertlik ölçümleri ASTM (American Society for Testing and Materials) standartlarının E-10 versiyonuna göre Brinell sertlik ölçüm test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Brinell Sertlik Değeri (BSD) ölçümü için her bir numune üzerinde 5 farklı noktada ölçümler yapılmış, en yüksek ve en düşük değerler çıkarılmış, kalan değerlerin aritmetik ortalamalarının alınması yöntemiyle sertlik değerleri belirlenmiştir. Şekil 3’de Al6061 alaşımına % 1, 3 ve 5 oranlarında ilave edilen taban cürufu, Al₂O₃ ve SiC’ün alaşımın sertliğine etkisi gösterilmiştir.



Şekil 4. (a) Takviye elemanlarının kompozitin sertliğine etkisi; **(b)** Takviye elemanlarının ikili hibrit kompozitin sertliğine etkisi; **(c)** Takviye elemanlarının üçlü hibrit kompozitin sertliğine etkisi.

Al6061 alaşımı iki kademeli karıştırmalı döküm yöntemi ile tekrar üretilmiş ve sertliği 58BSD ölçülmüştür. Şekil 4 (a)'da taban cürufu, Al_2O_3 ve SiC'ün %1, 3 ve 5 oranlarında Al6061 alaşımına ilave edilmesi ile üretilen kompozitlerin sertlik değişimi gösterilmiştir. Taban cürufu, Al_2O_3 ve SiC'ün artan oranlarında kompozitin sertliği artmaya devam etmiştir. %5 taban cürufu takviyesi Al6061 alaşımının sertliğini %25.86, %5 Al_2O_3 takviyesi %37.93 ve %5 SiC takviyesi ise %44.83 oranında arttırmıştır. %5 taban cürufu ilavesi Al6061 alaşımının sertliğini 73BSD, %5 Al_2O_3 ilavesi 80BSD ve %5 SiC ilavesi ise 84BSD değerine yükseltmiştir.

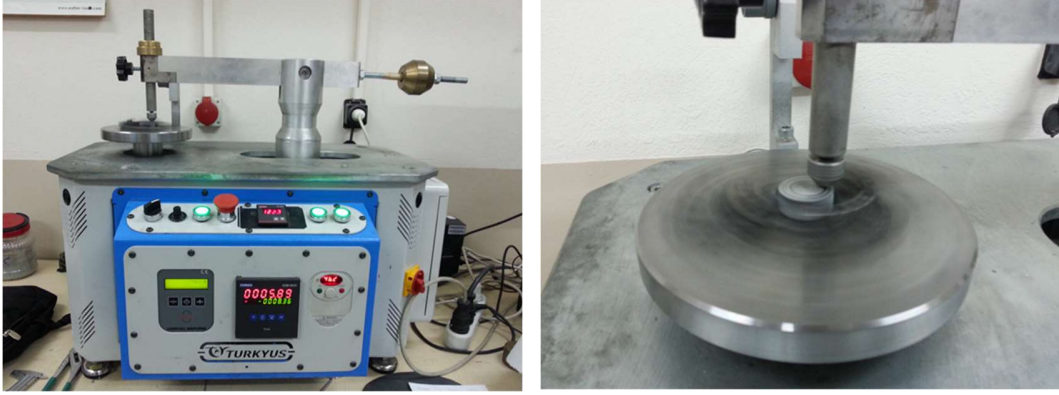
Şekil 4 (b)'de % 3 oranında sabit tutulmuş 1. takviye ile birlikte, 2. takviyenin % 1, 3 ve 5 oranlarında ilave edilmesi ile üretilen ikili hibrit kompozitin sertlik değişimi gösterilmiştir. 2. takviye elemanının artan oranlarında hibrit kompozitin sertliğinin arttığı belirlenmiştir. Sertliği 65BSD olan %3 taban cürufu takviyeli Al6061 alaşımına %5 oranında Al_2O_3 ilavesi sertliği % 41.54, %5 oranında SiC ilavesi ise % 49.23 oranında arttırmıştır. Sertliği 79BSD olan %3 SiC takviyeli Al6061 alaşımına %5 oranında taban cürufu ilavesi sertliği % 24.05 oranında arttırırken, sertliği 74BSD olan %3 Al_2O_3 takviyeli Al6061 alaşımına %5 oranında taban cürufu ilavesi ise sertliği % 22.97 oranında arttırmıştır. İkili hibrit kompozitlerde en yüksek sertlik değeri %3 SiC + %5 TC takviyeli olanda 98BSD olarak ölçülmüştür.

