




Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Al6061 Talaşının Toz Metalurjisi ile Geri Kazanımı

 Ümit Gencay BAŞCI^{a,*},  Hasan İsmail YAVUZ^a,  Rıdvan YAMANOĞLU^a

^a Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: umit.basci@kocaeli.edu.tr

doi: 10.29130/dubited.959123

ÖZ

Son yıllarda endüstrinin gelişmesi çevre kirliliğinin artmasında büyük rol oynamıştır. Çevrenin korunması amacıyla özellikle metalik atıkların geri dönüştürülmesi her geçen gün daha fazla dikkat çekmektedir. Bu nedenle özellikle talaş formundaki alüminyum atıklarının düşük enerji ve minimum emisyon ile geri kazanımını sağlayan katı hal yöntemleri tercih edilmeye başlanmıştır. Bu çalışmada, toz metalurjisi ile Al6061 talaşının vakum ortamında (10^{-4} mbar), 30 MPa basınç altında ve farklı sıcaklıklarda (560, 580 ve 600°C), 15 dakika sinterlenerek katı hal geri kazanımları amaçlanmıştır. Sinterleme sıcaklığının malzeme özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi için üretilen numunelerin Arşimet prensibine göre yoğunlukları ölçülerek, aşınma, sertlik ve eğme testlerine tabi tutulmuştur. Test sonuçları değerlendirildiğinde en yüksek yoğunluk (%97,8) 600°C’de sinterlenen numunede elde edilmiştir. Yoğunluk değerlerinin artış göstermesi mekanik özellikleri de doğrudan etkilemiştir. En yüksek sertlik değeri 58,9 HV ile 600°C’de sinterlenen numunede ölçülmüştür. Artan yoğunluk ve sertlik ile aşınma direncinde artış gözlenmiştir. Eğme testi sonucunda en yüksek eğme mukavemeti 348 MPa ile yine 600°C’de sinterlenen numunede ölçülmüştür. Sonuç olarak sıcak pres yöntemi ile 6061 talaşının katı hal geri kazanımları sağlanmış ve yüksek mukavemetli parça üretiminin mümkün olabileceği ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Al6061 alaşımı, Geri kazanım, Mikroyapısal karakterizasyon, Mekanik özellikler, Talaş, Toz metalurjisi

Recycling of Al6061 Chip by Powder Metallurgy

ABSTRACT

In recent years the development of industry has played a significant role in the increase of environmental pollution. In order to protect the environment, the recycling of metallic wastes is getting more and more attention day by day. For this reason, solid-state methods, which provide the recycling of aluminum waste, especially in the form of chips with low energy and minimum emission, have started to be preferred. In this study, solid-state recycling was aimed by sintering Al6061 chips in a vacuum environment under 10^{-4} mbar, 30 MPa pressure and at different temperatures (560, 580 and 600°C) for 15 minutes by powder metallurgy. In order to examine the effect of sintering temperature on material properties, the densities of the produced samples were measured according to the Archimedes principle, and they were subjected to wear, hardness and bending tests. When the test results were evaluated, the highest density was obtained in the sintered sample at 600°C with a relative density of 97,8%. The increase in density values also directly affected mechanical properties. The highest hardness value was measured in the sample sintered at 600°C with 58.9 HV. Wear performance increased with increasing hardness ratio. As a result of the bending test, the highest bending strength was measured at 348 MPa in the sample sintered at 600°C. Consequently, solid-state recovery of Al6061 chips was achieved by the hot press method, and it was demonstrated that it is possible to produce high-strength parts as well as material shaping.

Keywords: Al6061 alloy, Recycling, Microstructural characterization, Mechanical properties, Chip, Powder metallurgy.

I. GİRİŞ

Malzemelerin üretim ve şekillendirilebilmesi için farklı imalat yöntemleri geliştirilmiştir. Kaynağına göre üretim yöntemleri birincil veya ikincil üretim yöntemleri olarak sınıflandırılmaktadır. Birincil üretim yöntemleri cevherden yola çıkarak saf metal üretim yöntemlerini kapsamaktadır. Günümüzde yer kabuğunda bulunan cevher kaynaklarının günden güne azalış göstermesi metallerin geri kazanımı ile birlikte ikincil üretim yöntemlerinin önemini artırmaktadır. Karbondioksit ve tehlikeli gazların emisyonu, yüksek miktarda katı atık oluşması, kullanılan enerji miktarının fazlalığı ve çevrenin doğal dengesinin bozulması birincil üretim yöntemlerinin dezavantajları arasında yer almaktadır. Bu dezavantajlardan dolayı ikincil üretim yöntemleri üzerine araştırmalar artmaktadır [1, 2]. Yapılan araştırmalara göre küresel metal geri dönüşüm piyasasının 2020'den 2027 yılına kadar yaklaşık %7 büyüyerek 86,11 milyar dolara ulaşması beklenmektedir. Bununla birlikte 2019 yılında 630 milyon ton olan yeniden kazanım ile geri dönüşüm pazar hacminin 2025 yılına kadar 890,7 milyon tona çıkacağı öngörülmektedir [3].

Alüminyum, yer kürede bulunan cevherler bakımından üçüncü sırada yer almaktadır. Ayrıca alüminyum alaşımları düşük yoğunluk, yüksek spesifik mukavemet, yüksek korozyon direnci, kolay şekillendirilebilirlik, yüksek elektrik ve ısı iletimi, ısıl işlem ve deformasyon ile mukavemet artışı sağlanmasından dolayı endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilen malzemelerden birisidir [4, 5]. Alüminyum ve alaşımları bu üstün özelliklerinden dolayı otomotiv, havacılık, savunma, giyim, spor, yiyecek, makine imalat sektörü gibi birçok sektörde kullanılmaktadır [6, 7]. Bu doğrultuda alüminyum 24 milyon ton mevcut yıllık tüketim miktarı ile dünya çapında en fazla tüketilen demir dışı metal olma özelliğine sahiptir. Toplam tüketim hacminin yaklaşık %25' ini ikincil alüminyum üretimi oluşturmaktadır. Yapılan araştırmalar ABD' de günümüze kadar üretilen toplam alüminyumun yaklaşık %75' inin halen kullanıldığını ortaya çıkartmıştır [8].

