



MEKANİK ÖĞÜTME VE SİNERLEME YÖNTEMLERİNİN AA2024 ALAŞIMININ SERTLİK, YOĞUNLUK, MİKRO YAPI ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

EFFECTS OF MECHANICAL MILLING AND SINTERING TECHNIQUES ON
THE HARDNESS, DENSIFICATION, AND MICROSTRUCTURAL
CHARACTERISTICS OF AA2024 ALLOY

Halit SÜBÜTAY¹

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1759833>

Sorumlu Yazar
(Corresponding Author)
halit.subutay@selcuk.edu.tr

Geliş Tarihi
(Received)
06.08.2025

Revizyon Tarihi
(Revised)
21.11.2025

Kabul Tarihi
(Accepted)
25.11.2025

Öz

Bu çalışma, AA2024 alaşımı tozlarının Mekanik öğütme ve farklı üretim süreçleri kombinasyonunun nihai ürünün içyapı, yoğunluk ve sertlik özelliklerine etkisi değerlendirilmiştir. Mekanik öğütme işlemi sonucunda tozlarda morfolojik dönüşüm ve dislokasyon yoğunluğunda artış gözlenmiş, bu durum içyapıda daha fazla soğuk kaynak izine ve ince tanelere neden olmuştur. Sıcak pres sinterleme ile partikül sınırlarında meydana gelen oksit tabakasının basınç altında kırılması ve atomik difüzyon yoluyla partiküller arası bağların güçlenmesi sonucu yoğunluk ve sertlikte önemli artışlar elde edilmiştir. Özellikle Mekanik öğütme ile sıcak pres sinterlemenin bir arada kullanıldığı S1 numunesinde, en düşük gözeneklilik (%1,8±0,25) ve en yüksek sertlik/yoğunluk (120,3±1,35HB; 2,73±0,025g/cm³) değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sinterleme sıcaklığı ve basıncının yanı sıra Mekanik öğütme gibi ön işlemlerin Al alaşımlarının performansında belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: AA2024, mekanik öğütme, toz metalurjisi, mikro yapı, mekanik özellik.

Abstract

This study investigates the influence of mechanical milling combined with various production routes on the microstructural, densification, and hardness characteristics of AA2024 alloy powders. The mechanical milling process resulted in notable morphological transformation and increased dislocation density within the powders, promoting finer grain structures and more evident cold welding traces. During hot press sintering, the oxide layer present along particle boundaries was fragmented under applied pressure, enabling atomic diffusion and enhancing interparticle bonding. These mechanisms led to significant improvements in both density and hardness. Among all samples, the one processed through the combination of mechanical alloying and hot pressing (labeled S1) exhibited the lowest porosity (%1,8±0,25) and the highest density and hardness values (120,3±1,35HB; 2,73±0,025g/cm³). The findings clearly demonstrate that not only sintering temperature and applied pressure, but also pre-treatments such as mechanical alloying, play a decisive role in determining the final performance of aluminum alloy components.

Keywords: AA2024, mechanical milling, powder metallurgy, microstructure, mechanical properties.

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

1. GİRİŞ

Alüminyum alaşımları yüksek spesifik mukavemet, yüksek elektrik ve termal iletkenliğinin yanında işlenebilirliğinin kolay olmasından dolayı otomobilden havacılığa kadar bir çok farklı endüstride tercih edilen önemli mühendislik malzemeleridir (de Gouveia ve ark., 2019; Jiang ve ark., 2019). Bu alaşımlardan AA2024, 2XXX serisi Al alaşımları içerisinde en yaygın kullanılan malzeme grubundan biri olup yüksek mukavemeti, üstün yorulma direnci, iyi dökülebilirliği ve işlenebilirliği ile ön plana çıkmaktadır (Ramesh & Swamy, 2018 H. P. Kumar & Xavior, 2014; X. Wang, Scudino, & Eckert, 2013). AA2024 alaşımı uçaklarda (gövde ve kanatlar), perçinlerde, dişlilerde, piston ve silindirlerde yaygın olarak tercih edilmektedir (H. P. Kumar & Xavior, 2017; K. P. Kumar, Krishna, Rao, & Bhargava, 2015). Ayrıca AA2024 alaşımının elastisite modülü (73GPa), akma dayanımı (325 MPa) ve çekme dayanımı (472 MPa) gibi değerleri bu alaşımı benzer Al sistemlerinden daha ileriye taşımaktadır (Khan, 2013).

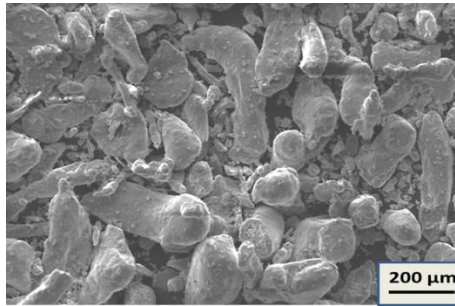
Bu tür alaşımların üretiminde karıştırmalı döküm (Pul, 2019), reo-sıkıştırma döküm (Taneroğlu, Akar, & Kılıçlı, 2013), basınçlı infiltrasyon (Gündoğan & Özarsı, 2019), sürtünme karıştırma (Zahmatkesh, Enayati, & Karimzadeh, 2010) ve toz metalurjisi (Jafari, Enayati, Abbasi, & Karimzadeh, 2010) gibi birden fazla üretim metodu kullanılmaktadır. Toz metalurjisi (TM), düşük gözenekli ve homojen bir içyapı sonucu yüksek mekanik özelliklere sahip parçaların üretilmesinde etkili bir yöntemdir (Pickens, 1981 Davis, 1999). Bu yöntemin diğer yöntemlere kıyasla en önemli avantajlarından biri düşük derecelerde uygulanan işlem sıcaklığıdır, bu sayede matris ile takviye fazı arasında istenmeyen reaksiyonların önüne geçilebilir (Torralba, Da Costa, & Velasco, 2003). Bu yöntem, belirli bir basınç altında presleme ile metal tozlarının şekillendirilmesi ve uygun sıcaklıkta fırın içinde sinterlenmesi işlem basamaklarını içermektedir (Akbarpour ve ark., 2023). TM’de nihai ürünün fiziksel ve mekanik özelliklerine etki eden parametrelerden ikisi metal ya da alaşım tozlarının homojen bir şekilde karıştırılması ve parçacık boyutudur (Rahimian, Parvin, & Ehsani, 2010). Bu işlem için birçok yöntem mevcuttur, bilyalı öğütme işlemi bu yöntemlerden en etkili olanlardan biridir. Alaşımlar, intermetalikler, amorf malzemeler, kompozit malzemeler gibi yüksek çeşitliliğe sahip malzeme gruplarının üretiminde bilyalı öğütme ya da başka bir deyişle mekanik öğütme (MÖ) sıklıkla tercih edilmektedir (Suryanarayana, 2001). MÖ işleminde, işlem süresine bağlı olarak tozlarda sadece öğütme ile karışım meydana gelmez aynı zamanda alaşımlama işlemi de gerçekleşir. Partikül boyutundaki bu değişimler, işlem esnasındaki bilye-toz-duvar çarpışmaları sonucu artan darbe enerjisine bağlı olarak tozlarda meydana gelen tekrarlı soğuk kaynaklanma ve parçacık kırılmaları sonucu oluşmaktadır (Lu & Zhang, 1999; Shaw, Villegas, Luo, Zawah, & Miracle, 2003). Suryanarayana, MÖ ile karıştırılmış malzemelerin nihai özelliklerini etkileyen birçok işlem parametresi olduğunu ifade etmiştir. Bu parametreler arasında işlem kontrol katkısının (İKK) önemli bir yere sahip olduğunu, öğütme esnasında sünek metallerin (Al,Ti,Cu, vb.) kırılmadan ziyade aşırı plastik şekil değiştirme ve soğuk kaynaklanma işlemine maruz kaldıklarını belirtmiştir (Suryanarayana, 2001). Bu olay neticesinde tozlar bilyelere ve havana yapışarak toz sıvanması olayını meydana getirirler. Öğütme esnasında sisteme eklenen İKK sayesinde toz yüzeyleri modifiye edilerek partiküller arasındaki kaynaklama yavaşlatılır ve bu sayede daha ince ve dar dağılımlı partikül boyutu elde edilir (Baghbaderani, Sharafi, & Chermahini, 2012; Lamoglia ve ark., 2022). Çanakçı ve ark.