Şekil 4 (c)'de % 3 oranında sabit tutulmuş 1. ve 2. takviye ile birlikte, 3. takviyenin % 1, 3 ve 5 oranlarında ilave edilmesi ile üretilen üçlü hibrit kompozitin sertlik değişimi gösterilmiştir. Üçlü hibrit kompozitlerde en düşük sertlik değeri %3 TC + %3 Al_2O_3 + %1 SiC takviyeli olanda 100BSD olarak, en yüksek sertlik değeri ise %3 TC + %5 SiC + %3 Al_2O_3 takviyeli olanda 116BSD olarak belirlenmiştir.

Literatür incelendiğinde elde edilen sonuçları destekleyen araştırmaların olduğu görülmektedir. Örneğin Pawar ve arkadaşları (2014), karıştırmalı döküm yöntemiyle saf alüminyuma %2.5 ile 10 arasında değişen 4 farklı oranda SiC ilave ederek ürettikleri kompozitlerde, ilave miktarının artmasıyla kompozitin sertliğinin arttığını ve %10 SiC ilaveli kompozitin sertliğinin 60BSD olduğunu bildirmişlerdir (Pawar and Utpat 2014). Benzer şekilde Surappa ve Rohatgi (1981), karıştırmalı döküm yöntemiyle saf alüminyuma %1 ile 3 arasında değişen 3 farklı oranda Al_2O_3 ederek ürettikleri kompozitlerde, ilave miktarının artmasıyla kompozitin sertliğinin arttığını ve %3 Al_2O_3 ilaveli kompozitin sertliğinin 37BSD olduğunu bildirmişlerdir (Surappa and Rohatgi 1981).

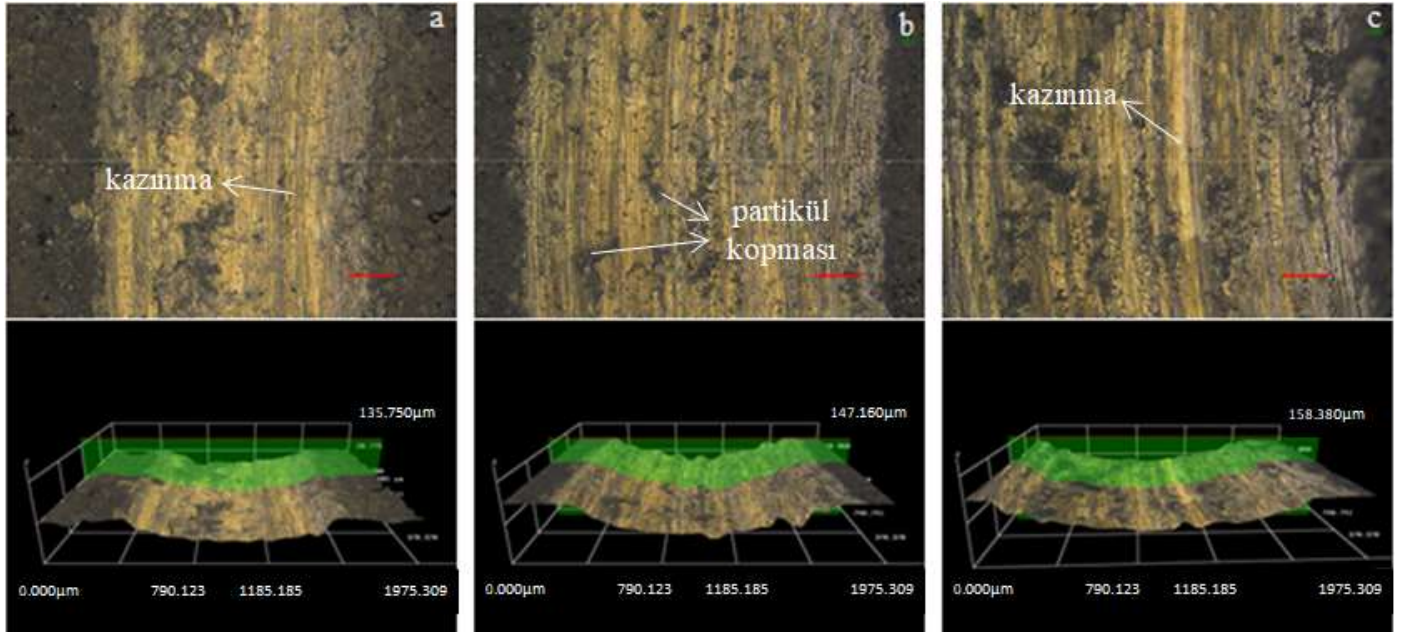
3.2. Aşınma

Üretilen kompozitlerin aşınma deneyleri şekil 5'te verilen TURKYUS marka pin-on disk cihazı kullanılarak, ASTM G 99 standardına göre yapılmıştır. Aşınma testlerinde 5mm çapında 60HRC değerine sertleştirilmiş çelik bilya uç kullanılmıştır.



