



TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN AA6061 ALAŞIMINDA İŞLEM KONTROL KATKISI VE SICAK/SOĞUK PRESLEMENİN KARŞILAŞTIRMALI ETKİSİ

COMPARATIVE EFFECTS OF PROCESS CONTROL AGENT AND HOT/COLD
PRESSING ON AA6061 ALLOY PRODUCED BY POWDER METALLURGY

Salih Bilal ÇETİNKAL¹

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1759832>

Sorumlu Yazar
(Corresponding Author)
bilal.cetinkal@selcuk.edu.tr

Geliş Tarihi
(Received)
06.08.2025

Revizyon Tarihi
(Revised)
25.11.2025

Kabul Tarihi
(Accepted)
25.11.2025

Öz

Bu çalışmada, bilyalı öğütme işlemi ile öğütülen AA6061 alaşım tozlarının mikroyapı ve mekanik özelliklerine işlem kontrol katkısının ve üretim prosesinin (sıcak ve soğuk pres) etkisi incelenmiştir. Üretilen tozlar soğuk pres (650MPa basınç sonrasında 650 oC sinterleme) ve sıcak pres (600 oC sıcaklık altında 100 Mpa basınç) yöntemleriyle disk numuneler elde edilmiştir. Üretilen tozların mikroyapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile numunelerin mikroyapıları ise optik mikroskop ile incelenmiştir. Hem İKK'nın etkisinin hem de üretim prosesinin mekanik özellikler üzerine etkisini incelemek için yoğunluk ve Brinell sertlik ölçümleri kullanılmıştır. İKK 'nın toz boyutunu azalttığı görünürken, İKK'lı sıcak pres ile üretilen numunenin yoğunluk ve sertlik değerlerinin yükselttiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: AA6061, bilyalı öğütme, sıcak pres, soğuk pres, İKK.

Abstract

In this study, the effects of process control agent (PCA) addition and production method (hot and cold pressing) on the microstructural and mechanical properties of AA6061 alloy powders processed via ball milling were investigated. Disc-shaped samples were produced by cold pressing (650 MPa followed by sintering at 650 °C) and hot pressing (under 100 MPa pressure at 600 °C) of the milled powders. The morphology of the powders was examined using scanning electron microscopy (SEM), while the microstructure of the samples was characterized by optical microscopy. To evaluate the influence of both the PCA and the processing method on mechanical performance, density and Brinell hardness measurements were conducted. The use of PCA was found to reduce particle size, and the sample produced by hot pressing with PCA exhibited increased density and hardness values.

Keywords: AA6061, ball milling, hot press, cold press, PCA

¹ Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, Türkiye.
bilal.cetinkal@selcuk.edu.tr

1. GİRİŞ

Alüminyum esaslı alaşımlardan AA6061 alaşımı, sahip oldukları düşük yoğunluk, yüksek özgül mukavemet ve iyi yorulma direnci gibi üstün özelliklerinden dolayı havacılık, otomotiv ve savunma sanayi gibi birçok endüstriyel alanda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu alaşım, özellikle çökeltme sertleşmesine uygunluğu sayesinde, yapısal uygulamalarda önemli bir malzeme konumundadır.

Son yıllarda, bu tür alaşımların mekanik ve mikroyapısal özelliklerini iyileştirmek amacıyla toz metalurjisi (TM) yöntemleri, özellikle de Bilyalı öğütme (BÖ), önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Mekanik alaşımlama; yüksek enerjili bilyalı öğütme sırasında tozların tekrarlı olarak parçalanması, soğuk kaynaklanması ve yeniden parçalanması süreçlerini içeren bir üretim yöntemidir (Lu ve Zhang, 1999; Shaw ve ark., 2003; Sübütay ve Şavklıyıldız, 2023). BÖ sayesinde homojen yapıların elde edilmesi ve tane incilmesi sağlanabilmektedir (Hall, 1951; Meyersm ve Ashworth, 1982). Ancak, alüminyum gibi sünek yapıya sahip malzemelerin öğütülmesi sırasında ortaya çıkan en önemli problemlerden biri, tozların aşırı soğuk kaynaklanmaya eğilimli olmasıdır. Bu durum, tozların topaklanmasına, bilyelerin veya haznenin yüzeylerine yapışmasına neden olduğu bildirilmiştir. Birçok araştırmacı bu sorunun önüne geçmek amacıyla, öğütme işlemi sırasında işlem kontrol katkısı (İKK) kullanılmaktadır (Benjamin ve Bomford, 1977; Singer ve ark., 1980; Gilman ve Nix, 1981; Eckert ve ark., 1992; Srinivasan ve ark., 1992; Lü ve Lai, 2013). İKK'lar, tozlar arasındaki reaksiyonu etkileyerek daha düzgün bir morfolojinin elde edilmesini sağlar. Öğütme sırasında eklenen İKK, toz yüzeylerini kaplar. Böylece işlemi esnasında oluşacak olan kaynağı yavaşlatır ve daha ince toz boyutu sağlar ve ayrıca tozların hazneye yapışmasını azaltır (Benjamin ve Bomford, 1977; Zhang ve ark., 1999; Pradeep ve ark., 2024).

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde BÖ sırasında, etanol (Aksenova ve ark., 2025), stearik asit (Çetinkal ve ark., 2025), palmitik asit (Topping ve ark., 2012), metanol (Doğan ve ark., 2022), izopropano (Aksenova ve ark., 2025), polivinil alkol (Kaykılarlı ve ark., 2024), C wax (Dematte ve ark., 2023), hekzan (Çetinkal ve Acarer, 2024), tolüen (Chabri ve ark., 2013) ve etilen bis-stearamid (Nouri ve ark., 2010) gibi İKK'lar kullanılmaktadır. İKK genellikle mütevazı miktarlarda (%0,5-3 ağırlıkça) eklenir. Çünkü İKK kullanımının karışıma ve nihai alaşıma istenmeyen elementler sokması mümkündür. İKK'nın, BÖ sırasında daha düşük yüzey serbest enerjisine sahip toz parçacıkları üzerinde Karbon, Oksijen ve Hidrojen'in varlığı nedeniyle karbür oluşumuna katkıda bulunduğu bildirilmiştir (Chabri ve ark., 2013; Zadra, 2013; Munir ve ark., 2016).