Alüminyum alaşımlarının geri kazanımında yaygın olarak ergitme yöntemleri kullanılmaktadır. Ergitme yöntemleri ile alüminyum geri kazanımı, alüminyum hurdalarının sınıflandırılması, ergitilmesi, alaşımlandırılması ve dökülmesi şeklindedir. Sınıflandırma işleminden sonra alüminyum hurdaları ergitme sistemlerinde belli bir enerji aktarımı ile sıvı faz haline getirilmektedir. Sıvı alaşımdan alınan kimyasal analiz sonucuna göre eksik alaşım elementlerinin ilavesi sonrasında çeşitli formlarda dökülerek geri kazanım sağlanmaktadır. Ergitme sırasında oksidasyon nedeniyle alüminyumun yaklaşık olarak %45' i kaybolmakta ve yüksek miktarda cüruf ve çevreyi kirletici gazlar ortaya çıkmaktadır [9]. Ayrıca talaşlı imalat ve testere ile kesim sonrası ortaya çıkan talaş ve toz şeklindeki ince alüminyum partiküllerinin ergitme ile yeniden kazanımı sırasında oksitlenme nedeniyle yüksek oranda metal kaybı oluşmaktadır. Ergitme yöntemlerinde tüketilen enerji ve doğaya salınan zararlı gaz miktarının fazlalığı, metal kaybının yüksek olması katı hal yeniden kazanım tekniklerinin geliştirilmesine neden olmuştur. Katı hal yeniden kazanım tekniklerinde ergitme prosesinin olmaması harcanan enerji miktarının düşük olmasını sağlamaktadır. Diğer bir yandan bu tekniklerin sayesinde çevreye salınan zararlı gaz miktarı minimum seviyede tutulmakta ve yüzey alanı yüksek partiküllerin geri kazanımları mümkün olmaktadır [1].

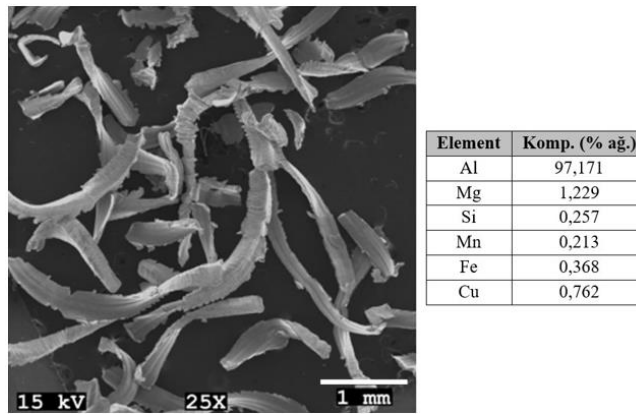
Talaş ve toz halindeki hurdaların katı hal geri kazanım yöntemleri üzerine birçok çalışma yapılmaktadır. Katı hal geri kazanım yöntemlerinden bazıları; sıcak ekstrüzyon, vıda ekstrüzyonu, basınç destekli sinterleme ve sürtünme kaynağıdır [10, 11]. Özellikle basınç destekli sinterleme yöntemleri özelinde birçok farklı proses çalışmaları bulunmaktadır. Son zamanlarda, geleneksel toz metalurjik yöntemlere kıyasla kısa ısıtma sürelerinde gelişmiş mekanik özellikler sağlama yetenekleri nedeniyle hızlı sinterleme tekniklerine yoğun ilgi vardır. Basınç destekli sinterleme yöntemlerinde sıcaklık ve basınç eş zamanlı uygulanmaktadır. Basınç ve sıcaklığın eş zamanlı uygulanması ile daha düşük sinterleme sıcaklığı ve sürelerinde proses gerçekleştirilebilmektedir [12, 13]. Geleneksel toz metalürjisi teknikleri düşük mekanik özelliklere sahip kaba mikroyapılı bir nihai ürüne sebep olurken basınç destekli sinterleme yöntemi yüksek dayanıma sahip numune üretimini mümkün kılmaktadır [14]. Dış basınç genellikle toz metalürjisinde geleneksel basınç destekli sinterleme tekniği olan tek eksenli sıcak presleme (HP) tekniği ile uygulanmaktadır. Bu yöntemde kullanılan grafit kalıp, yüksek yağlama özelliği sayesinde sinterlenmiş numunelerin kalıptan kolayca çıkarılması amacıyla tercih edilmektedir

[15]. Sıcak pres yönteminin sağladığı diğer bir avantaj yüksek yoğunluklu malzeme üretimini sağlamasıdır [16]. Sıcak pres tekniği geleneksel tekniklere kıyasla daha iyi mekanik ve elektrokimyasal özellikler sağlamanın yanı sıra daha basit bir imalat sürecine sahiptir [17]. Bu yöntem döküm yönteminin bir parçası olan homojenizasyon ve parça densifikasyonu gibi ek üretim proseslerine olan ihtiyacı kaldırarak üretim maliyetinin düşmesini sağlamaktadır [18]. Diğer yandan bu yöntem ilk toz şekil ve boyut özelliklerinin olumsuz etkilerini azaltmakta ve arayüzey kinetiğini kontrol etmektedir [19]. Basınç destekli sinterleme yöntemi ayrıca malzemenin yoğunlaşmasına ve nihai özelliklerine doğrudan etki etmektedir. Sinterleme sırasında uygulanan basınç, yoğunlaşma hızını arttırmakta ve sinterleme sıcaklığını azaltmaktadır. Sinterleme süresiyle birlikte ısıtma ve soğutma hızlarının da ayarlanması mikroyapısal açıdan oldukça önemli değişiklikler oluşturmaktadır [6]. Maksimum sinterleme sıcaklığına hızlı ısıtma sayesinde, malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyen tane büyümesi engellenmektedir. Bu sebeple ısıtma oranının malzemelerin yoğunlaşma özelliklerine katkısı nedeniyle sinterleme sıcaklığına ve süresine ek olarak birincil difüzyon parametresi olarak düşünülmesi gerekir [15]. Bunun yanı sıra üretim yönteminin vakum destekli olması alüminyum, magnezyum gibi yüksek oksijen afinitesine sahip elementlerin üretilmesinde kolaylık sağlamaktadır [20]. Paraskevas ve ark. alüminyum talaşından katı hal yeniden kazanım yöntemlerinde aynı kompozisyona sahip talaş ve tozun beraber kullanımıyla basınç destekli sinterleme prosesleri üzerine çalışmalar yapmışlardır. Talaş ve toz partikülleri kullanılarak katı hal geri kazanım prosesinde yüksek yoğunluk elde etmelerine rağmen pahalı olan metal tozların kullanımı ile geri dönüşüm maliyetlerinde artış tespit etmişlerdir [21].