Şekil 5. Aşınma test cihazı

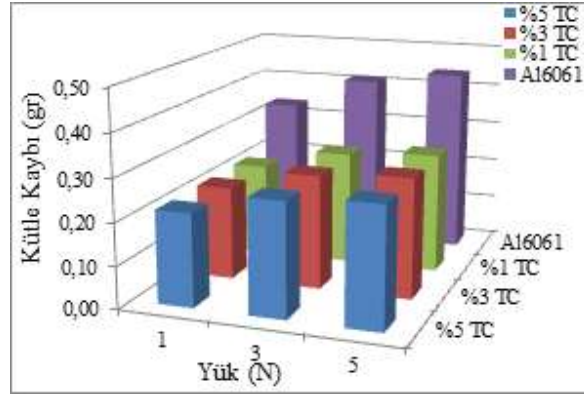
Deneyler 300m sabit kayma mesafesinde, 320dev/dk sabit kayma hızında ve 1N, 3N, 5N yük değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Tüm aşınma deneylerinin başlangıcında ve bitiminde, numunelerin ağırlıkları hassas terazi kullanılarak ölçülmüş ve kütle kaybı belirlenmiştir. Hem deney esnasında hem de ölçümler esnasında meydana gelebilecek hataları bertaraf etmek için her bir numuneden 3 adet üretilerek bu numuneler için aşınma deneyleri aynı şartlarda tekrarlanmıştır. Şekil 6'da %5 oranında taban cürufu içeren kompozitin 1N, 3N ve 5N yük değerlerinde aşınan yüzeylerine ait metal mikroskobu ve profilometre fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 6. Aşınma ve Profilometre Fotoğrafları (a) 1N; (b) 3N; (c) 5N

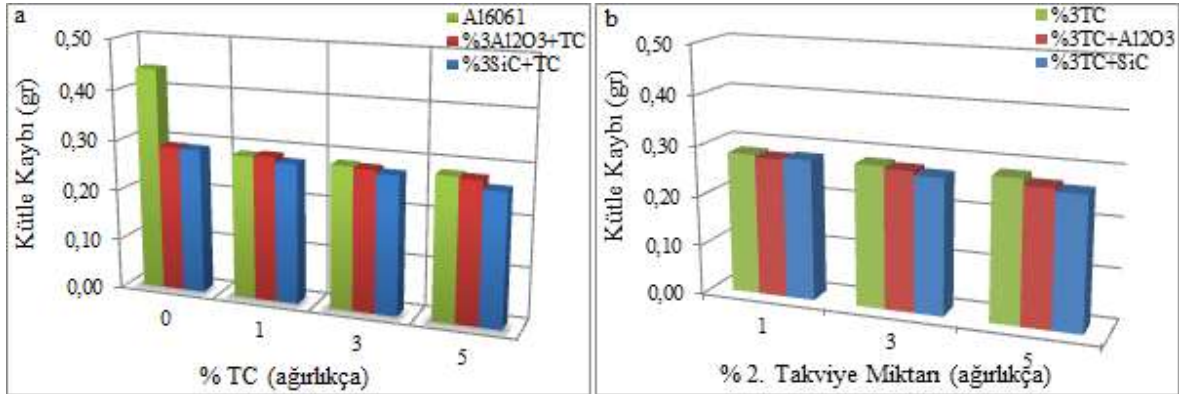
Şekil 6'da uygulanan yük arttıkça aşınan yüzeyin genişliği ve derinliği artmaktadır. Bununla birlikte yükün artması ile hem daha pürüzlü bir yüzey meydana gelmiş hem de yüzeyden kopan takviye elemanı miktarı artarak daha gözenekli bir yüzey oluşmuştur. Bunun nedeni matris/takviye ara yüzeyinde iyi bir yapılaşma meydana gelmemesi ve bazı bölgelerde toplanmadan dolayı takviye partiküllerinin arasına yeterli miktarda matrisin yerleşememesi olabilir. %5oranında taban cürufu içeren kompozitin aşınmış yüzey morfolojisi incelendiğinde incelendiğinde kayma yönünde çizikler, kısıtlanmış oluklar ve pürüzsüz eğrilerin olduğu net bir şekilde görülmektedir. Bu çizikler aşınma testi sırasında numune yüzeylerinden kopan parçaların yüzeyleri çizmesinden abrasif türü bir aşınma mekanizmasının kanıtı olduğu söylenebilir.

