

**T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN AISi10Mg
ALAŞIMININ OPTİMUM ÇÖKELME PARAMETRELERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEKLİSANS TEZİ

İLYAS GÖRGÜLÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Zülküf BALALAN**

BİNGÖL-2025

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez konumun belirlenmesi ve gerçekleştirilmesi aşamasında kıymetli bilgilerini benimle paylaşan, her türlü yardımlarını ve bilgi birikimini esirgemeyen, çalışmalarımın tamamlanabilmesi için gerekli desteği veren değerli hocam Doç. Dr. Zülküf Balalan'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarımın her aşamasında yardımlarını esirgemeyen, karşılaştığım her sorunla yakından ilgilenen, vermiş olduğu tavsiyelerle beni aydınlatan Doç. Dr. Özgür Özgün'e ve Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi'nde analizlerimin gerçekleştirilmesi konusundaki yardımlarından dolayı Doç. Dr. Ömer Ekinci'ye teşekkürü borç bilirim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi her türlü konuda yanımda olan kıymetli aileme ve desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen kıymetli eşim Ayşe Görgülü'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İlyas GÖRGÜLÜ

Bingöl 2025

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI.....	3
2.1. Alüminyum.....	3
2.1.1. Alüminyumun Özellikleri.....	4
2.1.2. Alüminyum Kullanım Alanları.....	6
2.2. Silisyum.....	7
2.3. Magnezyum.....	9
2.4. Alüminyum Alaşımları.....	10
2.4.1. Dövme Alaşımları.....	11
2.4.2. Döküm Alaşımları.....	11
2.5. Al-Si-Mg Alaşımları.....	11
2.5.1. Al-Si-Mg Alaşımlarının Üretim Yöntemleri.....	12
3. TOZ METALURJİSİ.....	14
3.1. Toz Metalurjisi Üretim Aşamaları.....	17
3.1.1. Tozların Hazırlaması.....	18
3.1.2. Mekanik Toz Üretimi.....	19
3.1.3. Kimyasal Yöntemler	20
3.1.4. Elektrolizle Üretim Yöntemi	21
3.1.5. Atomizasyon Üretim Yöntemi.....	21
3.1.6. Karıştırma.....	22
3.1.7. Presleme İşlemi.....	24
3.1.7.1. Tek Yönlü Presleme	24

3.1.7.2. Çift Yönlü Presleme	25
3.1.7.3. Sıcak Presleme.....	26
3.1.7.4. Sıcak İzo-Statik Presleme.....	28
3.1.8. Sinterleme İşlemi.....	29
3.1.8.1. Basınç Sinterleme	31
3.1.8.2. Spark Plazma Sinterleme.....	32
3.1.9. İkincil İşlemler.....	36
3.2. Toz Metalurjisi Yönteminin Avantajları.....	37
3.3. Toz Metalurjisi Yönteminin Dezavantajları.....	37
3.4. Toz Metalurjisinin Kullanım Alanları.....	37
4. KAYNAK ÖZETLERİ.....	39
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	50
5.1. Toz ve Malzemelerin Hazırlanması.....	50
5.1.1. Kullanılan Malzemeler	50
5.2. Presleme ve Sinterleme	51
5.3. Metalografik Hazırlık	53
5.4. Yaşlandırma Ve Çözeltiye Alma	55
5.5. Mikroyapı İncelemeleri.....	55
5.5.1. Taramalı Elektronmikroskopu (SEM-EDS).....	55
5.5.2. XRD Analizi.....	57
5.5.3. Üç Nokta Eğme Testi.....	57
5.5.4. Mikrosertlik Ölçümü.....	58
5.5.5. Yoğunluk Ölçümü.....	59
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	60
6.1. Yoğunluk İncelemesi.....	60
6.2. Kullanılan Tozların Karakterizasyonu.....	62
6.3. Sinterlenen ve Yaşlandırılan Numunelerin Karakterizasyonu.....	64
7. SONUÇLAR	74
KAYNAKLAR.....	75

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

°C	: Derece Celcius
%	: Yüzde
vb	: Ve Benzeri
g	: Gram
kg	: Kilogram
km	: Kilometre
m ³	: Metreküp
mm	: Milimetre
l	: Litre
µm	: Mikrometre
kN	: Kilonewton
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
MPa	: Basınç
rpm	: Revolutions Per Minute
Si	: Silisyum
Mg	: Magnezyum
Mn	: Mangan
Fe	: Demir
Cu	: Bakır
Ni	: Nikel
Al	: Alüminyum
Ti	: Titanyum
Zn	: Çinko
Â	: İyon Çapı
N	: Newton
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
TM	: Toz Metalurijisi
HP	: Sıcak Pres
HIP	: Sıcak İzostatik Pres

GPS	: Gaz Basınç Sinterleme
SPS	: Spark Plazma Sinterleme
Eİ	: Eklemeli İmalat
SKİ	: Sürtünme Karşılaştırma İşlemi
SLE	: Seçici Lazer Ergitme
HCF	: Yüksek Döngü Yorgunluğu
UTS	: Nihai Çekme Mukavemeti
XRD	: X Işını Difraksiyonu
HV	: Mikrosertlik

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Toz metalurjisi proses adımları.....	13
Şekil 3.1.	Toz metalurji yöntemiyle üretilmiş parçalara örnekler	16
Şekil 3.2.	Toz metalurji yöntemi üretim evreleri.....	18
Şekil 3.3.	Mekanik yöntemlerle toz üretimi.....	19
Şekil 3.4.	Kimyasal yöntemlerle demir tozu üretimi.....	20
Şekil 3.5.	Elektroliz yöntemiyle toz üretimi.....	21
Şekil 3.6.	Atomizasyon yöntemiyle toz üretimi.....	22
Şekil 3.7.	Bilyalı değirmen.....	23
Şekil 3.8.	Tozların karıştırıldığı turbula.....	23
Şekil 3.9.	Presleme basamakları.....	24
Şekil 3.10.	Tek yönlü preslemede yoğunluk dağılımı ve kalıp şematik görünümü	25
Şekil 3.11.	Çift yönlü preslemede yoğunluk dağılımı ve kalıp şematik görünümü	26
Şekil 3.12.	Sıcak preslemenin şematik görünümü.....	26
Şekil 3.13.	Sıcak izo-statik presleme.....	28
Şekil 3.14.	Sinterleme evresinin şeması.....	30
Şekil 3.15.	Sinterleme çeşitleri.....	30
Şekil 3.16.	Sıcak pres mekanizması.....	31
Şekil 3.17.	Sıcak izostatik pres mekanizması.....	32
Şekil 3.18.	Spark plazma sinterleme yöntemi ile üretilebilen malzeme grupları.	33
Şekil 3.19.	Spark plazma sinterleme (SPS) sisteminin şematik gösterimi.....	35
Şekil 3.20.	Partiküller arasında darbeli akım akışı.....	36
Şekil 3.21.	Toz metalürjisinin kullanım alanları.....	38
Şekil 5.1.	Deneylerde kullanılan AlSi10Mg tozunun SEM görüntüsü.....	50
Şekil 5.2.	Metal tozun görüntüsü.....	51
Şekil 5.3.a	Grafit kalıp.....	52
Şekil 5.3.b	Hassas terazi.....	52
Şekil 5.3.c	Manuel pres makinesi.....	52
Şekil 5.3.d	Otomatik pres makinesi.....	52

Şekil 5.4.	SPS makinesi.....	53
Şekil 5.5.	SPS’de 40*10*4 mm ölçülerinde hazırlanan numuneler.....	54
Şekil 5.6.	Zımpara ve parlatma makinesi.....	54
Şekil 5.7.	Isıl işlem fırını.....	55
Şekil 5.8.	Plazma yüzey temizleme cihazı.....	56
Şekil 5.9.	SEM/EDS mikroskobu.....	56
Şekil 5.10.	XRD cihazı.....	57
Şekil 5.11.	Üç nokta eğme test cihazı.....	58
Şekil 5.12.	Vickers mikrosertlik ölçüm cihazı.....	59
Şekil 6.1.	Üretilen alaşımın XRD kırınım desenleri.....	62
Şekil 6.2.	AlSi10Mg tozundan alınan SEM fotoğrafı.....	62
Şekil 6.3.	AlSi10Mg tozundan alınan EDS analizi.....	63
Şekil 6.4.a-b	AlSi10Mg tozundan alınan SEM fotoğrafı.....	65
Şekil 6.5.	AlSi10Mg alaşım tozunun mikrosertlik grafiği.....	69
Şekil 6.6.	Yaşlandırılmış numunenin mikrosertlik grafiği.....	69
Şekil 6.7.	Sinterlenen, Çözeltiye alınan ve yaşlandırılan numunelerin eğilme grafiği.....	70
Şekil 6.8.a.	Sinterlenmiş numunenin kırık yüzey SEM görüntüsü.....	72
Şekil 6.8.b.	Çözeltiye alınmış numunenin kırık yüzey SEM görüntüsü.....	72
Şekil 6.8.c.	Yaşlandırılmış numunenin kırık yüzey SEM görüntüsü.....	73

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 6.1. Üretilen alaşımanın teorik ve ölçülen yoğunluk değerleri	61
Tablo 6.2. AlSi10Mg tozundan alınan EDS analizi.....	63

TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN AlSi10Mg ALAŞIMININ OPTİMUM ÇÖKELME PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Bu çalışmada, AlSi10Mg alaşımları, Spark Plazma Sinterleme (SPS) yöntemi kullanılarak argon atmosferinde, 520 °C sıcaklık ve 35 MPa basınç altında, 4 dakikalık bekleme süresiyle işlenerek üretilmiştir. Üretilen AlSi10Mg alaşımlarının sinterlenmiş, çözeltiye alınmış ve yaşlandırılmış numuneleri üzerinde mikroyapı, mekanik özellikler ve yoğunluk analizleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemeleri; X-ışını difraksiyonu (XRD), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve SEM/EDS analizleri ile yapılmıştır. Mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla üç nokta eğilme testi ve mikrosertlik ölçümleri uygulanmıştır. Yaşlandırılmış numunelerde, her bir saatlik aralıklarla yapılan sertlik ölçümlerinde, sertlik değerlerinin doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek mikrosertlik değeri 13. saatte elde edilmiştir. Eğilme dayanımı açısından da en yüksek değerler yaşlandırılmış numunelerde ölçülmüştür. Ayrıca, sinterlenen numunelerde %98 oranında yüksek bağıl yoğunluk değerlerine ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum, alaşım, SPS, toz metalurjisi.

INVESTIGATION OF OPTIMUM DEPOSITION PARAMETERS OF AlSi10Mg ALLOY PRODUCED BY POWDER METALLURGY METHOD

ABSTRACT

In this study, AlSi10Mg alloys were produced using the Spark Plasma Sintering (SPS) method under an argon atmosphere at a temperature of 520 °C, a pressure of 35 MPa, and a holding time of 4 minutes. Microstructural, mechanical, and density analyses were carried out on the sintered, solution-treated, and aged specimens of the produced AlSi10Mg alloys. Microstructural examinations were conducted using X-ray diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), and SEM/EDS analyses. To determine the mechanical properties, three-point bending tests and microhardness measurements were performed. In the aged specimens, hardness measurements taken at one-hour intervals revealed a linear increase in hardness values, with the highest microhardness value obtained at the 13th hour. The highest bending strength values were also recorded in the aged samples. Additionally, the sintered samples achieved high relative density values of up to 98%.

Keywords: Aluminum, alloy, SPS, powder metallurgy.

1. GİRİŞ

Alüminyumun tarihsel kullanımı 1800'lü yıllara dayanmaktadır (Töre, 2012). İngiliz bilim insanı Sir Humphrey Davy tarafından 1807 yılında adlandırılan alüminyum, o dönemde saf halde elde edilememiştir (The Aluminium Association, b.t.; Yılmaz, 2019). 1821 yılında Fransa'nın Les Baux köyünde %52 oranında alüminyum oksit içeren kırmızı renkli bir toprak bulunmuş ve bu maden, köyün adından esinlenilerek "boksit (BAUXITE)" olarak adlandırılmıştır (Töre). Davy'nin çalışmalarından yaklaşık 20 yıl sonra, Danimarkalı bilim insanı Hans Christian Oersted, alüminyum klorür ile potasyum amalgamını reaksiyona sokarak ilk saf alüminyum partiküllerini elde etmeyi başarmıştır (The Aluminium Association, b.t.; Yılmaz, 2019). Ardından, 1827 yılında Alman kimyager Friedrich Wöhler, potasyum ile su içermeyen alüminyum klorürü tepkimeye sokarak toz formunda alüminyum üretmiştir (Töre, 2012). Wöhler'den dokuz yıl sonra, Fransız kimyacı Henri Sainte-Claire Deville, üretim sürecinde sıvı potasyum yerine daha ekonomik olan sodyumu kullanarak yıllık 2 tonluk alüminyum üretim kapasitesine ulaşmıştır

1845 yılında Friedrich Wöhler, alüminyumun yoğunluğunu 2.700 kg/m^3 olarak tespit etmiştir (Töre, 2012). Aynı yıl, Wöhler alüminyum klorür buharını sıvı potasyum ile reaksiyona sokarak daha fazla miktarda saf alüminyum elde etmiş ve bu süreçte alüminyumun birçok fiziksel özelliğini de belirlemiştir (Yılmaz, 2019). 1854 yılında ise Henri Sainte-Claire Deville, Fransa'da ilk ticari alüminyum üretimini gerçekleştirmiştir. O dönemde alüminyumun, altından daha değerli bir metal olduğu bilinmekteydi (Töre, 2012).

Alüminyumun geniş kitlelerle tanışması, 1855 yılında Paris'te düzenlenen "Paris Dünya Sergisi" ile gerçekleşmiştir (Yüksel, 2003). Bu malzeme, yaklaşık iki asırdır mühendislik alanında en önemli yapı malzemelerinden biri olma özelliğini sürdürmektedir (Töre, 2012). 1886 yılında Paul Héroult ve Charles Hall, birbirlerinden habersiz olarak alüminyum üretiminde elektroliz yöntemini keşfetmişlerdir. Bu yöntem, Héroult-Hall yöntemi olarak adlandırılmış ve modern alüminyum üretiminin temelini oluşturmuştur. 1888 yılında Fransa, İsviçre ve Amerika'da ilk alüminyum endüstrileri kurulmuştur. Takip eden yılda, 1889'da, Avusturyalı bilim insanı F. Bayer büyük ölçekli alüminyum üretimi için "Bayer

işlemi"ni geliştirmiştir. Bu yöntemle, boksit madeninden etkin bir şekilde alüminyum elde edilmektedir (Töre, 2012).

Yer kabuğunda %8 oranıyla en bol bulunan üçüncü element alüminyumdur. Ancak doğada saf halde bulunmadığı ve genellikle boksit minerali ($Al_2O_3 \cdot nH_2O$) içinde yer aldığı için, keşfi diğer elementlere göre daha geç gerçekleşmiştir. Kullanılmaya başlandığı andan itibaren sahip olduğu avantajlı özellikler sayesinde alüminyumun kullanım alanı hızla genişlemiştir. Günümüzde ise alüminyum, dünyada en fazla tüketilen demir dışı metal olma özelliğini taşımaktadır (Totten ve MacKenzie, 2003; Yıldırım, 2006).

Mevcut boksit cevheri rezervlerine bakıldığında, bu kaynakların yaklaşık 3000 yıl yetecek düzeyde olduğu tahmin edilmektedir. Ayrıca, mevcut tüketim hızının yaklaşık iki katı oranında yeni boksit yataklarının araştırıldığı ve keşfedildiği raporlanmaktadır. Alüminyumun ana kaynağı olan boksit cevheri, dünyanın birçok bölgesinde yaygın olarak bulunmaktadır. Özellikle Çin, Malezya, Hindistan, Endonezya, Amerika Birleşik Devletleri, Rusya, Avusturya, Macaristan, İtalya, Brezilya ve Fransa gibi ülkelerde yoğun şekilde boksit madenciliği yapılmaktadır (Atay, 2017).

Bu çalışmada, ön alaşımlı AlSi10Mg tozu kullanılarak toz metalurjisi (T/M) yöntemi ve Spark Plazma Sinterleme (SPS) tekniği ile Al matrisli alaşımlar üretilmiştir. Üretilen numunelere çözeltiliye alma ve yaşlandırma işlemlerini içeren ısıtma işlemleri uygulanmıştır. Numuneler; mekanik özellikleri, mikroyapısal özellikleri ve yoğunlukları açısından karakterize edilmiştir. Elde edilen bulgular, benzer çalışmalarla karşılaştırılarak literatüre katkı sağlanması hedeflenmiştir.

2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

2.1. Alüminyum

Saf alüminyumun çekme mukavemeti yaklaşık 49 MPa seviyesindeyken, Si, Mg, Cu ve Ni gibi alaşım elementleri ile takviye edildiğinde bu değer 700 MPa'ya kadar yükseltilebilmektedir. Bu durum, alüminyumun yalnızca hafif değil, aynı zamanda yüksek dayanım özelliklerine sahip bir mühendislik malzemesi olmasını sağlamaktadır. Yoğunluğu demirin yaklaşık üçte biri kadar olan alüminyum, uygun alaşım kombinasyonları ile demire benzer mekanik mukavemet değerlerine ulaşabilmekte ve bu özelliği sayesinde yapısal uygulamalarda tercih edilmektedir. Elektriksel iletkenlik açısından değerlendirildiğinde, alüminyum bakırın yaklaşık %65'i oranında iletkenliğe sahiptir. Ancak düşük yoğunluğu nedeniyle çeliğe kıyasla daha yüksek özgül dayanım sunar; bu da malzemenin hafiflik ve dayanım açısından daha verimli kullanılmasına olanak tanır. Alüminyum alaşımları, özellikle hafiflik ve yüksek dayanım kombinasyonları sayesinde havacılık, uzay ve otomotiv sektörlerinde yakıt tasarrufu ve verimlilik sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, bakırdan sonra en yüksek elektrik iletkenliğine sahip metal olması nedeniyle, elektrikli araçlar ve enerji iletim sistemlerinde de stratejik bir malzeme konumundadır (Atay, 2017). Bu avantajları sayesinde alüminyum, sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği hedeflerine yönelik uygulamalarda öncelikli bir tercih haline gelmektedir.

Demir ve çelikten sonra dünya genelinde en fazla kullanılan metal olan alüminyum, sahip olduğu çok sayıda üstün özellik sayesinde çeşitli endüstrilerde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Alüminyum; yüksek işlenebilirlik, iyi dökülebilirlik, düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci ile birlikte ısı ve elektrik iletkenliği gibi avantajlı fiziksel ve kimyasal özellikler sunmaktadır. Ayrıca, yaşlandırma yoluyla mekanik dayanımının artırılabilmesi, bu malzemenin mühendislik uygulamalarındaki fonksiyonelliğini daha da ileri taşımaktadır. Bu kapsamlı özellik profili, alüminyumun elektrik-elektronik, tarım, inşaat, gıda, otomotiv ve havacılık gibi birçok sektörde tercih edilmesini sağlamaktadır. Özellikle hafifliği sayesinde enerji verimliliği sağlayarak çevre dostu üretim süreçlerine katkıda

bulunmaktadır. Elektrikli araçlardan havacılık endüstrisine kadar uzanan geniş uygulama alanlarında, alüminyumun dayanıklılığı ve işlenebilirliği, modern teknolojilerin gelişiminde stratejik bir rol oynamaktadır.

Alüminyumun kolaylıkla geri dönüştürülebilmesi, çevresel sürdürülebilirliği ön planda tutan endüstriler açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır (Bolton, 1993; Sharma ve ark., 2005). Bu özellik, hem enerji tasarrufu hem de hammadde kullanımının azaltılması açısından ekonomik ve çevreci bir çözüm sunmaktadır. Tüm bu avantajlar, alüminyumun gelecekte daha geniş uygulama alanlarında kullanılacağını ve sürdürülebilir üretim süreçlerine önemli katkılar sağlayacağını göstermektedir.

Periyodik tablonun 3A grubunda yer alan alüminyum, 13 atom numarası ve 26,9815 g/mol atom ağırlığı ile öne çıkan bir elementtir. İyon çapı 0,86 Å, atom çapı ise 1,43 Å olan alüminyum, kompakt yapısı sayesinde çeşitli mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir. Yüzey merkezli kübik (YMK) kristal yapısı, yüksek mekanik dayanım ile işlenebilirliği bir arada sunar. Ayrıca, alüminyum 658 °C'ye kadar kararlı bir yapısını koruyarak bu sıcaklıkta herhangi bir yapısal dönüşüm geçirmez. Bu özellikler, alüminyumu hafiflik ve dayanıklılığın kritik olduğu endüstrilerde vazgeçilmez bir malzeme haline getirmektedir (Sarsılmaz, 2008).

2.1.1. Alüminyumun Özellikleri

Yüksek saflığa sahip alüminyum, teknik saflıktaki alüminyuma kıyasla daha yumuşak ve sünek bir yapıya sahiptir. Ancak bu artan süneklik ve işlenebilirlik, malzemenin mekanik dayanımında belirgin bir azalmaya neden olmaktadır. Bu nedenle, yüksek saflıktaki alüminyum genellikle yüksek mukavemet gerektirmeyen, ancak kolay şekillendirmenin öncelikli olduğu özel uygulamalarda tercih edilmektedir. Teknik saflıktaki alüminyum ise daha yüksek mekanik dayanım sunarak yapısal ve endüstriyel uygulamalar için daha uygun bir malzemedir (Sarsılmaz, 2008).

Alüminyum, gümüş renkli, düşük yoğunluklu ($2,7 \text{ g/cm}^3$) yapısı ve üstün fiziksel-mekanik özellikleri sayesinde çok çeşitli ticari ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir metaldir. Hafifliği ve yüksek performansı bir arada sunan alüminyum,

modern mühendislik ve tasarım dünyasının vazgeçilmez malzemelerinden biridir. Özellikleri şu şekilde özetlenebilir:

Hafiflik ve yüksek mukavemet: Alüminyum, demir-çeliğin yaklaşık üçte biri ağırlığında olmasına rağmen, alaşımları kullanıldığında çelik ve titanyum gibi metallerle benzer mekanik performans sergileyebilir. Bu özellik, alüminyumun taşıt üretiminden uzay teknolojilerine kadar geniş bir uygulama alanında tercih edilmesini sağlar (Sarsılmaz, 2008; Başer, 2013).

Kolay şekillendirilebilme: Düşük erime noktası (660°C) ve yüksek sünekliği sayesinde, alüminyum kolayca işlenip şekillendirilebilir. Yüksek işleme kabiliyeti, karmaşık geometrilerin üretiminde alüminyumu ideal bir malzeme haline getirir (Sarsılmaz, 2008; Başer, 2013).

Üstün korozyon direnci: Alüminyumun yüzeyinde doğal olarak oluşan Al_2O_3 oksit tabakası, malzemeyi korozyona karşı etkin biçimde korur. Bu sayede, inşaat, paketlenme ve otomotiv gibi uzun ömür ve dayanıklılık gerektiren sektörlerde güvenle kullanılabilir (Sarsılmaz, 2008; Başer, 2013).

Kimyasal direnç: Alüminyum, ışık, koku ve kimyasallara karşı bariyer oluşturarak hijyenik bir ortam sağlar. Bu özelliği, özellikle gıda ambalajı ve tıbbi ekipman gibi hassas uygulamalarda büyük önem taşır (Sarsılmaz, 2008; Başer, 2013).

Enerji tasarrufu ve çevresel avantajlar: Alüminyumun hafifliği, enerji tüketiminin azalmasında kritik rol oynar. Örneğin, otomobillerde 100 kg ağırlık azalımı, 100 km'de yaklaşık 0,315 litre yakıt tasarrufu ve kilometre başına 8 gram daha az CO_2 emisyonu sağlar. Ayrıca, geri dönüştürülebilir olması üretimde kullanılan enerjinin yalnızca %5'ini gerektirir ve bu da çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkı sunar (Sarsılmaz, 2008; Başer, 2013).

Alaşımsız alüminyum, sünek yapısı ve orta düzey mukavemetiyle dikkat çekerken, yüksek korozyon direncine sahiptir. Uygun alaşım elementleri (örneğin Cu, Mg, Mn, Si) eklendiğinde ve gerekli durumlarda ısıtıl işlem uygulandığında mukavemeti kayda değer

şekilde artırılabilir. Dövme ve döküm form üretiminde yaygın kullanılan alüminyum, esneklik ve dayanıklılık gerektiren uygulamalar için ideal bir malzeme çözümü sunar (Sarsılmaz, 2008; Başer, 2013).

2.1.2. Alüminyum Kullanım Alanları

Alüminyum, metaller, bileşikler ve alaşımlar arasında kullanım alanı en geniş olan malzemelerden biridir. Pencerelerden mutfak gereçlerine, uçaklardan araba egzozlarına, korkuluklardan dekoratif eşyalara kadar uzanan çeşitlilik, alüminyumun esnekliğini, dayanıklılığını ve işlenebilirliğini gözler önüne sermektedir. Bu özellikler bir araya geldiğinde alüminyum, birçok ürün için adeta “var olmayan Hint kumaşı” gibi benzersiz bir malzeme haline gelmiştir. Doğrudan boksit cevherinden elde edilen ve endüstriyel geri dönüşüm uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılan alüminyum, %100 geri dönüştürülebilir olmasıyla çevre dostu bir seçenek sunar. Ayrıca, alüminyumun işlenebilirliği oldukça yüksektir; insan saçından üç kat daha ince folyolar ve dayanıklı teller üretilebilir. Benzer metallere göre daha düşük maliyetli olan alüminyum, elektro kaplama işlemleri nedeniyle maliyetinin %20-40’ını elektrik tüketimi oluşturmalarına rağmen ekonomik bir malzeme olarak öne çıkar. Bu yönüyle demirden sonra en fazla kullanılan metal olmayı başarmıştır. Alüminyumun en sık kullanıldığı alanlar arasında motor gövdeleri, jantlar, şasi, tabletler, bilgisayarlar, cep telefonları, televizyonlar gibi elektronik cihazlar, beyaz eşya, gıda ambalajları, raflar, kablolar, yelkenler, gemiler ve pencereler yer alır. Günlük yaşamdan yüksek teknolojiye kadar geniş bir yelpazede karşımıza çıkan alüminyum, dayanıklılığı, hafifliği ve sürdürülebilirliği bir arada sunarak modern endüstrilerin vazgeçilmez bir parçası olmayı sürdürmektedir (Eskier, 2017).

Alüminyum alaşımları, yüksek özgül mukavemetleri (mukavemet/yoğunluk oranı), aşınma ve korozyon direnci, etkili ısı iletkenliği, yüksek elektrik iletkenliği, kolay işlenebilirlik, dökülebilirlik ve çevre dostu yapılarıyla otomotiv ve havacılık endüstrilerinde vazgeçilmez bir konuma sahiptir. Bu alaşımlar, üretilen parçaların ağırlığını azaltarak enerji tasarrufu sağlama ve performansı artırma gibi avantajlar sunar. Hafiflik ve dayanıklılığın aynı anda sağlanması, alüminyum alaşımlarını diğer malzemelere karşı daha rekabetçi bir hale getirmiştir. Alüminyumun endüstriyel kullanımı, 1889’da mutfak sektörüne giriş yapmasıyla hız kazanmıştır. Daha sonra denizcilik ve havacılık alanlarında konserve

kutularından büyük borulara, köprü inşaatlarından hafif yapı sistemlerine kadar pek çok alanda yaygınlaşmıştır. 2000'li yıllarda ise alüminyum alaşımları, motor blokları, otomotiv jantları, doğalgaz sıvılaştırma üniteleri, savunma sanayi ve zırh üretiminde tercih edilen stratejik bir malzeme haline gelmiştir. Modern endüstrilerde bu kadar geniş bir kullanım alanına sahip olması, alüminyumun eşsiz özelliklerinin bir sonucudur ve bu özellikler gelecekte de yeni teknolojiler için ilham kaynağı olmaya devam edecektir (Campbell, 2003).

2.2. Silisyum

Silikon, dünyada en bol bulunan ikinci element olup, metal ve metal olmayan özellikler arasında bir köprü kuran yarı metalik bir elementtir. Kimyasal davranışı açısından metallere benzerlik gösterirken, fiziksel özellikleriyle benzersiz bir yapıya sahiptir. Kırılgan ve yarı iletken olması, onu elektronik ve endüstriyel uygulamalar için vazgeçilmez kılar. İlginç bir şekilde, silikonun elektrik iletkenliği sıcaklık arttıkça yükselir; bu durum, sıcaklık arttığında iletkenliği azalan metallerden farklı bir özellik olarak öne çıkar. Silikon, yüksek dayanıklılık ve performans gerektiren alaşımlarda sıkça kullanılır. Çelik, bronz ve pirinç gibi metal alaşımlarında önemli bir rol oynar ve bu alaşımlar birçok endüstriyel ürünün hammaddesi olarak karşımıza çıkar. Yapısal güçlendirme, ısı direnci ve işlenebilirlik gibi özellikleri sayesinde silikon, modern mühendislik uygulamalarında değerli bir malzeme haline gelmiştir. Elektronikten inşaat, otomotivden enerji sektörüne kadar geniş bir kullanım alanına sahip olan silikon, teknolojinin gelişiminde kilit bir unsur olarak varlığını sürdürmektedir (Eskier, 2017).