(Canakci, Varol, & Ozsahin, 2013) yapmış oldukları bir çalışmada öğütme sonrası tozların partikül boyutu ve morfolojisine ilave edilen İKK'nın tek başına katkısının %84 olduğunu ifade etmişlerdir. Mu ve ark. çalışmalarında AA2024 alaşımlarında başlangıç toz boyutunun içyapı ve mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Yapılan ısıl işlemde sonra ultra ince alaşım tozu kullanılarak üretilen numunenin hem mukavemetinde hem de sünekliğinde en yüksek değerlerin elde edildiğini bildirmişlerdir (Mu ve ark., 2022). Xavior ve ark. tribolojik uygulamalar için AA2024-Grafen/CNT nanokompozitlerini toz metalurjisi yöntemi ile üretmişlerdir. Mekanik öğütülmüş Grafen/CNT takviyeli AA2024 kompozitlerinin daha yüksek sertlik, mukavemet ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinden dolayı tribolojik uygulamalar için uygun bir malzeme grubu olduğunu rapor etmişlerdir (Xavior, Kumar, & Kumar, 2018).

Literatürde AA2024 alaşımları ile ilgili çalışmalar incelendiğinde çok sayıda yayın bulunduğu anlaşılmaktadır. Genellikle, farklı üretim yöntemleri, partikül takviyeleri ve mekanik öğütme parametrelerinin incelendiği çalışmalar ön plandadır. Fakat, İKK ile mekanik öğütülmüş ve geleneksel toz metalurjisi ile sıcak pres sinterleme üretim yöntemlerinin birlikte araştırıldığı çok fazla yayına ulaşamamıştır. Bu çalışmada, mekanik öğütme ve farklı toz metalurjisi üretim yöntemleri arasındaki ilişkinin AA2024 alaşımının işlem-yapı-özellik performansına etkisi incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, mekanik öğütme işleminin ve farklı toz metalurjisi üretim yöntemlerinin malzemenin içyapısında meydana getirdiği değişimler ile bu değişimlerin sertlik ve yoğunluk değerlerine etkisini araştırmak için AA2024 alaşımı tercih edilmiştir. Bu amaç ile 4 adet numune üretilmiştir. Çalışmada kullanılan AA2024 alaşımına ait SEM görüntüsü kimyasal bileşim, üretilen numunelerin açıklamaları ile numune kodları ve üretim parametreleri sırası ile Şekil 1, Tablo 1, Tablo 2'de sunulmuştur. AA2024 alaşım tozu (%99,8 saflıkta,) Dome Metalden (Çin) temin edilmiştir. Şekil 1den toz morfolojisinin düzensiz ve köşeli bir yapıya sahip olduğu ve geniş dağılımlı bir boyut aralığı (40-200 µm) sergilediği ifade edilebilir.



Şekil 1. AA2024 Alaşım Tozunun SEM Görüntüsü

Tablo 1. AA2024 Alaşımının Kimyasal Bileşimi

Fe	Si	Mg	Cu	Zn	Mn	Diğer	Al
0,5	0,5	1,45	4,2	0,25	0,75	0,3	Kalan

Tablo 2. Çalışmada Kullanılan Numune Kodları, Üretim Yöntemleri ve Temel Parametreler

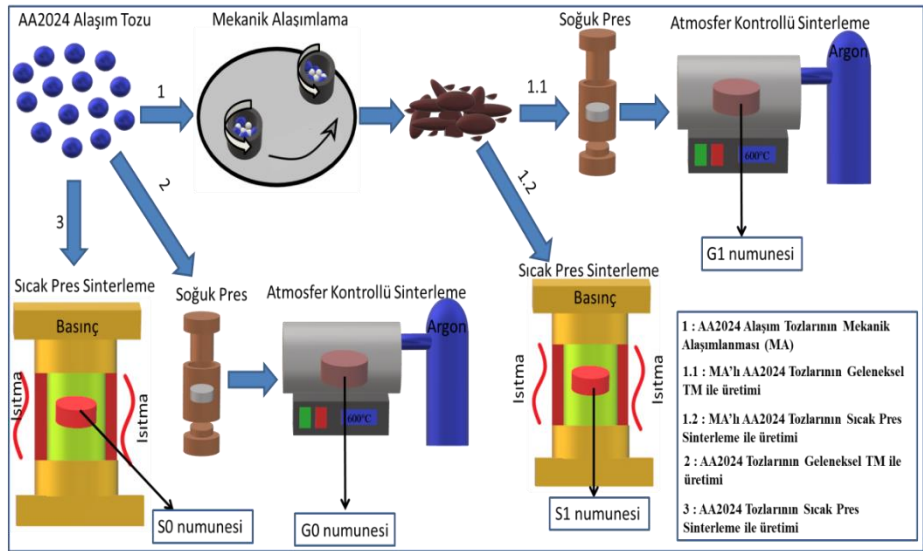
Numune Kodu	Üretim Yöntemi	Temel Parametreler
G0	AA2024 tozlarından geleneksel TM yöntemi ile üretilmiş numune	Sinterleme: 400 MPa, 600 °C, 1 saat, Ar atmosferi
G1	Mekanik öğütülmüş AA2024 tozlarından geleneksel TM yöntemi ile üretilmiş numune	MA parametreleri: 350 rpm, 2 saat, BTO = 10:1, WC bilye ve kap, Ar atmosferi, %2 stearik asit Sinterleme: 400 MPa , 600 °C, 1 saat, Ar atmosferi
S0	AA2024 tozlarından Sıcak Pres sinterleme yöntemi ile üretilmiş numune	Sinterleme: 600 °C, 30 dk. 25 MPa,
S1	Mekanik öğütülmüş AA2024 tozlarından Sıcak Pres sinterleme yöntemi ile üretilmiş numune	MA parametreleri: 350 rpm, 2 saat, BTO = 10:1, WC bilye ve kap, Ar atmosferi, %2 stearik asit Sıcak pres: 600 °C, 30 dk. 25 MPa,