Bu çalışmada, basınç destekli sinterleme yöntemi ile Al6061 talaşına herhangi bir metal tozu ilave edilmeden geri kazanımı üzerine deneysel bir çalışma yapılmıştır. Sinterleme işlemi için sıcak pres yöntemi seçilmiş ve farklı sinterleme sıcaklıklarının malzemenin özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

II. MALZEME VE METOD

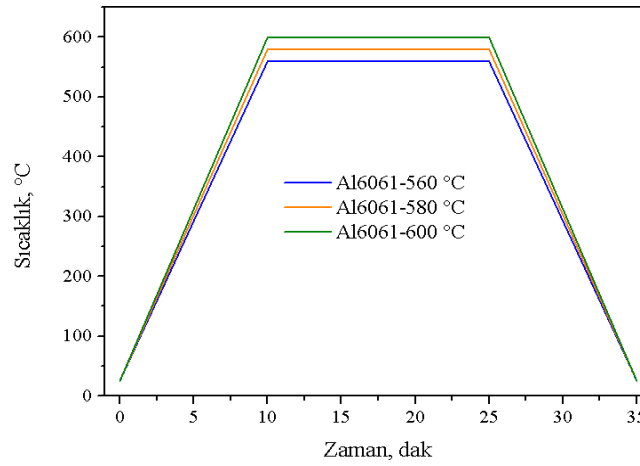
Bu çalışmada kullanılan talaşlar, 200x150x50 mm boyutlarındaki Al6061 alaşımının, basınçlı hava ile 3 eksen CNC kullanarak yüzeyinin işlenmesi ile elde edilmiştir. Deney öncesinde kesilen talaşların biriktiği ortam ve kesici takımın aşınması sonucu gelen mikro partiküllerin sebep olabileceği safsızlıkları gidermek amacıyla ultrasonik alkol banyosunda temizleme uygulanmıştır. Temizleme işlemi sonrası Al6061 talaşına SEM-EDX analizi uygulanmış ve partiküller incelenmiştir. Talaşların SEM görüntüsü ve EDX analizi sonrasında elde edilen kimyasal kompozisyon Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Al6061 talaşının SEM görüntüsü ve kimyasal bileşimi

Al6061 talaşlarının katı hal yeniden kazanımı ve şekillendirilmesi basınç destekli sinterleme yöntemi ile gerçekleşmiştir. Sinterleme prosesinde DIEX VS50 marka sinterleme cihazı kullanılmıştır. Al6061 alaşımı talaşlarının basınç destekli sinterleme işlemi; 10°C/dak hızla ısıtma, 560°C, 580°C ve 600°C’de 15 dakika tutma ve tüm proses süresince 30 MPa basıncının uygulanması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 2’de sinterleme çevrimi verilmiştir. Sinterleme sırasında ortam ile reaksiyonların önlenmesi

amacıyla, tüm üretimler vakum atmosferi (10^{-4} mbar) altında yapılmıştır. Sinterleme sonrasında 20mm çap 5mm yüksekliğinde metal disk numuneler elde edilmiştir. Üretilen numunelerin ilk olarak Arşimet prensibine göre yoğunlukları ölçülmüştür. Yoğunluk ölçümlerinde saf su kullanılmıştır. Arşimet yöntemi ile elde edilen yoğunluk değerleri Al6061 alaşımının teorik yoğunluğuna oranlanarak relatif yoğunlukları hesaplanmıştır. Ardından farklı sıcaklıklarda üretilen numuneler metalografik olarak hazırlanmıştır. Soğuk kalıplanan numuneler sırasıyla 320, 600, 1000 ve 2000 grid zımparalar kullanılarak zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Zımparalama işlemi sonrasında numuneler, sırasıyla 9, 6, 3 ve 1 mikronluk çuhalar kullanılarak elmas pasta solüsyonu ile parlatılmış ve ardından Keller dağlayıcısı (2 ml HF, 3 ml HCl, 5 ml HNO₃ ve 190 ml saf su) ile 15 s dağlanmıştır. Dağlama sonrası mikroyapı incelemesi Olympus marka BX41M-LED model metal mikroskobu kullanılarak yapılmıştır. Parlatılmış durumda numuneler ASTM G99-95 standardına göre ball-on-disc aşınma testine tabi tutulmuştur. Testler TURKYUS marka POD/HT/WT model aşınma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test koşulları olarak 5 N yük, 100 m mesafe, 150 rpm hız parametreleri seçilmiştir. Karşıt malzeme için 6 mm çapında 100Cr6 çelik bilye kullanılmıştır. Aşınma testi sonrasında malzemelerin ağırlık kayıpları AND marka GR-200 model hassas terazi ile belirlenmiştir. Üretilen numunelerin sertlikleri, Future-Tech marka EV-700 model vickers sertlik cihazında, 0,5 kg yük ve 20 s uygulama süresi kullanılarak ölçülmüştür. Sertlik testlerinde numunelerin kesitlerinden 5' er adet ölçüm alınmıştır. Eğme testleri Instron marka 300LXJ model çekme cihazında yapılmıştır.



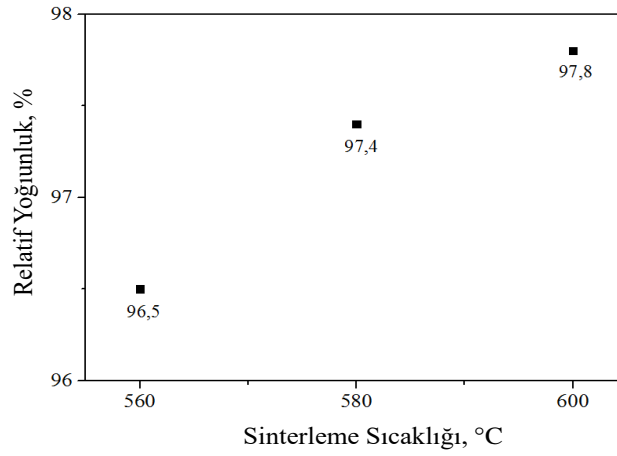
Şekil 2. Sinterleme çevrimi

III. SONUÇLAR

A. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ

Farklı sinterleme sıcaklıkları sonrasında elde edilen yoğunluklar Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde sinterleme sıcaklığının artması ile numunelerde elde edilen yoğunluk değerlerinin arttığı görülmektedir. En yüksek yoğunluk (%97,8) 600°C' de 15 dakika sinterleme ile elde edilirken, en düşük yoğunluk (%96,5) 560°C'de sinterleme sonucu elde edilmiştir. Sinterleme sıcaklığının artması ile atomların difüzyon hızının artması ve buna bağlı olarak basınç altındaki malzeme içerisindeki porozitelerin azalması, yoğunluğun artmasına yol açmıştır. Geleneksel sinterleme rotası izlenerek gerçekleştirilen çalışmalarda istenilen seviyede yoğunluk artışı sağlanamamaktadır. Bu doğrultuda Jha ve ark. yaptıkları çalışmada Al6061 matrisli grafit takviyeli kompozitleri geleneksel sinterleme yöntemiyle üretmiştir. 310 MPa basınç altında sıkıştırılan tozlar tüp fırın içerisinde 615 °C sıcaklıkta 30 dak. sinterlenmiştir. Sinterleme atmosferi olarak vakum, argon ve azot kullanılmıştır. Yoğunluk sonuçları değerlendirildiğinde vakum altında üretilen Al6061 alaşımının yoğunluk değeri %87,4 olarak ölçülmüştür [22]. Diğer yandan Paraskevas ve ark. Al6061 talaşına ağırlıkça %50 oranında gaz atomize Al6061 tozu katarak kıvılcım plazma sinterleme (SPS, Spark Plasma Sintering) yöntemi ile disk şeklinde numuneleri üretip mekanik özelliklerini incelemiştir. Al6061 tozları SPS ile sinterleme esnasında