Özellikleri; Silikon, kimyasal sembolü "Si" ve atom numarası 14 olan bir elementtir. Mavi-gri metalik bir parlaklığa sahip, sert, narin ve kristalimsi yapısıyla dikkat çeker. 4 değerlik elektronuyla yarı iletken özellikler sergileyen silikon, kimyasal tepkimelere karşı genellikle kararlı bir yapı gösterir. Bu özellikleri, onu modern teknolojilerdeki yarı iletken uygulamaların temel unsurlarından biri haline getirmiştir. İlk kez 1823 yılında Jöns Jakob Berzelius tarafından saf halde elde edilip karakterize edilen silikon, o dönemde kimya bilimi açısından önemli bir adımı temsil etmiştir. Silikonun oksijen ile reaksiyonları sonucu oluşan oksitler, silikatlar olarak bilinen bir anyon ailesini oluşturur. Bu silikatlar, doğada geniş bir dağılım gösterir ve cam, seramik ve inşaat malzemeleri gibi birçok endüstriyel

ürünün temel bileşenleri arasında yer alır. Silikonun bu kadar çok yönlü olması, onu sadece bilimsel değil, aynı zamanda endüstriyel ve teknolojik anlamda da vazgeçilmez bir element yapmıştır (Kaşıkçıoğlu, 2024).

Silikon, evrende kütlece en yaygın sekizinci element olmasına rağmen, dünyada nadiren saf halde bulunur. Bunun yerine, gezegenimizin kabuğunun %90'ından fazlasını oluşturan silikat bileşikleri formunda yer alır. Bu durum, silikonu oksijenden sonra dünyada en bol bulunan ikinci element yapar (kütlece %28). Silikonun bu yaygınlığı, hem doğal süreçlerde hem de endüstriyel uygulamalarda merkezi bir rol oynamasını sağlar.

Saf bir element olarak silikon, yeryüzündeki yaşam döngüsüne de katkıda bulunur. Her yıl, yüzey sularına yaklaşık 240 teramol biyogenik silikon birikerek, ekosistemlerin devamlılığına destek olur. Bu biyogenik silikon, özellikle denizel ortamlarda, fitoplankton gibi mikroskobik canlıların kabuk yapılarında hayati bir bileşen olarak görev alır. Silikonun doğada bu kadar aktif bir döngüye sahip olması, onun sadece yer kabuğundaki dağılımıyla değil, aynı zamanda canlılar üzerindeki etkisiyle de önem taşıdığını göstermektedir (Treguer vd., 2006).

Alaşımlardaki Kullanım Alanları: Silikon, döküm performansını iyileştirmek ve sementit oluşumunu engellemek amacıyla erimiş dökme demire genellikle ferrosilikon veya silikokalsiyum alaşımları şeklinde eklenir. Erimiş demirdeki silikon, bir oksijen havuzu işlevi görerek metalin kimyasal dengesini sağlar ve malzemenin özelliklerini kontrol altında tutar. Bu nedenle, neredeyse tüm çelik türlerinde karbon oranını istenilen seviyede sınırlandırmak için silikonun varlığı kritik öneme sahiptir. Ferrosilikonun üretimi ve çelik sanayisindeki kullanımı, silikonun endüstriyel alandaki en dikkat çekici örneklerinden biridir. Dünya genelinde kullanılan silikonun yaklaşık %80'i bu tür alaşımlarda yer alır. Silikon, saf halde olmasa bile, çeliğin dayanıklılığını artırmak ve ferromanyetik özelliklerini optimize etmek için önemli bir katkı maddesidir. Özellikle iletken çelik üretiminde silikon, ciddi bir rol oynar ve bu alandaki başarısını, elektrik motorları ve transformatör çekirdekleri gibi yüksek performans gerektiren uygulamalarda kanıtlamaktadır. Silikonun bu kadar stratejik bir element haline gelmesi, endüstrinin ihtiyaçlarına yönelik eşsiz uyum yeteneğinin bir sonucudur (Kaşıkçıoğlu, 2024).

2.3. Magnezyum

Magnezyum, dünyada en bol bulunan elementler arasında yer alır ve bu özelliğiyle yer kabuğunun en yaygın 8. elementi ve en bol bulunan 6. metali olarak dikkat çeker. Beyaz gümüş renkte ve yapısal amaçlarla kullanılabilen en hafif metaldir. Düşük yoğunluğu sayesinde hafiflik ve sağlamlık açısından önemli bir avantaj sağlar. Saf magnezyum, yüksek korozyon direncine sahip olmasına rağmen demir, bakır veya nikel gibi elementlerle bir araya geldiğinde bu direnç zayıflayabilir. Genellikle magnezyum, alüminyum, manganez ve çinko gibi metallerle birleştirilerek yüksek mukavemet-ağırlık oranına sahip alaşımlar elde edilir. Bu alaşımlar, hafiflik gerektiren uygulamalarda büyük öneme sahiptir. Ayrıca magnezyum, sıcaklık değişimlerine karşı boyutsal kararlılık, titreşim sönümleme kapasitesi ve işlem sonrasında pürüzsüz bir yüzey bırakma gibi avantajlar sunar. Bu özellikler, magnezyumu hem endüstriyel hem de mühendislik uygulamaları için cazip bir seçenek haline getirir. Magnezyum, alüminyum ve bakır içeren alaşımlar sayesinde deniz mühendisliği ve gemi yapımında uzun yıllardır önemli bir rol oynamaktadır. Hafifliği, dayanıklılığı ve işlenebilirliği ile modern tasarımlarda vazgeçilmez bir malzeme olan magnezyum, yüksek performans gerektiren projelerde öne çıkmaktadır (Kawamura, 2013).

Alaşımlardaki Kullanım Alanları; Magnezyum, tıp ve sanayi gibi geniş bir yelpazede kullanılan önemli bir elementtir. Özellikle hafifliği, onu birçok sektörde tercih edilen bir malzeme yapmaktadır. Genellikle alaşım oluşturma ajanı olarak, farklı metallerle birleşerek özel özellikler kazandırılır. Magnezyum-alüminyum alaşımları, uçaklar, füzeler ve roket gövdeleri gibi hafiflik ve dayanıklılık gerektiren ürünlerde yaygın olarak kullanılır. Bunun yanı sıra, magnezyum, erimiş demir ve çelikten kükürtü arındırmak için de kullanılır. Magnezyum, özellikle uranyum gibi metallerin tuzdan arındırılması ve dökme demir üretimi gibi işlemlerde de önemli bir rol oynar. Ayrıca, titanyum, uranyum, berilyum ve zirkonyum gibi metallerin üretiminde indirgeyici bir ajan olarak görev yapar. Otomotiv sektöründe de magnezyum, hafiflik ve dayanıklılığı birleştiren alaşımlarla motor parçaları, şasi ve koltuklar gibi bileşenlerde kritik bir malzeme haline gelmiştir. Sanayide, magnezyum birçok sektörde ve üründe çeşitli karışımlar halinde kullanılmaktadır. Otomotiv koltuklarından, havai fişeklere, elektrikli ev aletlerinden laptaplara kadar geniş bir ürün yelpazesinde yer alır. Ayrıca, boya, plastik, tuğla, hayvan yemi, gübre, fotoğraf

flaşı, beyzbol sopası, kar ayakkabısı, mürekkep, ilaç ve uçak iniş takımları gibi farklı alanlarda da kullanımı mevcuttur. Bu çeşitlilik, magnezyumun endüstriyel süreçlerde ne kadar vazgeçilmez bir element olduğunu ve çok yönlü kullanım alanlarının sürekli arttığını gösterir (Eskier, 2017).

2.4. Alüminyum Alaşımları

Alüminyum alaşımları, içerdiği saflık düzeyine ve eklenen alaşım elementlerine göre farklı sınıflara ayrılır. Alüminyumun mekanik özellikleri, alaşımda bulunan bakır (Cu), çinko (Zn), silikon (Si), magnezyum (Mg), demir (Fe) ve titanyum (Ti) gibi elementlerin varlığıyla belirgin bir şekilde artar. Bu elementler, alüminyum matrisi içinde katı çözeltisi oluşturarak veya çökelme sertleştirmesi yoluyla alaşımın mukavemetini artırır.

Bununla birlikte, eklenen alaşım elementlerinin miktarı arttıkça alaşımın mukavemeti yükselse de, bu durum genellikle alaşımın plastik şekil değiştirme kapasitesini sınırlar. Yani, yüksek mukavemetli alaşımlar genellikle daha az işlenebilirlik gösterir. Ancak, alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri, plastik şekil verme işlemleriyle uygulanacak deformasyon sayesinde önemli ölçüde geliştirilebilir. Bu tür işlemler, alaşımın yapısal özelliklerini optimize ederek istenilen sertlik ve dayanıklılığa ulaşmasını sağlar. Bu denge, alüminyum alaşımlarının hem mühendislik hem de endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmesinin temel nedenlerinden biridir (Anık vd., 2000).

Alüminyum alaşımları, genellikle iki ana kategoriye ayrılır: dövme alüminyum alaşımları ve döküm alüminyum alaşımlarıdır. Dövme alaşımları, genellikle sıcaklık ve basınç altında şekillendirilen alaşımlardır ve mekanik özellikleri, işlenebilirlikleri ile dikkat çeker. Döküm alaşımları ise, sıvı hale getirilip kalıplara dökülerek şekillendirilen alaşımlardır ve genellikle yüksek akma dayanımına sahip ürünlerde kullanılır. Bu iki kategori, alüminyumun farklı endüstriyel uygulamalarda nasıl kullanılacağına dair belirleyici faktörler sunar ve her biri farklı avantajlar sunar (Canbaz, 2021).

2.4.1. Dövmeye Alaşım

Dövmeye alüminyum alaşımları, yüksek deformasyon kabiliyetleri sayesinde kolayca şekillendirilebilirler. Bu özellikleri, onları endüstriyel uygulamalarda tercih edilen malzemeler haline getirir. Hem dövmeye hem de döküm alüminyum alaşımlarına, çeşitli mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla ısıtıl işlem uygulanabilir. Dövmeye alüminyum alaşımları, Amerikan standartlarına göre genellikle dört harfli bir sistemle sınıflandırılır ve bu sınıflandırma, alaşımların içerdikleri elementler ve özelliklerine göre değişir (Atay, 2017).

2.4.2. Döküm Alaşımları

Alüminyum döküm alaşımları, çeşitli döküm yöntemleriyle üretilir. Bunlar arasında kum kalıba döküm, kokil döküm ve alçak ile yüksek basınçlı döküm yöntemleri yer alır. Bu alaşımlar, üstün fiziksel özellikler sunarak hem kaynak yapılabilmesini hem de işlenebilmesini sağlar. Ayrıca, dövmeye alüminyum alaşımlarına uygulanan yaygın ısıtıl işlemler, belirli döküm alaşımlarına da etkili bir şekilde uygulanabilir, bu sayede alaşımların özellikleri iyileştirilebilir (Canbaz, 2021).

Alüminyum döküm alaşımları, yüksek dayanım ve korozyon direnci ile bilinir. Bu alaşımların kimyasal bileşimleri, dövmeye alaşımlarından oldukça farklıdır ve özellikle silisyum (Si), %5-12 oranı ile en önemli alaşım elementini oluşturur. Silisyum, alüminyumla birleşerek ötektik bir mikroyapı meydana getirir. Bu yapı, alaşımların akışkanlığını ve besleme kabiliyetini artırarak, aynı zamanda dayanımını da önemli ölçüde yükseltir (Canbaz, 2021).

2.5. Al-Si-Mg Alaşımları

Alüminyum-silisyum-magnezyum (Al-Si-Mg) alaşımları, yüksek mekanik özellikler, iyi spesifik mukavemet, ısıtıl işlemle mukavemet artışı sağlanabilmesi, kaynaklanabilirlik ve üstün korozyon direnci gibi avantajlarıyla çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir (Ao vd., 2021). Özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde bu alaşımlar önemli bir yer tutar. Al-Si-Mg alaşımlarından olan A356, silindir başlıkları, aktarma kutuları (transmisyon), jantlar ve manifoldlar gibi önemli parçaların üretiminde

kullanılır. Bu alaşım grubunun, çekme, darbe, yorulma ve aşınma direnci gibi özellikleri, güvenlik ve performans açısından büyük bir öneme sahiptir (Hernandez vd., 2017; Lumley, 2018).

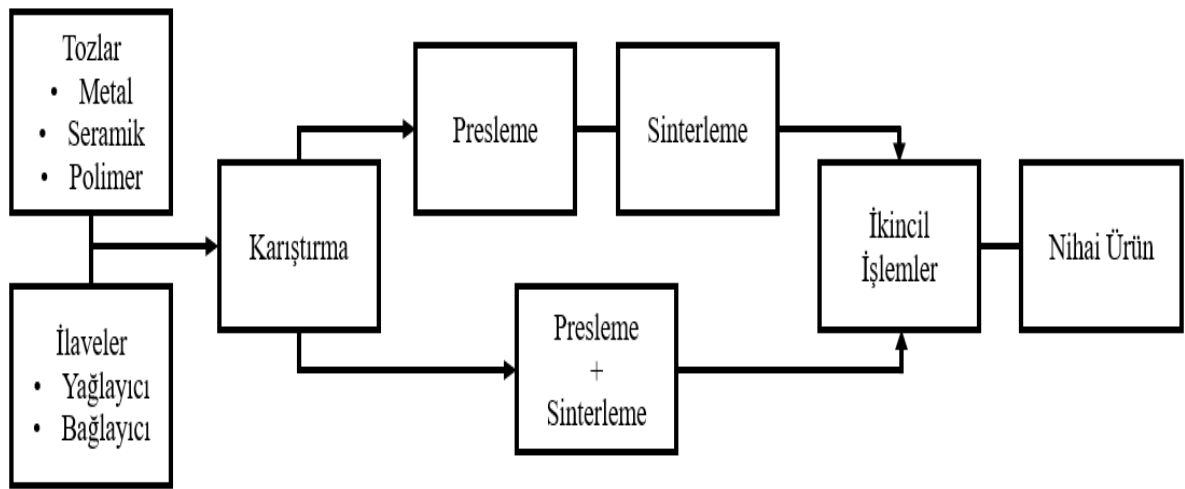
Malzemelerin mekanik özellikleri, genellikle fiziksel özelliklere, özellikle tane boyutu ve morfolojisi, ikincil fazların şekli ve boyutuna bağlı olarak şekillenir. Alüminyum alaşımlarına eklenen alaşım elementleri, malzemenin mukavemetini artırmakla kalmaz, aynı zamanda ısıtılma işlem özelliklerini ve çalışma sıcaklıklarını da belirler. Örneğin, bakır ve magnezyum eklenmesiyle, uygun ısıtılma işlem uygulandığında alüminyum alaşımlarının mukavemeti önemli ölçüde artırılabilir (Costas vd., 2020; Kim vd., 2020; Koju ve Mishin, 2020; Lan vd., 2019). Alaşım, tek faz bölgesinde çözeltiye alındıktan sonra, oda sıcaklığında hızlıca su ile soğutularak aşırı doymuş bir yapı elde edilir. Ardından, daha düşük sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işlemiyle mukavemet artışı sağlanabilir. Bu işlemin adı yapay yaşlandırmadır. Yaşlandırma işlemiyle Al-Cu alaşımlarında Al_2Cu , Al-Si-Mg alaşımlarında ise Mg_2Si çökeltileri oluşur (Sha vd., 2011).

2.5.1. Al-Si-Mg Alaşımlarının Üretim Yöntemleri

Alüminyum alaşımları, döküm, plastik şekillendirme (haddeleme, dövme, ekstrüzyon vb.) ve toz metalurjisi gibi farklı üretim yöntemleriyle elde edilebilir. Alaşım elementlerinin eklenmesi, alüminyum alaşımlarının üretim süreçlerini ve parametrelerini değiştirir. Alüminyumdan daha düşük yoğunluğa sahip olan silikon (Si) ve magnezyum (Mg) elementlerinin ilavesi, alaşımın yoğunluğunu azaltabilir. Si'nin yoğunluğu 0.85, Mg'nin ise yaklaşık 0.5'tir. Bu özellik, özellikle Al-Si-Mg alaşımlarının dökülebilirliğini artırarak, daha verimli üretim süreçlerine olanak tanır. Ayrıca, Si ve Mg'nin birlikte eklenmesiyle, ısıtılma sırasında 1:2 oranındaki intermetalik bileşiklerin oluşması, alaşımın mekanik özelliklerini güçlendirir ve mukavemeti artırır. Bu sayede, alüminyum alaşımları daha güçlü ve dayanıklı hale gelir, bu da mühendislik uygulamalarında önemli avantajlar sağlar. (Akyıldız, 2022).

Toz Metalurjisi (TM) üretim süreci, birkaç aşamadan oluşur ve bu aşamalar Şekil 2.1'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Farklı üretim yöntemleriyle elde edilen tozlar, belirli bileşenler (yağlayıcı, bağlayıcı ve farklı alaşım tozları) ile homojen bir karışım haline

getirilir. Bu homojen karışım, iki farklı yöntemle şekillendirilebilir. İlk yöntem, karışımın bir kalıba aktarılması ve ardından presleme ile şekil verilmesi, sonrasında ise sinterleme işlemine tabi tutulmasıdır. Diğer bir seçenek ise, hem basınç hem de sıcaklık uygulanarak aynı anda üretim sürecinin tamamlanmasıdır. Sinterleme işlemi, belirli bir sıcaklık ve süre boyunca difüzyonun gerçekleşmesini sağlayarak toz partikülleri arasında metalurjik bağların oluşmasına olanak tanır. Son adımda ise, ikincil yüzey işlemleri uygulanarak nihai ürün elde edilir. Bu süreç, yüksek kalite ve dayanıklılığı olan malzemelerin üretimine olanak sağlar (Akyıldız, 2022).



Şekil 2.1. Toz metalurjisi proses adımları

Toz metalurjisi proseslerinde nihai malzemeye ulaşmanın iki ana yolu bulunmaktadır. İlk yöntemde, toz partikülleri soğuk presleme ile şekillendirilir ve ardından sinterleme işlemi yapılır. Bu işlem, partiküllerin birbirine bağlanmasını ve istenilen yapının oluşturulmasını sağlar. Diğer yöntemde ise, presleme ve sinterleme işlemleri aynı anda uygulanır. Bu süreçte basınç ve sıcaklık aynı anda etkili olduğundan, bu işleme basınç destekli sinterleme adı verilir. Basınç destekli sinterleme yöntemlerine en bilinen örneklerden biri, Sıcak Pres (SP) yöntemidir. SP ile üretilen malzemeler, geleneksel toz metalurjisi yöntemleriyle üretilenlere göre daha yüksek nihai yoğunluğa sahip olurlar. Bu da, daha dayanıklı ve güçlü malzemelerin üretimini mümkün kılar (Yamanoğlu vd., 2013).

3. TOZ METALURJİSİ

Toz metalurjisinin temelleri, 1829 yılında Wollaston'ın platin-amonyak klorür çözeltisinden çöktürdüğü platin sünger tozunu sıkıştırarak platin üretmesiyle atılmıştır. Bu çalışma, toz metalurjisi alanındaki ilk uygulamalardan biri olarak kabul edilmektedir. 1980'li yıllarda ise mekanik alaşımlama, hızlı katılaşma ve enjeksiyon gibi yenilikçi toz işleme teknolojilerinin geliştirilmesiyle birlikte, toz metalurjisi önemli bir gelişim sürecine girmiştir. Bu ilerlemeler, daha geniş bir ürün yelpazesinin elde edilmesine olanak tanımış ve yöntemin, geleneksel üretim tekniklerine alternatif olarak sanayide yaygın biçimde benimsenmesini sağlamıştır. Böylece, toz metalurjisi, daha çeşitli ve yüksek performanslı malzemelerin üretiminde tercih edilen bir yöntem hâline gelmiştir (Öveçoğlu, 1997).

Malzeme bilimi alanında çalışan araştırmacılar, geleneksel üretim yöntemleriyle elde edilen malzemelerin tüm istenen özellikleri bir arada sunamaması ve bu yöntemlerin ekonomik açıdan yetersiz kalması nedeniyle, daha üstün özelliklere sahip ve maliyet etkin malzeme alternatifleri arayışına yönelmişlerdir. Bir malzemenin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri, doğrudan bileşimine bağlıdır ve bu bileşim, malzemenin performansını belirleyici bir unsurdur. Bu doğrultuda, yüksek kaliteli malzemelere duyulan ihtiyaç giderek artmıştır. Bu gereksinimi karşılamak amacıyla, özellikle metal esaslı tozlar önemli bir konuma gelmiştir. Demir bazlı malzemelerin üretiminde yaygın olarak kullanılan toz metalurjisi yöntemi, otomotiv endüstrisinde geniş uygulama alanı bulmuştur. Ayrıca, toz metalurjisi; havacılık ve uzay sanayii gibi ileri teknoloji gerektiren sektörlerde de kritik bir rol oynamaktadır. Bu yöntem; roket yakıtları, jet motoru bileşenleri, uçak fren balataları ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı filtrelerin üretiminde etkin şekilde kullanılmaktadır. Savunma sanayisinde ise toz metalurjisi; patlayıcılar, silah parçaları ve zırh delici mühimmat üretiminde önemli bir yer tutmaktadır (Özgün, 2007). Dolayısıyla, toz metalurjisi çok çeşitli endüstriyel ihtiyaçlara cevap verebilen geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir.

Toz metalurjisi, geleneksel üretim yöntemlerinden farklı olarak, daha düşük maliyetle üstün mekanik özelliklere sahip alaşımların üretimini mümkün kılan bir yöntemdir. Bu

yöntem kapsamında, belirli bir mesh veya mikron boyutuna indirgenmiş metal tozları homojen biçimde karıştırılarak işlemeye hazır hâle getirilir. Karıştırma işlemi, tozların yapısal bütünlüğünü bozmadan yeterli sürede gerçekleştirilir ve ardından uygun kalıplama teknikleri ile yağlayıcılar eşliğinde presleme aşamasına geçilir. Preslenen toz karışımı, alaşım bileşenlerinin ergime sıcaklıkları dikkate alınarak, vakum veya koruyucu gaz atmosferi gibi kontrollü ortamlarda sinterlenir. Sinterleme işlemi, metal tozlarının bir araya gelerek hedeflenen fiziksel ve mekanik özelliklere sahip kompakt yapılar oluşturmalarını sağlar (Panda ve Dobransky, 2018). Böylece, toz metalurjisi yöntemi; yüksek performanslı, özel amaçlı malzemelerin üretiminde geleneksel yöntemlere kıyasla daha verimli bir alternatif sunar.

Toz metalurjisi, mikron boyutundaki metal tozlarının bir araya getirilerek ekonomik ve kontrollü bir şekilde katı hâl parçalar hâline dönüştürüldüğü bir üretim yöntemidir. Bu yöntem, yüksek boyutsal hassasiyetin sağlanmasına olanak tanır ve istenilen ölçülerin minimum toleransla elde edilmesini mümkün kılar. Mevcut metal işleme teknolojileri arasında, sunduğu geniş şekillendirme olanakları sayesinde en kapsamlı üretim süreçlerinden birine sahiptir. Toz metalurjisinin en belirgin avantajı, karmaşık geometrilere sahip yüksek kaliteli parçaların, minimum malzeme kaybı ile ve ekonomik olarak üretilmesidir. Bu yönüyle, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla daha verimli ve maliyet etkin bir alternatif sunar (Kurbanoğlu ve ark., 2001). Geniş üretim potansiyeli nedeniyle, bu yönetime yönelik araştırmalar hızla ilerlemekte ve süreçlerin daha verimli hâle getirilmesi amacıyla sürekli olarak yeni teknolojik çözümler geliştirilmektedir (Akhtar vd., 2018).



Şekil 3.1. Toz metalurji yöntemiyle üretilmiş parçalara örnekler (Aslan, 2022)

Toz metalurjisi, döküm, kaynak, talaşlı imalat ve plastik şekil verme gibi geleneksel yöntemlerle üretimi zor hatta bazı durumlarda imkânsız olan alaşımların, ekonomik ve verimli bir şekilde üretilmesine olanak tanır. Özellikle molibden, tungsten ve platin gibi yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin işlenmesinde, toz metalurjisi önemli avantajlar sunar. Bu yöntem sayesinde, dökümde oluşan yolluk ve besleyici kaynaklı malzeme kayıpları ile talaşlı imalat sırasında ortaya çıkan israf önlenir. Böylece, hem malzeme kaybı minimize edilir hem de işçilik maliyetleri önemli ölçüde azaltılarak üretim süreçleri daha ekonomik hâle getirilir. Sunduğu bu verimlilik ve teknik üstünlükler nedeniyle, toz metalurjisi uzun süredir güvenilir ve tercih edilen bir üretim yöntemi olarak kullanılmaktadır (Özgün, 2007).

Toz metalurjisi uygulamalarında yaygın olarak kullanılan takviye fazları arasında silisyum karbür (SiC), grafit ve titanyum karbür (TiC) yer alırken, en sık tercih edilen matris malzemeleri ise alüminyum, titanyum ve bakırdır. Bu kombinasyonlar sayesinde yüksek

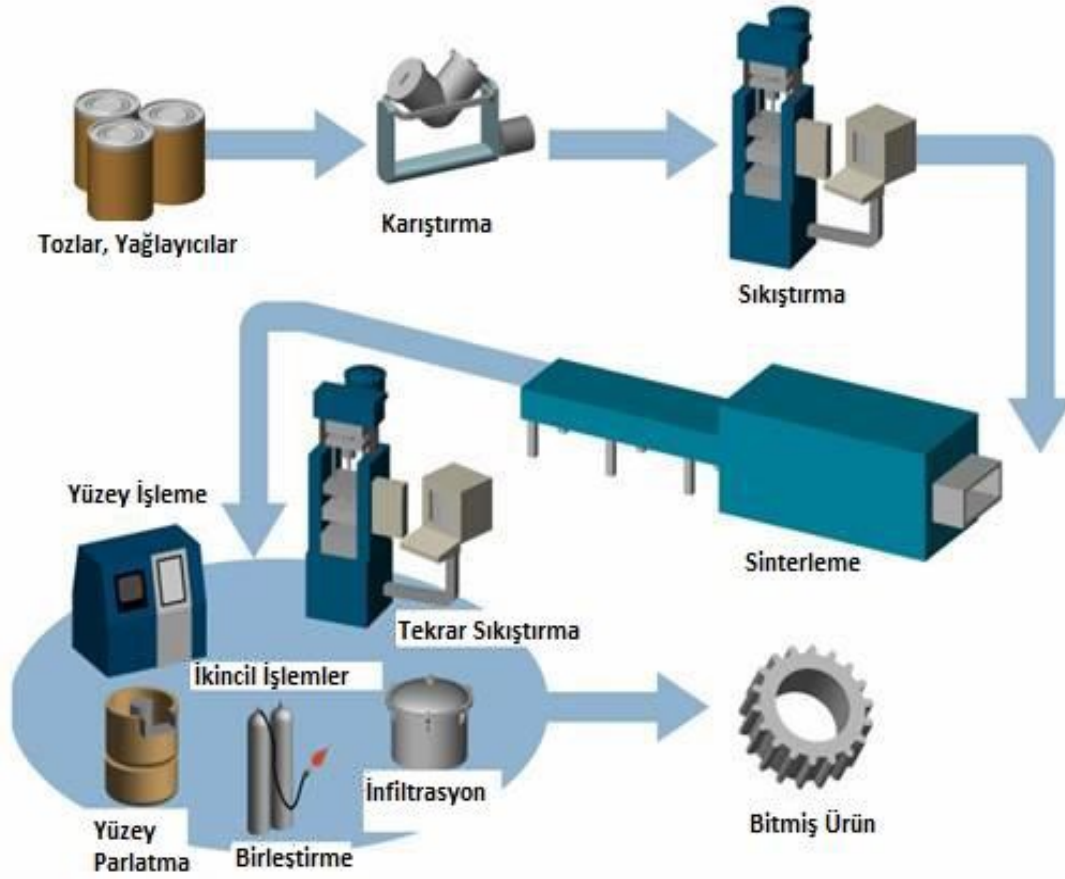
takviye hacim oranlarına ulaşılabilir ve dolayısıyla, yüksek elastisite modülüne ve düşük termal genleşme katsayısına sahip ileri mühendislik malzemeleri üretilebilmektedir. Toz metalurjisi ile üretilen parçaların mekanik özellikleri, büyük ölçüde kullanılan metal tozlarının karakteristiklerine bağlıdır. Modern toz malzemeleri, kimyasal bileşim açısından oldukça geniş bir çeşitliliğe sahiptir. Bu tozların özellikleri; partikül bileşimi, boyutu, şekli ve iç yapısının yanı sıra özgül yüzey alanı, gözeneklilik, akışkanlık, sertlik, mukavemet, gaz ve sıvı geçirgenliği, elektriksel iletkenlik ve sıkıştırılabilirlik gibi parametrelerle belirlenir. Bu faktörlerin tamamı, toz metalurjisi süreçlerinin etkinliği ve nihai ürün kalitesi üzerinde doğrudan etkili olmaktadır (Bahadır, 2021).