Adamek (2014), BÖ işleminde farklı İKK'lar (etanol, metanol ve izopropanol) öğütme işlemi yaptılar. En düşük gözeneklilik ve en yüksek sertlik sonuçlarına İKK olarak etanol kullandıklarında ulaştılar. Machio ve ark. (2011), Ti-Mg tozuna BÖ kullanılan İKK miktarının toz verimi ve parçacık boyutu üzerindeki etkisini inceledi. Artan stearik asit(SA) ile toz akışkanlığında önemli bir artış görüldü. Ancak, SA miktarının artışı ile toz boyutu azalırken belirli bir noktadan sonra boyutta artış görülmüştür. Munir ve ark. (2016), TM yoluyla İKK'lı ve İKK'sız olarak toz üretimi yaptılar. İKK olarak kullanılan SA sayesinde daha küçük toz boyutu ve yüksek toz akışkanlığı elde edildi. Doğan ve ark. (2022) alüminyuma BÖ yoluyla CNT takviyesi yaptılar. İKK olarak

kullanılan metanol sayesinde, tozları önce pulsu hale getirip, sonra parçalayarak toz boyutunun azaldığını ispatlamışlardır.

Toz metalurjisinde, tozlardan üretilecek olan malzemeler için form verme işlemi pres ile gerçekleşmektedir. Presleme prosesinde soğuk pres veya sıcak pres yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir (Xiao ve ark., 2015; Angelo ve ark., 2022). Moustafa ve ark. (2011) sıcak pres, soğuk pres ve sıcak dövme üretim yöntemleri üzerine yaptıkları çalışmada, sıcak pres yönteminin soğuk prese göre daha yüksek yoğunluk ve mukavemete sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Nassef ve ark. (2017) çalışmasında farklı Fe takviye oranlarına sahip Al matrisli soğuk ve sıcak pres yöntemi metal matrisli kompozit üretmişlerdir. Soğuk pres sonrası sinterleme esnasında yüzeyde çatlamlar meydana geldiğini bildirmişlerdir. Yıldız ve ark. (2018) çalışmasından sinterleme basıncını 30MPa ve sinterleme süresini 12dk olarak sabit tutarak farklı sinterleme sıcaklıkları denemiş ve yapılan analizler sonucunda, sinterleme sıcaklığının taneler ve mikroyapı üzerinde etkili olduğunu gözlemlemiştir.

Bu çalışmada, saf AA6061 tozuna İKK'lı ve İKK'sız olacak şekilde bilyalı öğütme işlemi uygulanmıştır. Öğütülen tozlardan iki farklı üretim yöntemiyle (sıcak pres ve soğuk pres) disk numune üretilmiştir. Hem İKK'nın hem de üretim yönteminin mikroyapı ve mekanik özelliklere (sertlik, yoğunluk) etkisi incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada Dome Metals tarafından su atomizasyonu ile üretilen saf AA6061 tozunun kimyasal ve fiziksel özellikleri sırasıyla tablo 1 ve tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. AA6061 Kimyasal Kompozisyonu

	Al	Si	Mg	Fe	Cu	Cr
AA6061	Kalan	0,85	1,1	0,7	0,2-0,4	0,1-0,35

Tablo 2. AA6061 Tozunun Fiziksel Özellikleri

	Özellikleri
Menşei	Çin
Toz şekli	Düzensiz
Toz boyutu	<250 µm
Safılık (%)	99
Yoğunluk (g/cm ³)	2,8

Öğütme işlemi, çift hazneli gezegensel tip bir bilyalı değirmen ile gerçekleştirilmiştir. Bilyalı öğütmede tozların morfolojisi ve fiziksel özellikleri etkileyen birçok parametre (Öğütme süresi ve hızı, bilye toz oranı, İKK öğütme şekli vb.) vardır (Shashanka ve Chaira, 2015; Adaan-Nyia ve ark., 2023; Tunc ve ark., 2024). Çalışmada İKK takviyesinin etkisi ön planda olduğu için diğer tüm parametreler sabit tutulmuştur. Her bir hazne ve 10mm çapındaki bilyeler tungsten karbür (WC) malzemeden üretilmiştir. AA6061 tozu, WC hazne içerisinde 10 gr olacak şekilde tartılıp konulmuştur. Haznelerden bir tanesine İKK olarak ağ. %5 metanol ilave edilmiştir (Tablo 3). Her

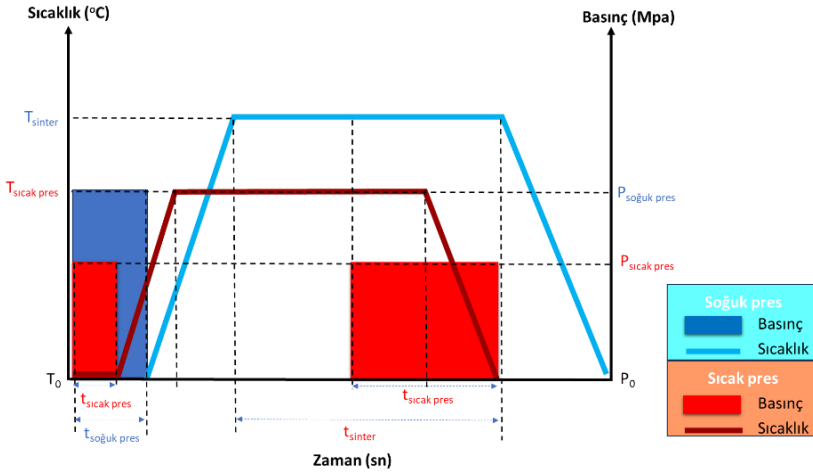
hazne içerisinde bilye/toz oranı 10:1 olacak şekilde WC bilye konularak 350 rpm de 2 saat öğütme işlemi uygulanmıştır. Öğütme esnasında oluşabilecek aşırı ısınmayı minimize ederek tozların yapısal kararlılığını korumak için, 5 dk. çalışma 5 dk. dinlenme döngüsüyle öğütme işlemi yapılmıştır.