Mekanik öğütmenin sertlik ve yoğunluğa etkisinin incelenebilmesi için AA2024 alaşım tozları gezegensel tipi bilyalı değirmen cihazında (PM-200) 125 ml WC havan içerisinde, 350 rpm dönme hızında, 10 mm WC bilyeler ile 10:1 bilye toz oranında argon atmosferi altında 2 saat süre ile öğütülmüştür. Tozların soğuk kaynaklanmasını önleyerek homojen bir şekilde dağılması ve aşırı plastik deformasyonu engellemek için İKK olarak ağırlık %2 stearik asit kullanılmıştır. İşlem sonrasında öğütülmüş tozlar ile öğütülmemiş tozlardan geleneksel TM (soğuk pres + sinter) ve sıcak pres olmak üzere iki farklı yöntem kullanılarak numuneler üretilmiştir. Geleneksel TM metodunda G0 ve G1 numunelerine ait tozlar 400 MPa basınç altında soğuk preslenerek yaş numune elde edilmiştir. Soğuk presleme işlemi sonrasında numuneler 5°C/dk. ısıtma hızında 600°C sıcaklıkta Ar gaz atmosferi altında atmosfer kontrollü tüp fırında 1 saat süre ile sinterlenerek nihai ürün elde edilmiştir. Sıcak pres metodunda ise, S0 ve S1 numunelerine ait tozlar 5°C/dk. ısıtma hızında 600°C’de 25MPa basınç altında 30 dak. boyunca sinterlenmiştir. Sinterleme işleminden sonra numuneler kalıp içerisinde kontrollü bir şekilde havada soğumaya bırakılarak nihai ürün elde edilmiştir. Stearik asidin düşük ergime (~69 °C) ve buharlaşma sıcaklığı nedeniyle, sinterleme sürecinin ısınma aşamasında (600 °C’ye kadar) tamamen uzaklaştığı düşünülmektedir. Çalışma kapsamında üretimi gerçekleştirilen numunelere uygulanan üretim süreçleri Şekil 2’de sunulmuştur. Üretimi gerçekleştirilen numunelerin yüzeyleri (400-800-1200’lük SiC) zımparalanıp sonrasında 3 ve 1 µm Al₂O₃ solüsyonlar ile parlatılmıştır. İyapıda tane sınırlarının belirgin olarak görüntülenebilmesi için numuneler Modifiye Keller çözeltisi ile dağlanmıştır. Dağlama sonrası numunelerin iyapı Karakterizasyonu Nikon Eclipse MA100 model ters metal mikroskopu ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin sertlik değerleri Digirock markalı makro sertlik cihazında Brinell sertlik yönteminde (Varol, Canakci, & Ozsahin, 2018) 2,5 mm çelik bilyalı uç kullanılarak 67,5 kgf yük altında 3

ölçüm alınarak belirlenmiştir. Yoğunluk değerleri 0,0001 g hassasiyetli elektronik bir terazide, Arşimet yöntemi ile ASTM B962-23 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Her bir numune işlem öncesinde etil alkol ile temizlenip kurutulduktan sonra ölçümler alınmıştır. Deneyler sıcaklığın $25 \pm 1^\circ\text{C}$ olduğu saf su ortamında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar her numuneden 3 ölçüm alınarak ($n=3$) ortalama \pm standart sapma ($\pm\text{SS}$) şeklinde verilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen numunelerin gözenek oranı 1 numaralı eşitlik ile hesaplanmıştır (Bai, Perevoshchikova, Sha, & Wu, 2019; Cingöz, Kıyasöz, Bayrak, & Kıyasöz, 2025).

$$\text{Gözeneklik (\%)} = (1 - \rho_{Den.}/\rho_{Teo.}) \times 100 \quad (1)$$

Yukarıda verilen eşitlikte, $\rho_{Den.}$ üretilen numunelerin deneysel yoğunluğudur. $\rho_{Teo.}$ ise, numunelerin teorik yoğunluk değeridir. Literatürde AA2024 alaşımı için teorik yoğunluk değeri $2,78 \text{ g/cm}^3$ (G. Wang, 2022) olarak belirtilmiştir.

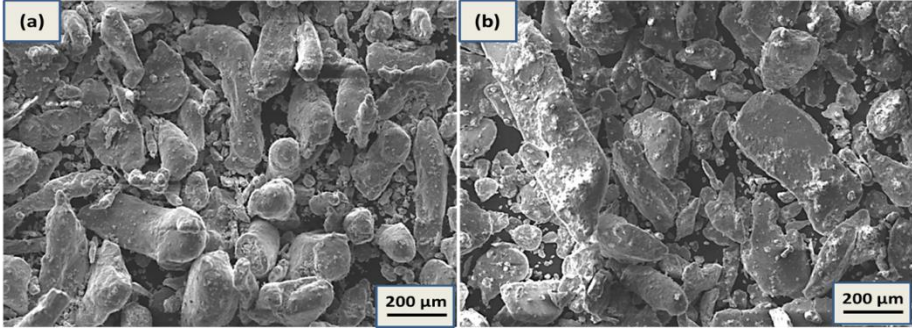


Şekil 2. AA2024 Tozlarının Mekanik Öğütme, Soğuk Pres Sinterleme ve Sıcak Pres Sinterleme İşlemleriyle Üretim Sürecinin Şematik Gösterimi.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. Mekanik Öğütmenin Toz Morfolojisine Etkisi

Çalışma kapsamında kullanılan AA2024 alaşımının SEM görüntüsü ve 2 saat mekanik öğütme sonrası öğütülmüş AA2024 tozlarına ait SEM görüntüsü Şekil 3 a ve b' de sırası ile verilmiştir.



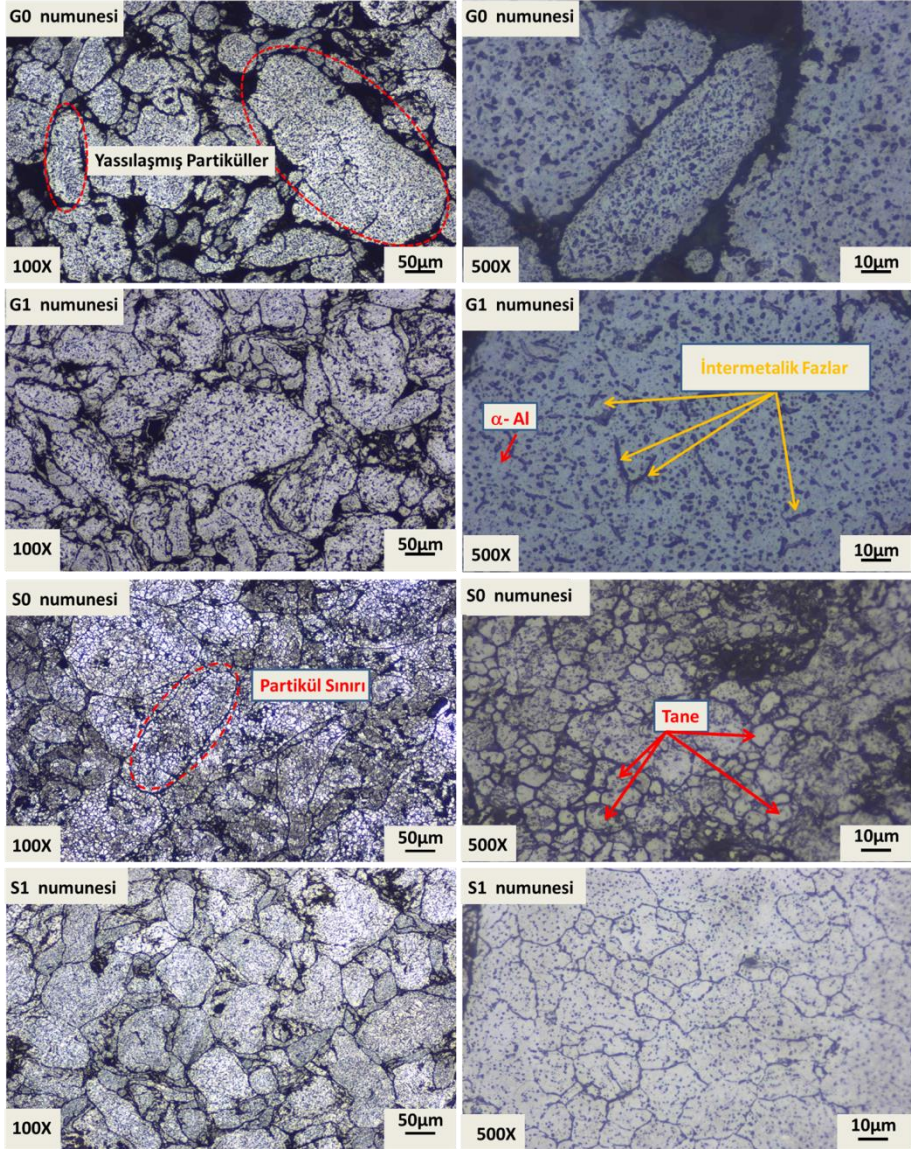
Şekil 3. Mekanik Öğütme Öncesi (a) ve Sonrası (b) AA2024 Tozlarının YüzeY Morfolojilerini Gösteren SEM Görselleri