Toz malzemelerin kimyasal bileşimlerine uygun olarak doğru ve dikkatli bir şekilde hazırlanması, yüksek kaliteli ürünlerin elde edilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Üretim sürecinde karşılaşılan hataların önemli bir bölümü, presleme ve sinterleme aşamalarında meydana gelen kusurlar ile bu işlemler sırasında uygulanan basıncın yetersiz veya dengesiz olmasından kaynaklanmaktadır. Genellikle tozlar saf hâlde değil; farklı metalik ve metal dışı tozlarla karıştırılarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, preslemeye uygun toz karışımının hazırlanması; sınıflandırma, homojen karıştırma ve gerekliyse ön işlemler (örneğin kurutma veya yüzey modifikasyonu) gibi aşamaları içermektedir. Bu adımlar, tozların homojen bir dağılım göstermesini ve üretilen parçaların hedeflenen fiziksel ve mekanik özelliklere ulaşmasını sağlamak amacıyla titizlikle uygulanmaktadır (Askeland, 1996).

3.1. Toz Metalurjisi Üretim Aşamaları

Toz metalurjisi üretim süreci, birbiriyle ilişkili birden fazla aşamadan oluşur ve her bir aşama, nihai ürünün kalitesini doğrudan etkiler. İlk aşama, uygun özelliklere sahip metal tozlarının temin edilmesi veya üretilmesiyle gerçekleştirilen toz hazırlığıdır. İkinci aşama, bu tozların istenilen kimyasal ve fiziksel özellikleri karşılayacak şekilde elde edilmesini kapsayan metal tozu üretimidir. Üçüncü aşamada, farklı toz bileşenleri homojen bir şekilde karıştırılarak uygun bir karışım oluşturulur. Dördüncü aşama olan presleme işleminde, hazırlanan toz karışımı belirli bir geometriye sahip kalıplarda sıkıştırılarak şekillendirilir. Beşinci aşama, sinterleme olup bu süreçte, toz partikülleri belirli sıcaklık ve atmosfer koşulları altında difüzyon yoluyla birleştirilerek metalurjik bağ oluşumu sağlanır. Son aşama ise ikincil işlemlerden oluşur; bu aşamada ürünün yüzey kalitesi, boyutsal

hassasiyeti ve mekanik özellikleri ek işlemlerle iyileştirilir. Bu süreç adımları, toz metalurjisi yöntemiyle yüksek mukavemetli, dayanıklı ve yüksek performanslı parçaların üretilmesine olanak tanır (Leander vd., 2002).



Şekil 3.2. Toz metalurji yöntemi üretim evreleri (Güven, 2011)

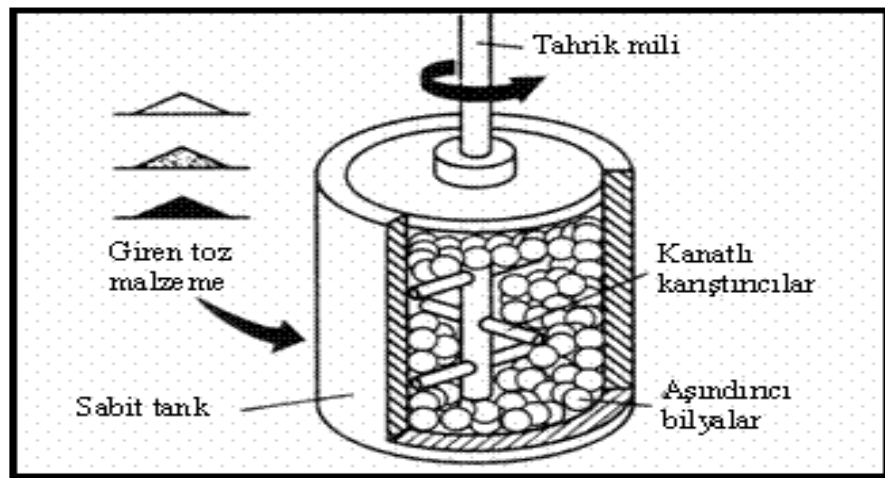
3.1.1. Tozların Hazırlaması

Tozların hazırlanması, malzeme üretim sürecinin kritik aşamalarından biridir ve hangi üretim yönteminin seçileceği, elde edilecek nihai ürünün kalitesini doğrudan etkiler. Metalik tozlar; yağlayıcılar ve alaşım elementleriyle karıştırılarak homojen bir toz karışımı elde edilir. Yağlayıcıların bu süreçteki temel işlevi, toz kütlesi ile kalıp yüzeyleri arasındaki sürtünmeyi azaltmak suretiyle tozların kalıp içerisinde daha kolay akmasını ve sıkıştırma işleminin daha verimli gerçekleşmesini sağlamaktır. Metal tozlarının üretiminde yaygın olarak kullanılan başlıca yöntemler; mekanik öğütme, mekanik alaşımlama, kimyasal

reaksiyonlar, elektrolitik biriktirme, buhar fazından yoğunlaştırma ve sıvı atomizasyonudur. Her bir üretim yöntemi, farklı morfolojik ve fiziksel özelliklere sahip tozların elde edilmesini sağlar ve tozun yapısal özelliklerini önemli ölçüde belirler (İçin, 2005).

3.1.2. Mekanik Toz Üretimi

Mekanik toz üretiminde dört temel öğütme yöntemi kullanılır ve her biri, malzemenin türü ile istenen toz özelliklerine bağlı olarak farklı avantajlar sunar. Birinci yöntem olan darbe ile toz haline getirmede, malzeme hızlı ve ani darbelerle (örneğin çekiç etkisiyle) parçalara ayrılır. İkinci yöntem ise öğütme işlemidir; bu yöntemde, toz ve bilyeler dönen bir silindirik kap içerisinde birlikte hareket eder. Bilyelerin birbirine çarpması sonucu toz parçacık boyutu küçülür ve homojen bir karışım elde edilir. Öğütme süresi arttıkça parçacık boyutu azalır ve istenilen ince toz elde edilene kadar işlem devam eder. Optimum öğütme için bilye çapının toz çapının yaklaşık 30 katı olması ve bilye hacminin kavanoz hacminin yarısını oluşturması gereklidir. Üçüncü yöntem kesme ile toz haline getirme olup, genellikle daha büyük boyutlu toz parçacıkları elde edilir. Son olarak, ezme yöntemi, malzemenin kırılma sınırına kadar deformasyona uğratarak toz haline getirilmesini kapsar. Her bir mekanik öğütme yöntemi, tozun morfolojisi ve özellikleri üzerinde belirleyici rol oynar; dolayısıyla üretilecek malzemenin gereksinimlerine göre uygun yöntem seçilmelidir (Özgürlük, 2010).

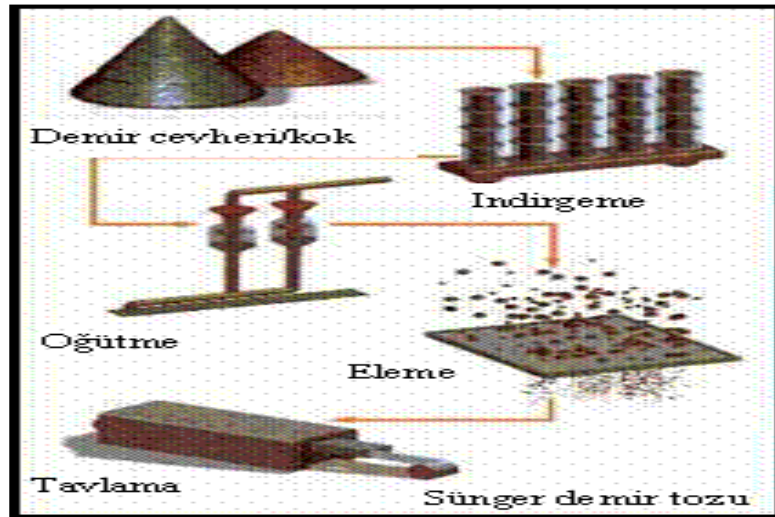


Şekil 3.3. Mekanik yöntemle toz üretimi

3.1.3. Kimyasal Yöntemler

Demir tozunun yaygın olarak üretildiği bu yöntem, Şekil 3.4'te gösterilen süreçle tamamlanmaktadır. Bu yöntemde seçilen cevher, ince toz haline getirilerek kok ile karıştırılır. Karışım, sürekli çalışan bir fırına sevk edilir ve burada indirgeme reaksiyonu gerçekleşir. Bu işlem sonucunda “esnek demir” olarak adlandırılan kek formundaki ürün elde edilir. Elde edilen sünger demir, daha sonra toz haline getirilerek metalik olmayan safsızlıklardan arındırılır ve eleme işlemine tabi tutulur. Tozun kalitesi, kullanılan hammaddelerin saflık derecesi ile doğrudan ilişkilidir. Düzensiz partikül yapısı, yumuşaklık ve kolay sıkıştırılabilirlik özellikleri sayesinde, yüksek ham dayanım ve dayanıklılık sağlanarak üretime önemli katkı sunar. Benzer biçimde, refrakter metaller de oksitlerinin hidrojenlenmesi yoluyla indirgenerek elde edilmektedir (Groover, 2010).

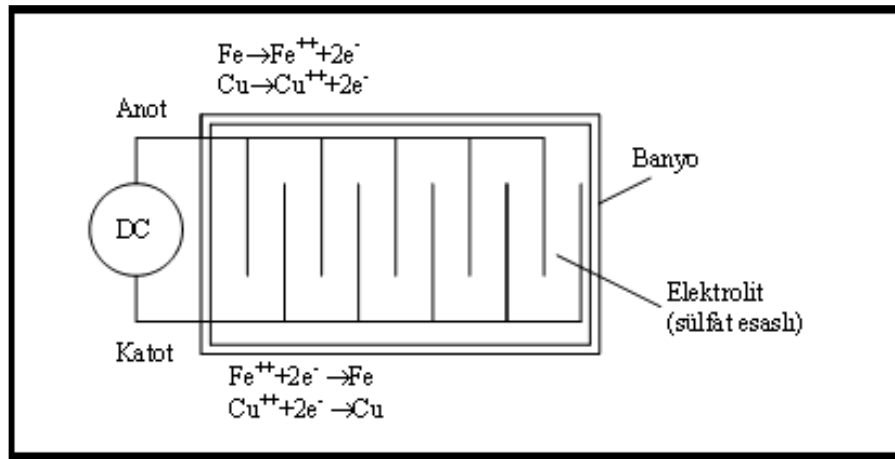
Elektrolitik ve atomizasyon yöntemleri genellikle daha yüksek kimyasal saflığa sahip tozlar üretirken, kimyasal indirgeme yöntemi istenilen boyut ve dağılımda toz üretimini pratik ve verimli şekilde tamamlaması açısından avantaj sağlamaktadır (Özbek vd., 2005).



Şekil 3.4. Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi

3.1.4. Elektrolizle Üretim Yöntemleri

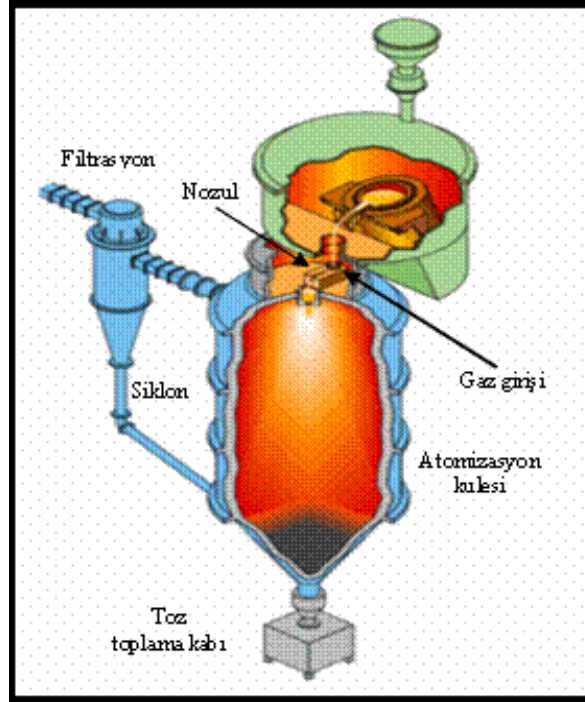
Bu yöntemde, metal tozları katot üzerinde biriktirilerek üretilir. Katotta oluşan birikintilerin saflaştırılması, elektrolit içerisindeki konveksiyon akımlarının sürekli kullanımıyla sağlanır. Şekil 3.5'te gösterildiği üzere, işlemin gerçekleştirilmesi için uygun voltaj değerleri uygulanmakta ve anotta metalin çözünmesi sağlanmaktadır. Katot üzerinde biriken malzeme işlem sonrasında çıkarılır, yıkanır, kurutulur ve ince toz haline getirilir. Ardından, malzemedeki iç gerilmelerin azaltılması ve istenmeyen bileşenlerin giderilmesi amacıyla tavlama işlemine tabi tutulur (Özaydın, 2015).



Şekil 3.5. Elektroliz yöntemiyle toz üretimi

3.1.5. Atomizasyon Üretim Yöntemi

Bu yöntemde, metal yüksek hızlı gaz akımı kullanılarak eritilir ve eriyik, küçük damlacıklara ayrılır. Bu damlacıklar hızla soğuyarak katılaşır ve metal tozları oluşturur. Atomizasyon yöntemi; metaller, alaşımlar ve intermetalik bileşiklerin üretiminde yaygın olarak tercih edilmekle birlikte, polimer ve seramik malzemelerin toz üretiminde de uygulanabilmektedir. Atomizasyon sürecine ilişkin bir örnek, Şekil 3.6'da sunulmuştur (Özaydın, 2015).



Şekil 3.6. Atomizasyon yöntemiyle toz üretimi

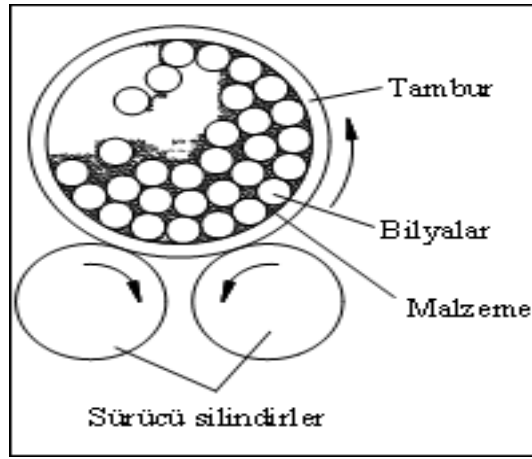
3.1.6. Karıştırma

Karıştırma işlemi, tozların homojen bir tane boyutuna ulaşmasını sağlamak ve presleme aşamasını kolaylaştırmak amacıyla yağlayıcıların ilave edilmesini içermektedir. Bu aşamadaki temel amaç, toz partikülleri arasında yığılma ve kümelenme oluşumunu engellemektir. Ayrıca, rutubet kaynaklı topaklanma ve yığınlaşmaların önlenmesi de karıştırma sürecinin önemli hedefleri arasında yer alır. Böylece, daha homojen bir karışım elde edilerek nihai ürünün kalitesi artırılmaktadır (Kumdalı, 2008).

Karıştırma işlemi sırasında homojen bir toz karışımı sağlanamazsa, büyük partiküller üstte, küçük partiküller ise altta birikir. Bu durum, presleme aşamasında düzensiz sıkıştırmaya neden olarak nihai ürünlerde gözenekliliklerin oluşmasına yol açar. Ayrıca, karıştırma sürecinin gerçekleştirildiği ortam koşulları da kritik öneme sahiptir. Nemli ortamlarda tozlar arasında aglomerasyonlar meydana gelir; bu durum homojen karışım elde edilmesini engeller ve aglomere tozlardan istenilen mekanik, kimyasal ve fiziksel özelliklerin sağlanmasını zorlaştırır. Farklı boyutlardaki toz partikülleri sadece yapısal düzensizliğe neden olmakla kalmaz, aynı zamanda ürünün yoğunluğunu da olumsuz yönde etkiler.

Sonuç olarak, presleme sonrası üretilen numunelerin üst ve alt tabakalarında yoğunluk farkları ortaya çıkar (Biçer, 2009).

Karıştırma işlemi, uygun bilyeli değirmende belirlenen süre ve bilye çapı koşullarında gerçekleştirildiğinde, elde edilen ürünlerin saflık ve homojenlik açısından herhangi bir sorun oluşturmaz. Ancak, işlemin başarılı olması için ortam sıcaklığı ve nem değerlerinin kontrol altında tutulması büyük önem taşımaktadır (Kumdalı, 2008).



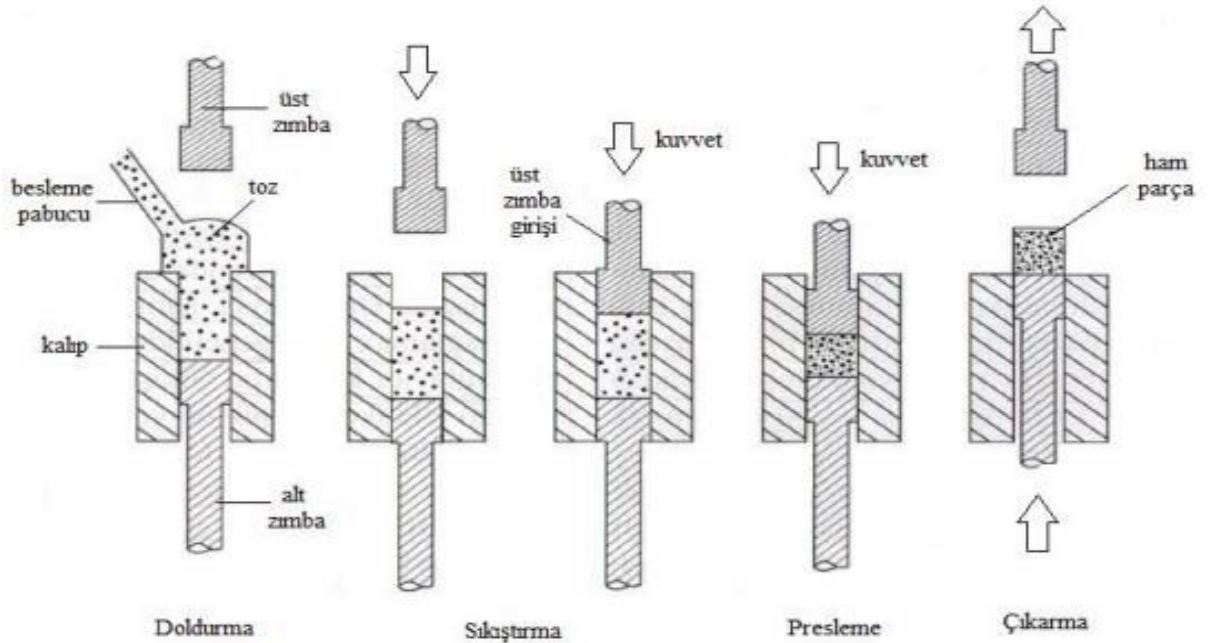
Şekil 3.7. Bilyalı Değirmen (Kumdalı, 2008)



Şekil 3.8. Tozların karıştırıldığı turbula. (Kaçan, 2022)

3.1.7. Presleme İşlemi

Presleme işlemi, öğütülmüş metal tozlarının istenilen geometrik şekle ulaşabilmesi amacıyla uygun bir kalıba yerleştirilmesiyle başlar. Zımbaya uygulanan belirli bir kuvvetle zımba, kalıp içine iner ve tozlar sıkıştırılarak ürünün ön şekillendirilmesi sağlanır. Bu aşamada, tozların yoğunluğu artmakta ve yapısı sıkılaşmaktadır. Tozun yapısı ve partikül boyutları, sıkıştırma basıncının etkinliğini doğrudan etkiler. Presleme işlemi genellikle hidrolik veya mekanik presler kullanılarak gerçekleştirilir ve kalıp tasarımı büyük bir titizlikle yapılmalıdır; zira ürünün kalıptan kolay çıkarılması, işlem verimliliği açısından kritik öneme sahiptir (Çalığülü vd., 2008).

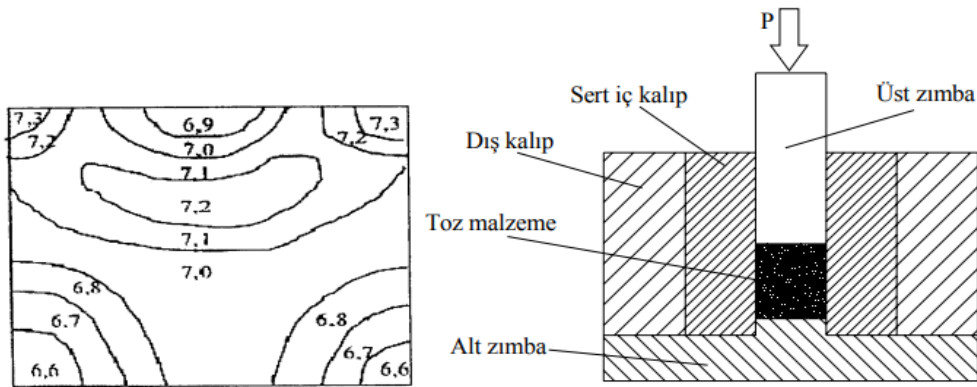


Şekil 3.9. Presleme basamakları (German, 2007)

3.1.7.1. Tek Yönlü Presleme

Sıkıştırma işlemi başladığında, toz partiküllerinin deformasyonu hem parçalar arasında hem de kalıp içerisinde artar. Bu durum, basıncın homojen şekilde dağılmasını engelleyerek düzensiz bir basınç dağılımına yol açar. Toz yoğunluğu, hareketli zımbanın bulunduğu bölgede daha yüksek, sabit zımba yakınında ise daha düşük olur. Bu dağılım, iş parçasının uzunluk/çap (Y/Ç) oranına bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik gösterir. İdeal

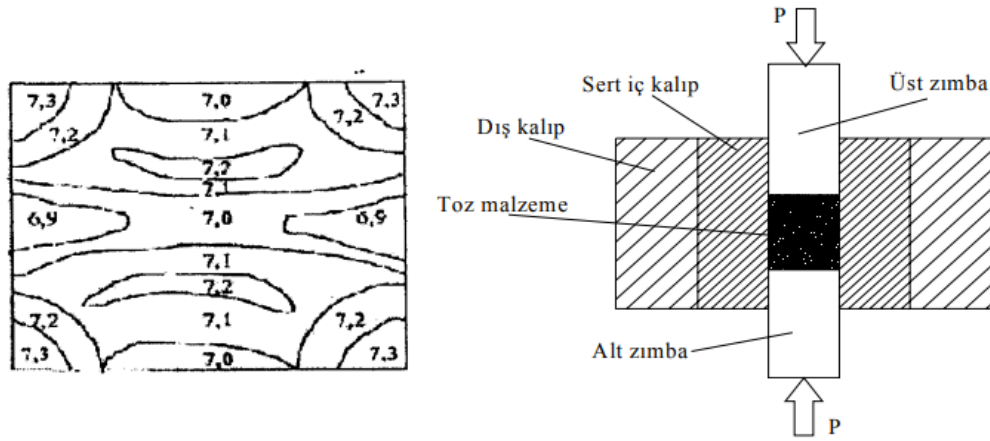
bir kalıp malzemesi, uzun ömürlü olmalı ve tozun kalıplara zarar vermesini önleyecek dayanıklılığa sahip olmalıdır; bu nedenle kalıplarda dayanıklı metaller tercih edilir. Şekil 3.10'da gösterildiği üzere, tek yönlü sıkıştırma sırasında kalıba doldurma, tozun yerleşimi ile Y/Ç oranı arasındaki ilişki, presleme sonrası oluşan yapıyı ve dolayısıyla nihai ürün kalitesini belirlemede kritik bir rol oynar. Bu süreci optimize etmek için Y/Ç oranının 4 veya daha düşük tutulması önerilmektedir (Ekşi ve Kurt, 1999).



Şekil 3.10. Tek yönlü preslemede yoğunluk dağılımı ve kalıp şematik görünümü (Bahçeci, 2006)

3.1.7.2. Çift Yönlü Presleme

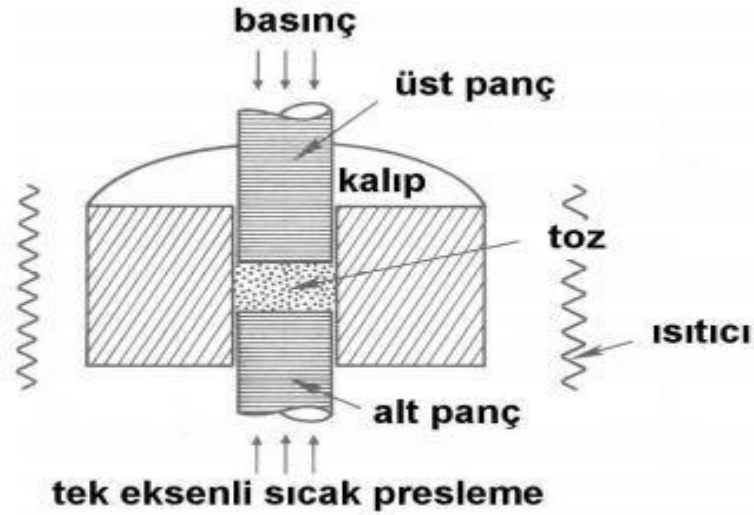
Çift taraflı presleme işlemi, tozun aynı anda hem üstten hem de alttan iki zımbayla eş zamanlı olarak sıkıştırılması prensibine dayanır. Bu yöntem, basıncın her iki tarafta da dengelenmesini sağlayarak daha homojen bir sıkıştırma gerçekleştirir. Sürecin her iki yönden düzenli bir şekilde uygulanması, ürünün yapısal bütünlüğünü artırır ve kaliteyi yükseltir. Şekil 3.11'de gösterildiği üzere, çift taraflı presleme sonucunda elde edilen veriler, tek taraflı preslemeye kıyasla daha homojen ve yoğun bir yapı ortaya koymaktadır (Ekşi ve Kurt, 1999).



Şekil 3.11. Çift yönlü preslemede yoğunluk dağılımı ve kalıp şematik görünümü (Bahçeci, 2006)

3.1.7.3. Sıcak Presleme

Sıcak presleme makinesi, Şekil 3.12’de gösterildiği gibi, sabit kalıp ve zımba yardımıyla toz parçacıklarına kontrollü bir basınç uygular. Bu işlemde, zımba hem eksenel yönde hem de iki dik yönde hareket ettirilerek tozun eş zamanlı olarak sıkıştırılması ve şekillendirilmesi sağlanır (Cura, 2002).



Şekil 3.12. Sıcak preslemenin şematik görünümü

Sistemin alt kısmı genellikle sabit kalırken, hidrolik sistem üst tabla veya hareketli parçalarına kuvvet ve basınç uygulanarak işlem gerçekleştirilir. Bu yöntemde, kalıp

üretiminde yüksek sıcaklıklara dayanabilen grafit beslemeler kullanılır. Sıcaklık ise ya kalıp aracılığıyla ya da dikey çubuklar yardımıyla ölçülüp kontrol edilir (Cura, 2002). Bu tasarım, sıcak presleme işleminin etkin biçimde yürütülmesini sağlar; çünkü kullanılan malzemeler yüksek ısıl dayanıklılığa sahip olup işlem sırasında gerekli sıcaklıkta tutulur.

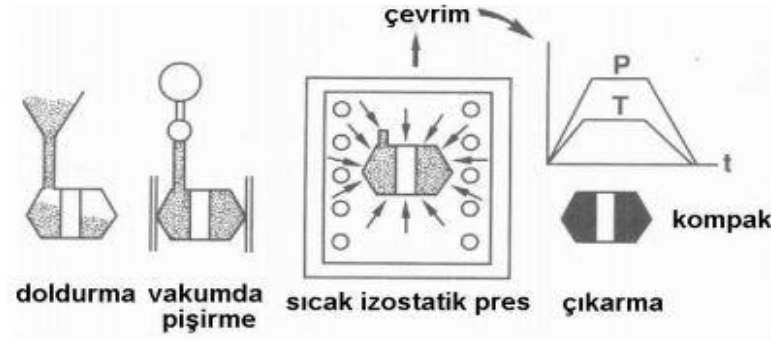
Sıcak presleme işlemi, yüksek gerilim ve yoğun emek gerektiren karmaşık bir süreçtir; bu nedenle uygulama sırasında büyük bir dikkat ve özen gerektirir. Kalıp içindeki sıcaklık dağılımının kontrolü oldukça zordur. En yüksek sıcaklık seviyelerine (2200°C) ulaşmak için grafit dirençler kullanılırken, daha düşük sıcaklıklara dayanabilen molibden, silisyum karbür ve tungsten gibi malzemeler grafit dirençlerin yerine alternatif olarak tercih edilebilir. Sıkıştırma miktarı yalnızca uygulanan kuvvetle değil, aynı zamanda kalıp tasarımı ve üretilen parçaların geometrisi gibi faktörlere de bağlıdır. Sinterleme işlemi genellikle vakum atmosferinde gerçekleştirilir; bu ortam, fırın dirençlerinin ve sinterlenen ürünün korunmasını sağlar. Ayrıca, sinterleme süresi ve uygulama şartlarına bağlı olarak, kontrollü koruyucu gaz atmosferlerinde de işlem yapılabilir. Kapalı sistemler kullanıldığında, vakum ortamı sayesinde oksidasyon ve safsızlık oluşumu büyük ölçüde engellenir (Cura, 2002).