Şekil 7’de Al6061 alaşımına ağırlıkça %1, 3 ve 5 oranlarında katılan taban cürufunun kompozitin aşınma miktarına etkisi verilmiştir.



Şekil 7. Taban cürufunun kompozitin aşınma miktarına etkisi

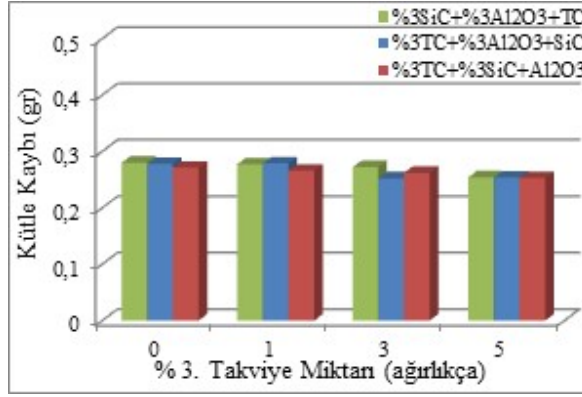
Şekil 7’de görüldüğü gibi, yükün artması ile hem Al6061 alaşımının hem de kompozitin aşınma miktarı artmıştır. Bununla birlikte Al6061 alaşımına katılan taban cürufunun her oranda aşınmayı azaltma yönünde bir etkisi olmuştur. Al6061 alaşımında 1N yük altında gerçekleştirilen kuru sürtünmeli aşınma deneyi sonucunda 0.3367gr kütle kaybı olurken, yük 5N değerine çıkarıldığında kütle kaybı 0.4415gr olmuştur. Alaşımına katılan taban cürufu miktarı ağırlıkça %5 olduğunda 1N yük altındaki kütle kaybı 0.2190gr, 5N yük de ise 0.2817gr olarak belirlenmiştir. Bu durumda %5 taban cürufu ilavesi ile kütle kaybında yaklaşık %34 oranında azaldığı belirlenmiştir. Takviyenin belli bir oranına kadar sertlik ile aşınma arasında bir ters orantıdan bahsedilebilir. Sertliğin artması ile aşınma miktarında azalma meydana gelmiştir. %5 taban cürufu katkısı ile Al6061 alaşımının sertliği 58BSD’den 73BSD’ne yükselmiş bu da aşınma miktarının azalmasına neden olmuştur. Bunun nedeni olarak taban cürufunun yapısında bulunan sert SiO₂ ve Al₂O₃ partikülleri gösterilebilir.



Şekil 8. (a) Taban cürufunun %3 SiC ve %3 Al₂O₃ ilaveli ikili hibrit kompozitin aşınmasına etkisi; (b) SiC ve Al₂O₃’ün %3 taban cürufu ilaveli ikili hibrit kompozitin aşınmasına etkisi

Şekil 8 (a)’da Al6061 alaşımına, %3 Al₂O₃ ve %3 SiC ilaveli kompozite, %1, 3 ve 5 oranlarında katılan taban cürufunun ikili hibrit kompozitin aşınma miktarına etkisi verilmiştir. Buna göre 5N yük altında Al6061 alaşımında 0.4415gr kütle kaybı meydana gelirken, alaşıma %5 oranında taban cürufu ilavesi ile kütle kaybı 0.2817gr’a düşmektedir. %3 Al₂O₃ + %5 taban cürufu ilaveli ikili hibrit kompozit de 0.2786gr kütle kaybına karşılık %3 SiC + %5 taban cürufu ilaveli ikili hibrit kompozit de ise 0.2615gr kütle kaybı ölçülmüştür.