Mekanik öğütmenin doğası gereği toz morfolojisi bilya-toz-duvar çarpışmaları neticesinde değişebilir. Meydana gelen böylesi sürekli çarpışma olayları plastik deformasyon mekanizmalarını tetikler (Krüger, Schmelzer, & Helmecke, 2016). Mekanik öğütmenin ilk etabında tozlar pulsulaşma eğilimindedir (Vitjaz, Lovshenko, & Lovshenko, 1998). Sonrasında, pulsu morfolojideki tozlarda şiddetli ve tekrarlayan çarpışmaların devam etmesi ile çalışma sertleşmesi meydana gelir. Çalışma sertleşmesi olayı sonucunda tozlar yorulma hasar mekanizmasıyla ya da sertliği ve kırılabilirliği artan pulsu tozların parçalanması ile kırılır (Neikov, Naboychenko, Yefimov, & Neikov, 2019). Öğütmenin devam etmesi durumunda kırılan partiküller tekrardan pulsulaşma eğilimine geçerek soğuk kaynaklanma eğilimi sergiler. Literatürdeki bilgiler ve yapılan çalışmaların sonuçları incelendiğinde benzer mekanizmanın sunulan çalışmada da var olduğu ifade edilebilir. Başlangıç AA2024 tozunun düzensiz yapıdaki morfolojisinin Bilyalı Öğütme işlemine bağlı olarak bozularak soğuk kaynaklanmış pulsu toz morfolojisine geçtiği ilgili görselden anlaşılmaktadır.

3.2. Bilyalı Öğütme ve Üretim Yönteminin İyçapıya Etkisi

Çalışma kapsamında üretilen numunelerin optik mikroskop içyapı görüntüleri Şekil 4' te sunulmuştur. Mekanik öğütmenin ve farklı üretim yöntemlerinin içyapıya etkisinin açık bir şekilde anlaşılabilmesi için genel yüzeY görüntüsü (100X) ile birlikte muhtemel intermetalik fazlarının morfolojisi ve tane yapılarının irdelenebilmesi için yakın çekim görüntüsü (500X) birlikte verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde bütün numunelerin iç yapısının α -Al (beyaz alanlar) ile birlikte şekil, boyut ve dağılım bakımından farklılık sergileyen muhtemel intermetalik fazlardan meydana geldiği anlaşılmaktadır. Mrówka ve Sieniawski(Mrówka-Nowotnik & Sieniawski, 2013) benzer bir çalışmada AA2024 alaşımının içyapısında üretim yöntemine göre meydana gelen intermetalik fazların nihai ürünün mekanik özellikleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Benzer bir durum yapılan çalışmada da gözlemlenmiş olup muhtemel intermetalik fazların şekil ve boyutunun sertliğe etkisi ileriki kısımlarda tartışılmıştır. G0 numunesine ait görsellerde, partikül sınırlarının varlığı açık bir şekilde görülmektedir. Partiküller arasındaki bağlanmanın oldukça zayıf olduğu ve sinterlenme etkinliğinin düşük olduğu ifade edilebilir. G1 numunesinde ise, Mekanik öğütme işleminin etkisinin ortaya çıkması sonucu partiküllerde meydana gelen yassılaştırmanın daha fazla olduğu söylenebilir. Ayrıca bu numunenin içyapı görüntüsünde soğuk

kaynaklanma izleri belirgin bir şekilde görünmektedir. Tozların daha ince ve yassı olması (G0 numunesine göre) ve bu yapıların üst üste binmiş gibi görünmeleri bu yorumun doğruluğunu ortaya koyar niteliktedir.



Şekil 4. AA2024 Alaşımına Ait Farklı Üretim Yöntemleriyle (Soğuk Pres–Sinter ve Sıcak Pres) Elde Edilen Numunelerin Optik Mikroskop Görüntüleri.

S0 numunesi ait optik mikroskop görüntüsü incelendiğinde, herhangi bir ön işlem görmemiş AA2024 alaşım tozlarının sıcak preslenmesi sonrası yapıda partikül sınırlarının belirginliğinin azaldığı ve yüksek oranda konsolidasyonun sağlandığı

söylenbilir. Benzer bir durumu Stergioudi ve ark. yapmış oldukları çalışmada sıcak pres ile üretilen numunelerin yüksek oranda birleşme sağladığı şeklinde rapor etmişlerdir (Stergioudi, Prospathopoulos, Farazas, Tsirogiannis, & Michailidis, 2022). Literatürde yapılan bir başka çalışmada ise üretim yöntemi olarak kullanılan sıcak pres sinterlemenin tozları hem termal hem de mekanik olarak birleştirerek yüksek fiziksel ve mekanik özelliklerin elde edilebileceği belirtilmiştir (Yakovtseva ve ark., 2024). Ayrıca bu numunede ilk defa partiküller içinde tane sınırları da belirgin bir şekilde görülmüştür. Fakat, diğer üç numuneye kıyas ile en homojen ve yoğun içyapımın ilgili görsel detaylıca incelendiğinde S1 numunesinde elde edildiği söylenebilir. Mekanik öğütme sonucu tozlarda hem homojen dağılımın sağlanması hem de alaşım içinde var olan elementlerin Al matris içerisinde çözünmesi böyle bir yapının ortaya çıkmasında öncülük etmiş olabilir. Sıcak pres sinterleme esnasında çözünen bu elementler yeniden çökerek daha ince, küresele yakın ve homojen dağılmış intermetalik fazların meydana gelmesine neden olabilir. Ayrıca partiküller içinde meydana gelen taneler daha eş eksenlidir. Bu sonuçlar öncülüğünde, sıcak pres sinterleme yönteminin tane incelmelerini iki farklı mekanizma ile sağlayabileceği sonucu ortaya çıkmıştır: (i) Bilyalı Öğütme sonucu elde edilen pulsu morfolojinin sinterleme boyunca basınç etkisi ile düzleştirilmesi, AA2024 partikülleri ile oluşan başlangıç tanelerinin boyutunun düşmesine neden olmuştur ve (ii) bu partiküllerin içerisinde alt tanelerin ortaya çıkması ilave bir tane incelmeleri mekanizmasını göstermektedir. Bu olgu sıcak pres esnasında yüksek plastik gerinim ve ısının neden olduğu dinamik geri kazanım, toparlanma ve yeniden kristallenmeye atfedilmiştir (Mao ve ark., 2022; Xie ve ark., 2021).