Sinterleme işlemi sırasında sıkça karşılaşılan önemli problemlerden biri, sinterlenmiş malzemenin kalıbın iç yüzeyine yapışmasıdır. Bu durum, sinterleme sonrası hem üretilen parçaların hem de kalıbın zarar görmesine neden olabilir. Bu tür problemlerin önlenmesi amacıyla, özellikle grafit kalıpların iç yüzeyine altıgen yapıya sahip bor nitrür kaplaması uygulanması önerilmektedir. Ancak, koruyucu katmanın ideal kalınlık sınırlarının aşılması büyük önem taşımaktadır (Cura, 2002).

Sıcak presleme yöntemi, kalıp maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle ekonomik açıdan pahalı bir süreçtir. Vakum ortamında gerçekleştirilen üretim ise bu maliyetleri daha da artırmaktadır. Buna karşın, sıcak presleme yöntemi, zorlu geometriye sahip parçaların üretiminde sağladığı avantajlar nedeniyle tercih edilmektedir. Özellikle, uzun ömürlü kalıp veya takım bileşenleri gibi üretim maliyetinin ikinci planda olduğu ürünlerin imalatında uygundur. Ayrıca, bu yöntem alaşımların oluşturulmasında yaygın olarak kullanılmakta ve elmas parçacıkları içeren bileşenlerin üretiminde önemli bir uygulama alanı bulmaktadır (Cura, 2002).

3.1.7.4. Sıcak İzo-statik Presleme

Sıcak izostatik presleme (HIP), özellikle havacılık ve uzay endüstrisi gibi uzun ömürlülüğün kritik olduğu uygulamalarda, kalıplar, kesici takım uçları ve çeşitli bileşenlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.13'te gösterildiği üzere, bu yöntemde malzemeye eş eksenli basınç uygulanmakta ve bu işlem yüksek basınçlı gaz kullanılarak gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.13. Sıcak izo-statik presleme

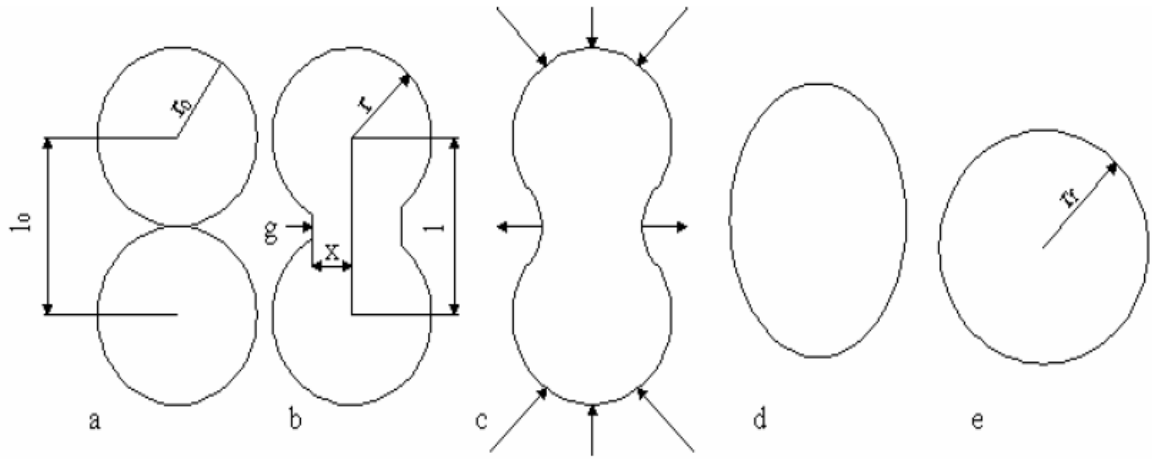
Sıcak izostatik presleme (HIP) işleminde uygulanan basınç, kullanılan gaz miktarı ile doğrudan ilişkilidir. Süreci etkileyen temel parametreler sıcaklık, basınç ve zamandır. Malzemeler, farklı yöntemlerle sinterleme işlemine dahil edilebilir. İlk aşamada, malzeme genellikle toz formunda işlenir veya ön sinterleme uygulanır. İkinci aşamada ise, ön sinterlenmiş ve kapalı gözenekli yapıya sahip malzeme, sıcak izostatik presleme işlemine tabi tutulur. Bu yöntemde temel amaç, malzemenin yüke dayanabilecek dayanıklılığa ulaştığı anda izostatik basınç uygulamaktır. Alternatif olarak, metalik tozlar doğrudan cam veya metal kalıplara yerleştirilerek de işlem gerçekleştirilebilir. Kalıp malzemesi seçiminde en önemli kriter, optimum sinterleme sıcaklığında hem basıncı iletebilme hem de deformasyona karşı direnç gösterebilme kapasitesidir. Bu nedenle kalıp üretiminde titanyum, çelik, cam, paslanmaz çelik ve tantal gibi malzemeler sıkça tercih edilmektedir. Sinterleme sırasında ortamda gaz kalmaması kritik öneme sahiptir, çünkü gaz varlığı malzemede gözenek oluşma riskini artırır. Toz halindeki malzeme, içten ısıtılmalı bir fırına yerleştirilir ve yoğunlaşmayı sağlamak için gerekli basınç ve ısı, yüksek basınçlı gaz genellikle nitrojen veya argon aracılığıyla uygulanır. Sistem, maksimum 2200 °C'ye ulaşabilen yüksek sıcaklıklarda çalışacak şekilde tasarlanmıştır (Cura, 2002).

3.1.8. Sinterleme İşlemi

Sinterleme işlemi, toz parçacıklarının yüksek sıcaklıklarda yüzey enerjilerinin azalması sonucu birbirine bağlanarak katı bir yapı oluşturduğu geri döndürülemez bir süreçtir. Sinterleme öncesinde toz partikülleri serbestçe hareket ederken, işlem sonrasında bu partiküller kalıcı olarak birbirine bağlanır. Küçük parçacıklar, yüksek yüzey enerjilerine bağlı olarak, daha büyük partiküllere kıyasla daha hızlı sinterlenir (Ayata, 2014).

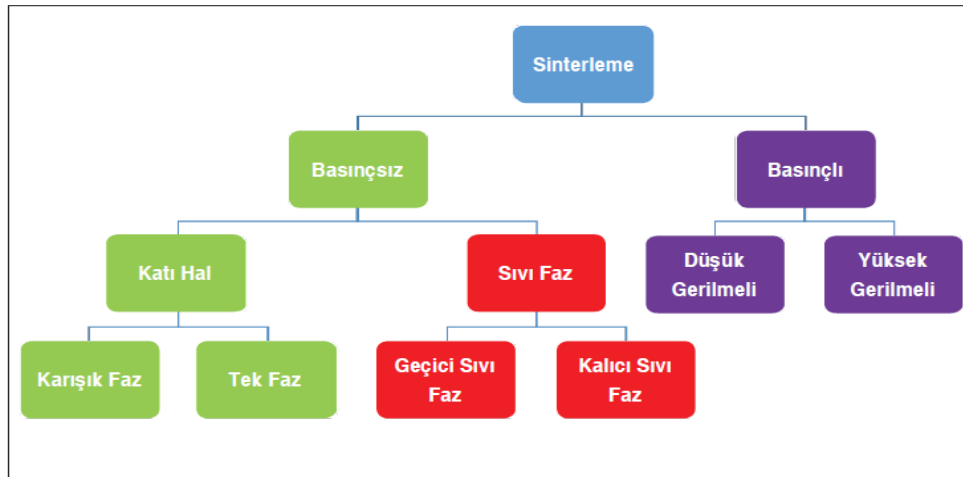
Sinterleme süresi, kullanılan malzemenin türüne bağlı olarak değişkenlik gösterir. Sinterleme sıcaklığı arttıkça, işlem süresi genellikle kısalır. Ancak kısa süreli sinterleme, tane sınırlarında aşırı gözenek oluşumuna yol açabilir. Yüksek sıcaklıklarda sinterleme işlemi hızlansa da, bu durum düzensiz tane büyümesine sebep olabilir ve tane sınırlarının hareketini kısıtlayabilir. Bu nedenle, sinterleme süresi ve sıcaklığı, difüzyon ve toplu taşıma mekanizmalarının etkin bir şekilde gerçekleşmesini sağlayacak şekilde dikkatle optimize edilmelidir. Parçacıklar arasındaki mekanik bağlar kimyasal bağlara dönüşerek malzemenin mekanik özellikleri ve kalitesi iyileştirilir. Sinterleme sıcaklığı, genellikle malzemenin erime noktasının altında tutulur ve işlem sonrası genellikle ek bir yüzey işleme gerektirmez (Naransimhan vd., 2001).

Sinterleme işlemi sırasında dört temel aşama gerçekleşir: başlangıç temas noktası oluşumu, boyun büyümesinin ilk aşaması, boyun büyümesinin ileri aşaması ve birleşmenin son aşaması. Şekil 3.14'te gösterildiği gibi, sinterleme ilerledikçe parçacıklar arasındaki gözenek sayısı azalırken, boyunların boyutu artar. Boyun oluşumunun ardından, büyüme sürecinde parçacıkların temas ettiği bölgede bir sınır meydana gelir. Yeterli süre sağlandığında, iki parçacık tamamen birleşir ve daha büyük tek bir parçacık oluşturur (Doğan, 2022).



Şekil 3.14. Sinterleme evresinin şeması (Palacı, 2001)

Sinterleme yöntemleri, kullanılan malzemenin türü ve uygulanan spesifik sinterleme işlemine bağlı olarak çeşitlilik gösterir. En yaygın yöntemler arasında katı hal sinterleme ve sıvı faz sinterleme yer alır. Bunun yanı sıra, Şekil 3.15'te gösterildiği üzere farklı sinterleme teknikleri de mevcuttur (Gökçe vd., 2017).

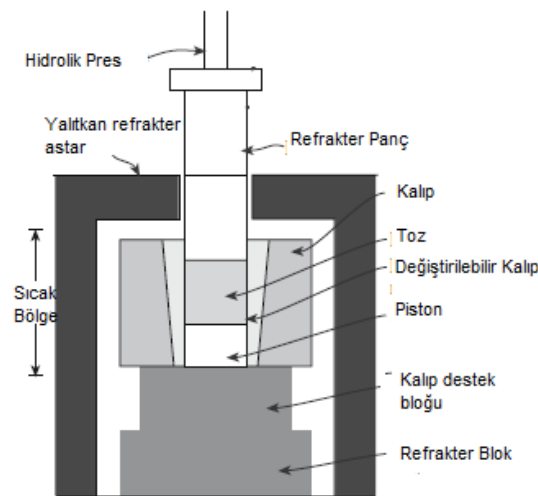


Şekil 3.15. Sinterleme çeşitleri

3.1.8.1. Basınç sinterleme

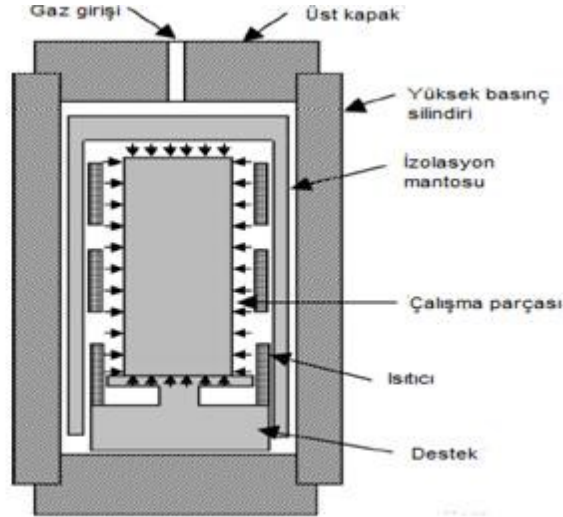
Kompakt toza dışarıdan uygulanan basınç, yoğunlaşma sürecinin itici gücünü doğrudan artırmakta ve yoğunlaşma kinetiğinin hızlanmasına katkı sağlamaktadır. Ancak tane büyümesi ile uygulanan basınç arasında doğrudan bir ilişki bulunmamaktadır. Bu nedenle, dış basıncın etkisi, tane büyümesinin yoğunluk oranına bağlı olduğu sistemlerde daha belirgin hale gelir. Uygulanan basınç, yoğunlaşma oranını artırırken sinterleme sıcaklığı ve süresini azaltarak tane büyümesinin daha etkin kontrolünü mümkün kılar. Özellikle, sinterleme süresinin uzun olduğu ve gözeneklerin kararlılık kazandığı durumlarda, basınç uygulaması sinterleme sürecinin etkinliğini artıran önemli bir yöntemdir (Kang, 2005).

Basınç uygulaması, tek eksenli ve izostatik olmak üzere iki farklı yöntemle gerçekleştirilebilir. Tek yönlü basınç uygulanan sinterleme yöntemlerinden biri olan sıcak presleme (HP), genellikle 20–50 MPa arasında değişen basınçlarda ve grafit kalıplar kullanılarak yapılır. İşlem esnasında sıcaklık 2200 °C'ye kadar yükseltilebilir. Basınç, genellikle üst panç aracılığıyla hidrolik sistemle uygulanır. Sıcak presleme, nispeten yavaş ilerleyen bir süreç olup, kullanılan kalıbın dayanıklılığı kritik önem taşır. Kalıp, uygulanan basınca karşı plastik deformasyon göstermemeli ve tozla kimyasal reaksiyona girmemelidir. Sıcak presleme işleminin şematik gösterimi Şekil 3.16'da sunulmuştur (Kang, 2005).



Şekil 3.16. Sıcak pres mekanizması (Carter vd, 2007)

Sıcak izostatik presleme (HIP), bir konteyner içinde inert gaz kullanılarak gerçekleştirilen ve sıcak preslemeye kıyasla çok daha yüksek basınçların uygulandığı bir sinterleme yöntemidir. Bu yöntemde uygulanan basınç yaklaşık 300 MPa seviyelerine ulaşmaktadır.



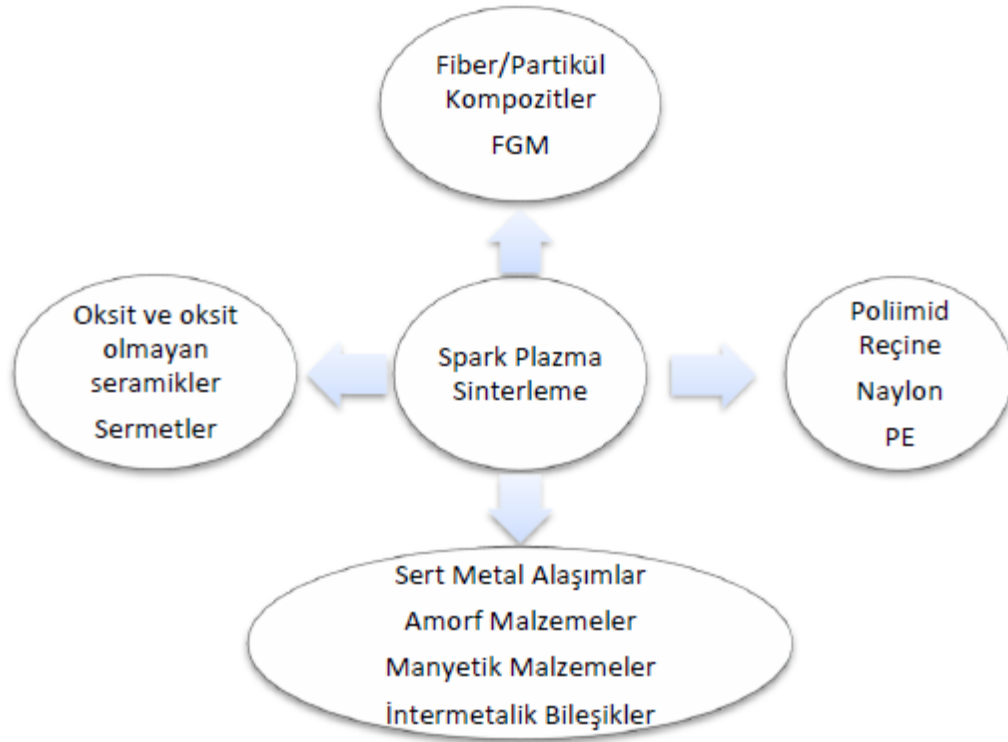
Şekil 3.17. Sıcak izostatik pres mekanizması (Suvacı, 2008)

Gaz Basıncılı Sinterleme (GPS), sıcak izostatik sinterlemenin bir çeşidi olup, genellikle 10 MPa'nın altında basınçlarda uygulanır. Bu yöntemde, malzemeler yüksek buhar basıncı kullanılarak sinterlenir ve özellikle Si_3N_4 gibi malzemelerin işlenmesinde başarılı sonuçlar elde edilir. GPS süreci, iki aşamalı bir sinterleme işlemine dayanır: İlk aşamada düşük basınçta sinterleme gerçekleştirilirken, ikinci aşamada porlar izole edilip yüksek basınç altında sinterleme tamamlanır. Sıcak izostatik pres sinterleme ise, malzemenin tam yoğunluğa ulaşmasını sağlamak veya sinterleme sırasında oluşabilecek kusurları gidermek amacıyla uygulanabilir. Şekil 3.17'de, sıcak izostatik presin detaylı görünümü sunulmuştur (Suvacı, 2008).

3.1.8.2. Spark plazma sinterleme

Spark Plazma Sinterleme (SPS) yöntemi, 1990'lı yıllardan itibaren, sıcak presleme yönteminin geliştirilmesi ve darbeli doğru akım uygulanmasıyla ortaya çıkmıştır. Bu yöntem, toz partiküllerine elektrik enerjisi verilerek, düşük sıcaklık ve kısa sürelerde tozların hızlı bir şekilde birbirine bağlanmasını sağlar. Böylece daha hızlı ve verimli bir

sinterleme süreci gerçekleştirilir (Kang, 2005). SPS, özellikle zor işlenen malzemeler ve ince yapılı parçalar için avantajlı bir teknik olup, işlem sıcaklıklarının düşürülmesine olanak tanır.



Şekil 3.18. Spark plazma sinterleme yöntemi ile üretilebilen malzeme grupları

Spark Plazma Sinterleme (SPS), modern bir sinterleme ve sentezleme teknolojisidir. Bu yöntem, sıcak presleme, sıcak izostatik presleme ve atmosferik sinterleme gibi geleneksel tekniklere kıyasla önemli avantajlar sunar. SPS, daha yüksek sinterleme hızları, daha düşük işlem sıcaklıkları ve sinterleme sırasında tane büyümesinin engellenmesi gibi özelliklerle öne çıkar. Bu avantajlar, malzemenin performansını artırırken işlem süresini kısaltmakta ve enerji tasarrufu sağlamaktadır (Akın, 2010).

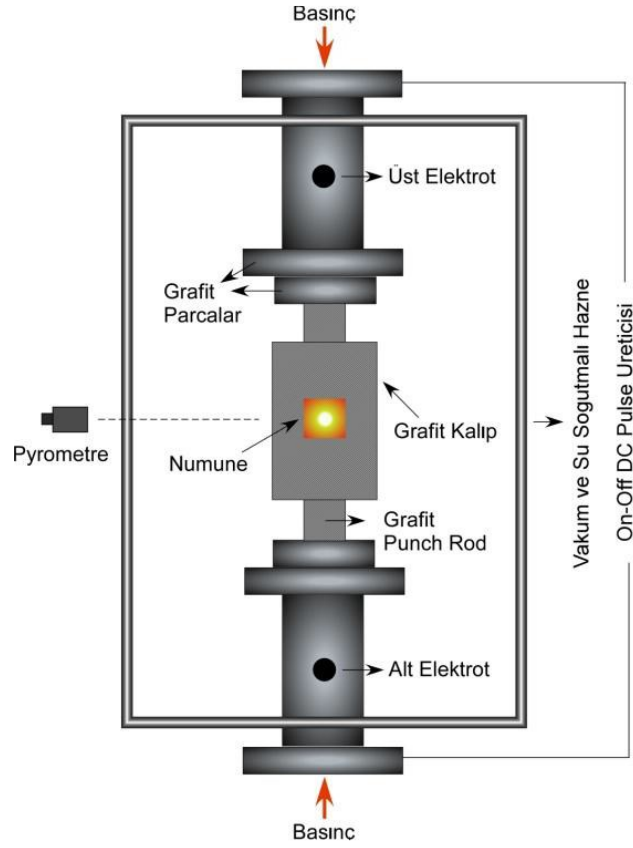
Elektriksel aktivasyon yöntemleriyle malzeme işleme üzerine ilk araştırmalar, 1930'ların sonlarında Amerika'da başlamıştır. Spark sinterleme, sinterleme sırasında darbeli akım uygulamasına dayanan bir teknik olarak Japonya'da geliştirilmiş ve 1960'larda patentlenmiştir. 1986 yılında, düşük basınç ve düşük darbeli doğru akım kullanabilen Plazma Etkin Sinterleme (Plasma Activated Sintering) sistemi geliştirilmiştir. Ardından,

1989 yılında hem düşük hem yüksek basınç altında malzeme üretimi yapabilen ve yüksek darbeli doğru akım geçirebilen Spark Plazma Sinterleme (SPS) sistemi ortaya çıkmıştır. Günümüzde, bu sistemin fonksiyonellik, tekrarlanabilirlik ve performans iyileştirmelerine yönelik çalışmalar devam etmektedir (Akın, 2010).

SPS sisteminde, cihaz kapasitesine bağlı olarak birkaç volt ile birkaç bin amper arasında değişen doğru akım doğrudan grafit kalıp ve numuneye uygulanır. Uygulanan bu akım, kalıbı bir ısıtma direnci gibi çalıştırarak numune üzerinde hızlı bir yoğunlaşma sağlar. Akım etkisiyle toz taneleri arasında kısa devreler, arklar, kıvılcımlar ve plazmalar oluşur; ancak bu plazma oluşumu ile ilgili farklı görüşler mevcuttur. SPS yöntemi, tane büyümesi olmaksızın yalnızca birkaç dakika içinde tam yoğunluklu yapılar elde edilmesini mümkün kılar. Özellikle nano boyutlu tozların sinterlenmesinde, geleneksel sıcak presleme yöntemlerinde toz boyutundaki artışın tane büyümesine yol açması ve bunun sonucu olarak mikron seviyelerine ulaşan tanelerin beklenen mekanik özellikleri sağlayamaması, SPS yönteminin önemli bir avantajıdır (Akın, 2010).

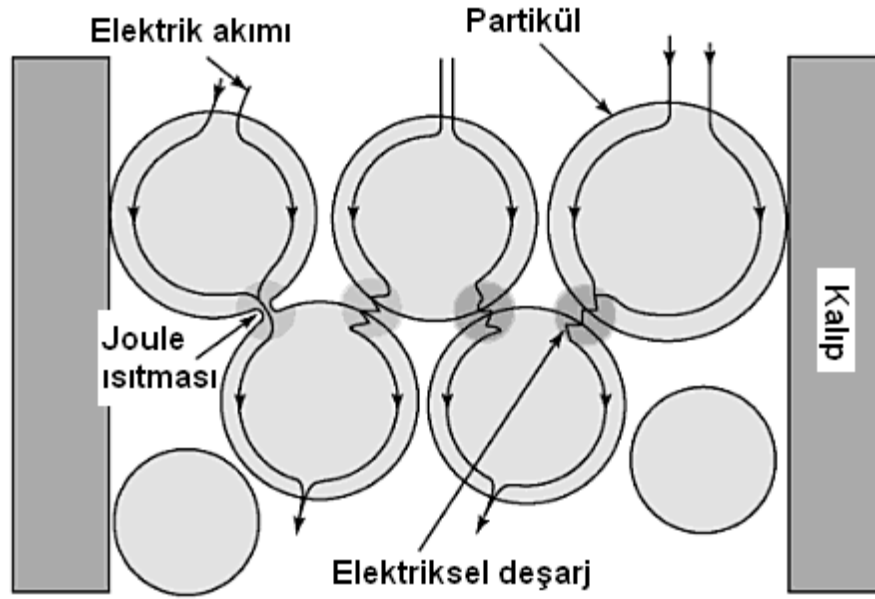
SPS işleminde, grafit kalıp ve numune doğrudan yüksek darbeli akımla ısıtıldığı için ısı verim oldukça yüksektir. Bu yüksek verimli ısıtma, ısının homojen dağılımını sağlar ve yüzeyde pürifikasyon ile aktivasyon süreçlerini tetikler. Sonuç olarak, bu yöntemle yüksek yoğunluklu, kaliteli ve homojen sinterlenmiş çeşitli numuneler elde etmek mümkündür (Akın, 2010).

SPS sistemi (Şekil 3.19), temel olarak tek eksenli basınç uygulama mekanizması, su soğutmalı üst ve alt elektrotlar, su soğutmalı vakum ünitesi, atmosfer kontrol ünitesi (vakum/hava/gaz), darbeli doğru akım üreticisi, soğutma suyu ünitesi, pozisyon ve yer değiştirme kontrol ünitesi, basınç göstergesi ile çeşitli güvenlik sistemlerini içeren kontrol panelinden oluşur. Bu sistemde, toz partiküllerinin yüzeyleri, geleneksel sinterleme yöntemlerine kıyasla darbeli doğru akım sayesinde daha etkin bir şekilde aktif hale gelir. Mikro ve makro düzeyde malzeme taşınımının kolaylaşmasıyla, düşük sıcaklıklarda ve kısa sürelerde yoğun ve homojen malzemeler elde edilmesi mümkün olur (Akın, 2010).



Şekil 3.19. Spark plazma sinterleme (SPS) sisteminin şematik gösterimi (Akın, 2010)

SPS prosesinde, toz partiküllerine özel bir güç kaynağı tarafından açık-kapalı darbeleri doğru akım ve voltaj uygulanır. Bu akım, partiküller arasında elektriksel iletim sağlayarak sinterleme sürecinin başlamasını tetikler. Şekil 3.20’de, bu doğru akımın partiküller arasındaki akış mekanizması detaylı olarak gösterilmiştir (Akın, 2010).



Şekil 3.20. Partiküller arasında darbeli akım akışı (Akın, 2010)

SPS prosesi sırasında malzeme taşınımını etkileyen temel parametreler arasında uygulanan yük, sinterleme gerilmesi (yüzey gerilimi) ve elektrik alanın difüzyona olan katkısı yer almaktadır. Elektrik alan, kararlı elektro-göç (steady-state electromigration) mekanizmasıyla etkinleşir; elektro-göç, difüzyonun bir sonucu olarak ortaya çıkar, ancak hareketi elektrik alan tarafından yönlendirilir. Difüzyon için gerekli itici kuvvetler ise, malzeme içerisindeki yüksek yoğunluklu tane-porozite ve tane-tane etkileşim alanlarından kaynaklanmaktadır (Akın, 2010).

3.1.9. İkincil İşlemler

Sinterlenmiş parçalar, yüzey kalitesinin artırılması, boyutsal toleransların sağlanması, korozyon direncinin iyileştirilmesi ve yoğunluk değerlerinin yükseltilmesi amacıyla genellikle ikincil işlemlere tabi tutulur. Bu işlemler arasında taşlama, kaplama, baskılama ve zımparalama gibi yöntemler yer alır. Söz konusu işlemler, parçaların mekanik performansını ve dayanıklılığını artırmak açısından büyük önem taşımaktadır (Hryha vd., 2008).

3.2. Toz Metalurjisi Yönteminin Avantajları

Toz metalurjisi, diğer üretim yöntemlerine göre birçok avantaj sağlamaktadır. Bu yöntemin başlıca üstünlükleri arasında, yüksek üretim hızı sayesinde işgücü ihtiyacının azalması, karmaşık geometrilere sahip parçaların kolaylıkla üretilebilmesi ve farklı tozların kimyasal reaksiyona girmeden birlikte kullanılabilmesi yer almaktadır. Ayrıca, üretilen parçalar yüksek fiziksel ve mekanik kalitede olup, ince tane boyutları, kolay işlenebilirlik ve yüksek çekme mukavemeti ile dayanıklılık gösterir. Talaşlı imalat gibi ikincil işlemlere gerek duyulmaması, malzeme kaybını minimuma indirirken ergime kaynaklı kayıpları ortadan kaldırır. Toz metalurjisi, seri üretimlere uygun yapısıyla da ekonomik bir üretim yöntemi sunar. Tüm bu özellikler, yöntemin verimliliğini ve maliyet etkinliğini artırmaktadır (Demir, 1992).