Tablo 3. Metanol Fiziksel Özellikleri

Özellikleri	
Molekül formülü	CH ₃ OH veya CH ₄ O
Yoğunluk	0,792 g/cm ³
Form	Sıvı
Kaynama noktası	64,7 °C

2.2. Mekanik Alaşımlama Süreci

Bilyalı öğütme sonrasında elde edilen tozlara iki farklı (sıcak pres ve soğuk pres) yöntemle form verilmiştir. Soğuk pres işleminde, tozlar 15 mm çapındaki çelik kalıplarda, 650 MPa sabit basınç altında disk şeklinde form verilmiştir. Bu işlem sonrası elde edilen yeşil numuneler, 650 °C sıcaklıkta ve argon atmosferinde 2 saat süreyle sinterlenmiştir. Sinterleme sıcaklığı ve atmosferi, tozlar arası difüzyonu artırmak ve oksidasyonu önlemek amacıyla optimize edilmiştir.



Şekil 1. Sıcak Pres ve Soğuk Pres İşlemlerinin Sıcaklık Zaman Grafiği

Sıcak presleme yönteminde ise bilyalı öğütülmüş tozlara öncelikle 100 MPa basınç ile sıkıştırılarak ön şekillendirme işlemi ile form verilmiştir. Disk şeklindeki numune kalıp içerisinde hiç çıkarılmadan kalıp ile birlikte 600 °C sıcaklığa ısıtılmıştır. 600 °C sıcaklıkta 20 dk. boyunca kalıp içerisinde bekletilmiştir. Sonra 600 °C sıcaklıkta tekrar 100 MPa basınç 5 dk boyunca uygulanmıştır. Parça soğuduktan sonra kalıp içerisinde çıkarılmıştır. Sıcak pres işleminde, sinterleme ve presleme süreçleri aynı anda gerçekleştirilmektedir. Üretilen numunelerin kodlamaları tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Numunelerin Kodlama Sistemi

Form	Kodlama	İKK	Üretim şekli
Toz	M0	-	Bilyalı öğütme
	M5	%5 metanol	
Disk	HM0	-	Sıcak pres
	HM5	%5 metanol	
	CM0	-	Soğuk pres
	CM5	%5 metanol	

2.4. Numune Yüzey Hazırlığı

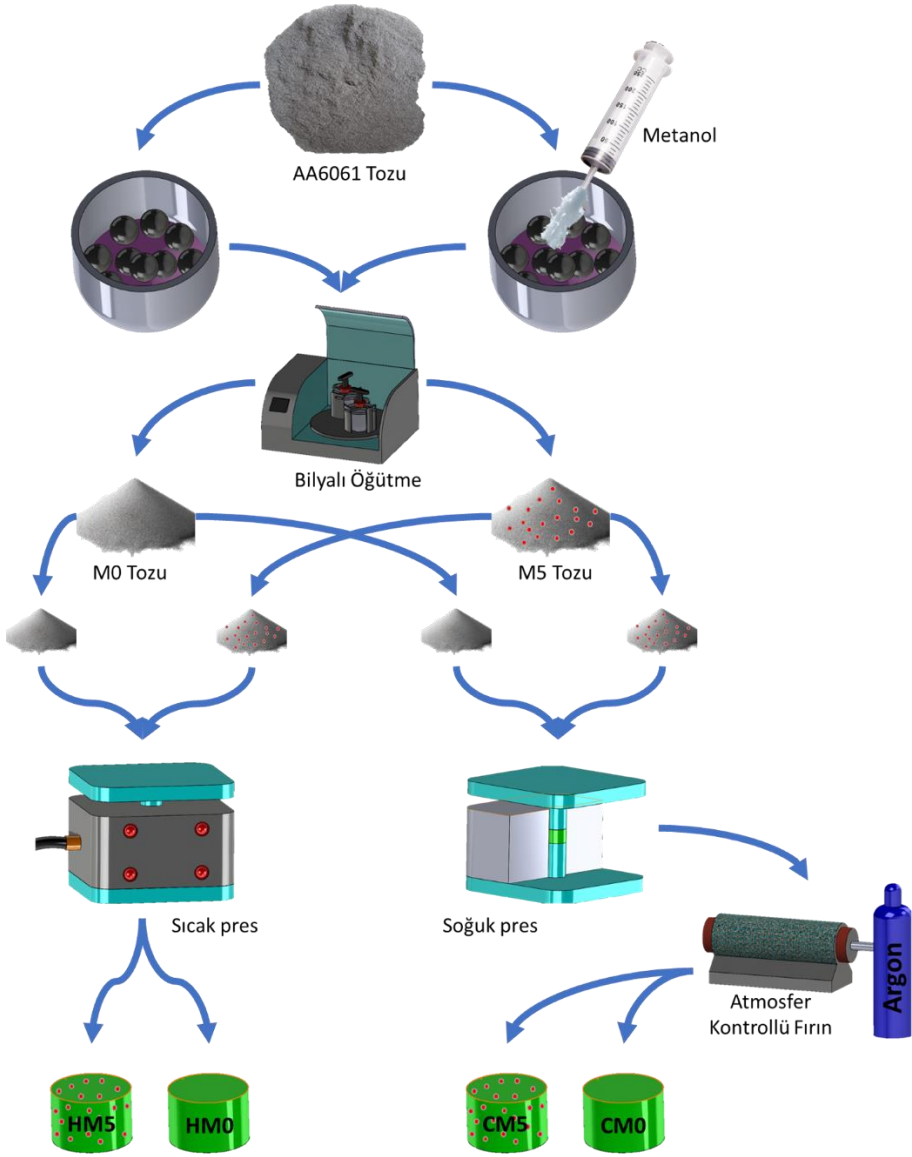
Numunelerin mikroyapı karakterizasyonu öncesinde standart metalografik hazırlık süreci uygulanmıştır. Sıcak presle üretilen numuneler (HM0 ve HM5) yüzey kaliteleri iyi oldukları için zımparalama işlemi 800 grid zımparadan başlarken, soğuk pres ile üretilen numunelerin ki (CM0 ve CM5) 320 grid zımparadan başlamıştır. Tüm numuneler 2000 grid zımparaya kadar zımparalanmıştır. Zımparalama işlemi sonrası tüm numuneler önce 3µm sonra 1 µm alümina süspansiyon ile parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Mikroyapıyı görebilmek için numuneler parlatma işlemi sonrası Modifiye Keller reaktifi ile dağlanmıştır.