Bütün numunelerde partikül sınırlarında gözlenen koyu bölgelerin γ -Al₂O₃ muhtemel fazı olabileceği literatürde AA2024 ve diğer Al alaşımlarında rapor edilen oksit tabakaların morfolojileriyle uyumludur. Housaer ve ark. tarafından yapılan çalışmada tane sınırlarında var olan koyu bölgelerin kristalin yapıya sahip olan γ -Al₂O₃ olduğunu rapor etmişlerdir (Housaer ve ark., 2015). Ayrıca, Moustafa ve ark. sıcak pres ve geleneksel toz metalurjisi yöntemleri ile üretmiş oldukları Al-Si alaşımlarında oksit tabakanın var olduğunu belirtmişlerdir. Fakat bu oksit tabakasının sıcak presleme esnasında meydana gelen plastik deformasyona bağlı olarak kırıldığını ve tane sınırlarında daha ince bir morfolojide kaldığını rapor etmişlerdir (Moustafa, 2011). Jeurgens ve ark. tarafından yapılan çalışmada amorf Al₂O₃ → γ -Al₂O₃ dönüşümü, oksit büyüme koşulları ve mikro yapı gözlemleri üzerinden tartışılmaktadır. Yazarlar tane sınırlarında ortaya çıkan bu fazın başlangıçta daha az düzgün kalınlıkta amorf bir oksit filmi olduğunu ve yavaş yavaş kristalin γ -Al₂O₃'e dönüştüğünü ifade etmişlerdir (Jeurgens ve ark., 2002).

Sunulan çalışmada, partikül sınırlarında gözlenen koyu bölgelerin muhtemel γ -Al₂O₃ fazı olabileceğine ilişkin yorum, doğrudan ölçüm olmasa da, Al alaşımlarında oksit tabakalarının bilinen davranışına ve literatürde raporlanan benzer morfolojilere dayanarak ifade edilmektedir.

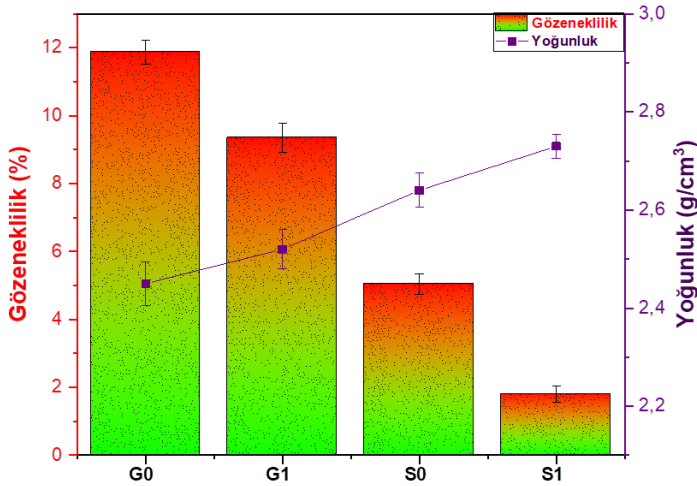
Bu bilgiler doğrultusunda, G0 ve G1 numunelerinde tane sınırında muhtemel oksit fazı olduğu düşünülen bu yapı daha fazla gözlenirken, S0 ve S1 numunelerinde sıcak presleme sonucu bu yapının etkinliğini azalttığı söylenebilir.

Bütün numuneler incelendiğinde, S1 numunesinin Mekanik öğütmenin ve sıcak pres sinterlemenin sinerjik etkisini en iyi şekilde temsil ettiği düşünülmektedir. Hem taneler

arasındaki içyapısal bağlanmanın üst düzey olması hem de intermetalik olduğu düşünülen fazların yapı içerisinde homojen bir şekilde dağılması bu düşüncenin temelini oluşturmaktadır.

3.3. Mekanik Öğütme ve Üretim Yönteminin Yoğunluk ve Gözenekliliğe Etkisi

Üretim yöntemi ve Mekanik öğütme işleminin AA2024 alaşımının yoğunluk ve gözeneklilik değerlerine etkisi Şekil 5'te verilmiştir. Şekilden yoğunluk değerlerinin gözenek ya da boşluğun dağılımı ve miktarı ile doğrudan bağlantılı olduğu açıkça ifade edilebilir. Malzemenin içyapısında meydana gelen gözenekler, yapıda gerilim birikimine sebebiyet veren bölgeler olarak görev yapmakta ve parçanın yük taşıma kabiliyetini azaltarak daha düşük yüklerde hasar oluşumuna sebebiyet vermektedir. Ayrıca, bu gözenekler sayesinde oluşan çatlakların kolay bir şekilde ilerlediği bilinen bir gerçektir (Gökmeşe & Bostan, 2013). İlgili şekil incelendiğinde, geleneksel sinterleme ile üretilen G0 numunesinde en düşük yoğunluk ($2,45 \pm 0,044 \text{ g/cm}^3$) ve en yüksek gözeneklilik ($\%11,87 \pm 0,36$) değerlerinin elde edildiği görülmektedir. G0 numunesine ait içyapı görüntülerinde (Şekil 4) partikül sınırlarında koyu renkli alanların miktarının yüksek olduğu görülmektedir. Geleneksel sinterleme esnasında soğuk presleme basıncının yeterli olmaması partiküllerin birbirine yaklaşmasını engelleyerek aralarında boşluk kalmasına neden olmuş olabilir. Ayrıca partikül sınırlarında var olan oksit tabakası sinterleme esnasında olumsuz etki yaparak partiküllerin birleşmesini ve aralarındaki malzeme transferini engellemektedirler. Bu sebeplerden dolayı, numunenin yoğunluğunda istenilen artış meydana gelememektedir. Yuan ve ark. ile Moustafa ve ark. yapmış oldukları farklı çalışmalarda benzer bir durumu gözlemlediklerini belirtmişlerdir (Moustafa, 2011; Wendel, Manchili, Hryha, & Nyborg, 2020).



Şekil 5. Farklı Üretim Yöntemleriyle (G0, G1, S0, S1) Elde Edilen AA2024 Numunelerinin Yoğunluk (G/Cm³) ve Gözeneklilik (%) Değerlerinin Karşılaştırılması. Hata çubukları tekrarlı ölçüm (n=3) sonrası elde edilen standart sapmayı ($\pm SS$) ifade etmektedir.