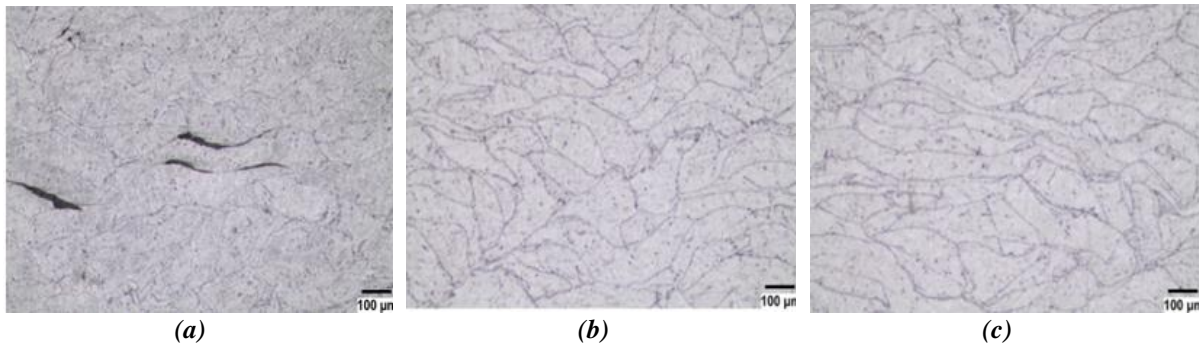
bağlayıcı olarak davranarak neredeyse tam yoğunluk elde edilmesini sağlamıştır [21]. Sharma ve ark. yaptıkları çalışmada döküm yöntemi ile ürettikleri Al6061 alaşımının yoğunluğunu %98,8 olarak tespit etmişlerdir [23]. Konu ile alakalı başka bir çalışma Karakoç ve ark. [24] tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Al6061 alaşımı geleneksel toz metalurjik prosesler ile üretilmiş ardından numunelere sıcak ekstrüzyon uygulanmıştır. 100 µm ortalama partikül boyutuna sahip Al6061 tozları 300 MPa basınç altında preslenmiş ve açık atmosfer ortamında 550°C’de 1 saat sinterlenmiştir. Sinterleme ve ekstrüzyon işlemlerinin öncesinde ve her aşamanın ardından yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işleminin ardından Al6061 alaşımı için %91 relatif yoğunluk değeri ölçülmüştür. Sıcak ekstrüzyon işleminin uygulanmasıyla birlikte relatif yoğunluk değeri %99’a yükselmiştir. Başka bir ifadeyle sinterlenmiş numunelerde görülen %9 gözeneklilik oranı sıcak ekstrüzyon işleminin uygulanmasıyla birlikte %1’e düşürülmüştür. Çalışmamız ile karşılaştırıldığında basınç destekli sinterleme yöntemiyle ulaşılan yoğunluk değerlerine yaklaşılmaları için ikincil işlemlere ihtiyaç duyulduğu tespit edilmiştir. Buradan yola çıkıldığında yapıya katkı maddesi ilave edilmeden yalnızca talaş kullanılarak 600°C’de üretim ile elde edilen %97,8 yoğunluk değeri, basınç destekli sinterleme yönteminin avantajını açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 3. Sinterleme sıcaklığına bağlı olarak elde edilen yoğunluk değerleri

B. MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYON

560, 580 ve 600°C’de 15 dakika sıcak pres ile sinterlenmiş Al6061 numunelerin parlatılmış durumdaki mikroyapı görüntüleri Şekil 4’te verilmiştir. Sinterleme, sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak kontrol edilmektedir. Talaşların temas noktalarında artan sıcaklık ile aktive olmuş atomların hareketliliği sayesinde malzemenin yoğunluğu artmaktadır. Şekil 4a’da 560°C’de atom difüzyonu için gerekli itici gücün yetersiz olması nedeniyle talaşların arasında talaş şekline bağlı olarak uzamış gözenekler görülmektedir.

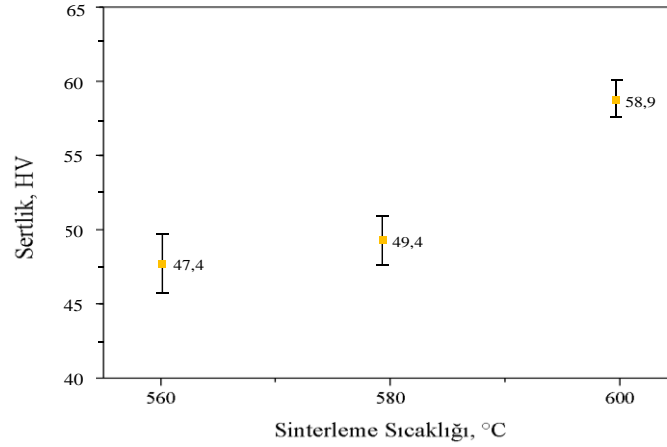


Şekil 4. Farklı sıcaklıklarda sinterlenmiş Al6061 talaşının parlatılmış konumda mikroyapıları (a) 560°C, (b) 580°C, (c) 600°C