3.3. Toz Metalurjisi Yönteminin Dezavantajları

Toz metalurjisi yönteminin bazı dezavantajları da mevcuttur. Öncelikle, tozların homojen karıştırılamaması durumunda presleme aşamasında ürünlerin deformasyon riski artar. Ayrıca, üretim sürecinde genellikle yaklaşık %5 oranında hurda oluşabilir; ancak bu oranı düşürmeye yönelik araştırmalar sürmektedir. Toz metalurjisi ürünlerinde gözeneklilik sık karşılaşılan ve istenmeyen bir problemdir. Bunun yanında, talaşlı imalat yöntemlerine kıyasla boyutsal toleranslar daha geniştir. Metal tozları genellikle maliyetli olup, bazı türleri yanıcı özellik taşıyabilir; bu nedenle kullanımı sırasında dikkatli olunmalıdır. Tozlara dış etkenlerin karışması malzemenin yapısını bozarak mekanik özelliklerde olumsuz değişikliklere sebep olabilir. Ayrıca, toz metalurjisi yöntemiyle çok büyük boyutlu parçaların üretimi zordur (Diler, 2012; Demir, 1992).

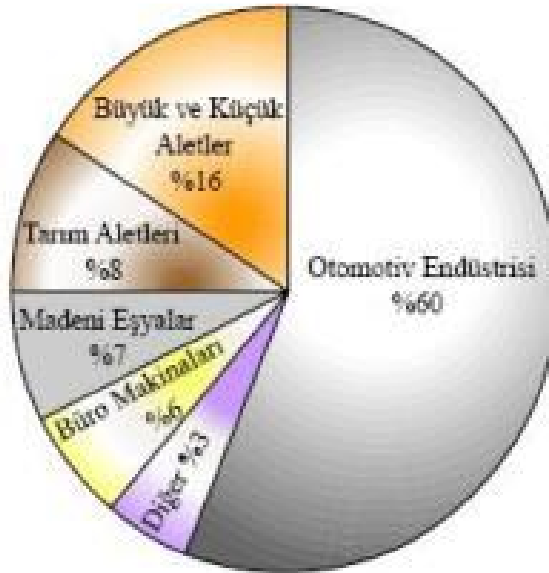
3.4. Toz Metalurjisinin Kullanım Alanları

Toz metalurjisi, pek çok endüstride ve uygulama alanında tercih edilen bir üretim yöntemidir. Özellikle otomotiv sektörü olmak üzere, toz metalurjisinin kullanıldığı bazı alanlar şunlardır:

Tungsten lamba filamentleri

Dişli çarklar
 Ortopedik gereçler
 Yağlamasız yataklar
 Elektrik kontakları
 Ofis makineleri parçaları
 Yüksek sıcaklık filtreleri
 Uçak fren balataları
 Jet motor parçaları
 Kaynak elektrotları
 Katalizörler
 Lehimleme aletleri
 Nükleer güç yakıt elemanları
 Devre levhaları
 Dişçilikte kullanılan malzemeler

Bu geniş yelpazede kullanım, toz metalurjisinin sunduğu üstün özellikler ve ekonomik üretim avantajları sayesinde birçok endüstride tercih edilmesini sağlamaktadır (Ataş, 2003).



Şekil 3.21. Toz metalurjisinin kullanım alanları (Aslan, 2022)

4. KAYNAK ÖZETLERİ

Yiwen Lei vd. (2020), nikel esaslı süperalaşım numunelerini toz metalurjisi ile üretmişlerdir. Numuneleri, yaklaşık 1 saat süreyle 200 rpm hızında mekanik alaşımlama cihazında karıştırmışlardır. Öğütme ortamı olarak paslanmaz çelik kap ve sertleştirilmiş çelik bilyalar kullanılmıştır. Karıştırılan tozlara, ham mukavemet sağlamak amacıyla bağlayıcı eklenmiş ve ardından yaklaşık 140 MPa basınçla çift yönlü preslenmiştir. Numuneler, 5 L/dakika akış hızında argon atmosferi altında sinterlenmiştir. Sinterleme sıcaklıklarının numune üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla, 1050, 1080, 1110 ve 1140 °C sıcaklıklarda sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemi sırasında, 1050 °C'de az miktarda sıvı faz oluşmuş ve alaşımın tane yapısının düzensiz ve dağınık olduğu gözlemlenmiştir. 1080 ve 1110 °C sıcaklıklarda sinterleme sırasında daha fazla sıvı faz oluştuğu belirlenmiştir. 1140 °C'de sinterleme yapıldığında ise, M7C3 partiküllerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu sinterleme sıcaklıkları arasında, sertlik değerlerinde doğrusal bir artış gözlemlenmiştir. Ancak, 1140 °C'nin üzerindeki sinterleme sıcaklıklarında sertlik değerinde belirgin bir düşüş meydana gelmiştir. Bu bulgular, sinterleme sıcaklığının alaşımın yapısı ve mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Wei-min Guo vd. (2006), nikel esaslı süperalaşım numunelerini toz metalurjisi yöntemiyle üretmişlerdir. Numuneler, sıcak izostatik presleme yöntemiyle hazırlanmış ve ardından mikro yapı ile faz analizleri gerçekleştirilmiştir. Isıl işlem sonrasında, numunelerin mikroyapılarında primer dendritler ve primer parçacık sınırları gözlemlenmiştir. Ayrıca, numunelerin tane boyutunun yaklaşık ASTM 6-7 aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma, numunelerin mikro yapısal özelliklerinin ve tane boyutunun üretim yöntemi ve ısıtılma koşullarıyla nasıl etkilendiğini ortaya koymaktadır.

Zhu vd. (2004), toz TiNi karışımlarının üretimi üzerine bir deneysel çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, Ti-Ni tozları 1:1 oranında karıştırılmış ve karışım 24 saat boyunca homojen bir yapı elde edebilmek için karıştırılmıştır. Karıştırılan tozlar, 200 MPa basınçla preslenmiş ve ardından Ar gazı atmosferinde 980 °C'de 2, 4 ve 6 saat süreyle

sinterlenmiştir. Sinterleme sonrasında yapılan XRD analizleri, numunelerde NiTi, NiTi₂, Ni₃Ti ve Ni fazlarının bulunduğunu göstermiştir. Ayrıca, sinterleme süresinin uzatılması, bükme ve basma dayanımlarında artışa, ortalama gözenek çapında ise azalmaya yol açmıştır. Bu bulgular, sinterleme süresi ile mekanik özellikler ve gözeneklilik arasında bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır.

Artyukhova ve Yasenchuk (2015), farklı sinterleme sıcaklıklarında üretilen TiNi tozları üzerinde yaptıkları çalışmada, üç farklı fazın varlığını gözlemlemişlerdir: NiTi₂, NiTi ve Ni₃Ti. Ayrıca, bu numunelerde Ni ve Ti çökeltileri de tespit edilmiştir. Çalışma, TiNi tozları için optimal sinterleme sıcaklığının 950°C olduğunu ve sinterleme süresinin 3 saat olarak belirlendiğini ortaya koymuştur. Sinterleme süresi 3 saatin üzerine çıktığında, numunelerde gerilmeler ve ikincil TiNi fazlarının oluşmaya başladığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, sinterleme süresi ve sıcaklığının numunenin mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini göstermektedir.

Dikici (2010), Ni-Ti alaşımının toz metalurjisi yöntemiyle en iyi mekanik özelliklere ulaşabilmesi için Ti ve Ni tozlarının, uçucu toz olarak belirli oranlarda üre ile kuru karıştırma ve mekanik karışım yöntemleriyle harmanlandığını belirtmiştir. Bu karışım, presleme ve sinterleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Çalışmada, presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı ve uçucu toz oranının karışımın fiziksel, yapısal ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, üre oranının arttıkça basma dayanımının azaldığını göstermiştir. Ayrıca, presleme basıncının artırılmasıyla üretilen örneklerin basma dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. 200 MPa basınçla preslenen numunelerde porozite oranı %31-34 arasında iken, 625 MPa basınçla preslenen numunelerde bu oran %28-31 arasında değişmiştir. Bu bulgular, presleme basıncının ve üre oranının mekanik özelliklere olan etkilerini açıkça ortaya koymaktadır.

Subbiah vd. (2020), AlSi10Mg alaşımının SLE yöntemiyle üretimi üzerinde yaptıkları çalışmada, destek yapılarının, tarama yönünün ve son işlemenin mekanik özellikler, yüzey pürüzlülüğü ve mikroskobik yapı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Araştırmacılar, SLE yöntemiyle üretilen ürünlerde destek yapısının önemli bir rol oynadığını vurgulamış ve sonlu eleman analizini kullanarak optimum destek türünü belirlemişlerdir. Deney sonuçlarına göre, SLE yöntemiyle üretilen numunelerin geleneksel yöntemle üretilenlere

kıyasla %20 daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir. Ancak, bu artışa rağmen uzama değerinde bir azalma gözlemlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü analizleri de, SLE yönteminin geleneksel üretim yöntemlerine alternatif olabileceğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, SLE yönteminin potansiyel avantajlarını ve sınırlamalarını değerlendiren önemli veriler sunmaktadır.

Michaela vd. (2018), AlSi10Mg alaşımının SLE yöntemi ile üretimini, 120 °C ile 180 °C arasındaki sıcaklıklarda (20 °C'lik adımlarla) gerçekleştirerek incelemiştir. 160 °C'de üretilen numunede akma mukavemetinde %5'lik bir artış gözlemlerken, aynı anda uzama değerinde %60'luk belirgin bir azalma tespit etmişlerdir. Yapılan TEM analizleri, bu davranışın aşırı doymuş çökeltiler nedeniyle oluşan nano boyutlu saf silikon iğnelerinin varlığıyla ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Araştırmacılar, genel olarak AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalat yöntemiyle sorunsuz bir şekilde çalışabilmesi için sıcaklıkların kritik bir faktör olduğunu vurgulamışlardır. Bu bulgular, alaşımın mekanik özelliklerinin ve mikro yapısının sıcaklıkla nasıl etkileşime girdiğini anlamak adına önemli bir gösterge sunmaktadır.

Leon vd. (2017), SLE yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımını gerilim azaltmalı ısıtma işlemi tabi tutarak, bu işlemin yüzey pürüzlülüğü, korozyon direnci ve korozyon yorulma performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Karşılaştırma yapmak amacıyla, üretilen numuneler öncelikle cilalanmış ve aynı parametrelerle işlenmeyen numunelerle de karşılaştırılmıştır. Araştırmada, cilalanmış ve işlem görmemiş numunelerin korozyon direncinin, gerilim azaltmalı ısıtma işlemi tabi tutulmuş numunelere göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Isıtma işlemi tabi tutulmuş numunelerde, üretim sürecinde dış yüzeyde oluşan büyük miktarda oyuklar, artan yüzey pürüzlülüğü ve diğer yüzey kusurlarının, korozyon direncini zayıflattığı tespit edilmiştir. Ayrıca, gerilim azaltmalı ısıtma işlemi tabi tutulmuş numunelerin korozyon yorulma ömrü, diğer örneklerle kıyasla daha kısa bulunmuştur. Araştırmacılar, bu çalışmada, gerilim azaltmalı numunelerde çatlak başlatma, ilerleme ve korozyon yorulma başarısızlıklarıyla ilgili önemli sonuçlar elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Nesma vd. (2016), SLE yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımının mekanik özelliklerini nano, mikro ve makro ölçeklerde inceleyerek, geleneksel T6 ısıtma işleminin etkisini mikro

yapı üzerinde değerlendirmişlerdir. Çalışmada, ince mikro yapı ve alaşım tozlarının homojen dağılımı sayesinde, malzeme içinde tek tip nano sertlik oluştuğu gözlemlenmiştir. Ancak ısıtıl işlem sonrasında, nano sertlikte gözle görülür değişiklikler olduğu belirtilmiştir. Bu durum, ısıtıl işlemin malzemenin sertlik değerinde yumuşama etkisi yarattığını ve bunun, geleneksel üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında zıt bir sonuç olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, üretilen numunelerin akma mukavemeti, döküm örneklerine göre daha yüksek olmasına rağmen, kırılmaya karşı uzamanın zayıf olduğu gözlemlenmiştir. Sürekliliğin, ısıtıl işlemle önemli ölçüde arttığı, fakat gerilme mukavemetinde çok az bir azalma olduğu tespit edilmiştir. Bu da, dökme numunelere kıyasla yüksek akma mukavemetinin büyük ölçüde korunduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, Nesma et al.'ın çalışması, geleneksel işlenmiş malzemelere kıyasla, SLE yöntemiyle üretilen numunelerin daha gelişmiş mekanik özelliklere sahip olduğunu ve bu üretim yönteminin, malzemenin mekanik performansını önemli ölçüde iyileştirebileceğini ortaya koymaktadır. Bu tür bulgular, özellikle eklemeli imalat ve malzeme mühendisliği alanında yeni üretim tekniklerinin önemini vurgulamaktadır.

Wang vd. (2017), SLE yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımının yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini LED kullanarak incelemişlerdir. Araştırmada, SLE yöntemiyle üretilen numuneler, endüstriyel X ışını, CT algılama sistemi ve katı yoğunlukölçer ile detaylı bir şekilde karakterize edilmiştir. Elde edilen verilere göre, lazer enerji yoğunluğunun artışıyla numunelerdeki yoğunluk önemli ölçüde artmış, ancak belirli bir noktadan sonra bu artış yavaşlamıştır. Ayrıca, ilk başlarda azalan yüzey pürüzlülüğü ve gözenekliliğin, enerji yoğunluğunun daha da artmasıyla tekrar yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu bulgular, lazer enerji yoğunluğunun, SLE yöntemiyle üretilen numunelerin yüzey morfolojisi üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Çok düşük veya çok yüksek enerji yoğunluğunun, malzemedeki istenmeyen gözeneklilik ve mikro çatlak oluşumuna yol açabileceği belirtilmiştir. Sonuç olarak, bu araştırma, lazer enerji yoğunluğunun kontrol edilmesinin, üretilen parçaların kalitesi ve performansı üzerinde büyük bir etkisi olduğunu vurgulamaktadır. Bu tür araştırmalar, endüstriyel üretim süreçlerinde daha hassas kontrol ve optimize edilmiş üretim parametrelerinin belirlenmesine olanak tanır, böylece malzeme performansı iyileştirilebilir ve hatalar en aza indirilebilir.

Kempen vd. (2012), SLE yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımasının mekanik özelliklerini inceleyerek, bu numunelerin çekme mukavemeti, uzama, young modülü, darbe tokluğu ve sertlik gibi önemli parametrelerde geleneksel üretim yöntemleriyle karşılaştırmalar yapmıştır. Araştırmanın bulguları, SLE yöntemi ile üretilen AlSi10Mg alaşımlarının geleneksel üretimle yapılan numunelere göre daha üstün mekanik özelliklere sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuç, SLE yönteminin, özellikle karmaşık geometrilere sahip parçaların üretiminde potansiyel avantajlar sunduğunu ve mekanik performansını optimize etme konusunda önemli bir fırsat sunduğunu göstermektedir. Kempen vd. çalışması, eklemeli üretim teknolojilerinin geleneksel üretim yöntemleriyle kıyaslandığında, özellikle malzeme özellikleri açısından daha verimli bir seçenek olabileceğini vurgulamaktadır. Bu tür yenilikçi üretim teknikleri, malzeme tasarımındaki esnekliği artırarak, mühendislik uygulamalarında yüksek performanslı, dayanıklı parçaların üretimini mümkün kılabilir. Bu bulgular, SLE teknolojisinin endüstriyel alanda daha geniş bir kullanım alanı bulabileceğini ve gelecekte daha fazla araştırma ile iyileştirilebileceğini düşündürmektedir.

Lattanzi vd. (2017), otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan yüksek basınçlı alüminyum döküm alaşımlarının mikro yapı özelliklerinin, yorulma mukavemeti üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, AlSi9Cu3(Fe) alaşımına ait döküm numunelerinin tek eksenli yorulma testlerine tabi tutularak, döküm parçasının mikro yapısının yorulma çatlağı başlangıcı ve yayılmasını nasıl etkilediğini belirlemeyi amaçlamışlardır. Bu tür analizler, özellikle otomotiv sektöründeki uygulamalarda, malzeme performansının artırılması adına kritik öneme sahiptir. Döküm hatalarının ve mikro yapıdaki farklılıkların, malzemenin yorulma dayanımını nasıl etkilediği konusunda bilgi sağlamak, üretim süreçlerinin optimize edilmesine ve daha dayanıklı parçaların üretilmesine olanak tanıyabilir. Lattanzi ve ekibinin çalışması, yüksek basınçlı döküm alaşımlarının mikro yapıdaki inceliklerin, parçaların uzun ömürlü performansını belirleyici faktörler arasında yer aldığını ortaya koymaktadır.

Wan vd. (2013), alüminyum döküm alaşımlarının yüksek dayanımlı yapısal parçalarda kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla, yüksek basınçlı döküm ve vakumlu basınçlı döküm yöntemleriyle üretilen Al-Mg-Si-Mn numunelerinin yorulma davranışını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, vakumlu basınçlı döküm ile üretilen

numunelerin, çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve uzama gibi mekanik özellikler açısından yüksek basınçlı döküm numunelerinden daha iyi performans gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Ancak, her iki üretim yöntemi arasında yorulma ömürlerinin benzer olduğu, fakat vakumlu basınçlı döküm numunelerinin yorulma ömrünün daha az dağınık olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, vakumlu basınçlı dökümün, yüksek basınçlı dökümle karşılaştırıldığında mekanik özellikler açısından bir avantaj sağladığını ve özellikle demir içeren partiküllerin zararlı etkilerini ortadan kaldırma potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, porozite, oksit inklüzyonları ve sünek deformasyonun, çatlak başlangıcının başlıca sebepleri olduğu ve transgranüler kırılmanın baskın çatlak yayılma mekanizması olarak gerçekleştiği belirtilmiştir. Bu durum, malzeme tasarımında dikkat edilmesi gereken unsurlardır çünkü bu faktörler malzemenin uzun ömürlü performansını doğrudan etkileyebilir. Vakumlu basınçlı dökümün, alüminyum alaşımlarının dayanım ve yorulma ömrü üzerindeki etkilerini gösteren bu araştırma, üretim yönteminin geliştirilmesi ve optimizasyonu açısından önemli bir kılavuz niteliği taşımaktadır.

Avalle vd. (2002), döküm hatalarının, özellikle yüksek basınçlı döküm alüminyum alaşımlarının statik ve yorulma dayanımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Döküm hataları genellikle gaz ve çekinti gözenekleri, soğuk birleşmeler ve cüruf kaynaklı oluşan kusurlardan kaynaklanmaktadır. Araştırmalarında, yolluk tasarımına göre farklılık gösteren üç numune grubu üzerinde yapılan yorulma dayanımı testlerinde, bu hataların yorulma dayanımı üzerinde önemli bir değişikliğe yol açmadığı gözlemlenmiştir. Ancak, döküm hatalarının varlığına rağmen, kalite kontrol kriterlerine göre maksimum kabul edilebilir gözeneklilik seviyesinin belirlenmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Bu seviyenin, özellikle kalın bölümlerin merkezinde yer alan boşluklar için uygun olmayacağı belirtilmiştir. Bu çalışma, döküm hatalarının etkilerini anlamak ve kalite kontrol süreçlerinin doğruluğunu sağlamak açısından önemli bir katkı sağlamaktadır. Özellikle, yoğunluk ve gözeneklilik gibi parametrelerin, döküm parçalarının mekanik özellikleri üzerindeki potansiyel etkileri göz önünde bulundurularak, döküm kalitesinin optimize edilmesi gerektiği sonucuna varılabilir. Bu bağlamda, her ne kadar tasarımda yer alan farklılıklar yorulma dayanımını etkilemese de, döküm hatalarına karşı hassasiyetin artırılması, malzemenin uzun ömürlü ve dayanıklı olabilmesi için kritik bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.

Li vd. (2015), farklı kompozisyonlar, ısıt işlemler ve mikro yapılarla üretilmiş dört farklı alüminyum alaşımı üzerinde ultrasonik yorulma testleri gerçekleştirmişlerdir. Yüksek basınç, alçak basınç ve kuma döküm yöntemleriyle üretilen bu alaşımlar üzerinde yapılan testler, kuru hava, laboratuvar havası ve suya batırılmış ortamda gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, bazı alaşımların ultrasonik yorulma ömürlerinin ortam neminden önemli ölçüde etkilendiğini ortaya koymuştur. Çalışma, alaşım kompozisyonu, akma dayanımı, ikincil dendrit kolu aralığı ve gözeneklilik gibi faktörlerin, çevresel nem etkisini arttıran anahtar unsurlar olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, malzemenin mekanik özelliklerinin ve çevresel koşulların birbirini nasıl etkileyebileceğini anlamak açısından önemli bir katkı sağlamaktadır. Özellikle çevresel nemin, malzemenin dayanımını ve yorulma ömrünü nasıl değiştirdiği konusundaki bulgular, malzeme tasarımı ve üretimi için kritik bilgiler sunmaktadır. Düşük nemli ortamlarda daha uzun ömürlü alaşımlar tercih edilirken, nemin etkisinin yüksek olduğu ortamlarda kullanılacak alaşımların tasarımına dikkat edilmesi gerektiği sonucuna ulaşılabilir. Bu, özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde, çevresel koşullara dayanıklı malzemelerin seçiminde rehberlik sağlayabilecek bir bulgudur.

Gül (2014), AlSi10Mg alaşımının ikincil yaşlanma sürecinin sertlik ve aşınma direnci üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışma, AlSi10Mg alaşım numunelerinin önce T6 ısıt işlemine tabi tutulduğunu, ardından ikincil yaşlanma süreciyle yeniden yaşlandırıldığını belirtmektedir. Aşındırıcı aşınma testleri sonucunda, ikincil yaşlanma işlemi uygulanan numunelerin en yüksek aşındırıcı dayanıklılığı sergilediği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, ikincil yaşlanma işleminin AlSi10Mg alaşımının aşınma direncini ve dayanıklılığını artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle otomotiv ve diğer endüstriyel uygulamalarda, malzemenin aşınmaya karşı dirençli olması büyük önem taşır. Bu çalışma, ikincil yaşlanma işleminin malzeme özelliklerini iyileştirebileceğini ve daha dayanıklı ürünlerin üretilebileceğini ortaya koyarak, AlSi10Mg alaşımının mühendislik uygulamalarındaki verimliliğini artıran önemli bir yaklaşım sunmaktadır.

Kahramanzade vd. (2021), Eİ tekniğiyle üretilen AlSi10Mg alaşımının yüzeyine Sürtünme Karıştırma işlemi (SKİ) uygulayarak, bu işlemin alaşımın yapısı, sertliği ve aşınma özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. SKİ işlemi sonrasında, eklemeli imalatla üretilen AlSi10Mg alaşımının karakteristik tabakalı yapısının karıştırma sonucu daha düz bir yapıya dönüştüğü gözlemlenmiştir. Bu değişim, alaşımın mekanik özellikleri üzerinde

önemli iyileşmelere yol açmıştır. SKİ işlemi, özellikle AlSi10Mg alaşımının aşınma direncini hem atmosferik hem de vakumlu ortamlarda belirgin şekilde artırmıştır. Araştırma ayrıca, atmosferik ortamdaki aşınma performansının vakum ortamındaki performanstan daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Bu, ortam koşullarının ve işlem parametrelerinin, malzemenin aşınma direncini etkileyebileceğini gösteriyor. Sonuç olarak, SKİ işlemi, AlSi10Mg alaşımının yüzey özelliklerini iyileştirerek, farklı ortam koşullarında daha dayanıklı hale getirilmesine olanak tanımaktadır. Bu çalışma, özellikle endüstriyel uygulamalarda malzeme performansını artırmak isteyenler için değerli bir yöntem sunmaktadır.

Varmus vd. (2021), AlSi10Mg alaşımlarının yorulma performansını inceledikleri çalışmalarında, mikro yapı, yüzey özellikleri ve yorulma davranışı arasındaki ilişkiyi ortaya koymayı hedeflemişlerdir. Sonuçlar, alaşımın yorulma davranışının büyük ölçüde numunenin üretim yönüne bağlı olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, malzemenin yönlü özelliklerinin, özellikle yorulma ömrü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Yüzeye yakın malzeme yapısının metalografik incelemesi, bu etkileşimin çok daha belirgin hale geldiğini ve yüzeyin malzeme davranışı üzerindeki etkilerini gözler önüne serdiğini ortaya koymuştur. Bu çalışma, üretim süreçlerinin ve mikro yapı özelliklerinin, özellikle yorulma gibi kritik performans kriterleri üzerinde ne kadar etkili olduğunu vurgulamaktadır. Yüzey özelliklerinin malzemenin dayanıklılığı üzerindeki belirleyici rolü, uygulamalı mühendislik ve üretim süreçlerinde göz önünde bulundurulması gereken önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Bu bulgular, AlSi10Mg alaşımlarının tasarımında ve üretiminde daha dayanıklı ve uzun ömürlü ürünler elde edilmesine yönelik önemli ipuçları sunmaktadır.

Ngnekou vd. (2021) araştırmasında, AlSi10Mg alaşımlarının hazır ve zemin yüzeylerinin yorulma dayanımının karakterizasyonu ve analizi üzerine yapılan incelemeler, önemli bulgular ortaya koymuştur. Araştırma, T6 işlemine tabi tutulan yüzeylerin, işlenmiş yüzeylerle benzer şekilde, hazır yüzeylerdeki yorulma özelliklerini de iyileştirdiğini göstermektedir. Numunelerin oryantasyonunun, hem bitmiş hem de işlenmiş malzemelerin yorulma mukavemetini etkilediği gözlemlenmiştir. Ancak, hazır malzemelerin yorulma sınırlarının pürüzlülükle doğrudan ilişkilendirilemediği belirtilmiştir, bu da yüzey pürüzlülüğünün yalnızca tek başına yorulma performansını açıklamadığını göstermektedir.

Bu bulgu, AlSi10Mg alaşımlarının yorulma davranışlarının daha karmaşık ve çok faktörlü bir süreç olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle mikro yapı, artık gerilme ve çoklu çatlak başlama bölgelerinin bu süreçteki rolü, malzeme tasarımında göz önünde bulundurulması gereken kritik unsurlar arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, AlSi10Mg bileşenlerinin yorulma kırılmasının kapsamlı bir şekilde tanımlanabilmesi için, mikro yapının ve gerilme durumlarının daha derinlemesine incelenmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Araştırma, bu alaşımlar için daha dayanıklı ve uzun ömürlü ürünlerin tasarımında önemli ipuçları sunmaktadır.

Romano vd. (2018) çalışması, Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen AlSi10Mg malzemesinin yorulma testleri üzerinden yapılan kapsamlı bir incelemeyi sunmaktadır. Araştırma, üretim hatalarının malzemenin yorulma ömrü ve mukavemeti üzerindeki etkilerini dikkate alarak, bu parametreleri tahmin edebilmek için yeni bir model önermektedir. Özellikle SLM sürecinde son yıllarda kaydedilen gelişmeler, malzemenin kalite ve yorulma direncinde kayda değer ilerlemelere yol açmıştır. Bu gelişmeler, numunenin yüzey ölçüm hacmindeki ilk kusur boyutunun dağılımını değerlendirerek yüksek döngü yorgunluğu (HCF) bölgesindeki yorulma ömrünün tahminini daha hassas bir şekilde yapmayı mümkün kılmaktadır. Araştırmacılar, malzeme üzerinde yapılan incelemelerde, plastisitenin etkisinin göz ardı edilemeyeceğini ve bu nedenle kırılma mekanizmasının uygulanmasının yorulma analizlerinde olumlu sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Bu bulgu, SLM yöntemiyle üretilen AlSi10Mg malzemesinin yorulma direncinin sadece yüzey kusurlarına dayalı değil, aynı zamanda malzemenin plastisite özelliklerine de bağlı olduğunu vurgulamaktadır. Genel olarak, bu çalışma, AlSi10Mg malzemelerinin yorulma davranışlarının daha doğru tahmin edilebilmesi için önemli bir metodolojik gelişmeyi temsil etmektedir ve bu tür modellerin malzeme mühendisliği ve tasarım süreçlerinde kullanımının faydalı olacağı söylenebilir.