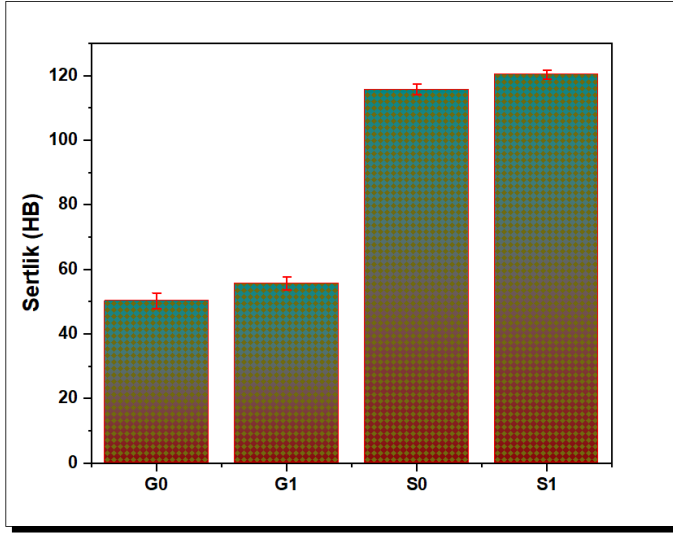
G1 numunesinde ise, tozlara uygulanan Mekanik öğütme işlemi sonrası pulsu yapıya dönüşen toz morfolojisine bağlı olarak yoğunluk değerinde bir artış meydana gelirken ($2,52 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$) gözeneklilik değerinin ($\%9,35 \pm 0,36$) ise tam tersine bir düşüş eğilimi sergilediği ifade edilebilir. Toozandehjani ve ark. yapmış oldukları bir çalışmada mekanik öğütülmüş Al-Al₂O₃ kompozit tozlarından üretilen numunelerin yoğunluk değerlerinin özellikle 2 saat ve üzerindeki öğütme sürelerinde arttığını belirtmişlerdir (Toozandehjani, Matori, Ostovan, Abdul Aziz, & Mamat, 2017). Sıcak pres sinterleme yöntemi ile üretilen S0 numunesinin sonuçları incelendiğinde üretim yöntemine bağlı olarak yoğunluğun ($2,64 \pm 0,035 \text{ g/cm}^3$) etkili bir şekilde arttığı ve gözeneklilik ($\%5,04 \pm 0,3$) değerinin azaldığı söylenebilir. Bahsedilen numunenin yoğunluk değerleri ile içyapı görüntüleri birlikte incelendiğinde, belirgin bir şekilde tanelerin küçüldüğü görülmektedir (Şekil 4). Ayrıca, partikül sınırlarında var olan oksit tabakasının bu yöntem ile üretilen numunelerde incelendiği ifade edilebilir. Sinterleme esnasında parçaya uygulanan sıcaklık ve basınç etkisine bağlı olarak oksit tabakası kırılmasıyla atomik difüzyon gerçekleşebilir. Difüzyon olayının meydana gelmesi ile partiküller arasında birleşmeler sonucu boyun verme olayları gerçekleşir ve gözenekler kapanarak yoğunluk artar. Partiküller arası difüzyon olayı gerçekleşir ve bu tabaka inceleyerek partiküller arası bağlanmanın artması sonucu yoğunlukta ciddi bir oranda artış meydana gelir. Benzer bir şekilde Felbinger ve ark. yapmış oldukları bir çalışmada Al esaslı malzemelerin sinterlenebilmesi için partikül sınırlarında var olan oksit tabakasının uzaklaştırılmasının ya da kırılmasının elzem olduğunu belirtmişlerdir (Angenoorth, Erhard, Wächter, Volk, & Günther, 2024). Yuan ve ark. ise sinterleme esnasında uygulanan basıncın Al₂O₃ tabakasını kırmada ya da inceltmede etkili olduğunu bu sayede sinterlemenin başarılı bir şekilde tamalanarak malzemenin yoğunlaşabilirliğinin artırılacağını rapor etmişlerdir (Yuan, Qu, Yin, Yan, & Tan, 2019).

S1 numaralı numuneye ait sonuçlar incelendiğinde ise, Bilyalı Öğütme ve sıcak pres sinterleme üretim yönteminin yüksek yoğunluk ($2,73 \pm 0,025 \text{ g/cm}^3$) ve düşük gözeneklilik ($\%1,8 \pm 0,25$) değerleri elde edilmesinde son derece başarılı olduğu ifade edilebilir. Bu numunede iki farklı mekanizmanın yoğunlaşabilirliği artırmada etkili olduğu düşünülmektedir. Bunlardan ilki S0 numaralı numune de gözlemlenen sıcak pres basıncının etkisi ile oksit tabakasının parçalanması sonucu artan kütle taşınımı ile atomlar arası birleşmenin sağlanmasıdır. İkinci mekanizma ise mekanik öğütmeden kaynaklı tane içlerine homojen bir şekilde dağılan intermetalik olduğu düşünülen fazların bölgesel olarak meydana getirdiği kayma deformasyonları sonucu sınırlarda bulunan oksit tabakasını parçalamasıdır. Ayrıca, bu deformasyonlara bağlı olarak taneler arasındaki etkileşimin kolaylaştığı ve mevcut olan gözeneklerin ortadan kalkması ile yoğunluğun arttığı söylenebilir (Z. Wang, K G, Zhang, Scudino, & Eckert, 2018).

3.4. Bilyalı Öğütme ve Üretim Yönteminin Sertliğe Etkisi

Çalışma kapsamında AA2024 alaşımından üretilen numunelere ait sertlik sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, en düşük sertlik değeri $50,2 \pm 2,5 \text{ HB}$ ile G0 numunesinde elde edilmiştir. İlgili numuneye ait içyapı görüntüleri (Şekil 4) ve yoğunluk değerlerine (Şekil 5) bakıldığında partiküller arası birleşmenin beklenen seviyede olmayışı ve yüksek miktardaki gözeneklilik değerleri sonucu sertlik artışının sağlanamadığı söylenebilir. Kubota yapmış olduğu çalışmada, geleneksel sinterleme ile

ürettikleri numunelerin sertliklerinin düşük olmasını içyapıdaki gözeneklerden kaynaklandığını rapor etmiştir (Kubota, 2007).



Şekil 6. Farklı Üretim Yöntemleriyle Üretilen AA2024 Numunelerinin Brinell Sertlik Değerleri (HB). Hata çubukları tekrarlı ölçüm (n=3) sonrası elde edilen standart sapmayı ($\pm SS$) ifade etmektedir.

Mekanik öğütme esnasında tozların pulsu morfolojiye dönmesi ve soğuk kaynak izlerinin artmasıyla içyapıda gözeneklerin azalmasının G1 numunesindeki sertlik artışına sebep olduğu söylenebilir. Sonuçlardan 2 saat uygulanan mekanik öğütmenin sertlikte meydana gelen artışa etkisinin düşük olduğu ortaya çıkmaktadır. Sıcak pres sinterleme ile üretilen S0 numunesinin sertliğindeki gözle görülür artış üretim yönteminin sertlik üzerinde daha etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bu yöntemde sinterleme süresi boyunca numune üzerine etki eden basınç sayesinde yapıda var olan gözenek oranında ciddi bir düşüş meydana gelir (German, 2005). Ayrıca diğer numunelere göre içyapıda daha ince taneli bir yapının ortaya çıkması sertlik değerinde meydana gelen artışın bir diğer sebebidir (Brodova ve ark., 2022).

Bilyalı Öğütme işlemi ile ince ve homojen dağılmış muhtemel intermetalik fazların meydana gelmesi ve sonrasında bu yapının sıcak pres yöntemi ile sinterlenmesi S1 numunesinin çalışmada üretilen bütün numuneler içerisinde en yüksek sertlik değerine ulaşmasına neden olmuştur. Mekanik öğütme ile dislokasyon yoğunluğunun arttığı bilinen bir olgudur (Gräning, Rieth, Leiste, Duerrschabel, & Möslang, 2022). Dislokasyon yoğunluğunun yüksek olması tane inceltme mekanizmalarını hızlandırmakta ve içyapı da yüksek oranda alt tanelerin meydana gelmesine neden olur (Casati ve ark., 2014). Salur ve ark. yapmış oldukları çalışmada içyapıda meydana gelen alt tanelerin dislokasyon hareketini engellediğini bundan dolayı mekanik öğütme sonrası üretilen numunelerin sertliklerinin başlangıç tozundan üretilen numuneye göre daha yüksek olduğunu rapor etmişlerdir (Salur, Acarer, & Nazik, 2021).