Mikroyapı Analizi

Mikroyapı analizleri, Nikon Eclipse MA100 optik mikroskop ile gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri Brinell sertlik metoduna (62,5 kgf yük, 2,5 mm çelik bilye) göre DIGIROCK-LC-RBOV sertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Sertlik değeri için her numuneden 5 ölçüm alınmıştır.

Yoğunluk ölçümünde Arşimed prensibine (ASTM B595-11) göre Precisa XB220A cihazı ile yapılmıştır. Yoğunluk değeri için her numuneden 5 ölçüm alınmıştır. Bağlı yoğunluk hesabında Al6061'in teorik yoğunluk değeri 2,8 g/cm³ alınmış olup ve bağlı yoğunluk değerinin hesabında Denklem 1 kullanılmıştır.

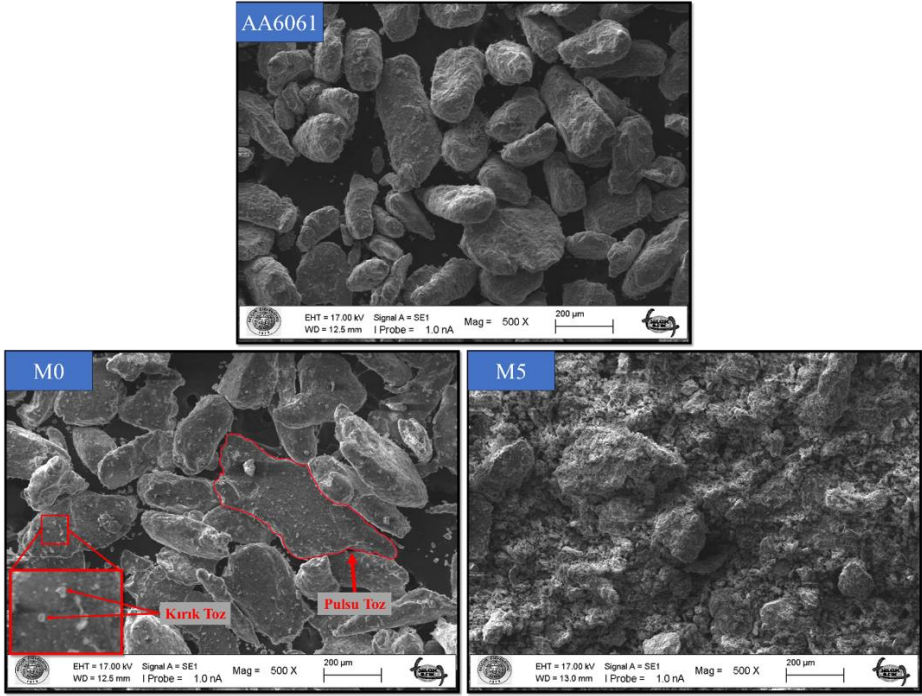
$$\rho_{bağlı} = \frac{\rho_{ölçülen}}{\rho_{teorik}} \times 100 \quad (1)$$