Sıcaklığın 560°C'den 600°C'ye çıkarılması ile yapıdaki porozite miktarının minimuma indiği görülmüştür. Baffari ve ark. yaptıkları bir çalışmada 5-10 mm boyutlarındaki plaka şeklindeki AA1050 alüminyum alaşım hurdalarını FSC (Friction Stir Consolidation) yöntemi ile 20 mm çapında silindirik numuneler haline getirmişlerdir [11]. Mikroyapı incelemelerinde sürtünme ile ortaya çıkan sıcaklığın yetersiz olduğu bölgelerde Şekil 5a'daki gibi benzer gözenekler tespit edilmiştir. Yapı içerisindeki bu gözenekler mekanik özellikleri negatif yönde etkilemiştir. Dolayısıyla yoğunluk sonuçları ve mikroyapı görüntülerinin birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Karakoç ve ark. [25] yaptıkları bir çalışmada Al6061 alaşımına geleneksel sinterleme yöntemiyle elde edildikten sonra sıcak ekstrüzyon işlemi uygulanmış ve T6 ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Optik mikroskop ile gerçekleştirilen mikroyapı incelemelerinde partikül sınırlarında Şekil 5b ve 5c'de yer alan görüntülere benzer görüntüler elde edilmiştir. Diğer bir yandan Surya [26] tarafından herhangi bir ek işlem uygulanmadan yalnızca geleneksel toz metalurjik prosesler kullanılarak üretilmiş Al6061 alaşımının optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde yüksek oranda gözeneklilik tespit edilmiştir. Çalışmada 30 µm partikül boyutuna sahip Al6061 tozları 300 MPa basınç altında preslenmiş ve numuneler koruyucu atmosfer altında 530°C'de 1, 2 ve 3 saat sinterlenmiştir. Görüntüler incelendiğinde ancak 3 saat sinterlemenin ardından yapıda yer alan gözenekliliklerin giderilebildiği belirlenmiştir. Bu açıdan değerlendirildiğinde yapıda yer alan gözenekliliklerin çalışmamızda kullanılan basınç destekli sinterleme yöntemi ile 15 dak. sinterleme süresiyle giderilebildiği buna karşın geleneksel yöntemlerle bu işlemin 3 saate kadar çıkabildiği görülmüştür. Gözeneklilik oranının mekanik özellikleri doğrudan etkilediği düşünüldüğünde düşük porozite oranına sahip yapı eldesi için basınç destekli sinterleme yönteminin daha kısa sinterleme süresi ve dolayısıyla daha az enerji maliyeti sağladığı görülmüştür. Mikroyapısal karakterizasyon sonucunda tespit edilen düşük gözeneklilik oranlarının mekanik özelliklere etkisi sonraki bölümlerde yer alan mekanik test incelemelerinde verilmiştir.

C. SERTLİK TESTLERİ

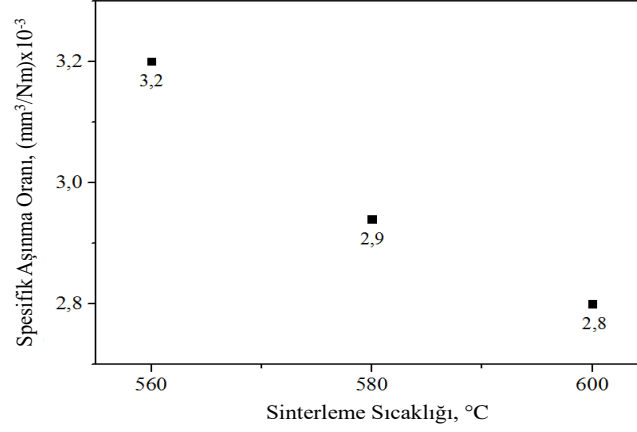
Farklı sıcaklıklarda sinterlenmiş Al6061 talaşının sertlik değerleri Şekil 5'te verilmiştir. Görüldüğü gibi en yüksek sertlik değeri 600°C'de sinterlenen numunede elde edilmiştir. Yoğunluk artışına paralel olarak yapıdaki gözeneklilik oranının düşmesi mekanik özelliklerin gelişmesine yol açmıştır. Bu açıdan değerlendirildiğinde 600 °C'de sinterlenen numunenin en yüksek sertlik değerine (58,9 HV) sahip olması beklenen bir durumdur. Kumar ve ark. Al6061 alaşımını mikrodalga sinterleme yöntemi ile 610°C'de sinterlemişler ve sinterlenen numunelerde sertlik değerinin 60 HV olduğunu belirlemişlerdir [27]. Kumar ve ark. yaptıkları çalışmada hammadde olarak Al6061 tozu kullanılırken bizim çalışmamızda Al6061 talaşı kullanılmıştır. Buna rağmen çalışma sonucu elde edilen sertlik değeri, Kumar ve ark. yaptıkları çalışmada elde edilen sertlik değerine %98 oranında yaklaşmıştır. Bu durum geri dönüştürülen malzemenin birincil üretime kıyasla oldukça yakın sonuçlar verdiğini göstermektedir. Diğer bir yandan Bhaskar Raju ve ark. [28] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada Al6061 alaşımının mekanik özellikleri üzerinde WC'nin etkisi değerlendirilmiştir. Sinterleme işlemi öncesinde numuneler preslenmiş ardından 540°C'de 2 saat kontrollü atmosfer ortamında sinterlenmiştir. Sinterlenen numunelerin sertlik değerleri Brinell sertlik ölçüm yöntemine göre belirlenmiştir. Çalışmada takviye elemanı içermeyen Al6061 alaşımının sertlik değeri 41 BHN olarak ölçülmüştür. Al6061 alaşımının geleneksel sinterleme ile üretildiği bir başka çalışmada ikincil işlem olarak yaşlandırma uygulanmış ve yaşlandırma sonrasında sertlik 43 BHN değerine yükselmiştir [29]. Dolayısıyla Al6061 talaşının geri dönüştürüldüğü çalışmamızda sinterleme işlemi sonucunda literatürde yer alan çalışmalara kıyasla daha yüksek sertlik sonuçlarının da elde edildiği görülmüştür.