Brandão vd. (2017) çalışması, AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalat (Eİ) süreçlerinde yaygın olarak gözlemlenen yorulma özelliklerinin, yüzey koşulları ve kusur popülasyonlarına bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Araştırma, eklemeli imalat parametrelerinin numunelerin mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini tam olarak anlamak için daha derinlemesine çalışmaların yapılması gerektiğine işaret etmektedir. Özellikle, metal tozu yatağı bazlı eklemeli imalat süreçlerinde yaygın olarak

uygulanan kontur parametrelerinin, üretim sırasında yer altı kusurlarına neden olabileceği ve bunun da yorulma performansını önemli ölçüde olumsuz yönde etkileyebileceği vurgulanmıştır. Bu bulgular, eklemeli imalatın yüzey kalitesinin ve iç yapısının yorulma özellikleri üzerindeki etkilerinin ne kadar kritik olduğunu göstermektedir. Ayrıca, mevcut eklemeli imalat parametrelerinin, potansiyel zayıflıklar ve kusurlar yaratabileceği gerçeği, üretim süreçlerinde kalite kontrolün ne kadar önemli olduğunu bir kez daha gözler önüne sermektedir. Bu çalışmanın bulguları, gelecekte eklemeli imalat süreçlerinin iyileştirilmesi ve daha sağlam, güvenilir parçaların üretilmesi için parametrelerin optimize edilmesi gerektiğine dair değerli bir rehber sunmaktadır.

Vatansever vd. (2018) çalışmasında, AlSi10Mg alaşımına uygulanan T6 ısıt işleminin, mikro yapıyı dönüştürdüğü ve mekanik özelliklerde iyileşmelere yol açtığı bulunmuştur. Yapılan taramalı elektron mikroskobu incelemeleri, T6 ısıt işleminin mikro yapıyı nasıl değiştirdiğini açıkça ortaya koymuştur. Özellikle, α -Al dendritinin sınırını oluşturan asiküler ötektik silikon fazının, ısıt işlem sonucunda küresel ve poligonal bir yapıya dönüştüğü ve bunun dendrit yapısının şekil değişimine yol açtığı gözlemlenmiştir. Bu bulgu, T6 ısıt işleminin sadece malzemenin mikro yapısal özelliklerini değil, aynı zamanda malzemenin mekanik performansını da önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Küreselleşen silikon fazı ve modifiye dendrit yapısı, malzemenin dayanıklılığını ve genel olarak mekanik niteliklerini güçlendirerek, AlSi10Mg alaşımının endüstriyel uygulamalarda daha verimli ve güvenilir bir seçenek olmasını sağlamaktadır. Bu sonuç, ısıt işlemlerin malzeme mühendisliğinde ne kadar etkili bir yöntem olduğunu ve mikro yapıyı kontrol etmenin, istenilen mekanik özellikleri elde etmek için ne kadar önemli olduğunu vurgulamaktadır.

Silvestri vd. (2020) çalışmasında, AlSi10Mg malzemelerinin üretiminde aynı teknolojik ve koşulları altında farklı ekipmanların kullanılmasıyla iş parçasının mekanik özelliklerinde önemli farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu bulgu, üretim sürecindeki ekipman ve tesisat seçimlerinin, malzemenin mekanik performansı üzerinde ne kadar belirleyici bir etkisi olduğunu göstermektedir. Özellikle kopma uzaması, son gerilme gerilmesi, akma dayanımı ve elastikiyet modülü gibi özelliklerin, kullanılan ekipmana bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Bu durum, üretim sürecinde kullanılan makinelerin ve ekipmanların kaliteyi doğrudan etkileyebileceğini ve belirli ekipmanlar ile daha üstün mekanik özelliklere sahip

ürünlerin elde edilebileceğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, bu çalışma, üretim süreçlerinde dikkatli ekipman seçiminin ve tesisatların önemini vurgulamaktadır. Üretim kalitesinin ve nihai ürünün mekanik özelliklerinin optimize edilmesi için doğru ekipmanların tercih edilmesi, endüstriyel uygulamalar için kritik bir faktör olabilir.

Kempana vd. (2012) çalışmasında, SLM yöntemiyle üretilen AlSi10Mg numuneleri ile dökme AlSi10Mg numunelerinin mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, sertlik, nihai çekme mukavemeti (UTS), uzama ve darbe enerjisi gibi önemli mekanik parametreleri kapsamaktadır. SLM yöntemiyle üretilen numunelerin, ince mikro yapısı ve homojen dağılımı sayesinde daha üstün mekanik özellikler sergilediği gözlemlenmiştir. Ancak, kopma uzamasında SLM örneklerinde belirli bir anizotropi olduğu da belirtilmiştir. Bu durum, eklemeli imalat sürecinin yönlendirilmiş yapı özellikleri nedeniyle, malzemenin mekanik davranışında yönsel farkların ortaya çıkabileceğini göstermektedir. Anizotropik özelliklerin, üretim yönüne bağlı olarak farklılık göstermesi, özellikle uygulamalı mühendislik ve tasarım açısından dikkate alınması gereken bir faktördür. Bu çalışma, SLM yöntemiyle üretilen malzemelerin, geleneksel dökme malzemelere kıyasla farklı mekanik özellikler sergileyebileceğini ve üretim yönünün bu özellikler üzerindeki etkilerini vurgulamaktadır.

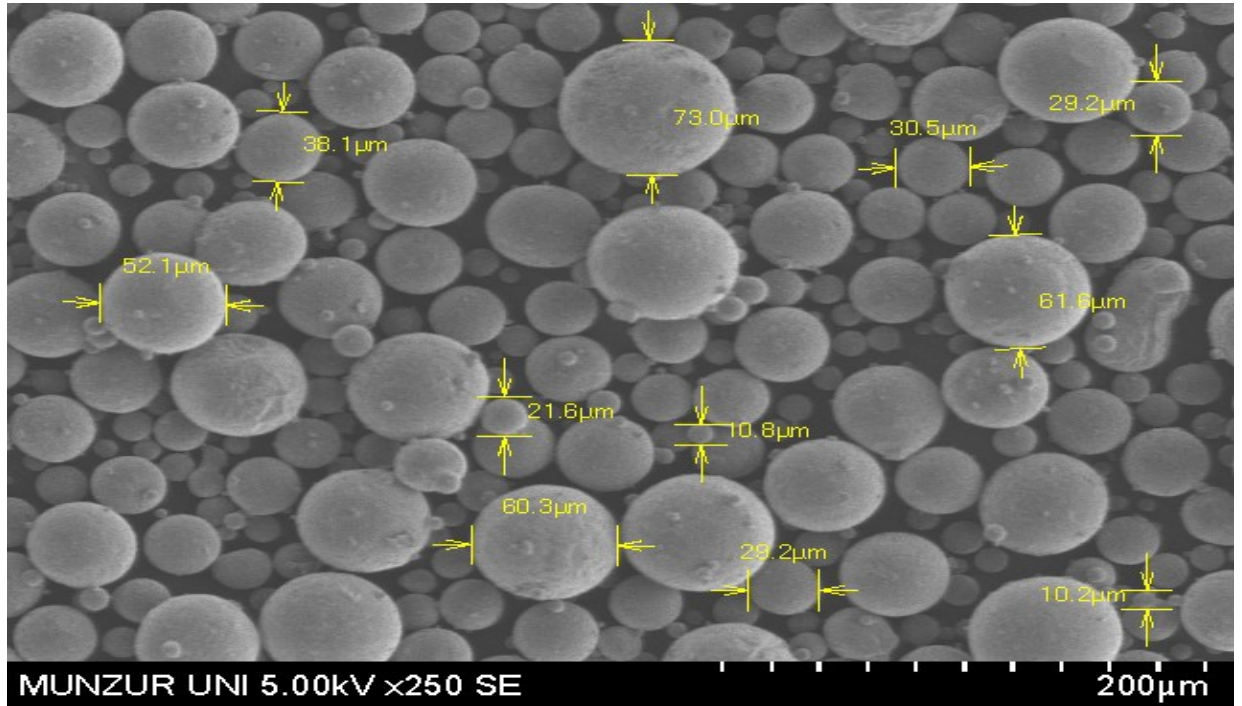
5. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, ağırlıkça %90 Al, %9 Si ve %1 Mg içeren ön alaşımlı AlSi10Mg tozu kullanılarak Spark Plazma Sinterleme (SPS) yöntemi ile Al bazlı alaşımlı malzemeler üretilmiştir. Üretilen numunelerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri kapsamlı şekilde incelenmiştir.

5.1. Toz ve Malzemenin Hazırlanması

5.1.1 Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada kullanılan AlSi10Mg alaşım tozu, Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiş olup, parçacık boyut dağılımı 10–73 μm aralığındadır. Şekil 5.1’de sunulan Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüsünden, toz partiküllerinin büyük oranda küresel morfolojiye sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5.1. Deneylerde kullanılan AlSi10Mg tozunun SEM görüntüsü

Hazır alınan ön alaşımlı AlSi10Mg tozunun görüntüsü Şekil 5.2'deki gibidir;



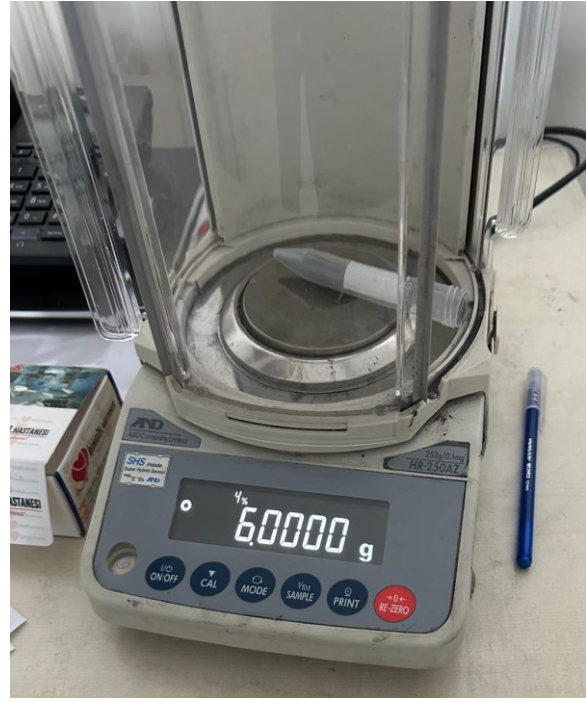
Şekil 5.2. Metal tozun görüntüsü

5.2. Presleme ve Sinterleme

Şekil 5.3.a'da görülen, her biri on iki adet göz içeren çift sıralı grafit kalıplara, Şekil 5.3.b'de gösterilen hassas terazi ile tartılan ve darası alınan falcon tüpleri kullanılarak 6 gramlık karışım tozları dökülmüştür. Daha sonra, Şekil 5.3.c'de yer alan manuel pres makinesi ile kalıplardaki hava boşlukları giderilmiştir. Son aşamada, argon gazı atmosferinde, 525 °C sıcaklık ve 35 MPa basınç altında, Şekil 5.3.a'da gösterilen grafit kalıplar kullanılarak, SPS makinesi ile üretim yapılmak üzere, Şekil 5.3.d'de görülen otomatik pres makinesi ile 5 dakika süreyle presleme işlemi uygulanmıştır.



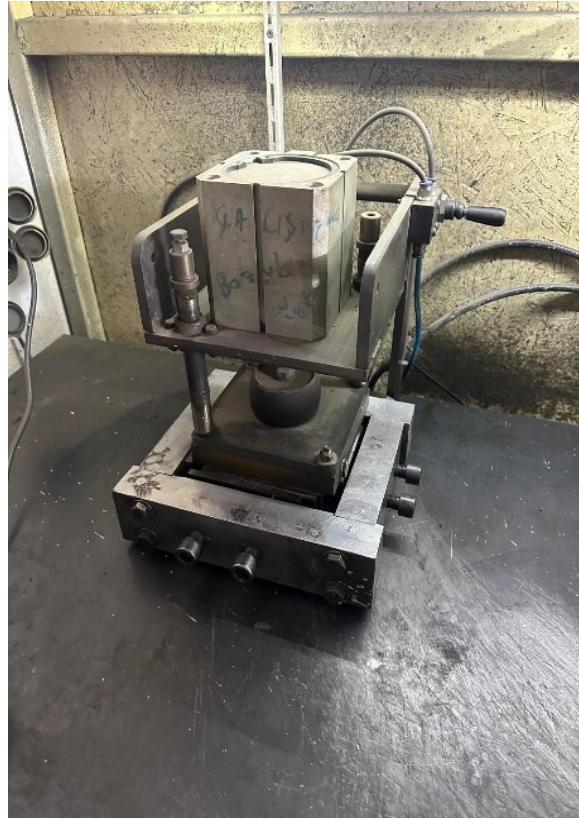
Şekil 5.3.a Grafit kalıp



Şekil 5.3.b hassas terazi



Şekil 5.3.c Manuel pres makinesi



Şekil 5.3.d Otomatik pres makinesi

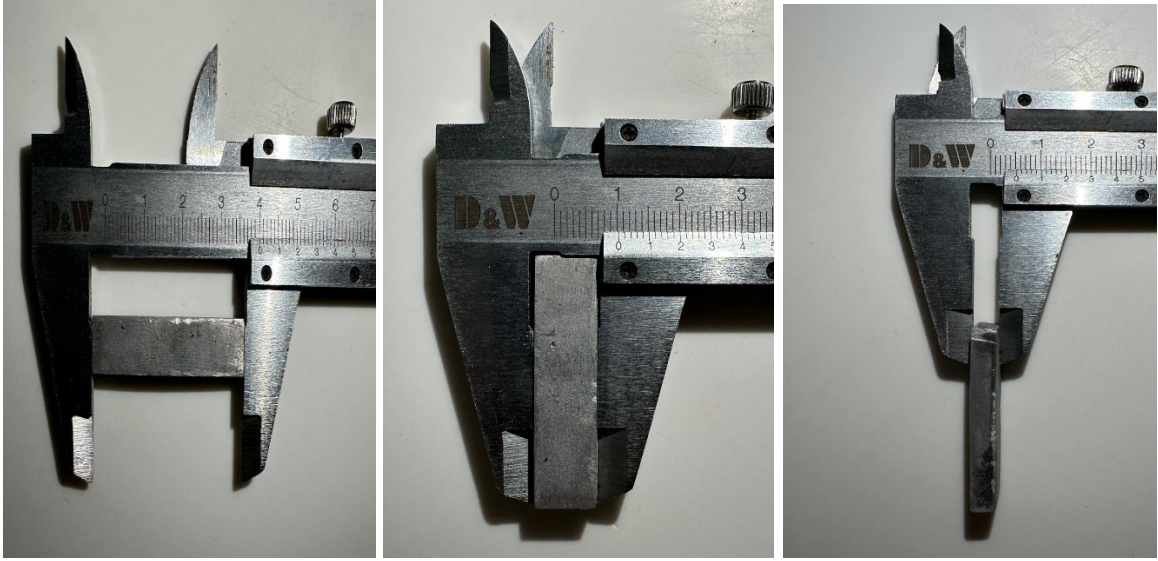
Ön hazırlığı tamamlanan kalıp, Şekil 5.4'te gösterilen SPS cihazında, 525 °C sıcaklık ve 350 kN basınç altında, 5 dakika süreyle sinterlenmiştir.



Şekil 5.4. SPS makinesi

5.3. Metalografik Hazırlık

Şekil 5.5'te verilen 40×10×4 mm ölçülerindeki SPS yöntemiyle üretilen numunelerin mikroyapı incelemesi için zımparalama ve parlatma işlemleri uygulanmıştır. Zımparalama, her numune için sırasıyla 120, 240, 400, 600, 1000 ve 1200 gritlik SiC zımpara kağıtları kullanılarak, sulu ortamda ve Şekil 5.6'da gösterilen zımpara-parlatma makinesinde gerçekleştirilmiştir. Ardından, çuha bezi ve 1 µm elmas süspansiyonu ile parlatma işlemi tamamlanmıştır.



Şekil 5.5. SPS’de 40x10x4 mm ölçülerinde hazırlanan numuneler

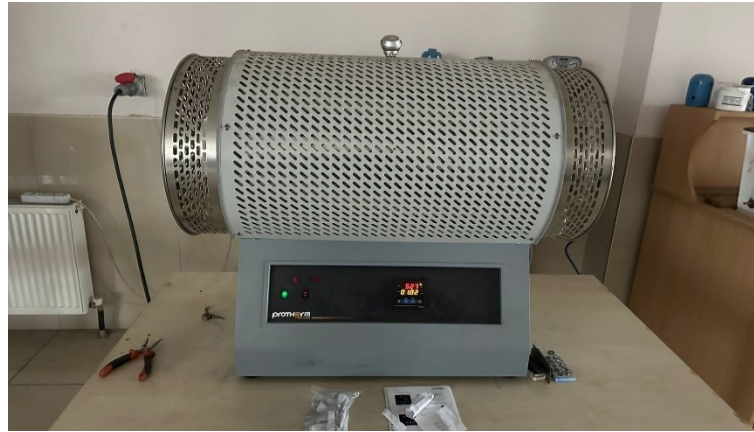


Şekil 5.6. Zımpara ve parlatma makinesi

Yüzey zımparalama ve parlatma işlemlerinin ardından, malzemelerin mikroyapısını inceleyebilmek amacıyla numuneler, %36 saf su, %36 amonyum hidroksit, %21 nitrik asit ve %7 hidrojen peroksit içeren bir çözeltide 45 saniye süreyle bekletilerek dağlanmıştır.

5.4. Yaşlandırma Ve Çözeltiye Alma İşlemi

Üretilen numuneler, Şekil 5.7’de gösterilen Protherm marka PTF 14/105/450 fırında ısıtılma işlemi tabi tutulmuştur. İlk aşamada, numunelere 540 °C’de 5 saat süreyle çözeltiye alma işlemi uygulanmıştır. Ardından, oda sıcaklığında su verilerek hızla soğutulmuştur. Son olarak, numuneler 145 °C’de 13 saate kadar yaşlandırma işlemi için bekletilmiş ve işlem tamamlandıktan sonra fırında soğumaya bırakılmıştır.

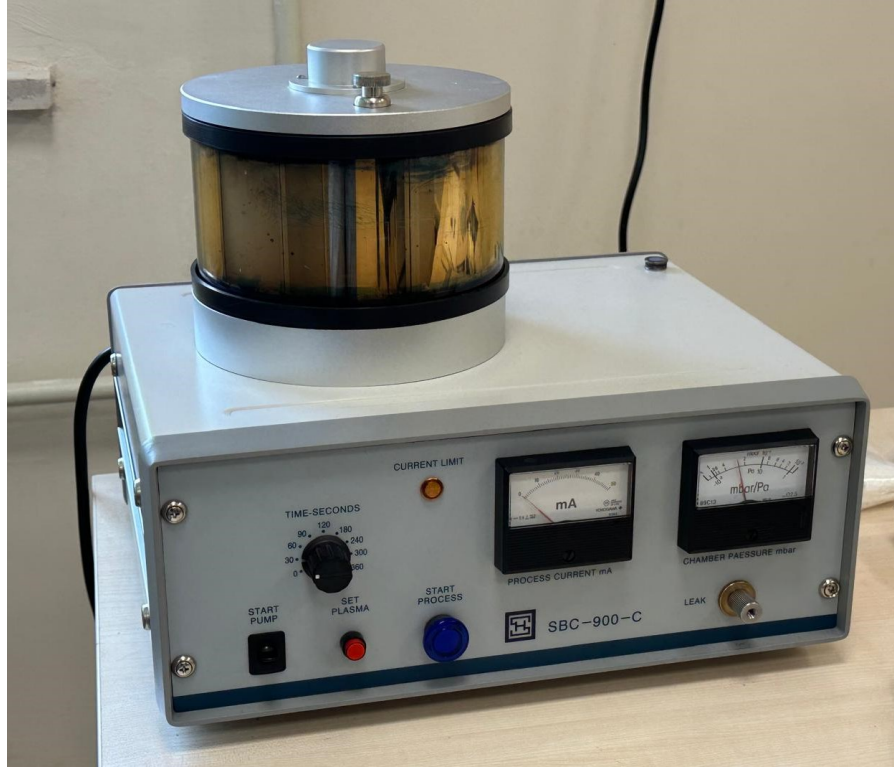


Şekil 5.7. Isıl işlem Fırını

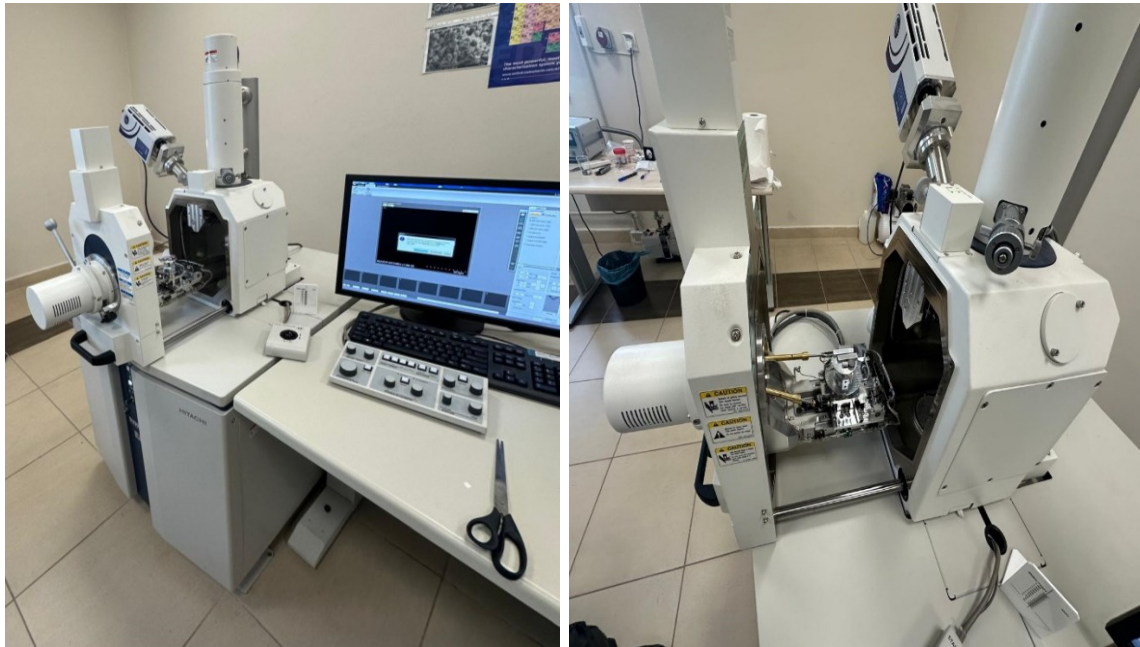
5.5. Mikroyapı İncelemeleri

5.5.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-EDS)

Yüzeyi parlatılan numune, Şekil 5.8’de gösterilen SBC-900-C plazma yüzey temizleme cihazı kullanılarak temizlenip hazırlanmıştır. Ardından, SEM ve SEM/EDS incelemeleri Munzur Üniversitesi Laboratuvarı’nda bulunan JEOL JSM 6510 SEM mikroskobu ile gerçekleştirilmiş ve bu mikroskoba bağlı IXRF 550 marka EDS cihazı kullanılmıştır. Şekil 5.9’da SEM ve EDS cihazlarının fotoğrafları sunulmuştur.



Şekil 5.8. Plazma yüzey temizleme cihazı



Şekil 5.9. SEM/EDS Mikroskobu

5.5.2. XRD Analizi

X ışını difraksiyonu (XRD), bilinmeyen malzemelerin kimlik tespiti veya bilinen malzemelerin atomik düzeyde yapısının belirlenmesi amacıyla kullanılan bir analiz yöntemidir. Bu çalışmada XRD analizi, Munzur Üniversitesi'nde gerçekleştirilmiştir. Analiz sırasında, alüminyum (Al) hedefli X-ışını tüpü ($\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$) kullanılmış ve tarama işlemi $0,02^\circ/0,4^\circ/\text{saniye}$ hızında gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, Şekil 5.10'da gösterilen Rigaku Miniflex 600 model cihazla yapılmıştır.



Şekil 5.10. XRD cihazı

5.5.3. Üç Nokta Eğme Testi

Üç nokta eğme testi, Erzurum Teknik Üniversitesi'nde, Şekil 5.11'de gösterilen Shimadzu marka 250 kN kapasiteli universal çekme test cihazı kullanılarak, 1 mm/dakika hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.11. Üç nokta eğme test cihazı

5.5.4. Mikrosertlik Ölçümü

Daha önce zımparalanıp parlatılmış numunelerin mikrosertlik ölçümleri, Şekil 5.12’de gösterilen AOB marka cihaz kullanılarak Vickers mikrosertlik yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Ölçüm esnasında, 300 gramlık yük 10 saniye süreyle uygulanmıştır. Her numune üzerinde, 0,5 mm aralıklarla belirlenen 9 farklı noktadan ölçüm alınmış ve bu değerlerin ortalaması değerlendirmeye dahil edilmiştir.



Şekil 5.12. Vickers mikrosertlik ölçüm cihazı

5.5.5. Yoğunluk Ölçümü

Üretilen numunelerin yoğunlukları, Arşimet prensibine dayalı bir yoğunluk ölçüm kiti kullanılarak belirlenmiştir.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. Yoğunluk İncelemesi

Üretilen alaşım malzemelerin teorik yoğunlukları ile Arşimet prensibine göre ölçülen yoğunluk değerleri Tablo 6.1’de sunulmuştur. Teorik yoğunluklar, Denklem 6.1’de verilen karışımlar kuralı (rule of mixture) bağıntısına göre hesaplanmıştır. Arşimet prensibine dayalı ölçüm sonuçları ise Denklem 6.2’de belirtilen formül kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca, Denklem 6.3’te (Erçetin vd., 2021) verilen bağıntı ile bağıl yoğunluk değerleri hesaplanmıştır. Al oranındaki artışla birlikte bağıl yoğunluk değerinde de bir yükselme gözlenmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda, sinterlenen numunenin bağıl yoğunluk değeri %98,12 olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, SPS yönteminin AlSi10Mg alaşımının üretimi için uygun olduğunu göstermektedir.

Jian ve arkadaşları (2021), AlSi10Mg alaşımının yoğunluğunun, farklı partikül boyutlarından nasıl etkilendiğini incelemiştir. Çalışmada, 20 µm ve 50 µm boyutlarında iki farklı toz tipi kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre, toz partikül boyutundaki değişimle elde edilen bağıl yoğunluk değerleri sırasıyla %94 ve %96 olarak belirlenmiştir. Partikül boyutu küçüldükçe, birim hacimdeki toplam yüzey alanı artmaktadır. Bu artan yüzey alanı, ince partiküllerin kaba partiküllere kıyasla daha yüksek yüzey enerjisine sahip olmasına neden olur. Yüksek yüzey enerjisine sahip küçük partiküller, birbirlerine yapışarak topaklanma eğilimi gösterir ve böylece yüzey enerjilerini azaltmaya çalışır. SLM prosesi sırasında toz katmanının serilmesi esnasında oluşan bu topaklanma, tozların akışkanlık özelliklerini olumsuz etkiler. Sonuç olarak, ince toz partikülleri kullanıldığında numunelerde daha yüksek porozite gözlemlenmiştir (Jian vd., 2021).

$$\text{Teorik yoğunluk } (g.cm^{-3}) = \frac{\text{Toplam kütle}}{\text{Toplam hacim}} = \frac{(Al\text{ın kütle}) + (Si\text{in kütle}) + (Mg\text{ın kütle})}{\left[\frac{Al\text{ın kütle}}{Al\text{ın yoğunluğu}}\right] + \left[\frac{Si\text{in kütle}}{Si\text{in yoğunluğu}}\right] + \left[\frac{Mg\text{ın kütle}}{Mg\text{ın yoğunluğu}}\right]} \quad (6.1)$$

$$\text{Ölçülen yoğunluk } (g.cm^{-3}) = \frac{\text{Havadaki ağırlık}}{(\text{Havadaki ağırlık}) - (\text{Sudaki ağırlık})} \quad (6.2)$$

$$\text{Bağıl Yoğunluk (\%)} = \frac{\text{Ölçülen yoğunluk}}{\text{Teorik yoğunluk}} \times 100 \quad (6.3)$$

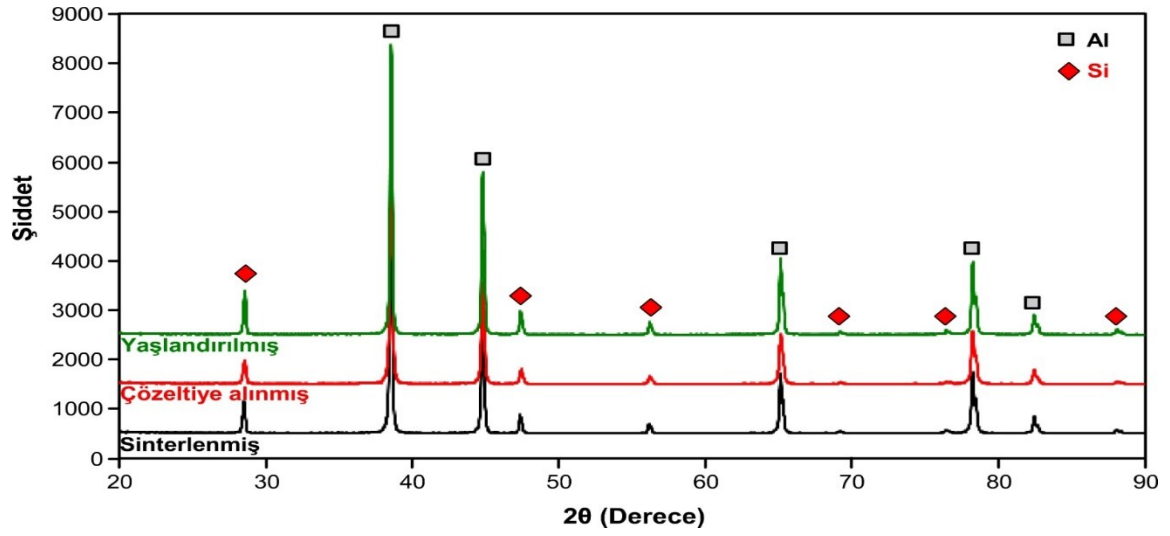
Tablo 6.1. Üretilen alaşımların teorik ve ölçülen yoğunluk değerleri

Numune	Teorik Yoğunluk (g.cm ⁻³)	Ölçülen Yoğunluk (g.cm ⁻³)
AlSi10Mg	2,6486	2,5986

Şekil 6.1’de, AlSi10Mg alaşımının sinterleme, çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemleri sonrası elde edilen XRD kırınım desenleri sunulmuştur. İncelenen desenlerde, her üç durumda da yalnızca Al ve Si fazlarına ait piklerin yer aldığı gözlemlenmiştir.