Dislokasyon yoğunluğu ile sertlik arasında bir bağıntı mevcuttur. Bu bağıntı Eşitlik 2 ile verilmiştir. Yapı içerisindeki dislokasyon yoğunluğu arttıkça sertlik değeri de artar. Bu nedenle çalışma kapsamında üretimi gerçekleştirilen numuneler içinde en yüksek sertlik değeri mekanik öğütülmüş AA2024 alaşım tozlarından sıcak pres sinterleme ile üretilen numunede elde edilmiştir.

$$H = \sqrt{\rho\alpha Gb} + \sqrt{tDh} \quad (2)$$

Yukarıda verilen eşitlikte, \sqrt{tDh} kısmı difüzyona bağlı mikro yapısal sertlik artışıdır. H sertlik, G ve α değerleri malzeme sabiti, ρ dislokasyon yoğunluğunu ifade eder (Taşkın & Şenel, 2024).

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, AA2024 alaşım tozlarının farklı üretim yöntemleri (geleneksel toz metalurjisi, Mekanik öğütme + geleneksel toz metalurjisi, sıcak pres sinterleme ve Mekanik öğütme +sıcak pres sinterleme) altında elde edilen örneklerin içyapı, sertlik ve yoğunluk özellikleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular aşağıda sunulmuştur.

- Geleneksel toz metalurjisi yöntemi ile üretilen numunelerde içyapıda tane sınırlarında meydana gelen oksit tabakası ve partiküller arası birleşmenin olmaması yüksek gözenekliliğe (%11,87±0,36) neden olmuştur. Bu nedenle en düşük yoğunluk değeri (2,45±0,044 g/cm³) G0 numaralı numunede elde edilmiştir.
- Sıcak pres sinterleme ile üretilen numunelerde sıcaklık ve basıncın birlikte kullanılması partiküller arası temas yüzeyini artırmıştır. Ayrıca, oksit tabakasının parçalanarak atomik difüzyonun meydana gelmesi ile gözeneklilik oranı azalmıştır.
- Mekanik öğütme yöntemi nihai ürünün yoğunluk ve sertlik değerlerini bir miktar artırırken Sıcak pres sinterleme yöntemi nihai ürünün yoğunluk ve sertlik değerlerini artırmada en etkili yöntemdir.
- En yüksek yoğunluk (2,73±0,025 g/cm³), sertlik (120,3±1,35 HB) ve homojen içyapı S1 numaralı numunede elde edilmiştir.

Bu çıktılar, toz metalurjisinin ileri uygulamalarında proses parametrelerinin seçiminde kritik bir öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

Akbarpour, M. R., Gazani, F., Mousa Mirabad, H., Khezri, I., Moeini, A., Sohrabi, N., & Kim, H. S. (2023). Recent advances in processing, and mechanical, thermal and electrical properties of Cu-SiC metal matrix composites prepared by powder metallurgy. *Progress in Materials Science*, 140, 101191. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101191>

- Angenooth, J., Erhard, P., Wächter, D., Volk, W., & Günther, D. (2024). Sintering of 3D-printed aluminum specimens from the slurry-based binder jetting process. *Progress in Additive Manufacturing*, 9(3), 633-642. <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00657-2>
- Baghbaderani, H. A., Sharafi, S., & Chermahini, M. D. (2012). Investigation of nanostructure formation mechanism and magnetic properties in Fe₄₅Co₄₅Ni₁₀ system synthesized by mechanical alloying. *Powder Technology*, 230, 241-246.
- Bai, S., Perevoshchikova, N., Sha, Y., & Wu, X. (2019). The Effects of Selective Laser Melting Process Parameters on Relative Density of the AlSi10Mg Parts and Suitable Procedures of the Archimedes Method. *Applied Sciences*, 9(3), 583. <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/3/583>
- Brodova, I., Yolshina, L., Razorenov, S., Rasposienko, D., Petrova, A., Shirinkina, I., . . . Savinykh, A. (2022). Effect of Grain Size on the Properties of Aluminum Matrix Composites with Graphene. *Metals*, 12(6), 1054. <https://www.mdpi.com/2075-4701/12/6/1054>
- Canakci, A., Varol, T., & Ozsahin, S. (2013). Analysis of the effect of a new process control agent technique on the mechanical milling process using a neural network model: measurement and modeling. *Measurement*, 46(6), 1818-1827.
- Casati, R., Wei, X., Xia, K., Dellasega, D., Tuissi, A., Villa, E., & Vedani, M. (2014). Mechanical and functional properties of ultrafine grained Al wires reinforced by nano-Al₂O₃ particles. *Materials & Design*, 64, 102-109.
- Cingöz, U. C., Kisasöz, B. Ö., Bayrak, Y., & Kisasöz, A. (2025). Synergetic effect of Y₂O₃ rare-earth oxide and in-situ phases on corrosion and wear properties of AlSi10Mg aluminium matrix composites produced by hot pressing. *Ceramics International*. 51(24), 43111-43124
- Davis, J. R. (1999). *Corrosion of aluminum and aluminum alloys*: Asm International.
- De Gouveia, G. L., Kakitani, R., Gomes, L. F., Afonso, C. R. M., Cheung, N., & Spinelli, J. E. (2019). Slow and rapid cooling of Al–Cu–Si ultrafine eutectic composites: Interplay of cooling rate and microstructure in mechanical properties. *Journal of Materials Research*, 34(8), 1381-1394.
- German, R. M. (2005). *AZ of powder metallurgy. (No Title)*.
- Gökmeşe, H., & Bostan, B. (2013). AA 2014 Alaşımında Presleme ve Sinterlemenin Gözenek Morfolojisi ve Mikroyapısal Özelliklere Etkileri. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 1(1), 1-8.
- Gräning, T., Rieth, M., Leiste, H., Duerrschabel, M., & Möslang, A. (2022). On the mechanical alloying of novel austenitic dual-precipitation strengthened steels. *Materials & Design*, 213, 110316. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110316>

- 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. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(2), 657-669.
- Housaer, F., Beclin, F., Touzin, M., Tingaud, D., Legris, A., & Addad, A. (2015). Interfacial characterization in carbon nanotube reinforced aluminum matrix composites. *Materials Characterization*, 110, 94-101.
- Jafari, M., Enayati, M. H., Abbasi, M. H., & Karimzadeh, F. (2010). Compressive and wear behaviors of bulk nanostructured AA2024 alloy. *Materials & Design*, 31(2), 663-669. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.08.020>
- Jeurgens, L. P. H., Sloof, W. G., Tichelaar, F. D., & Mittemeijer, E. J. (2002). Structure and morphology of aluminium-oxide films formed by thermal oxidation of aluminium. *Thin solid films*, 418(2), 89-101. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(02\)00787-3](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(02)00787-3)
- Jiang, Y., Ding, H., Cai, M., Chen, Y., Liu, Y., & Zhang, Y. (2019). Investigation into the hot forming-quenching integrated process with cold dies for high strength aluminum alloy. *Materials Characterization*, 158, 109967.
- Khan, R. (2013). Anisotropic deformation behavior of AA2024T351 aluminum alloy. *The Journal of Engineering Research [TJER]*, 10(1), 80-87.
- Krüger, M., Schmelzer, J., & Helmecke, M. (2016). Similarities and differences in mechanical alloying processes of V-Si-B and Mo-Si-B powders. *Metals*, 6(10), 241.
- Kubota, M. (2007). Properties of nano-structured pure Al produced by mechanical grinding and spark plasma sintering. *Journal of alloys and compounds*, 434, 294-297.
- Kumar, H. P., & Xavier, M. A. (2014). Graphene reinforced metal matrix composite (GRMMC): a review. *Procedia engineering*, 97, 1033-1040.
- Kumar, H. P., & Xavier, M. A. (2017). Assessment of mechanical and tribological properties of Al 2024-SiC-graphene hybrid composites. *Procedia engineering*, 174, 992-999.
- Kumar, K. P., Krishna, M. G., Rao, J. B., & Bhargava, N. (2015). Fabrication and characterization of 2024 aluminium-High entropy alloy composites. *Journal of alloys and compounds*, 640, 421-427.
- Lamoglia, M. S., Gonçalves, P. H., Pontes, Á. M. P., Serrano, L. B., Silva, G., & Silva, A. A. A. P. d. (2022). Effect of Process control agents on Fe-15at.% Nb powder during mechanical alloying. *Materials Research*, 25, e20210318. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0318>