Şekil 2. Toz Hazırlama ve Üretim Akış Prosesi

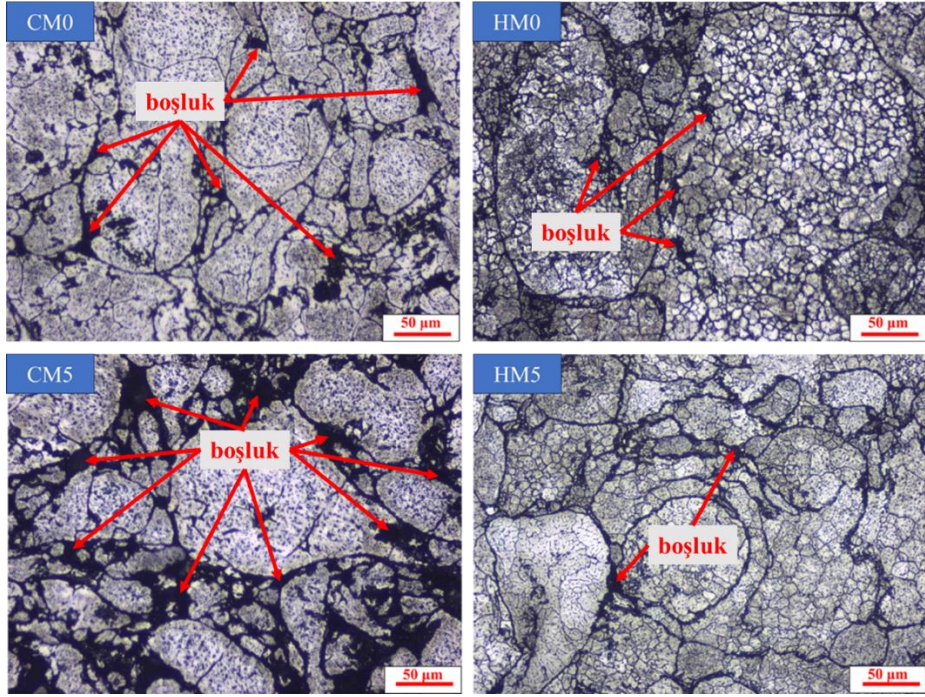
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında kullanılan AA6061 tozunun başlangıç şekil ve morfolojilerini ifade eden mikro yapıları Şekil 3' te yer almaktadır. Çalışmada kullanılan bilyalı öğütülmüş İKK'sız AA6061 tozu (M0) ve İKK'lı AA6061 tozu M5 SEM görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir.



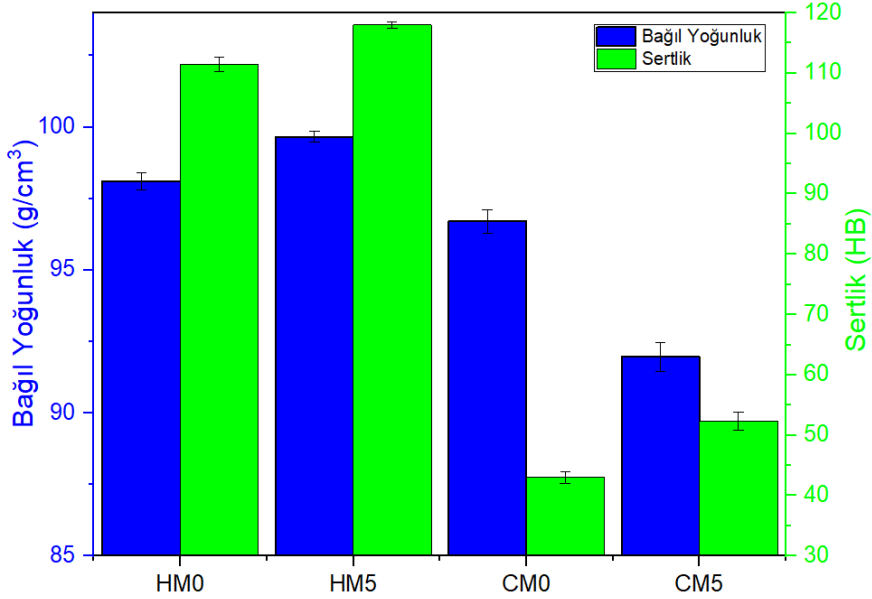
Şekil 3. Referans AA6061 Tozunun ve Bilyalı Öğütme Sonrası Elde Edilen M0 ve M5 Tozların SEM Görüntüleri

Başlangıç tozu olan AA6061 tozuna uygulanan bilyalı öğütme işlemi sonrasında, M0 tozunun bir kısmının hazne duvarlarına sıvanmaya başlayarak toz morfolojisinin pulsulaşma eğiliminde olduğu ve tozlarda kırılmalar Şekil 3'te görülmektedir. M5 Tozunun ise hazne duvarlarına yapışmadığı ve toz boyutunun küçüldüğü görülmektedir. Benzer eğilim Tunc ve ark. (2024) yapmış oldukları bilyalı öğütme çalışmalarında İKK olarak metanol kullandıklarında tozlarda kırılmaların olduğunu ve toz boyutunun küçüldüğünü gözlemlemişler. Tozunun morfolojisine bakıldığında kırılmaların olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Numunelerin Optik Mikroskop Görüntüleri (200x)

M0 ve M5 tozlarından sıcak ve soğuk pres ile üretilen disk numunelerin OM görüntüleri şekil 4’te verilmektedir. HM0 ve HM5 numunelerinin yapısındaki gözenek miktarının CM0 ve CM5 numunelerine göre düşüş eğiliminde olduğu görselden anlaşılmaktadır. BÖ işlemi sonrası M0 tozlarına göre M5 tozlarının boyutundaki düşüş, sinterleme sonrası CM5’in CM0’a göre ve HM5’in HM0’a göre mikro yapıdaki tanelerin küçük olmasının sebeplerinden biridir. Her ne kadar CM5 numunesinin tane boyutlarında bir düşüş gözlemlenmiş olsa da preslenme basıncı ve sinterleme sıcaklığının yetersiz olması yapı içerisindeki gözeneklerin artmasına sebep olabilir. Ayrıca presleme esnasında meydana gelen mekanik kilitlemede gözeneklerin oluşmasına sebep olmaktadır. Sıcak pres yöntemi ile üretilen HM5 numunesinde ise, sıcaklık ve basıncın ikili etkisinin yapıdaki gözenek oluşumunda gözle görülür bir düşüşe neden olduğu ifade edilebilir. Ayrıca sıcak pres yöntemi ile üretilen numunelerin mikro yapılarında tanelerin ve tane sınırlarının ortaya çıktığı görülmektedir. Tane sınırlarında var olan siyah renkli alanların oksit tabakası olduğu söylenebilir (Aslan ve ark., 2020; Gaikwad ve ark., 2025). Yamaguchi ve Takagi (2025) yapmış oldukları çalışmada tane sınırlarının oksit bakımından zengin olduğunu ispatlamışlardır. Sıcak pres yöntemi ile üretilen numunelerin iç yapısında intermetalik fazların küresel formda, homojen bir şekilde dağıldığı söylenebilir. BÖ süresinin etkisi üzerine çalışma yapan Long ve ark. (2010) çalışmalarında BÖ sonrası intermetalik fazların yapı içerisinde homojen dağıldığını ifade etmişlerdir.