Şekil 8 (b)’de %3 taban cürufu katkılı Al6061 alaşımının 5N yük altında kütle kaybı 0.2830gr olarak belirlenmiştir. %3 TC + %5 Al₂O₃ ilaveli hibrit kompozitin 5N yük altında kütle kaybı 0.2704gr, %3 TC + %5 SiC ilaveli hibrit kompozitin aynı yük altında kütle kaybı ise 0.2640gr olarak ölçülmüştür. Bu durumda Al₂O₃’ün aşınmaya etkisi %4.45, SiC ’ün ise %6.71 olarak belirlenmiştir. SiC ’ün sertlik değeri Al₂O₃’den daha yüksek olduğundan elde edilen sonuçların beklenen sonuçlar olduğu söylenebilir.



Şekil 9. Takviye elemanlarının üçlü hibrit kompozitin aşınmasına etkisi

Şekil 9'da Al6061 alaşımına ilave edilen 2 takviyenin oranı %3'de sabit tutulurken 3. takviye %1, 3 ve 5 oranında ilave edilerek üretilen üçlü hibrit kompozitlerin kuru sürtünmeli aşınma deneyinde ölçülen kütle kayıpları verilmiştir. Buna göre 5N yük altında yapılan kuru sürtünmeli aşınma deneyinde 3. takviyenin %5 ilavesi ile üretilen üçlü hibrit kompozitlerde kütle kayıpları birbirine çok yakındır. 3. takviye elemanı olarak %5TC ilavesi ile oluşan kütle kaybı 0.2539gr, %5SiC ilavesi ile oluşan kütle kaybı 0.2534gr ve %5Al₂O₃ ilavesi ile oluşan kütle kaybı ise 0.2528gr olarak ölçülmüştür.

Literatür incelendiğinde elde edilen sonuçlara ulaşan benzer araştırmaların olduğu görülmektedir. Örneğin Suresh ve arkadaşları (2020), karıştırmalı döküm yöntemiyle Al7075 alaşımına %1, 2, 3 ve 4 oranlarında Al₂O₃ + SiC ilavesiyle hibrit kompozitleri başarıyla üretmişler ve pin-on disk yönteminde 1200m sabit kayma mesafesi, 3 farklı değişken yük değeri, 3 farklı kayma hızı kullanarak kuru sürtünmeli aşınma deneylerini gerçekleştirmişlerdir. 20N yük ve 2m/s kayma hızı değerlerinde Al7075 alaşımında 0.018 gr kütle kaybına karşılık, alaşıma %3SiC ve %3Al₂O₃ ilave ettiklerinde 0.014gr kütle kaybı belirlemişlerdir (Suresha et al. 2020). Benzer şekilde Paladugu ve arkadaşları (2022), karıştırmalı döküm yöntemiyle Al6061-T6 alaşımına %3Al₂O₃ + %3SiC ilavesiyle hibrit kompozit üretmişler ve takviyesiz alaşım ile hibrit kompozitin kuru sürtünmeli aşınma dayanımını karşılaştırmışlardır. Takviye eklenmesi ile aşınma dayanımının %45 oranında arttığını belirlemişlerdir (Paladugu et al. 2022). Bunların yanı sıra literatürde metal matrisli kompozit üretiminde taban cürufunun kullanıldığı sadece 1 çalışmaya rastlanılmıştır. Subramani ve arkadaşları (Subramani vd. 2022), karıştırmalı döküm yöntemi ile Al2219 alaşımına taban cürufu ve Si₃N₄ ekleyerek ikili hibrit kompozit üretmişler ve pin-on disk yöntemiyle kuru sürtünmeli aşınma değerini inceleyerek, en düşük aşınma değerinin %10 taban cürufu + %4 Si₃N₄ takviyeli kompozit de meydana geldiğini bildirmişlerdir (Subramani et al. 2022).

4. Sonuçlar

Bu çalışmada Al6061 matrisli, taban cürufu, SiC ve Al₂O₃ takviyeli kompozitler iki kademeli karıştırmalı döküm yöntemi kullanılarak başarılı bir şekilde üretilmiştir. Takviye elemanlarının kompozitin sertliğine ve aşınma miktarına etkisi incelenmiş elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

* SEM görüntülemeleri ve EDS analizleri sonucunda içyapıda taban cürufu takviyesi belirlenmiştir. Takviye elemanları 250°C sıcaklığında ön ısıtmaya tabi tutularak ısıtma kabiliyetleri artırılmış bu nedenle hem matrisle uygun bir ara yüzey bağı oluşturmuş hem de topaklanma gözlenmemiştir.

* 58 HBN sertliğindeki Al6061 alaşımına eklenen %5 taban cürufu ilavesi sertliği 73BSD, %5 Al₂O₃ ilavesi 80BSD ve %5 SiC ilavesi ise 84BSD değerine yükseltmiştir.