Mikroyapıda varlığı kesin olmakla birlikte, kırınım desenlerinde Mg fazına ait herhangi bir pike rastlanmamıştır. Benzer şekilde, faz diyagramlarına göre oluşumu kaçınılmaz olan Mg₂Si fazına ait pikin de bulunmadığı tespit edilmiştir. Bu durumun, Mg oranının oldukça düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Zhonghua ve arkadaşları tarafından multi-lazer ışını seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımlarının XRD analizlerinde de Mg ve Mg₂Si fazlarına ait piklerin tespit edilmediği rapor edilmiştir. Bu sonuçlar, AlSi10Mg alaşımındaki Mg oranının çok düşük olmasına bağlanmıştır (Li vd., 2019).

Benzer bir çalışmada, Tang ve arkadaşları tarafından seçici lazer ergitme yöntemi kullanılarak AlSi10Mg alaşımı numuneleri üretilmiştir. Bu numunelerin hem ısıtım işlem öncesi hem de ısıtım işlem sonrası XRD analizleri gerçekleştirilmiş olup, elde edilen paternlerde yalnızca Al ve Si fazlarına ait piklerin bulunduğu rapor edilmiştir (Tang vd., 2023).



Şekil 6.1. Üretilen alaşımanın XRD kırınım desenleri

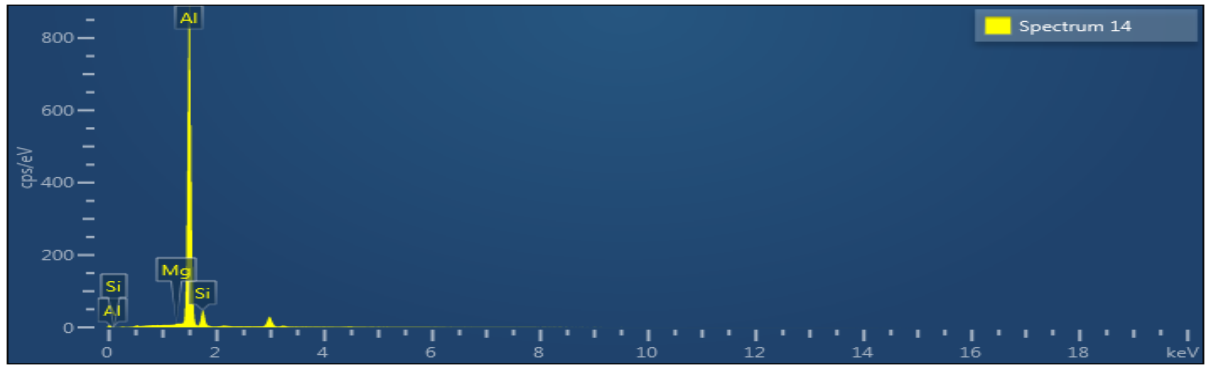
6.2. Kullanılan Tozların Karakterizasyonu

Bu çalışmada AlSi10Mg alaşım tozu kullanılmıştır. Şekil 6.2’de AlSi10Mg tozuna ait SEM görüntüsü, Şekil 6.3’te ise gerçekleştirilen EDS analizine ait spektrum yer almaktadır.



Şekil 6.2. AlSi10Mg tozundan alınan SEM fotoğrafı

Şekil 6.2’de yer alan görüntüye göre, toz partikülleri genel olarak küresel geometridedir. Küresel partiküllerin varlığı, toz üretim yönteminin kontrollü ve yüksek kalitede gerçekleştirildiğini göstermektedir. Partikül yüzeylerinde, ana partiküllere yapışmış şekilde bazı ince partiküller gözlemlenmiştir. Bu durum, atomizasyon işlemi sırasında küçük partiküllerin büyük partiküllerle birleşmesinden kaynaklanabilir. Küçük partiküller, tozun akışkanlığını bir miktar azaltabilse de, burada gözlemlenen küçük partikül oluşumu sınırlı ve düzenli olduğundan genel toz kalitesini olumsuz yönde etkilememektedir. Ölçek çubuğu (100 μm) ve büyütme oranı ($\times 500$) dikkate alındığında, partiküllerin genel olarak 20–80 μm aralığında bir boyut dağılımına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 6.3. AlSi10Mg tozundan alınan EDS analizi

EDS spektrumunda en yüksek zirveye sahip elementin alüminyum olduğu görülmektedir. İkinci önemli element olarak silisyum, daha küçük ancak belirgin bir pik oluşturmaktadır. AlSi10Mg alaşımında silisyum oranı yaklaşık %9–11 aralığındadır. Daha düşük yoğunlukta tespit edilen bir diğer element ise magnezyumdur ve yaklaşık %0,3–0,5 oranında bulunmaktadır. Sonuç olarak, elde edilen EDS analizi, tozun kimyasal bileşiminin AlSi10Mg alaşım standardı ile uyumlu olduğunu doğrulamaktadır.

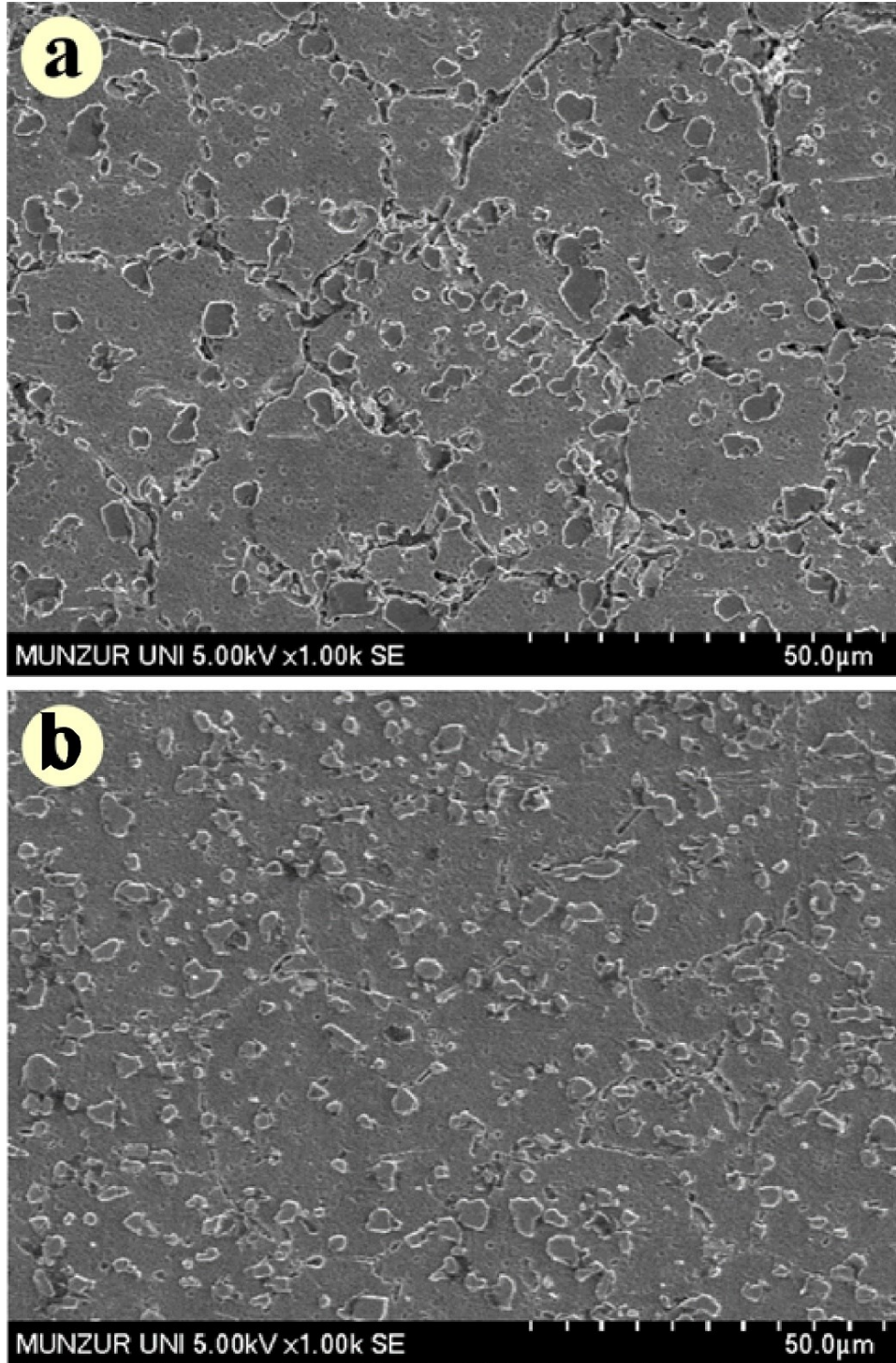
Tablo 6.2. AlSi10Mg tozundan alınan EDS analizi

Spectrum 14				
Element	Line Type	Weight %	Weight % Sigma	Atomic %
Al	K Series	90,14	0,10	90,47
Si	K Series	9,71	0,10	9,36
Mg	K Series	0,15	0,03	0,17
Total		100,00		100,00

Tablo 6.2’de sunulan EDS analizi sonuçlarına göre, Al, Si ve Mg elementlerinin alaşım tozunda bulunduğu tespit edilmiştir. Kullanılan AlSi10Mg tozu içerisinde %90,14 oranında Al, %9,71 oranında Si ve %0,15 oranında Mg elementi belirlenmiştir.

6.3. Sinterlenen ve Yaşlandırılan Numunelerin Karakterizasyonu

Şekil 6.4.a’da, AlSi10Mg alaşımına uygulanan SPS ve yaşlandırma işlemleri sonrasında elde edilen SEM görüntüleri sunulmuştur. SPS işlemi sonrası elde edilen mikroyapı görüntüsünde, yapının α -Al ve Si fazlarından oluştuğu gözlemlenmiştir. Al-Si faz diyagramına göre, oda sıcaklığında Si elementi Al matrisi içerisinde çözünemez. SEM görüntüsünde, Si fazının hem α -Al fazının tane sınırlarında hem de tane içlerinde homojene yakın şekilde dağıldığı görülmektedir. Belirgin bir morfolojiye sahip olmayan Si fazı, eşeksensiz tanecikler halinde dağılmıştır. Eşeksensiz tanelerden oluşan α -Al fazının ortalama tane boyutu yaklaşık 40–50 μm mertebesindedir. Daha önce belirtildiği üzere, kullanılan tozun parçacık boyutu 10–73 μm aralığındadır. Bu doğrultuda, 525 °C’de 5 dakika bekletilerek uygulanan SPS işleminin tane irileşmesine yol açmadığı söylenebilir. Yoğunluk ölçümlerine ilişkin açıklamalarda, SPS işlemi sonucunda yaklaşık %98,12 bağıl yoğunluğa ulaşıldığı belirtilmiştir. Bununla birlikte, SEM görüntülerinde tane sınırlarında çok düşük miktarda ve küçük boyutlu gözenekler gözlemlenmektedir.



Şekil 6.4.a-b. AlSi10Mg tozundan alınan SEM fotoğrafı

Şekil 6.4.b’de yer alan yaşlandırılmış numuneye ait SEM görüntüsünde, yine α -Al ve Si olmak üzere iki fazın bulunduğu görülmektedir. SPS işleminden sonra elde edilen SEM görüntüsüyle karşılaştırıldığında, yaşlandırılmış numunede Si fazının α -Al matrisi

içerisinde daha küçük boyutlu ve daha homojen bir dağılım sergilediği tespit edilmiştir. Yaşlandırma öncesinde Si fazına ait çökeltiler 5–10 μm aralığında bir boyut dağılımına sahipken, yaşlandırma sonrasında bu çökeltiler 3–4 μm 'den daha küçük boyutlara inmiştir. Hatta, çökeltilerin önemli bir kısmı 1 μm 'den daha küçük boyutlardadır. Bu durum, sertlik ve mukavemet açısından olumlu kabul edilir; çünkü ana faz içerisinde dağılmış ikincil fazların boyutu küçüldükçe, faz sınırları artar ve bu da dislokasyon hareketlerini zorlaştırarak malzemenin mekanik özelliklerini geliştirir.

Bununla birlikte, yaşlandırma işleminin sertlik ve mukavemet artışına katkısında en etkili mekanizma, α -Al fazı içerisinde Mg_2Si çökeltilerinin oluşumudur. Literatürde, AlSi10Mg alaşımının yaşlandırılmasına yönelik yapılan çok sayıda çalışmada, bu çalışmada kullanılan parametrelere benzer koşullarda gerçekleştirilen yaşlandırma işlemleri sonucunda Mg_2Si çökeltilerinin oluştuğu rapor edilmiştir. Bu çökeltiler, çok küçük boyutlarda olup oluşturdukları kafes çarpımları sayesinde sertlik ve mukavemet artışına katkı sağlar. Ancak, bu çökeltiler nanometrik boyutta olduklarından dolayı Şekil 6.4.a ve 6.4.b'deki SEM görüntülerinde doğrudan gözlemlenememektedir.

Rong ve arkadaşları (2023) tarafından yapılan çalışmada, Spark Plazma Sinterleme (SPS) yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımının mikroyapı özellikleri incelenmiş ve sinterleme sıcaklığının tane boyutu üzerinde belirgin bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada, optimum sinterleme sıcaklığı 525 $^{\circ}\text{C}$ olarak belirlenmiş; bu sıcaklıkta, partikül boyutunun yaklaşık 9 μm , ötektik silisyum fazının boyutunun ise yaklaşık 2 μm olduğu ve bu yapıların matris içerisinde homojen bir dağılım sergilediği rapor edilmiştir (Rong et al., 2023).

Tang ve arkadaşları, seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilen AlSi10Mg numunelerin esas olarak ince α -Al hücrelerinden ve bu hücrelerin etrafına dağılmış ağ benzeri bir Si yapısından oluştuğunu tespit etmiştir. Ayrıca, doğrudan yaşlandırma işleminin hücresel yapıda nano ölçekli Si çökeltilerinin oluşumuna yol açtığını, tane boyutunun arttığını ve düşük açılı tane sınırlarının azaldığını; ancak Si yapısının tamamen korunduğunu bildirmişlerdir (Gao et al., 2023).

Daniyar ve arkadaşları, seçici lazer ergitme yöntemiyle ürettikleri AlSi10Mg alaşımına uygulanan çözeltiye alma işlemi sonrasında, ötektik Si fazının ayrılarak AlSi10Mg

partikülleri oluşturduğunu ve bu partiküllerin boyutunun sıcaklık arttıkça büyüdüğünü rapor etmişlerdir. Ayrıca, Al₃FeSi intermetalik bileşiklerinin, çözelti işlemi sonrasında 500 ve 540 °C sıcaklıklarda oluştuğu belirtilmiştir (Syrlbayev et al., 2024).

Şekil 6.5'te görüldüğü üzere, sinterleme, çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemlerinin AlSi10Mg alaşımının mikrosertlik değerleri üzerindeki etkisi belirgin şekilde ortaya çıkmıştır. Sinterleme işlemine tabi tutulan numunelerde ortalama mikrosertlik 59,6 HV olarak ölçülmüş ve bu değer, temel sertlik seviyesini temsil etmektedir. Çözeltiye alma işlemi sonrasında ise bu değer 55,9 HV'ye düşmüştür; bu düşüş, mikroyapının homojenleşmesi ve alaşım elementlerinin matriste yeniden çözünmesi ile ilişkilendirilmektedir. 145 °C'de gerçekleştirilen yaşlandırma işlemi boyunca sertlik değerlerinde artış gözlemlenmiş ve maksimum sertlik 13. saatte elde edilmiştir. Bu sürenin ardından ise sertlikte hafif bir düşüş meydana gelmiştir. Bu durum, yaşlandırma sürecinde çökelti sertleşmesi mekanizmasının etkili olduğunu ve bunun sonucu olarak malzemenin hem sertliğinde hem de mukavemetinde artış sağlandığını göstermektedir. Yaşlandırma işlemiyle elde edilen bu iyileşme, AlSi10Mg alaşımlarını özellikle yüksek sertlik ve dayanım gerektiren mühendislik uygulamaları için daha uygun hale getirmektedir.

Cerri ve arkadaşları (2022), Lazer-Toz Yatak Füzyonu (LPBF) yöntemiyle üretilen AlSi7Mg0.6 ve AlSi10Mg0.3 alaşımlarının yaşlanma profillerini inceledikleri çalışmalarında, yaşlanma süresine bağlı olarak numunelerin sertlik değerlerinde meydana gelen değişimi ortaya koymuşlardır. Sertlik değerlerinin yaşlanma süresiyle birlikte arttığı ve 10. saatte maksimum seviyeye ulaştığı, 15. saatten itibaren ise azalmaya başladığı rapor edilmiştir. Bu sertlik değişim eğrisi, literatürde daha önce bildirilen zamanla sertlik evrimine ilişkin verilerle yüksek uyum göstermektedir.

Zhou ve arkadaşları (2018), seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımına uygulanan ısı işlemlerin mekanik özellikler üzerindeki etkilerini kapsamlı biçimde incelemişlerdir. Çalışmalarında, 520 °C sıcaklıkta farklı sürelerde çözeltiye alınan SLM numunelerine çeşitli yaşlandırma sürelerinde çökelti sertleşmesi uygulanmış ve bu numunelerin mekanik performansları, döküm yöntemiyle üretilen numunelerle karşılaştırılmıştır.

SLM sürecinde, toz partiküllerine aktarılan yüksek enerji sonucunda, ergiyik sınırlarında yoğun silisyum ağları oluşmakta ve bu yapılar başlangıç sertliğini artırmaktadır. Ancak, çözeltiye alma işlemi sırasında bu ağlarda biriken enerji, topaklanma (coarsening) mekanizmasıyla azalmakta ve bu durum sertlikte düşüşe neden olmaktadır. Bu bulgu, tez çalışmasında gözlemlenen ve çözeltiye alma işleminden sonra sertlikte meydana gelen azalma ile de örtüşmektedir.

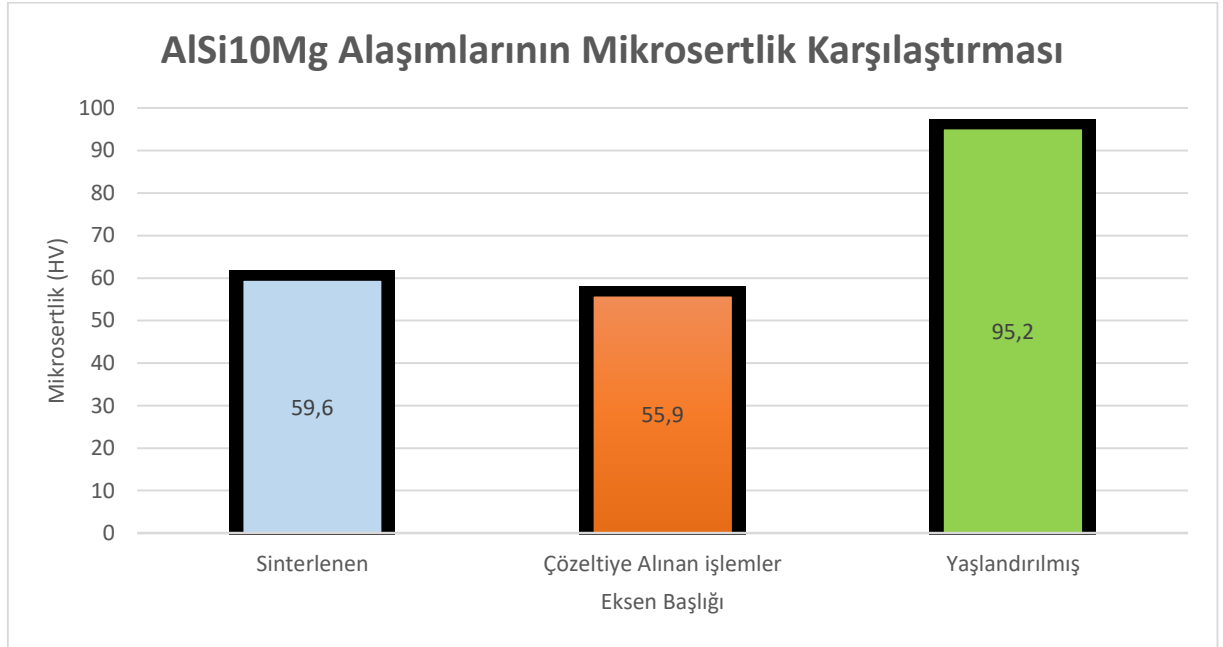
AlSiMg alaşımlarında, çözeltiye alma işleminden sonra uygulanan yaşlandırma süreci sırasında Mg_2Si çökeltilerinin oluşumu, sertlik ve mukavemetin artmasını sağlamaktadır. Yapılan deneylerde, 10 saat süreyle yaşlandırılan SLM numunelerinde 103,4 HV sertlik değerine ulaşılmıştır. Öte yandan, döküm yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımında iri taneler ve bu tanelerin sınırlarında oluşan kalın MgSi ağları nedeniyle sertlik değeri yalnızca 43 HV olarak ölçülmüştür.

Çözeltiye alma işlemi ile bu iri çökeltiler α -Al matrisi içerisinde çözündürülerek aşırı doymuş bir yapı elde edilmiş, ardından uygulanan yaşlandırma işlemiyle homojen ve ince MgSi çökeltileri oluşarak sertlikte önemli bir artış sağlanmıştır. Sonuç olarak, döküm yöntemiyle üretilen yapı üzerinde uygulanan 12 saatlik yaşlandırma sonrası elde edilen optimum sertlik değeri 96,9 HV'ye ulaşmıştır. Bu sonuç, bu tez çalışmasında 13 saat yaşlandırılan numunede elde edilen 95,2 HV sertlik değeriyle yüksek oranda uyumluluk göstermektedir.

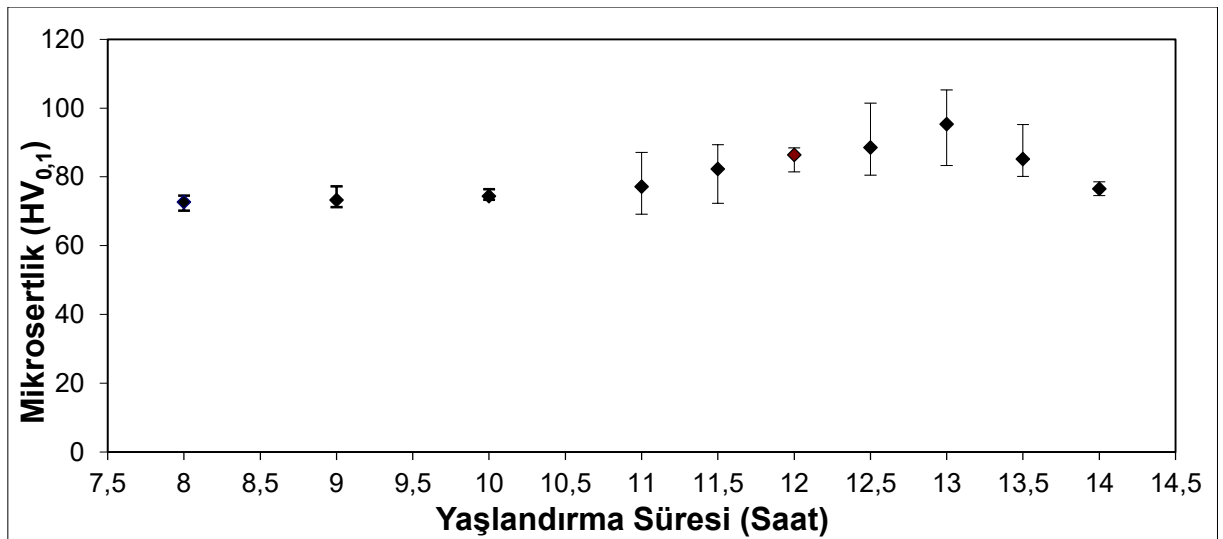
Tonelli ve arkadaşları (2021) tarafından gerçekleştirilen benzer bir çalışmada, lazer toz yatak füzyonu (LPBF) yöntemiyle üretilen A357 (AlSi7Mg0.6) alaşımının, geleneksel döküm alaşımına kıyasla yüksek yaşlandırma koşullarında daha yüksek sertlik değerlerine ulaştığı tespit edilmiştir. Ancak, bu üretim yöntemi sonucunda oluşan aşırı doymuş katı çözelti nedeniyle farklı çökeltme mekanizmalarının ortaya çıktığı rapor edilmiştir.

Tang ve arkadaşları (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımlarının yaşlandırma sonrası mikroyapı ve çekme analizleri incelenmiştir. Analizler sonucunda, ince hücreli α -Al ve Si fazlarının oluştuğu, ayrıca bazı çökelti ve dislokasyonların alaşımın mukavemetini artırırken sünekliği azalttığı tespit edilmiştir. Yaşlandırma sıcaklığı 160 °C'den 200 °C'ye

yükseltildikçe, yaşlandırma sertleşme davranışında belirgin bir artış gözlenmiş; bu artışın, su ile doyurulmuş α -Al matrisinin ayrışması, Si fazının çökmesi ve düşük açılı tane sınırlarının açığa çıkmasından kaynaklandığı rapor edilmiştir (Tang vd., 2023).



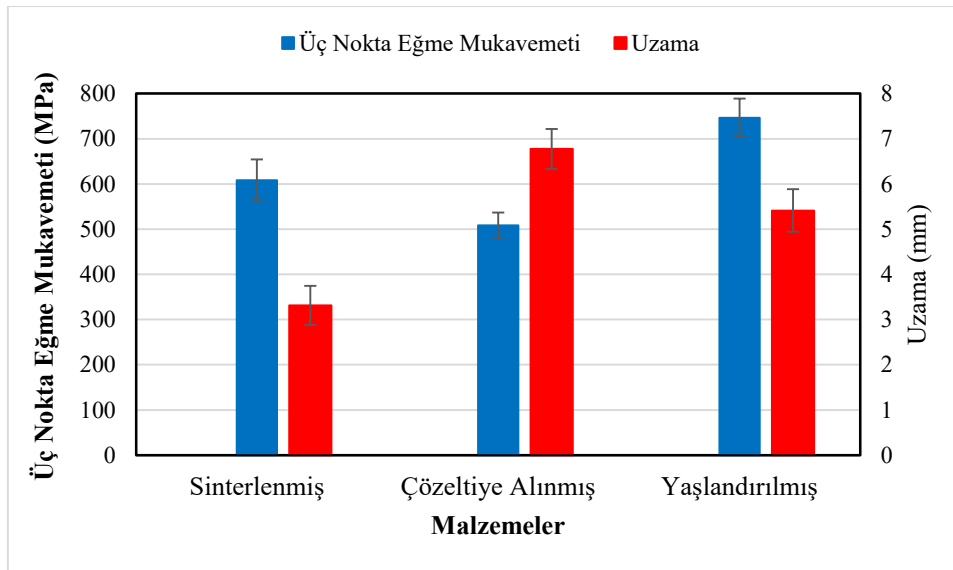
Sekil 6.5. AlSi10Mg alaşım tozunun mikrosertlik grafiği



Şekil 6.6. Yaşlandırılmış numunenin mikrosertlik grafiği

SPS yöntemiyle 525 °C’de üretilip çözeltiye alınan numunelere, Şekil 6.6’da gösterildiği üzere farklı yaşlandırma sürelerinde çökelti sertleşmesi uygulanmıştır. Başlangıçta, SPS süreci sonucunda oluşan silisyum ağları sertlikte artış sağlasa da, çözeltiye alma işlemi bu yapıların zayıflamasına ve sertlikte düşüşe neden olmaktadır. Ancak, yaşlandırma sürecinde oluşan Mg_2Si çökeltileri mukavemeti artırarak sertlik kaybını telafi etmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, SPS numunelerinde en yüksek sertlik değeri 13 saatlik yaşlandırma süresi sonunda 95,2 HV olarak ölçülmüş; yaşlandırma süresi uzadıkça mikrosertlikte azalma gözlenmiştir.