Şekil 5. Sertlik Ve Bağıl Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

Üretim yönteminin ve İKK'nın yoğunluk ve sertlik değerleri üzerine etkisi Şekil 5'te verilmiştir. Toz metalurjisi ile yapılan üretimlerde karşılaşılan gözeneklilik durumu yoğunluk ve sertlikle doğrudan ilişkilidir (Beder, 2024).

M5 tozlarına uygulanan bilyalı öğütme işleminde yapı içerisine ilave edilen ağ 5% Metanol, partikül boyutunun, İKK ilavesiz bilyalı öğütme işlemi yapılan numuneye göre azalma eğilimi sergilediği ve yapıdaki İKK'nın soğuk kaynaklanma mekanizmasını tetikleyerek aşırı plastik deformasyona bağlı dislokasyon yoğunluğunu artırdığı ifade edilebilir. Benzer bir ifade literatürde Calka ve ark. (1993) tarafından yapılan çalışmada, bilyalı öğütme esnasında tozlarda oluşan plastik deformasyon sayesinde; dislokasyon yoğunluğunun hızla arttığı, taneler içinde deformasyon bantları oluştuğu ve kristal yapıda iç gerilmelerin biriktiği şeklinde ifade edilmiştir. Bu durumda tozun paketlenabilirliğinin zorlaştığı ve yapıda gözenek oluşmasına neden olduğu Anas ve ark. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada rapor edilmiştir.

Soğuk pres ile üretilen numunelerin bağıl yoğunluk ve sertlik değerlerinin sıcak pres yöntemi ile üretilen numunelere göre daha düşük olduğu ilgili görsele bakılarak ifade edilebilir. CM5 numunesinin en düşük bağıl yoğunluk değerine, CM0 numunesi ise en düşük sertlik değerine sahip olduğu sonuçlardan açık bir şekilde anlaşılmaktadır. Soğuk pres yöntemi ile üretilen numunelerde sertlik ve yoğunluk değerlerindeki düşüşün başlıca sebebi yapıda var olan gözenek miktarının yüksek olmasıdır (Phatak ve ark., 2024). CM5 numunesinin sertlik değerinin CM0'a göre %24,2 daha fazla olmasının sebebi bilyalı öğütme işleminde başlangıç tozuna ilave edilen ağ.%5 İKK'dan kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapıya ilave edilen İKK ile tozların hızlı bir şekilde pulsu yapıya dönüşüp soğuk kaynaklanması ve sonrasında aşırı plastik deformasyona

bağlı olarak dislokasyon yoğunluğundaki artış sertlik te böyle bir artış meydana gelmesine neden olmuştur. Altuntaş (2024) yapmış olduğu çalışmada benzer bir mekanizmanın sertlik artışını tetiklediğini ifade etmiştir. İKK ilave edilmeden bilyalı öğütme işlemi yapılan tozlardan soğuk pres ile üretimi gerçekleştirilen numunede ise, aşırı plastik deformasyon olayının meydana gelmediği ifade edilebilir. Bu sebeple CM0 numunesinin preslenebilirliği daha yüksek olduğu için bağlı yoğunluk değeride CM5'e göre %5 daha fazladır.

İKK ilave edilen CM5 numunesinde, BÖ esnasında oluşan gerilme yığılmaları ve oksit tabakaları paketlenebilirliği olumsuz etkilemektedir. Paketlenebilirlik özelliğinin olumsuz etkilenmesi presleme basıncının yetersiz kalmasına ve partiküller arasındaki boşlukların artmasına sebep olmaktadır. Bu boşluklar ve partikül sınırlarında oksit tabakalarının yığılmaları gibi durumlar, sinterleme esnasında partiküllerin birleşmesini olumsuz etkilemektedir. Yamaguchi ve Takagi (2025), çalışmalarında tane sınırlarındasiah renkte görülen kısımların oksitce zengin bir tabakalarının olduğunu gözlemlemişlerdir.

Sıcak pres yöntemi ile üretilen numunelerde sertlik ve bağlı yoğunluk değerlerinin soğuk pres ile üretilenlere göre daha yüksek olmasında birkaç mekanizma etkin rol oynamaktadır. Basıncı ve sıcaklık mekanizmalarının aynı anda tozlar üzerinde etkisi sonucunda yapıda kısmi sıvı faz oluşmasına neden olmaktadır. Oluşan bu kısmi sıvı faz, gözeneklerin varlığına olumsuz etki ederek azalmasına sebebiyet verir. Aynı zamanda, basıncın etkisi ile de gözenek içerisindeki gazlar yapıdan atılmaktadır. Böylece gözenek sayısı azalmakta ve bağlı yoğunluk ve sertlik değerleri artmaktadır (Beder, 2024).

HM0'ın sertlik ve yoğunluk değerleri sırasıyla 111,5 HB ve 98,1 g/cm³ iken HM5'in sertlik ve yoğunluk değerlerinin sırasıyla 118 HB ve 99,6 g/cm³ 'tür. Sertlik ve bağlı yoğunluk değerlerindeki artışın sebebi ise bilyalı öğütme işlemi sonucunda elde edilen partikül boyutunun küçük olmasıdır. Literatürde partikül boyutu daha küçük olan parçaların sinterlenmesi sonucu iç yapının daha küçük tanelerden meydana geldiği ve buna bağlı olarak sertlik değerinin yükseldiği ifade edilmektedir (Phatak ve ark., 2024). Aynı zamanda Hall-petch eşitliği sertlik ile tane boyutu arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır. Bu eşitliğe göre tane boyutu azaldıkça sertlikte artış meydana geldiği ifade edilmektedir (Kottedda ve ark., 2024).