- 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.
- Mao, D., Meng, X., Xie, Y., Yang, Y., Xu, Y., Qin, Z., Huang, Y. (2022). Strength-ductility balance strategy in SiC reinforced aluminum matrix composites via deformation-driven metallurgy. *Journal of alloys and compounds*, 891, 162078.
- Moustafa, S. (2011). Hot Forging and Hot Pressing of AlSi Powder Compared to Conventional Powder Metallurgy Route. *Materials Sciences and Applications*, 02, 1127-1133.
- Mrówka-Nowotnik, G., & Sieniawski, J. (2013). Analysis of intermetallic phases in 2024 aluminium alloy. *Solid State Phenomena*, 197, 238-243.
- Mu, D., Jiang, Z., Zhang, Z., Liang, J., Wang, J., Zhang, D., & Xian, Q. (2022). Microstructural evolution, precipitation and mechanical properties of ultrafine-grained and coarse-grained 2024 aluminum alloys fabricated by powder metallurgy. *Journal of Materials Research*, 37(3), 692-704.
- Neikov, O. D., Naboychenko, S., Yefimov, N., & Neikov, O. (2019). Mechanical alloying. *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders*, 2, 91-124.
- Pickens, J. (1981). Aluminium powder metallurgy technology for high-strength applications. *Journal of Materials Science*, 16(6), 1437-1457.
- Pul, M. (2019). Karbon nanotüp (cnt) ve nano grafen (g) takviyeli al 2024 kompozitlerin vorteks yöntemiyle üretilerek aşınma ve işlenebilme özelliklerinin incelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(1), 370-382.
- Rahimian, M., Parvin, N., & Ehsani, N. (2010). Investigation of particle size and amount of alumina on microstructure and mechanical properties of Al matrix composite made by powder metallurgy. *Materials Science and Engineering: A*, 527(4), 1031-1038. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.09.034>
- Ramesh, B., & Swamy, R. (2018). Study of dry sliding wear properties for AL-2024 based metal matrix composites fabricated by stir casting method. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 6(3), 438-446.
- Salur, E., Acarer, M., & Nazik, C. (2021). Mekanik Alaşımlama Süresinin Toz Metalurjisi ile Üretilen AA7075 Matrisli Nanokompozit Malzemelerinin Sertliklerine Etkisi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(3), 2218-2231.
- 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.

- Stergioudi, F., Prospathopoulos, A., Farazas, A., Tsirogiannis, E. C., & Michailidis, N. (2022). Mechanical Properties of AA2024 Aluminum/MWCNTs Nanocomposites Produced Using Different Powder Metallurgy Methods. *Metals*, 12(8), 1315. <https://www.mdpi.com/2075-4701/12/8/1315>
- Suryanarayana, C. (2001). Mechanical alloying and milling. *Progress in Materials Science*, 46(1-2), 1-184.
- Taneroğlu, H., Akar, N., & Kılıçlı, V. (2013). Tikso-Döküm Yöntemiyle Üretilen AA2024 Alaşımının Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(4).
- Taşkın, A., & Şenel, M. C. (2024). Tribological Properties and Microstructures of Tungsten Carbide and Few-Layer Graphene-Reinforced Aluminum-Based Composites. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 77(2), 445-456.
- Toozandehjani, M., Matori, K. A., Ostovan, F., Abdul Aziz, S., & Mamat, M. S. (2017). Effect of Milling Time on the Microstructure, Physical and Mechanical Properties of Al-Al₂O₃ Nanocomposite Synthesized by Ball Milling and Powder Metallurgy. *Materials*, 10(11), 1232. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1996-1944/10/11/1232>
- Torralba, J. D., Da Costa, C., & Velasco, F. (2003). P/M aluminum matrix composites: an overview. *Journal of Materials Processing Technology*, 133(1-2), 203-206.
- Varol, T., Canakci, A., & Ozsahin, S. (2018). Prediction of effect of reinforcement content, flake size and flake time on the density and hardness of flake AA2024-SiC nanocomposites using neural networks. *Journal of alloys and compounds*, 739, 1005-1014. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.256>
- Vitjaz, P., Lovshenko, F., & Lovshenko, G. (1998). Mechanical alloyed alloys based on aluminium and copper. *Minsk (Byelorussia): Byelorusskaja Nauka*.
- Wang, G. (2022). Superplastic Forming (SPF) of Complex Sheet Metal Parts and Structures. In F. G. Caballero (Ed.), *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys* (pp. 417-434).
- Wang, X., Scudino, S., & Eckert, J. (2013). Production and characterization of Al 2024 matrix composites reinforced with β -Al₃Mg₂ complex metallic alloy particles. *MRS Online Proceedings Library*, 1517(1), 405.
- Wang, Z., K G, P., Zhang, W. W., Scudino, S., & Eckert, J. (2018). Removing the oxide layer in a nanostructured aluminum alloy by local shear deformation between nanoscale phases. *Powder Technology*, 343.
- Wendel, J., Manchili, S. K., Hryha, E., & Nyborg, L. (2020). Sintering behaviour of compacted water-atomised iron powder: effect of initial state and processing conditions. *Powder Metallurgy*, 63(5), 338-348.

- Xavior, M. A., Kumar, H. P., & Kumar, K. A. (2018). Tribological studies on AA 2024–graphene/CNT nanocomposites processed through powder metallurgy. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 6588-6596.
- Xie, Y., Meng, X., Li, Y., Mao, D., Wan, L., & Huang, Y. (2021). Insight into ultra-refined grains of aluminum matrix composites via deformation-driven metallurgy. *Composites Communications*, 26, 100776.
- Yakovtseva, O. A., Mochugovskiy, A. G., Prosviryakov, A. S., Bazlov, A. I., Emelina, N. B., & Mikhaylovskaya, A. V. (2024). The Microstructure and Properties of Al–Mn–Cu–Zr Alloy after High-Energy Ball Milling and Hot-Press Sintering. *Metals*, 14(3), 310. <https://www.mdpi.com/2075-4701/14/3/310>
- Yuan, X., Qu, X., Yin, H., Yan, Z., & Tan, Z. (2019). Effects of Compaction Velocity on the Sinterability of Al-Fe-Cr-Ti PM Alloy. *Materials*, 12(18), 3005. <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/18/3005>
- Zahmatkesh, B., Enayati, M. H., & Karimzadeh, F. (2010). Tribological and microstructural evaluation of friction stir processed AA2024 alloy. *Materials & Design*, 31(10), 4891-4896. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.054>