* Sertliği 65HBN olan %3 taban cürufu takviyeli Al6061 alaşımına %5 oranında Al₂O₃ ilavesi sertliği 92BSD, %5 oranında SiC ilavesi ise 97BSD değerine yükseltmiştir. Sertliği 79HBN olan %3 SiC takviyeli Al6061 alaşımına %5 oranında taban cürufu ilavesi sertliği 98BSD değerine yükseltirken, sertliği 74HBN olan %3 Al₂O₃ takviyeli Al6061 alaşımına %5 oranında taban cürufu ilavesi ise sertliği 91BSD değerine yükseltmiştir.

* Üçlü hibrit kompozitlerde en düşük sertlik değeri %3 TC + %3 SiC + %1 Al₂O₃ takviyeli olanda 103BSD olarak, en yüksek sertlik değeri ise %3 TC + %5 SiC + %3 Al₂O₃ takviyeli olanda 116 BSD olarak belirlenmiştir.

*Tüm kompozitlerde kuru sürtünmeli aşınma durumunda artan yük ile kütle kaybı artmıştır.

* Al6061 alaşımına eklenen taban cürufu tüm oranlar için kuru sürtünmeli aşınmada kompozitin kütle kaybını azaltmıştır. %5 oranında katılan taban cürufu kompozitin kütle kaybını %34 oranında azaltmıştır.

* Taban cürufu ile Al₂O₃'in birlikte takviye malzemesi olarak kullanıldığı ikili hibrit kompozit de meydana gelen kütle kaybı taban cürufu ile SiC'ün birlikte kullanıldığı kompozit deki kütle kaybına kıyasla %2.26 oranında daha fazladır.

*Taban cürufu, SiC ve Al₂O₃ in birlikte takviye malzemesi olarak kullanıldığı üçlü hibrit kompozitin ise üretilen kompozitler arasında en düşük kütle kaybına sahip olduğu belirlenmiştir.

* Kompozitlerin aşınmış yüzey morfolojisi incelendiğinde abrazif aşınma mekanizmasının etkili olduğu belirlenmiştir.

Referanslar

Annual Book of ASTM Standards, 1992, Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, vol. 04.02, ASTM, Philadelphia, PA, USA, C 618-92a, 306-308.

Argiz, C., Sanjuán, M. Á., & Menéndez, E. (2017). Coal Bottom Ash for Portland Cement Production. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, Article ID 6068286, 7 pages. <https://doi.org/10.1155/2017/6068286>.

Aydın, E. (2016). Novel Coal Bottom Ash Waste Composites for Sustainable Construction. *Construction and Building Materials*, 124, 582-588.

Bayca, S.U., Batar, T., Sayin, E., Solak, O., & Kahraman, B. (2008). The Influence of Coal Bottom Ash and Tincal (Boron Mineral) Additions on the Physical and Microstructures of Ceramic Bodies. *J. Ceram. Proc. Res.*, 9(2), 118-122.

Benavidez, E., Grasselli, C., & Quaranta, N. (2003). Densification of Ashes from a Thermal Powerplant. *Ceram. Int*, 29, 61-68. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(02\)00090-1](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(02)00090-1).

Coal Combustion Byproducts, Univ. Kentucky URL <http://www.uky.edu/KGS/coal/coal-for-combustionbyproducts.php>, (Erişim: 25.10.2020).

Gao, J.N., Shi, N., Guo, X.B., Li, Y.F., Bi, X.J., Qi, Y.F., Guan, J., & Jiang, B. (2021). Electrochemically Selective Ammonia Extraction From Nitrate by Coupling Electron- and Phase-Transfer Reactions at a Three-Phase Interface. *Environ. Sci. Technol.* 55(15), 10684-10694. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c08552>.

Gündoğan, K., & Özşarı, A.R.B. (2019). Basınçlı İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilen AA2024 ve AA6061 Matrisli, B4C ve SiC Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mikroyapı, Mekanik ve Isıl İletkenlik Özelliklerine Basıncın Etkisi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 11(2), 657-669.

Hahn, H. T., & Tsai, S. W. (1980). *Introduction to Composite Materials*. Basel, Technomic Publishing Co.

Hashim, J., Looney, L., & Hashmi, M.S.J. (1999). Metal Matrix Composites Production by Stir Casting Method. *Journal of Material Processing Technology*, 92-93, 1-7.