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, AA6061 alaşım tozuna bilyalı öğütmede İKK etkisi (katkısız öğütme - metanol katkılı öğütme) ve üretim yöntemi etkisi (sıcak pres - soğuk pres) incelenmiştir. Çalışma parametrelerinin tane boyutu, mikroyapı, sertlik ve yoğunluk üzerine etkileri incelenerek elde edilen sonuçlar anlatılmıştır:

- Çalışmadaki bütün numuneler başarılı bir şekilde üretilmiştir.
- İKK ile yapılan öğütmelerde toz boyutunun küçüldüğü ve İKK'sız yapılan öğütmede soğuk kaynak ve hazne yüzeylerinde sıvanma gözlemlendi.
- En yüksek sertlik değeri (118HB) sıcak presin ve İKK'lı öğütmenin etkisi ile HM5 numunesinde elde edildi. En düşük sertlik değeri gözenek ve tozlardaki plastik deformasyonun etkisinden dolayı CM0 numunesinde elde edildi.

- En yüksek bağıl yoğunluk değeri (%99,6 g/cm³) sıcak presin ve İKK'lı öğütmenin etkisi ile HM5 numunesinde elde edildi. En düşük bağıl yoğunluk değeri gözenek ve presleme esnasında mekanik kitlenmeden dolayı CM5 numunesinde elde edildi.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

- Adaan-Nyiaik, M. A., Alam, I. & Tihamiyu, A. A. (2023). Ball milling process variables optimization for high-entropy alloy development using design of experiment and genetic algorithm. *Powder Technology*, 427, 118766.
- Adamek, G. (2014). Influence of type of alcohol as the Process Control Agent on Ti-20Ta-20Nb alloy preparation by mechanical alloying. *Acta Physica Polonica A*, 126 (4), 875-878.
- Aksenova, V., Kanunnikova, O. & Lad'yanov, V. (2025). Structural and Chemical Transformations in the Liquid Phase during High-Energy Milling of Al and Mg Powders with Heptane. *Inorganic Materials: Applied Research*, 16 (3), 776-783.
- Altuntaş, O. (2024). Crystallographic analysis of a new heat treatment strategy for improving the mechanical properties of powder metallurgical steel. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 63 (4), 1061-1069.
- Anas, N., Ramakrishna, M., Dash, R., Rao, T. N. & Vijay, R. (2019). Influence of process control agents on microstructure and mechanical properties of Al alloy produced by mechanical alloying. *Materials Science and Engineering: A*, 751, 171-182.
- Angelo, P., Subramanian, R. & Ravisankar, B., (2022). Powder metallurgy: science, technology and applications. PHI Learning Pvt. Ltd., p.
- Aslan, M., Ergül, E., Kaya, A., Kurt, H. İ. & Yılmaz, N. F. (2020). Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen Al-MgO kompozitlerin özelliklerine sinterleme sıcaklığının etkisi. *El-Cezeri*, 7 (3), 1131-1139.
- Beder, M. (2024). AlSi10Mg alaşımının içyapı ve mekanik özellikleri üzerine sıcak presleme yönteminin etkisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 13 (4), 1420-1427.
- Benjamin, J. & Bomford, M. (1977). Dispersion strengthened aluminum made by mechanical alloying. *Metallurgical Transactions A*, 8 (8), 1301-1305.
- Calka, A., Kaczmarek, W. & Williams, J. (1993). Extended solid solubility in ball-milled Al-Mg alloys. *Journal of materials science*, 28 (1), 15-18.

- Chabri, S., Chatterjee, S., Pattanayak, S., Chakraborty, H., Bhowmik, N. & Sinha, A., 2013, Development and characterization of Al₂O₃ dispersed Al/Mg/Cu/Ti matrix composite. *Journal of Materials Science & Technology*, 29 (11), 1085-1090.
- Çetinkal, S. B. & Acarer, M. (2024). Sinterleme sıcaklığının mekanik alaşımlama ile üretilmiş oksit takviyeli A360 kompozitlerinin mikroyapı ve sertlik özelliklerine etkisi.
- Çetinkal, S. B., Salur, E., Arıcı, G., Degnah, A., Sarkar, S. & Sübütay, H. (2025). Development of Zn-Reinforced Mg Matrix Composites via High Energy Ball Milling Duration: Impact on Mechanical Properties and Biodegradability. *Coatings*, 15 (5), 561.
- Dematte, E., Franco, E., Milan, J. & Costa, C. E. d. (2023). Influence of Milling and Use of Ni and Al Containing Metal Binder in NbC-Based Cermets. *Materials Research*, 26, e20220003.
- Doğan, K., Özgün, M. İ., Sübütay, H., Salur, E., Eker, Y., Kuntoğlu, M., Aslan, A., Gupta, M. K. & Acarer, M. (2022). Dispersion mechanism-induced variations in microstructural and mechanical behavior of CNT-reinforced aluminum nanocomposites. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 22 (1), 55.
- Eckert, J., Holzer, J., Krill III, C. & Johnson, W. (1992). Structural and thermodynamic properties of nanocrystalline fcc metals prepared by mechanical attrition. *Journal of Materials Research*, 7 (7), 1751-1761.
- Gaikwad, S., Dabhade, V. V., Murty, S. N. & Manwatkar, S. (2025). Mechanical behaviour and microstructural analysis of IN718+ 0.3 yttria ODS superalloy mixed by different approaches and consolidated by powder forging. *Materials Science and Engineering: A*, 925, 147896.
- Gilman, P. & Nix, W. (1981). The structure and properties of aluminum alloys produced by mechanical alloying: Powder processing and resultant powder structures. *Metallurgical Transactions A*, 12 (5), 813-824.
- Hall, E. (1951). The deformation & ageing of mild steel: III discussion of results. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 64 (9), 747.
- Kaykilarli, C., Uzunsoy, D. & Yeprem, H. A. (2024). Role of process control agent in the production of Al₂O₃-reinforced titanium matrix composites. *Ceramics International*, 50 (9), 16452-16462.
- Kotteda, T. K., Kumar, M., Kumar, P., Gupta, A. & Kalidindi, S. R. R. (2024). Mechanical and Metallurgical behaviour of Aluminum/graphene nanocomposites in Fuselage applications. *Cogent Engineering*, 11 (1), 2324030.
- Long, B., Zuhailawati, H., Umemoto, M., Todaka, Y. & Othman, R. (2010). Effect of ethanol on the formation and properties of a Cu–NbC composite. *Journal of Alloys and Compounds*, 503 (1), 228-232.