Şekil 5. Sinterleme sıcaklığına bağlı olarak sertlik değişimi

D. AŞINMA TESTLERİ

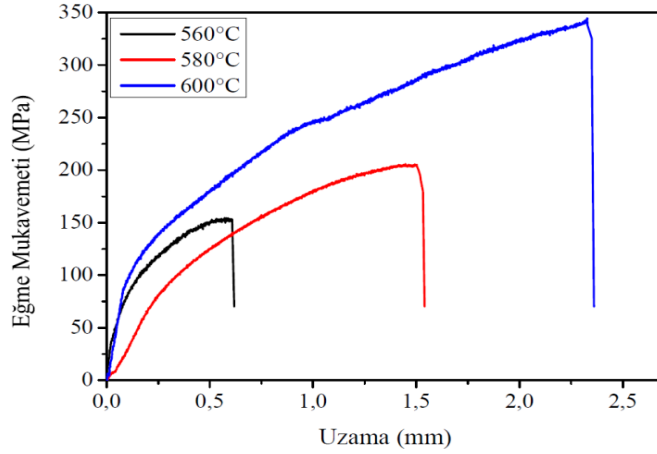
Sinterleme sıcaklığına bağlı olarak elde edilen numunelerin spesifik aşınma oranlarının değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Sertlik ile aşınma direnci arasında genellikle doğru orantılı bir ilişki vardır. Elde edilen sertlik sonuçlarının artması aşınma direncinin yükselmesine yol açmıştır. Bu doğrultuda en düşük spesifik aşınma oranı $2,80 \text{ (mm}^3/\text{Nm)} \times 10^{-3}$ ile 600 °C'de 15 dak. sinterleme sonrasında elde edilmiştir. 560 ve 580 °C'de sinterlenen numunelerin aşınma oranlarına kıyasla sırasıyla %14 ve %3 oranında iyileşme görülmüştür. Sinterleme sıcaklığının artması atomların difüzyon hızını artırarak talaşlar arasındaki metalürjik bağlanmanın artmasına ve yapı içerisindeki porozite miktarının düşmesine yol açmıştır. Sıcaklığın artması ile yoğunluğun arttığı Şekil 3'te verilen yoğunluk grafiğinden de görülmektedir. Dolayısıyla 600°C'de elde edilen numunedeki porozite miktarı minimum seviyededir. Porozite miktarının daha düşük olması malzemenin mekanik özelliklerinin iyileşmesine yol açmıştır. Bu durum yük altında yapılan aşınma testinde daha düşük sıcaklıklarda sinterlenen numunelere göre daha düşük aşınma değerinin elde edilmesiyle sonuçlanmıştır. Yu ve ark. Al6061 alaşımına farklı oranlarda yüksek basınç infiltrasyon yöntemi ile SiC ilave etmişler ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. 25°C'de 10 N yük altında çelik bilyaya karşı yaptıkları pin-on-disk aşınma testinde takviyesiz Al6061 alaşımının spesifik aşınma oranını $6 \text{ (mm}^3/\text{Nm)} \times 10^{-3}$ olarak bulmuşlardır [30]. Basınç destekli sinterleme yöntemi ile şekillendirilen Al6061 talaşının spesifik aşınma oranının %50 oranında daha düşük çıktığı görülmüştür. Destekleyici nitelikli başka bir çalışma Al-Qutub ve ark. [31] tarafından gerçekleştirilmiştir. Hacimce %0-30 arasında değişen oranlarda mikron altı boyutlarda Al₂O₃ partikülleri içeren Al6061 alaşımı pin-on-disk tipi kuru aşınma testine tabi tutulmuştur. Aşınma testi 0,5-40N aralığında değişen yükler altında gerçekleştirilmiş olup karşıt yüzey olarak 12,5 cm çaplı AISI 4140 çeliği kullanılmıştır. 1 km kayma mesafesinde gerçekleştirilen testte dönme hızı 1 m/s olarak ayarlanmıştır. Çalışmamızla benzer şekilde 5N altında gerçekleştirilen test sonuçları incelendiğinde takviyesiz Al6061 alaşımının aşınma oranı yaklaşık $4 \text{ (mm}^3/\text{Nm)} \times 10^{-3}$ olarak ölçülmüştür. Geleneksel sinterleme yönteminin kullanıldığı bu çalışmada tozlar 200 MPa altında tek eksenli olarak preslendikten sonra 550 °C'de sinterlenmiştir. Konu ile ilgili diğer bir çalışma Partheeban ve ark. [32] tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Al6061 alaşımının aşınma davranışı üzerine TiB₂ ve grafitin etkisi araştırılmıştır. Sinterleme öncesinde tüm numuneler 1.2 GPa basınç altında sıkıştırılmış ardından argon atmosferi altında 550°C'de 1 saat sinterlenmiştir. Referans numunesi olan takviyesiz Al6061 alaşımına 5N yük, 500 rpm devir hızı ve 1000m kayma mesafesi parametrelerinde pin-on-disk tipi kuru sürtünme aşınması testi uygulanmıştır. Test sonuçları incelendiğinde Al6061 alaşımının spesifik aşınma oranı $\sim 4.2 \text{ (mm}^3/\text{Nm)} \times 10^{-3}$ olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla üretim yönteminin getirdiği bu avantaj sayesinde bir geri dönüşüm malzemesinde, hammadde olarak toz kullanılan Al6061 alaşımına göre daha iyi aşınma direnci elde edilmiştir.



Şekil 6. Sinterleme sıcaklığına bağlı olarak spesifik aşınma oranlarının değişimi

E. EĞME TESTLERİ

560, 580 ve 600°C’de sinterlenen Al6061 talaşlarından elde edilen numuneler eğme testine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar Şekil 7’de verilmiştir. Sinterleme sıcaklığının artması ile numunelerin eğme mukavemetleri ve % uzama değerlerinde artış meydana gelmiştir. En yüksek eğme mukavemeti 600°C’de sinterleme sonucu 348 MPa olarak elde edilmiştir. En düşük mukavemet ve uzama değerleri ise 560°C’de sinterlenen numunede ölçülmüştür. Bu durum sinterleme sıcaklığının artırılması ile numunelerdeki yoğunluğun artması ile ilişkilidir. Şekil 3’ten de görülebileceği gibi en yüksek yoğunluk 600°C’de sinterlenen numunede %97,8 olarak elde edilmiştir. Yapı içerisindeki poroziteler eğme sırasında yükün uygulandığı noktada çentik etkisi yaparak gerilme konsantrasyonunun burada toplanmasına ve malzemenin daha düşük uzama altında bu bölgeden kırılmasına neden olmaktadır. En yüksek yoğunluktaki numunede en yüksek eğme mukavemetinin elde edilmesi beklenen bir sonuçtur. Khan ve ark. [33] yaptıkları bir çalışmada grafen ilavesinin T6 yapay yaşlandırma işlemi uygulanmış ve herhangi bir ısıl işlem uygulanmamış Al6061 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Üretim yöntemi olarak toz metalurjik proseslerin kullanıldığı çalışmada tüm numuneler 300 MPa basınç altında preslenmiş ve argon atmosferi altında 630°C’de 2 saat sinterlenmiştir. Mekanik özelliklerin değerlendirilmesi amacıyla üç noktalı eğme testi uygulanan çalışmada T6 yapay yaşlandırma işlemine tabi tutulmuş ve ısıl işlem uygulanmamış Al6061 alaşımının sonuçları grafen ilaveli numuneler ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde referans numunesi olan Al6061 alaşımının eğme mukavemeti 150±15 olarak ölçülmüştür. Diğer yandan T6 ısıl işlemi uygulanan Al6061 alaşımının eğme mukavemeti 220±10 olarak belirtilmiştir. Başka bir çalışmada Sharma ve ark. Al6061 alaşımını döküm yöntemi ile üretmişlerdir. Üretilen numunelere uyguladıkları 3 nokta eğme testinde eğme mukavemeti 340 MPa olarak ölçülmüştür [23]. Al6061 alaşımının eğme mukavemetinin değerlendirildiği diğer bir çalışma Chu ve ark. tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında 6061 ve 2024 alüminyum alaşımlarının eğme mukavemeti ve kırılma davranışına hacimce %30 SiC fiber takviyesinin etkisi araştırılmıştır. Üretim yöntemi olarak sıcak izostatik preslemenin kullanıldığı çalışmada numuneler 120 MPa basınç altında 580 °C’de sinterlenmiştir. Eğme sonuçları incelendiğinde Al6061 alaşımının 369 MPa eğme mukavemetine sahip olduğu görülmüştür [34]. Sıcak izostatik presleme yönteminin sıcak pres yöntemine kıyasla tozlara her yönden eşit basınç uygulaması sebebiyle daha yüksek yoğunluk ve mekanik özellikler sağladığı bilinmektedir [6]. Çalışma doğrultusunda kullanılan talaşların sıcak pres yöntemiyle üretilmesine rağmen sıcak izostatik presleme ile üretilen numunelere yakın eğme sonuçları elde edilmiştir. Dolayısıyla Al6061 alaşım talaşının sıcak pres ile sinterlenmesi ile ürettiğimiz numunelerde elde ettiğimiz eğme mukavemetinin sıcak izostatik pres gibi daha üstün yöntemler ile saf alaşımdan üretilen malzemeye yakın değerler elde edilmesi kullandığımız yöntemin başarısını açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 8. Sinterleme sıcaklığına bağlı olarak eğme test sonuçları