Hooton, R.D., & Bickley, J.A. (2014). Design for Durability: the Key to Improving Concrete Sustainability. *Construct Build Mater*, 67, 422-430. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.016>.

<https://asm.matweb.com> (03.04.2023)

Kaczmar, J.W., Pietrzak, K., & Wlosinski, W. (2000). The Production and Application of Metal Matrix Composite Materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 106(1), 58-67.

Kim, H.K., & Lee, H.K. (2015). Coal Bottom Ash in Field of Civil Engineering: a Review of Advanced Applications and Environmental Considerations. *KSCE J. Civ. Eng.*, 19, 1802-1818. <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0282-7>.

Kumar, G.B.V., Rao, C.S.P., & Selvaraj, N. (2011). Mechanical and Tribological Behavior of Particulate Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites – a review. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 10(01), 59-91.

Kumar, G.B.V., Rao, C.S.P., Selvaraj, N., & Bhagyashekar, M.S. (2010). Studies on Al6061-SiC and Al7075-Al₂O₃ Metal Matrix Composites. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 9(1), 43-55.

Lloyd, D. (1994). Particle Reinforced Aluminum And Magnesium Matrix Composites. *International Materials Review*, 39(1), 1-23.

- Lokesh, N., Ramachandra, M., Mahendra, K.V., & Sreenith, T. (2013). Effect of Hardness, Tensile and Wear Behavior of Al- 4.5wt % Cu Alloy / Flyash / SiC Metal Matrix Composites. *IJMER*, 3(1), 381-385.
- Mahendra, B.M., Arulshri, K.P., & Iyandurai, N. (2013). Evaluation of Mechanical Properties of Aluminium alloy 2024 Reinforced with Silicon Carbide and Fly Ash Hybrid Metal Matrix Composites. *American Journal of Applied Sciences*, 10(3), 219-229.
- Martins, I.M., Gonçalves, A., & Marques, J. (2010). Durability and Strength Properties of Concrete Containing Coal Bottom Ash," in *Proceedings pro077: International RILEM Conference on Material Science-AdIPoC-Additions Improving Properties of Concrete-Theme*, 3, 275-283.
- Mondal, M., Dutta, B.K., & Panigrahi, S.C. (2008). Wear Properties of Copper-Coated Short Steel Fiber Reinforced Stir Cast Al-2Mg Alloy Composites. *Wear*, 265(5-6), 930-939.
- Muthusamy, K., Rasid, M.H., Jokhio, G.A., Budiea, A.M.A., Hussin, M.W., & Mirza, J. (2020). Coal Bottom Ash as Sand Replacement in Concrete: a Review. *Constr. Build. Mater*, 236, 117507, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117507>.
- Paladugu, S.R.M., Aparna, N.D., & Sreekanth, P.S.R. (2022). Mechanical and Wear Analysis of Al6061-SiC/Al₂O₃/B₄C Hybrid Metal Matrix Composites Using Stir Casting Process. *Materials Today: Proceedings*, 56(3), 1091-1096.
- Panagopoulos, A., & Haralambous, K.-J. (2020). Environmental Impacts of Desalination and Brine Treatment-Challenges and Mitigation Measures. *Mar. Pollut. Bull.* 161, 111773, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111773>.
- Panagopoulos, A., Haralambous, K.-J., & Loizidou, M. (2019). Desalination Brine Disposal Methods and Treatment Technologies-a review. *Sci. Total Environ.* 693, 133545, 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.351>.
- Pawar, P.B., & Utpat, A.A. (2014). Development of Aluminium Based Silicon Carbide Particulate Metal Matrix Composite for Spur Gear. *Procedia Materials Science*, 6, 1150-1156.
- Pawar, P.B., & Utpat, A.A. (2014). Development of Aluminium Based Silicon Carbide Particulate Metal Matrix Composite for Spur Gear. *Procedia Materials Science*, 6, 1150-1156.
- Prasad, S.V., & Asthana, R. (2004). Aluminum Metal-Matrix Composites for Automotive Applications: Tribological Considerations. *Tribology Letters*, 17(3), 445-453.
- Prashanth, R., Shanmugasundaram, A., Abhinavaram, J., & Jagadeesh, S. (2017). The Role of TiC on the Hardness and Wear Resistance of AA7075 Using GTA. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(21), 5903-5913.
- Ramachandra, M., & Radhakrishna, K. (2006). Sliding Wear, Slurry Erosive Wear, And Corrosive Wear of Aluminium/SiC Composite. *Materials Science-Poland*, 24(2/1), 333-349.
- Ramesh, C.S., & Safiulla, M. (2007). Wear Behavior of Hot Extruded Al6061 Based Composites. *Wear*, 263(1-6), 629-635.
- Robin, N.K., Ilangovan, S., Arul, S., & Shanmugasundaram, A. (2015). Influence of Nickel Content on Mechanical Properties of Aluminium-Boron Carbide Hybrid Composite. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(12), 32311-32320.
- Rohatgi, P. (1991). Cast Aluminum-Matrix Composites For Automotive Applications. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 43(4), 10-15.
- Sani, M. S. H. M., Muftah, F., & Muda, Z. (2010). The properties of special concrete using washed bottom ash (WBA) as partial sand replacement. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 1(2), 65-76.
- Sanjith, J., Kiran, B., Chethan, G., & Mohan Kumar, K. (2015). A study on mechanical properties of latex modified high strength concrete using bottom ash as a replacement for fine aggregate. *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*, 3(6), 114-121.
- Seshappa, A., & Prasad, B.A. (2022). Swirl Cast with Wire Cut Electric Discharge Machining For Investigational Purposes on Al-7075/Al₂O₃&SiC. *Materials Today: Proceedings*, 68, 2258-2264.
- Sharma, H., Tiwari, S.K., Kumar, A., & Singh, D. (2022). Investigation of Mechanical and Erosive Behaviour of the Al 6061-SiC Composites Fabricated by Stir Casting. *Materials Today: Proceedings*, 68, 446-453.