- Lu, L. & Zhang, Y. (1999). Influence of process control agent on interdiffusion between Al and Mg during mechanical alloying. *Journal of Alloys and Compounds*, 290 (1-2), 279-283.
- Lü, L. & Lai, M. O. (2013). Mechanical alloying, Springer Science & Business Media, p.
- Machio, C., Chikwanda, H. & Chikosha, S. (2011). Effect of process control agent (PCA) on the characteristics of mechanically alloyed Ti-Mg powders. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 111 (3), 149-153.
- Meyersm, M. A. & Ashworth, E. (1982). A model for the effect of grain size on the yield stress of metals. *Philosophical Magazine A*, 46 (5), 737-759.
- Moustafa, S., Daoush, W., Ibrahim, A. & Neubaur, E., 2011, Hot forging and hot pressing of AlSi powder compared to conventional powder metallurgy route. *Materials Sciences and Applications*, 2 (08), 1127.
- Munir, K. S., Oldfield, D. T. & Wen, C. (2016). Role of process control agent in the synthesis of multi-walled carbon nanotubes reinforced titanium metal matrix powder mixtures. *Advanced Engineering Materials*, 18 (2), 294-303.
- Nassef, A., El-Garaihy, W. H. & El-Hadek, M. (2017). Characteristics of cold and hot pressed iron aluminum powder metallurgical alloys. *Metals*, 7 (5), 170.
- Nouri, A., Hodgson, P. D. & Wen, C. e. (2010) Study on the role of stearic acid and ethylene-bis-stearamide on the mechanical alloying of a biomedical titanium based alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 41 (6), 1409-1420.
- Phatak, A., Gupta, P., Mandal, S., Agrawal, H., Parkash, O. & Kumar, D. (2024). Hardness-Porosity-Grain Size Interrelationship in Conventionally Sintered 3 mol% Yttria Stabilized Zirconia. *High-Temperature Materials*, 1 (2), 10008.
- Pradeep, N., Parameshwara, S., Chethan, S., Lokesh, V., Harish, T., Basavarajappa, S. & Girisha, K. (2024). Mechanism of ball milling and the factors affecting the process of milling. In: Mechanically alloyed novel materials: processing, applications, and properties. Eds: Springer, p. 1-10.
- Shashanka, R. & Chaira, D. (2015). Optimization of milling parameters for the synthesis of nano-structured duplex and ferritic stainless steel powders by high energy planetary milling. *Powder Technology*, 278, 35-45.
- Shaw, L., Villegas, J., Luo, H., Zawrah, M. & Miracle, D. (2003). Effects of process-control agents on mechanical alloying of nanostructured aluminum alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 34 (1), 159-170.
- Singer, R., Oliver, W. & Nix, W. (1980) Identification of dispersoid phases created in aluminum during mechanical alloying. *Metallurgical Transactions A*, 11 (11), 1895-1901.

- Srinivasan, S., Chen, S. & Schwarz, R. (1992). Synthesis of Al/Al₃Ti two-phase alloys by mechanical alloying, In: High Temperature Aluminides and Intermetallics, Eds: Elsevier, p. 691-695.
- Sübütay, H. & Şavklıyıldız, İ. (2023). The relationship between structural evolution and high energy ball milling duration in tin reinforced Mg alloys. *Materials Today Communications*, 35, 105868.
- Topping, T. D., Ahn, B., Li, Y., Nutt, S. R. & Lavernia, E. J. (2012). Influence of process parameters on the mechanical behavior of an ultrafine-grained Al alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 43 (2), 505-519.
- Tunc, S. A., Çanakçı, A., Karabacak, A. H., Çelebi, M. & Türkmen, M. (2024). Effect of different PCA types on morphology, physical, thermal and mechanical properties of AA2024-B4C composites. *Powder Technology*, 434, 119373.
- Xiao, Z., Geng, H., Sun, C., Jia, P. & Luo, H. (2015). Effect of yttrium on properties of copper prepared by powder metallurgy. *Advanced Powder Technology*, 26 (4), 1079-1086.
- Yamaguchi, W. & Takagi, K. (2025). Coating Metal Powders with Different Metals Under Ultra-low Oxygen Atmosphere for Tuning Material Functions. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, 72 (Supplement), S143-S147.
- Yildiz, T., Kati, N. & Gür, A. K. (2018). The effect of sintering temperature on microstructure and mechanical properties of alloys produced by using hot isostatic pressing method. *Journal of Alloys and Compounds*, 737, 8-13.
- Zadra, M. (2013). Mechanical alloying of titanium. *Materials Science and Engineering: A*, 583, 105-113.
- Zhang, Y., Lu, L. & Yap, S. (1999). Prediction of the amount of PCA for mechanical milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 89, 260-265.