IV. SONUC

Bu çalışmada Al6061 talaşlarının sıcak pres yöntemi ile geri dönüşümleri sağlanmıştır. Metal tozlarının sinterlenmesinde üretilen parçanın yoğunluğuna etki eden en önemli parametre sinterleme sıcaklığı ve süresidir. Bu doğrultuda Al6061 talaşları sıcak pres ile farklı sıcaklıklarda sinterlenmiştir. Sinterleme sıcaklığının artışına bağlı olarak numunelerin yoğunluklarında artış meydana gelmiştir. Bu doğrultuda 600°C’de sinterlenen numunede %97,8 relatif yoğunluğa ulaşılmıştır. Yoğunluk artışı malzemenin mekanik performansında gelişmeye yol açmıştır. Farklı sıcaklıklarda 15 dakika sinterlenmiş numunelerin arakesitinden alınan dağlanmış mikroyapı görüntüleri incelendiğinde özellikle 560°C’de üretilen numunede yetersiz difüzyon nedeniyle talaşların arasında yeterli miktarda bağlanma olmadığı görülmüştür. Sıcaklığın 560°C’den 580°C’ye çıkarılması yapı içerisindeki porozite miktarının azalmasına yol açmıştır. Sıcaklığın 600°C’ye çıkarılması ise yapıdaki porozite miktarını minimuma indirmiştir. Porozite miktarının minimuma inmesi mekanik özelliklerin gelişmesiyle sonuçlanmıştır. En yüksek mekanik özellikler 600°C’de sinterleme ile elde edilmiştir. 600°C’de sinterleme sonrası 348 MPa eğme mukavemeti, 58,9 HV sertlik ve $2,8 \text{ (mm}^3/\text{Nm)} \times 10^{-3}$ spesifik aşınma değerleri elde edilmiştir. Sonuç olarak sıcak pres sinterleme yöntemi ile herhangi bir bağlayıcı metal tozu eklenmeden Al6061 talaşları yüksek yoğunlukta ve mekanik özelliklerde geri kazanılmıştır. Bu açıdan sıcak pres, talaş bileşimine bağlı olarak doğru sinterleme sıcaklığı ve süresinin seçilmesi ile metal talaşlarından, parça üretimini mümkün kılmaktadır. Üretilen numunelere uygulanan test sonuçlarının literatür çalışmalarında farklı üretim yöntemleri ile üretilen Al6061 alaşımı test sonuçlarına yakın olması, yöntemin başarısını ve uygulanabilirliğini desteklemektedir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.

VI. KAYNAKLAR

- [1] M. W. A. Rashid, F.F. Yacob, M.A. Lajis, M. Asyadi, A. M. Abid, E. Mohamad, and T. Ito, “A review: The potential of powder metallurgy in recycling aluminum chips (Al 6061 & Al 7075),” *The Proceedings of Design & Systems Conference*, no. 14-27, pp. 2301-2308, 2014.
- [2] L. Rojas-Díaz, L. E. Verano-Jiménez, E. Muñoz-García, J. Esguerra-Arce, and A. Esguerra-Arce, “Production and characterization of aluminum powder derived from mechanical saw chip sand its processing through powder metallurgy,” *Powder Technology*, vol. 360, pp. 301-311, 2020.