- Sharma, V.K., Chaudhary, S., Singh, R.C., Vikas, V., Sonia, D., & Goel, V. (2020). Reusing Marble Dust as Reinforcement Material for Better Mechanical Performance: Studies on Compositing Aluminum Matrix. *Material Research Express*, 6, 1265f6.
- Singh, N., Mithulraj, M., & Arya, S. (2018). Influence of Coal Bottom Ash as Fine Aggregates Replacement on Various Properties of Concretes: a review. *Resour Conserv Recycl*, 138, 257-271. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.025>.
- Singh, N., Mithulraj, M., & Arya, S. (2018). Influence of Coal Bottom Ash as Fine Aggregates Replacement on Various Properties of Concretes: a review. *Resour Conserv Recycl* 2018;138:257–71. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.025>.
- Subramani, K., Arunkumar, T., Mohanavel V., Kolappan, S., Kailasanathan, C., Rathinam, B.B., Subbiah, R., & Kumar S.S. (2022). Investigation on Wear Characteristics of Al 2219/Si3N4/Coal Bottom Ash MMC. *Materials Today: Proceedings*, 62(8), 5514-5518.
- Surappa, M.K., & Rohatgi, P.K. (1981). Preparation and Properties of Cast Aluminium-Ceramic Particle Composites. *Journal of Materials Science*, 16(4), 983-993.
- Surappa, M.K., & Rohatgi, P.K. (1981). Preparation and Properties of Cast Aluminium-Ceramic Particle Composites. *Journal of Materials Science*, 16(4), 983-993.
- Suresha, S., Gowdb G.H., & Devakumar, M.L.S. (2020). Wear behavior of Al 7075/Al₂O₃/SiC Hybrid NMMC's by Stir Casting Method. *Materials Today: Proceedings*, 24, 261-272.
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), 2020, Atık, Haber Bülteni.
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), 2022, Katı yakıtlar, Haber Bülteni.
- Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu (TKİK), 2021, Kömür "Linyit" Sektör Raporu.
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), 2010. Human and Ecological Risk Assessment of Coal Combustion Wastes
- Umanath, K., Palanikumar, K., & Selvamani, S.T. (2013). Analysis of Dry Sliding Wear Behaviour of Al6061/SiC/Al₂O₃ Hybrid Metal Matrix Composites. *Composites: Part B*, 53, 159-168.
- Ünlü, B.S. (2008). Investigation on Tribological and Mechanical Properties of Al₂O₃-SiC Reinforced Aluminum Composites Manufactured by Casting or PM method. *Materials and Design*. 2008;29(10):2002-2008.
- Villanova, D.L., & Bergmann, C.P. (2007). Sinterability Study of Ceramic Bodies Made from a Mixture of Mineral Coal Bottom Ash and Soda-Lime Glass Cullet. *Waste Manage Res.*, 25, 77-82. <https://doi.org/10.1177/0734242X07069764>.