- [3] Global Recycling. (2021, January 14). *The Global Metal Recycling Market 2020* [Online]. Available: <https://global-recycling.info/archives/4094>.
- [4] A. Selmy, M. I. Abd El Aal, A. M. El-Gohry, and M. A. Taha, "Solid-state recycling of aluminum alloy (AA-6061) chips via hot extrusion followed by equal channel angular pressing (ECAP)," *The Egyptian International Journal of Engineering Sciences and Technology*, vol. 21, pp. 33-42, 2016.
- [5] R. Yamanoglu, "In situ aluminum alloy coating on magnesium by hot pressing," *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, vol. 28, no. 8, pp. 1059-1064, 2015.
- [6] E. Karakulak, R. Yamanoglu, U. Erten, A. Zeren, S. Zor and M. Zeren, "Investigation of corrosion and mechanical properties of Al-Cu-SiC-xNi composite alloys," *Materials & Design*, vol. 59, pp. 33-37, 2014.
- [7] S. M. A. Rahim, M.A. Lajis and S. Arafin, "A review on recycling aluminum chips by hot extrusion process," *Procedia CIRP*, vol. 26, pp. 761-766, 2015.
- [8] M. A. Lajis, S.S. Khamis, and N. K. Yusuf, "Optimization of hot press forging parameters in direct recycling of aluminium chip (AA 6061)," *Key Engineering Materials*, vol. 622-623, pp. 223-230, 2014.
- [9] S. Shamsudin, M. A. Lajis, and Z. W. Zhong, "Evolutionary in solid state recycling techniques of aluminium: a review," *Procedia CIRP*, vol. 40, pp. 256-261, 2016.
- [10] J. R. Dufloy, A. E. Tekkaya, M. Haase, T. Welo, K. Vanmeensel, K. Kellens, W. Dewulf and D. Paraskevas, "Environmental assessment of solid state recycling routes for aluminium alloys: can solid state processes significantly reduce the environmental impact of aluminium recycling?," *CIRP Annuals-Manufacturing Technology*, vol. 64, no. 1, pp. 37-40, 2015.
- [11] D. Baffari, G. Buffa, G. Ingarao, A. Masnata, and Fratini L., "Aluminium sheet metal scrap recycling through friction consolidation," *Procedia Manufacturing*, vol. 29, pp. 560-566, 2019.
- [12] F. Khoshnaw, R. Yamanoglu, U. G. Basci and O. Muratal, "Pressure assisted bonding process of stainless steel on titanium alloy using powder metallurgy," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 259, pp. 1-8, 2021.
- [13] R. Yamanoglu, "Pressureless spark plasma sintering: A perspective from conventional sintering to accelerated sintering without pressure," *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, vol. 57, no. 9-10, pp. 513-525, 2019.
- [14] H. H. Bakır, E. Karakulak, R. Yamanoglu ve M. Zeren "Sıcak preslenmiş Ti6Al4V alaşımı tozlarının mikroyapısal karakterizasyonu ve aşınma özellikleri," *Metal Dünyası Dergisi*, ss. 70-72, 2011.
- [15] R. Yamanoglu, I. Daoud and, E.A. Olevsky, "Spark plasma sintering versus hot pressing-densification, bending strength, microstructure, and tribological properties of Ti5Al2.5Fe alloys," *Powder Metallurgy*, vol. 61, no. 2, pp. 178-186, 2018.
- [16] Ö. Özgün, K. Aslantas, A. Ercetin, "Powder metallurgy Mg-Sn alloys: production and characterization," *Science Iranica*, vol. 27, no. 3, pp. 1255-1265, 2020.
- [17] Z. Doni, A.C. Alves, F. Toptan, J.R. Gomes, A. Ramalho, M. Buciumeanu, L. Palaghian, and F. S. Silva, "Dry sliding and tribocorrosion behaviour of hot pressed CoCrMo biomedical alloy as compared with the cast CoCrMo and Ti6Al4V alloys," *Materials and Design*, vol. 52, pp. 47-57, 2013.

- [18] A. Ercetin, "Application of the hot press method to produce new Mg alloys: characterization, mechanical properties, and effect of Al addition," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 30, no. 6, pp. 4254-4262, 2021.
- [19] M. Pul, "Alüminyum 7075 matrisli kompozitlerde SiC, B₄C ve TiB₂ takviye elemanlarının mekanik özelliklere etkilerinin karşılaştırılması," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 7, ss. 180-193, 2019.
- [20] D. Paraskevas, K. Vanmeensel, J. Vleugels, W. Dewulf, and J.R. Dufloy, "The use of spark plasma sintering to fabricate a two-phase material from blended aluminium alloy scrap and gas atomized powder," *Procedia CIRP*, vol. 26, pp. 455-460, 2015.
- [21] A. Ercetin, Ö. Özgün, and K. Aslantas, "Investigation of mechanical properties of Mg₅Sn-xZn alloys produced through new method in powder metallurgy," *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 49, no. 5, pp. 3506-3518, 2021.
- [22] A. Jha, S. V. Prasad, and G. S. Upadhyaya, "Preparation and properties of 6061 aluminum alloys/graphite composites by PM route," *Powder Metallurgy*, vol. 32, no. 4, pp. 309-312, 1989.
- [23] V. K. Sharma, V. Kumar and R. S. Joshi, "Investigation of rare earth particulate on tribological and mechanical properties of Al-6061 alloy composites for aerospace application," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 3504-3516, 2019.
- [24] H. Karakoç, Ş. Karabulut, and R. Çıtak, "Study on mechanical and ballistic performances of boron carbide reinforced Al6061 aluminum alloy produced by powder metallurgy," *Composites Part B: Engineering*, vol. 148, pp. 68-80, 2018.
- [25] H. Karakoç, İ. Ovalı, S. Dünder, and R. Çıtak, "Wear and mechanical properties of Al6061/SiC/B₄C hybrid composites produced with powder metallurgy," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 6, pp. 5348-5361, 2019.
- [26] M. S. Surya, "Effect of SiC weight percentage and sintering duration on microstructural and mechanical behaviour of Al6061/SiC composites produced by powder metallurgy technique," *Silicon*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01053-z>.
- [27] H. P. Kumar, and M. A. Xavier, "Effect of graphene addition on flexural properties of al 6061 nano composites," *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 8, pp. 8127-8133, 2017.
- [28] S. A. Bhaskar Raju, A. R. K. Swamy, A. Ramesha, "Mechanical characterization of Al6061-tungsten carbide composites using powder metallurgy technique," *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, vol. 4, no.7, pp. 325-331, 2019.
- [29] S. Pournaderi, and F. Akhlaghi, "Wear behaviour of Al6061-Al₂O₃ composites produced by in-situ powder metallurgy," *Powder Technology*, vol. 313, pp. 184-190, 2017.
- [30] S. Y. Yu, H. Ishii, K. Tohgo, Y. T. Cho and D. Diao, "Temperature dependence of sliding wear behavior in SiC whisker or SiC particulate reinforced 6061 aluminum alloy composite," *Wear*, vol. 213, no. 1-2, pp. 21-28, 1997.
- [31] A. M. Al-Qutub, I. M. Allam, and T. W. Qureshi, "Effect of sub-micron Al₂O₃ concentration on dry wear properties of 6061 aluminum based composite," *Journal of Material Processing Technology*, vol. 172, no. 3, pp. 327-331, 2006.

- [32] C. M. A. Partheeban, M. Rajendran, S. C. Vettivel, S. Suresh, and J. B. Raj, "Wear behaviour of nano graphite reinforced Al6061-10TiB₂ hybrid composite using powder metallurgy," *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 10, no. 2, pp. 2761-2770, 2015.
- [33] M. Khan, R. U. Din, A. Wadood, W. H. Syed, S. Akhtar, R. E. Aune, "Effect of graphene nanoplatelets on the physical and mechanical properties of Al6061 in fabricated and T6 thermal conditions," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 790, pp. 1076-1091, 2019.
- [34] D. Chu, Y. Ma, and T. Penjun, "Bending properties and failure mechanism of continuous W-core-SiC fiber-reinforced 2024 and 6061 aluminum matrix composites," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 29, no. 10, pp. 6295-6306, 2020.