Yapılan diğer çalışmalarda, farklı yaşlandırma sıcaklıklarında gerçekleştirilen yapay yaşlandırma işlemlerinin, daha düşük sıcaklıklarda uygulandığında, tepe sertlik değerine daha düşük seviyede ve daha geç ulaşıldığını göstermiştir (Bossio et al., 2021; Rometsch & Schaffer, 2002; Li et al., 2004; Myhr et al., 2001).



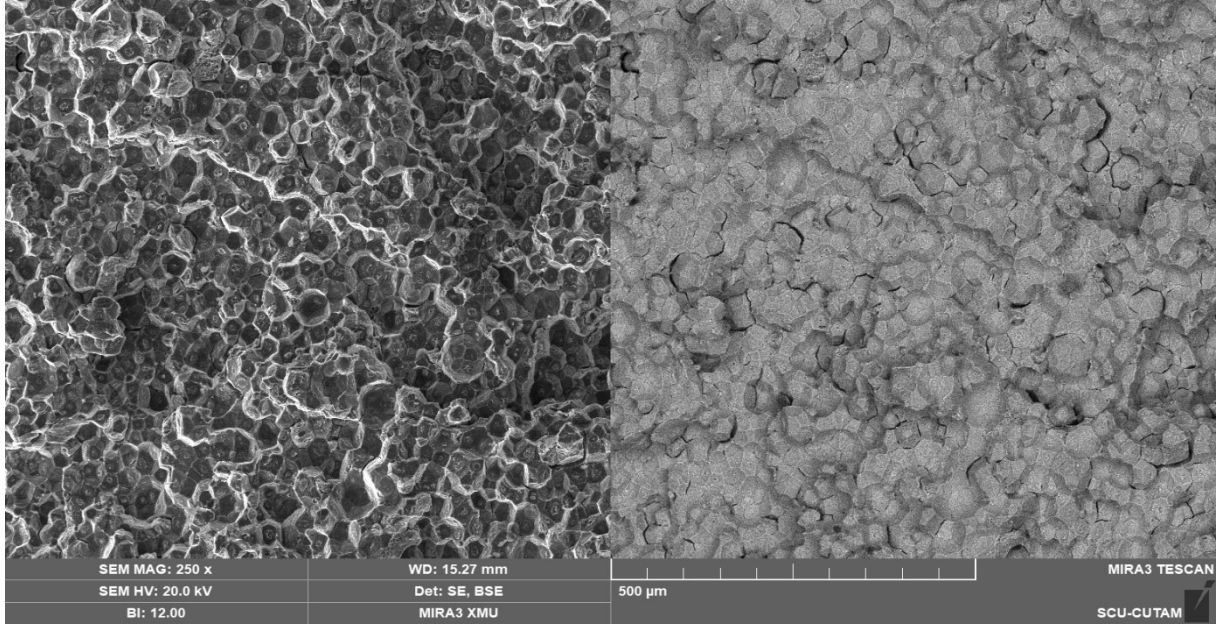
Şekil 6.7. Sinterlenen, Çözeltiye alınan ve Yaşlandırılan numunelerin eğilme grafiği

Üretilen kompozitlerin üç nokta eğme deneyleri sonucunda elde edilen eğilme mukavemetleri ve % uzama değerleri Şekil 6.7’de sunulmuştur. Şekil incelendiğinde, çözeltiye alınan numunelerde sinterlenmiş numunelere kıyasla ortalama mukavemet değerlerinde bir azalma gözlenmiş, buna karşın % uzama değerlerinde artış meydana gelmiştir. Bu durum, sertlik değerleriyle ilgili yapılan değerlendirmelerde de belirtildiği

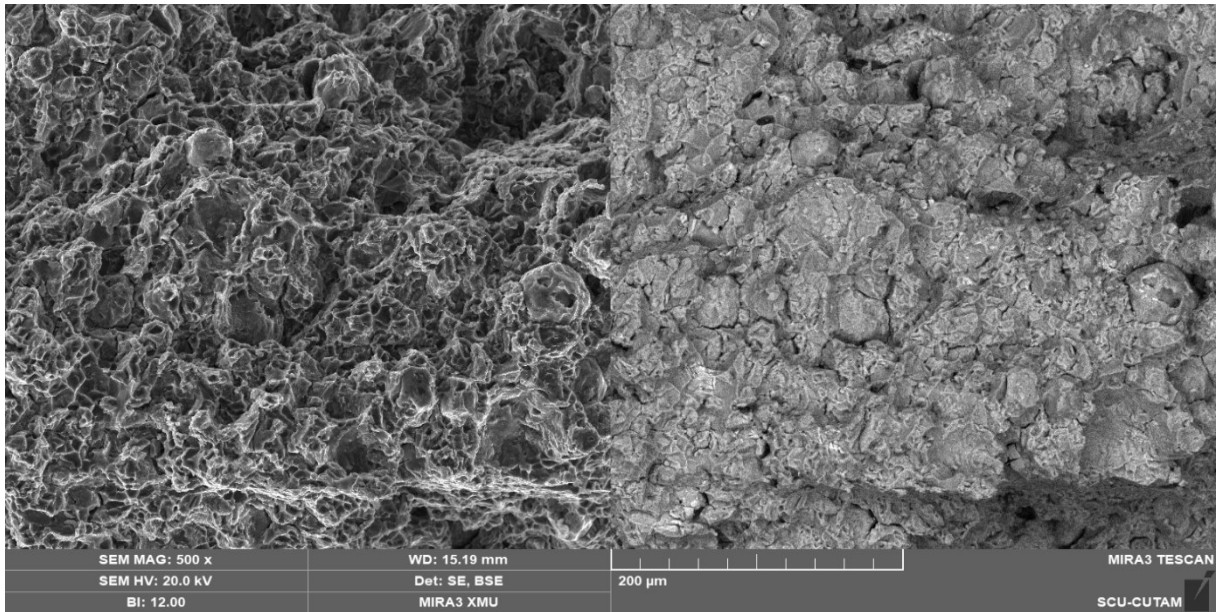
üzere, çözeltiye alma işleminin sinterleme sırasında oluşan Si fazı ve intermetalik çökeltilerin oranını azaltmasından kaynaklanmaktadır.

Yaşlanmanın ilk aşamasında oluşan çökeltiiler oldukça küçük boyutlardadır ve bu nedenle dislokasyon hareketlerini önemli ölçüde engellemez; dolayısıyla, çökelme başlangıcında malzemenin sertlik ve mukavemetinde belirgin bir değişim gözlenmez. Ancak zamanla çökelti boyutlarının büyümesi, dislokasyon hareketlerini zorlaştırır ve gerilme değerlerinde kayda değer bir artışa yol açar. Yaşlanma süresinin fazla olması durumunda ise aşırı yaşlanma meydana gelir; bu süreç sertlik ve gerilme değerlerinde düşüşlerle sonuçlanır (Kayalı, 1991; Shan vd., 2012). Bu literatür ışığında, eğilme testi yalnızca maksimum sertlik değerinin elde edildiği 13 saat yaşlandırılmış numunelere uygulanmıştır. Bu numunelerde ölçülen ortalama eğilme dayanımı 773 MPa olarak belirlenmiştir. Mukavemetteki bu artış, beklenildiği üzere % uzama değerlerinde azalmaya neden olmuştur.

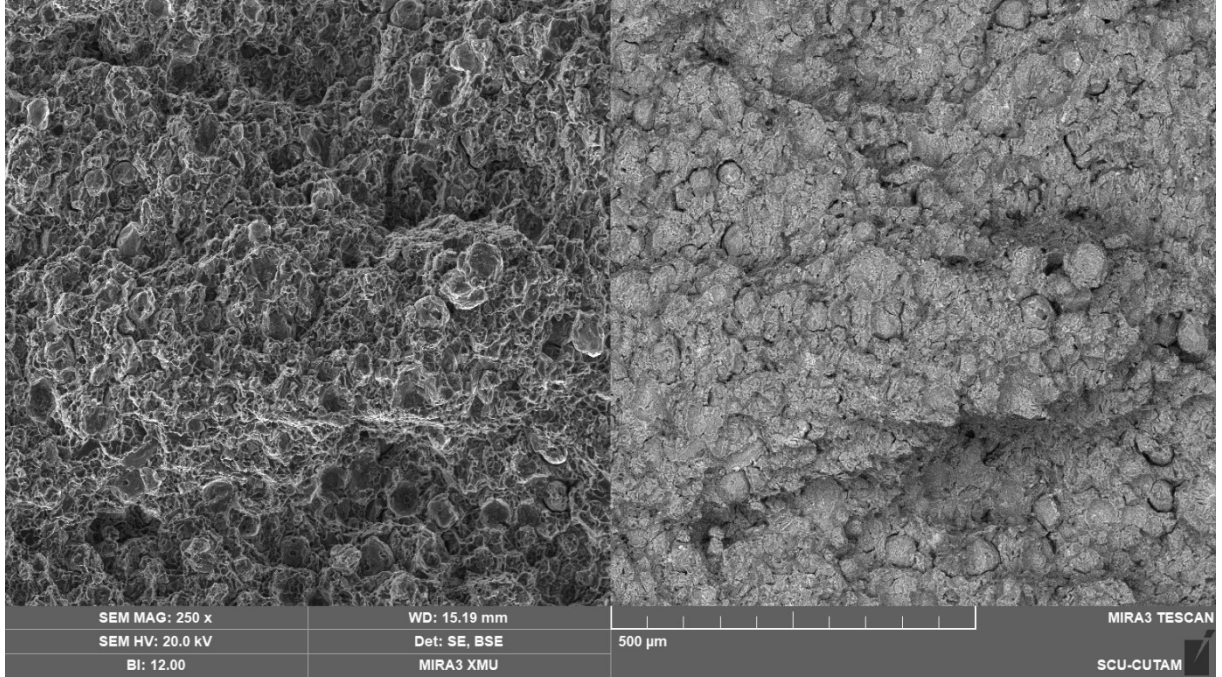
Sathiskumar ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, döküm ve seçici lazer ergitme (SLM) yöntemleriyle üretilen AlSi10Mg alaşımlarına 180 °C’de 6 saat süreyle doğrudan yaşlandırma uygulanmış ve bu işlemin mikroyapı ile mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Döküm yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımının çekme mukavemeti, yaşlandırma öncesinde 632,64 MPa iken, yaşlandırma sonrası 653,86 MPa’ye yükselmiştir. Benzer şekilde, SLM yöntemiyle üretilen alaşımda çekme mukavemeti 656,37 MPa’dan 683,59 MPa’ye çıkmıştır. Mukavemetteki bu artışın, doğrudan yaşlandırma sürecinde oluşan nano boyutlu Si çökeltilerine bağlı olduğu belirtilmiştir (Sathiskumar et al., 2023).



Şekil 6.8.a. Sinterlenmiş numunenin kırık yüzey SEM görüntüsü



Şekil 6.8.b. Çözeltiliye alınmış numunenin kırık yüzey SEM görüntüsü



Sekil 6.8.c. Yaşlandırılmış numunenin kırık yüzey SEM görüntüsü

Şekil 6.8.a, 6.8.b ve 6.8.c’de, üç nokta eğme deneyi sonrası kırık yüzeylerden elde edilen SEM görüntüleri sunulmaktadır. Görüntülerin incelenmesi sonucunda, kırılma yüzeyinde sünek kırılmaya işaret eden lifsi yapılar ve yüksek oranda gamze şeklinde çukurcukların (dimple) olduğu gözlemlenmiştir.

Yaşlandırılmış numunede, kırılma yüzeylerinde gamze biçimindeki çukurcuk oluşumu azalmıştır. Buna karşılık, sinterlenmiş numunede Si fazının etkisiyle mukavemet değerleri artmış ve bu durum, daha gevrek bir kırılma yüzeyinin oluşmasına neden olmuştur.

Özlen (2024), seçici lazer ergitme yöntemiyle ürettiği AlSi10Mg alaşımına yönelik tez çalışmasında, hem gerilim giderme hem de doğrudan yaşlandırma işlemleri uygulanmış numunelerin çekme testi sonrası kırılma yüzeylerinde, hücresel yapıya benzer boyutlarda ince çukurcuklar gözlemlendiğini ve bu yapıların sünek kırılmadan gevrek kırılmaya geçiş davranışı sergilediğini rapor etmiştir.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada Spark Plazma Sinterleme (SPS) yöntemi kullanılarak AlSi10Mg alaşımlı numuneler üretilmiştir. Üretilen Al alaşımlı malzemelere uygulanan karakterizasyon işlemlerinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

SPS ile üretilen alaşımlar genel olarak %98'in üzerinde bağıl yoğunluk değerlerine ulaşılmıştır. SPS tekniği üretilen numuneler SPS işleminde uygulanan sıcaklık, basınç ve bekleme süresi bu kompozisyonlar için uygun olduğu görülmüştür.

XRD analizlerinde yalnızca Al ve Si fazları tespit edilmiş ve Mg_2Si çökeltileri SEM ile görülmese de bu çökeltiler literatür ışığında kabul edilmiştir.

SEM görüntüsünde Si fazının α -Al fazı içerisinde küçük ve homojen dağılım sergileyen partiküller halinde dağıldığı görülmüştür. Yaşlandırma işleminden önce Si fazının çökeltileri 5-10 μm aralığında iken yaşlandırmadan sonra 1-3 μm çökeltiler oluşmuştur.

Üretilen alaşımlarda en yüksek sertlik (95,2 HV) 13 saat yaşlandırma ile en yüksek eğilme mukavemeti (773 MPa) ise yaşlandırılmış numunede gözlemlenmiştir.

Çözeltiye alma işlemi sünekliği artırırken, yaşlandırma ısı işlemi mukavemeti artırmakla birlikte kırılma davranışını daha gevrek hale getirmiştir.

Bu çalışma, özellikle yüksek bağıl yoğunluk, mukavemet ve sertlik gerektiren otomotiv, havacılık ve kalıpcılık sektörlerinde bu yöntemin uygulanabilirliğini ortaya koymuştur.

KAYNAKLAR

- Aboulkhair, N. T., Maskery, I., Tuck, C., Ashcroft, I. and Everitt, N. M. (2016). The microstructure and mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg: The effect of a conventional T6-like heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 667, 139-146.
- Akhtar, S., Saad, M., Misbah, M. R. and Sati, M. C. (2018). Recent Advancements in Powder Metallurgy: A review. *Materials Today: Proceedings* 5(9), 18649-18655.
- Akın, İ. (2010). ZrB₂ Esaslı Kompozitlerin Spark Plazma Sinterleme (SPS) Yöntemi ile Üretimi ve Karakterizasyonu. (Doctoral dissertation).
- Akyıldız, Y. (2022). Alsi10mg Alaşımının Seçici Lazer Ergitme ve Basınç Destekli Sinterleme İle Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Anık, S., Anık, E. S. ve Varol, M. (2000). 1000 soruda kaynak teknolojisi el kitabı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Ao, X., Xia, H., Liu, J., He, Q. and Lin, S. (2021). Büyük bir alt soğutma altında Al-Si alaşımlarında düzensiz ötekiğin sayısal bir çalışması. *Hesaplamalı Malzeme Bilimi*, 186, 110049.
- Arockiasamy, A., German, R. M., Wang, P., Horstemeyer, M., Morgan, W., Park, S. and Otsuka, I. (2011). Sintering Behaviour of Al-6061 Powder Produced by Rapid Solidification Process. *Powder Metallurgy*, 54(3), 354-359.
- Artyukhova, N. V. and Yasenchuk, Y. F. (2015). Reaction sintering of porous shapememory titanium-nickelide-based alloys. *Russian Physics Journal*, 57(10), 1313-1320.
- Aslan, K. (2022). Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Al+Si Matrisli Kompozitlerin Aşınma Dayanımlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bitlis.
- Ataş, A. (2003). Alaşımlı Demir Tozu Peletlerinin Sinterleme Sonrası Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Atay, G. (2017). Titanyum Borür İçeren Alsi10mg1 Alaşımının Üretimi ve Malzeme Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

Avalle, M., Belingardi, G., Cavatorta, M. P. and Doglione, R. (2002). Casting defects and fatigue strength of a die cast aluminium alloy: a comparison between standard specimens and production components. *International journal of Fatigue*, 24(1), 1-9.

Ayata, A. (2014). Toz metal alüminyum malzemelerin mikrodalga enerjisi ile sinterlenebilirliğinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-9.

Bahadır, A. (2021). Toz Metalurjisi Yöntemi İle A356 Matrisli Hibrit Kompozit Malzeme Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.

Bahçeci, E. (2006). Al matrisli α -Si₃N₄ takviyeli kompozit malzeme üretimi ve işlenebilirliğinin karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Başer, T. A. (2013). Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı. *Mühendis ve Makine Dergisi* Vol 53, 51-58.

Bolton, W. (1993) .*Engineering Materials Technology* 2nd. Edition, *B.H* Newness, Oxford, 271-280.

Bosio, F., Fino, P., Manfredi, D. and Lombardi, M. (2021). Strengthening strategies for an Al alloy processed by in-situ alloying during laser powder bed fusion. *Materials & Design*, 212, 110247.

Brandão, A. D., Gumpinger, J., Gschweidl, M., Seyfert, C., Hofbauer, P. and Ghidini, T. (2017). Fatigue properties of additively manufactured AlSi10Mg–surface treatment effect. *Procedia Structural Integrity*, 7, 58-66.

Campbell, J. (2003). *The New Metallurgy Of Cast Metals*. Butterworth Heinemann, United Kingdom.

Canbaz, E. (2021). Zr ve/veya V İlavesinin Al-si Alaşımlarının Yapısal ve Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi (Master's thesis, Konya Teknik Üniversitesi).

Carter, C. B. and Norton, M. G. (2007). *Ceramic Materials: Science and Engineering*, Springer, New York.

Cerri, E. and Ghio, E. (2022). Aging profiles of AlSi7Mg0. 6 and AlSi10Mg0. 3 alloys manufactured via laser-powder bed fusion: direct aging versus T6. *Materials*, 15(17), 6126.

Costas, M., Morin, D., De Lucio, M. and Langseth, M. (2020). Testing and Simulation of Additively Manufactured AlSi10Mg Components Under Quasi-Static Loading. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 81, 103966.

Croteau, J. R., Griffiths, S., Rossell, M. D., Leinenbach, C., Kenel, C., Jansen, V. and Vo, N. Q. (2018). Microstructure and Mechanical Properties of Al-Mg-Zr Alloys Processed by Selective Laser Melting. *Acta Materialia*, 153, 35-44.

Cura, M. E. (2002). Sıcak Preslenmiş Wc-Co/B₄C Kompozitlerinin Mekanik, Manyetik ve Mikroyapısal İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çalığülü, U., Dikbaş, H. ve Taşkın, M. (2006). Sıcak Presleme Yöntemiyle İmal Edilmiş Sicp Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Difüzyon Kaynağında Sürenin Birleşme Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. *Fırat Üniversitesi Fen ve Müh. Bil. Dergisi* 18(3), 437-443.

Çalığülü, U., Taşkın, M. ve Kejanlı, H. (2008). Soğuk Presleme Yöntemiyle Üretilmiş Ni-Ti-Cu Kompozitlerin Tlp Difüzyon Kaynağında Sıcaklığın Birleşme Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. *Engineering Sciences*, 3(4), 558-570.

Demir, A. (1992). Toz Metal Bir Çeliğin Mekanik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Dikici, B. (2010). Toz Metalurjisi Yöntemiyle Nikel Titanyum Alaşımlarının Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Diler, E. A. (2012). Toz Metalurjisiyle Üretilen Al-Sic Metal Matrisli Kompozitlerde Faktör Etkileşimlerinin Partikül Dağılımı, Eğme Dayanımı Ve Aşınma Özelliklerine Etkileri. *Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir*, 3-15.

Doğan, M. (2022). Toz Metalurjisi Yöntem ile Üretilen Al-Xcu Alaşımlarının Mikroyapı, Mekanik Ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Donald, R. A. (1996). Chapman & Hall, The science and engineering of materials. 3rd S.I. ed. London.

Ekşi, A. ve Kurt, A. O. (1999). Metal ve Seramik Tozlarının Bilgisayar Kontrollü Tek Eksenli Kalıpta Preslenmesi, II. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, Ankara, s. 557- 563.

Eskier, U. (2017). Alüminyum Nedir? Nerelerde Kullanılır. www.makaleler.com.

Eskier, U. (2017). Silisyum Nedir? Özellikleri Ve Kullanımı. www.makaleler.com.

Eskier, U. (2017). Magnezyum Nedir? Özellikleri. www.makaleler.com.

Fousová, M., Dvorský, D., Michalcová, A. and Vojtěch, D. (2018). Changes in the microstructure and mechanical properties of additively manufactured AlSi10Mg alloy after exposure to elevated temperatures. *Materials Characterization*, 137, 119-126.

Gao, C., Zhang, Y., Zhang, N., Lei, C., Bi, Y., Tang, P. and Rao, J. H. (2023). Effects of direct aging treatment on microstructure, mechanical properties and residual stress of

selective laser melted AlSi10Mg alloy. Huaping Tang Journal of Materials Science & Technology p.139, 198–209.

German, R. M. (2007). Powder metallurgy & Particulate materials processing 1 st ed. Çeviri Editörleri, Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu. N., Türk Toz Metalurjisi Derneği, Ankara, 20-40.

Gökçe, A., Fındık, F. ve Kurt, A. O. (2017). Alüminyum ve Alaşımlarının Toz Metalurjisi İşlemleri - Powder Metallurgy Processing of Aluminum Alloys. Engineer&Machinery, 58(568), 21–47.

Grayson, G., Schaffer, G. and Griffiths, J. (2004). On the Fatigue of Sintered Aluminium Alloys. Paper Presented at the Materials Forum.

Guo, W. M., Wu, J. T., Zhang, F. G. ve Zhao, M.H. (2006). Toz metalurjisi süper alaşımı FGH95'in mikro yapı özellikleri ve ısıl işlem süreci. Uluslararası Demir ve Çelik Araştırma Dergisi, 13(5), 65-68.

Gül, F. (2014). AlSi10Mg Döküm Alaşımlarının Bazı Mekanik Özellikleri Üzerine İkincil Yaşlandırma İşleminin Etkisi. Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Malzeme Mühendisliği.

Güven, Ş. Y. (2011). Toz Metalurjisi ve Metalik Köpükler”, SDÜ Teknik Bilimler Dergisi, 1(2), 22-28.

Hernandez, F. C. R., Ramírez J. M. H. and Mackay, R. (2017). Al-Si Alloys: Automotive, Aeronautical and Aerospace Applications: Springer.

Hryha, E., Dudrova, E. and Bengtsson, S. (2008). Influence of powder properties on compressibility of prealloyed atomised powders. Powder Metallurgy. 51(4), 340-3.

İçin, K. (2005). Toz Metalurjisi Deneti. Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuar Föyü, Trabzon, 1-8.

Jian, Z., Qian, G., Paolino, D., Tridello, A., Berto, F. and Hong, Y. (2021). Crack Initiation Behavior and Fatigue Performance Up to Very-High-Cycle Regime of AlSi10Mg Fabricated by Selective Laser Melting with Two Powder Sizes. International Journal of Fatigue, 143, 106013.

Kaçan, H. (2022). Toz Metalurjisi Yöntemi İle Sic Takviyeli Cu-Al-Ni Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu (Doctoral Dissertation).

Kahramanzade, H., Sert, Y. ve Küçükömeroğlu, T. (2021). Sürtünme Karıştırma İşleminin Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilen AlSi10Mg Alaşımının Tribolojik Özelliklerine Etkisi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (28), 1159-1166.

Kang, S. J. L. (2005). Sintering: Densification, Grain Growth and Microstructure, Elsevier, Oxford.

Kaşıkcıoğlu, S. (2024). Metal Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen AlSi10Mg Alaşımının Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

Kawamura, Y. (2013). Ultralight Magnesium Alloy. <https://uskudar.biz> > malzeme-bilgisi > magnezyum.

Kayalı, E. S. (1991). Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları. İstanbul: İTÜ Yayınları.

Kempen, K., Thijs, L., Van Humbeeck, J. and Kruth, J. P. (2012). Mechanical properties of AlSi10Mg produced by selective laser melting. *Physics Procedia*, 39, 439-446.

Kumdalı, F. (2008). Alüminyum Matrisli B₄C Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 15-28.

Kurbanoglu, C., Durak, E., Tunay, R. F. ve Karaaslan, R. (2001). Değişken Yüklü T/M Esaslı Kaymalı Yataklardaki Sürtünme Kuvvetinin Ölçülmesi. TMMOB IV. Ulusal Ölçüm Bilim Kongresi, Eskişehir, s. 33-46.

Lattanzi, L., Fabrizi, A., Fortini, A., Merlin, M. and Timelli, G. (2017). Mikro yapı ve döküm kusurlarının yüksek basınçlı kalıp döküm AlSi9Cu₃ (Fe) alaşımının yorulma davranışı üzerindeki etkileri. *Procedia Yapısal Bütünlük*, 7, 505-512.

Leander, F. P. and West V. G. (2002). *Fundamentals of powder metalurgy*”, MPIF Princeton.

Lei, Y., Li, X., Sun, R., Tang, Y. and Niu, W. (2020). Effect of sintering temperature and heat treatment on microstructure and properties of nickel-based superalloy, *J. Alloys Compd.* 818, 15288

Leon, A. and Aghion, E. (2017). Effect of surface roughness on corrosion fatigue performance of AlSi10Mg alloy produced by Selective Laser Melting (SLE). *Materials Characterization*, 131, 188-194.

Li, Z., Kuai, Z., Bai, P., Nie, Y., Fu, G., Liu, W. and Yang, S. (2019). Microstructure and Tensile Properties of AlSi10Mg Alloy Manufactured by Multi-Laser Beam Selective Laser Melting (SLM), *9(12)*, 1337.

Li, R. X., Li, R. D., Zhao, Y. H., He, L. Z., Li, C. X., Guan, H. R. and Hu, Z. Q. (2004). Age-hardening behavior of cast Al–Si base alloy. *Materials Letters*, 58(15), 2096-2101.

Li, W., Cui, H., Wen, W., Su, X. and Engler-Pinto, C. (2015). Değişken nem seviyeleri altında döküm alüminyum alaşımlarının çok yüksek çevrim yorgunluğu. *SAE Uluslararası Malzeme ve Üretim Dergisi*, 8(2), 444-449.

Myhr, O. R., Grong, Ø. and Andersen, S. J. (2001). Modelling of the age hardening behaviour of Al–Mg–Si alloys. *Acta Materialia*, 49(1), 65-75.

Narasimhan, K. S. (2001). Sintering of powder mixtures and the growth of ferrous powder metallurgy. *Materials chemistry and physics*, 67(1-3), 56-65.

Ngnekou, D. J. N, Nadot, Y., Henaff, G., Nicolai, J. and Ridosz, L. (2021). Katkılı imalatla üretilen AlSi10Mg alaşımasının yorulma özellikleri üzerinde inşa edilmiş ve taşlanmış yüzeylerin etkisi. *Metaller*, 11(9), 1432.

Ouyang, X. X., Zhao, H. D., Zhang, K. W. and Li, Y. Y. (2009). Microstructure and tensile properties of Al-Cu-Si alloy with different solidification pressures. *Mater. Sci. Forum*, 628–629, 593–598.

Öveçoğlu, M. (1997). Toz Metalurjisi Tarihsel Gelişim, Üretim Aşamaları ve Yeni Eğilimler, 9, Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 449, 475.

Özaydın, D. (2015). Toz Metalurjisi ile Üretilen Demir Esaslı Malzemelerde Borlamanın Mekanik Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Özbek, Y., Yıldız, K. ve Alp, A. (2005). Röntgen Atık Sularından Gümüş Tozu Kazanımı, 4.Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, Sakarya, s. 1221-1227.

Özgün, Ö. (2007). Toz Metalurjisi ile Üretilen Alaşımlı Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Sakarya.

Özgürlük, Y. (2010). Toz Metalurjisi deneyi. Mühendislik fakültesi ve malzeme mühendisliği bölümü, Bartın Üniversitesi, Bartın.

Özlen, B. (2024). Effect Of Post-Processing Heat Treatments On The Mechanical Properties Of AlSi10Mg Alloy Produced By Selective Laser Melting. A Thesis Submitted To The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University.

Palacı, Y. (2001). Alüminanın Özelliklerine, Şekillendirme Yönteminin, Katkıların ve Sinterleme Sıcaklığının Etkisi. Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Panda, A. and Dobransky, J. (2018). Advantages and Effectiveness of The Powder Metallurgy in Manufacturing Technologies, *Metalurgija*, 57(4), 353-356.

Romano, S., Brückner-Foit, A., Brandão, A., Gumpinger, J., Ghidini, T. and Beretta, S. (2018). Fatigue properties of AlSi10Mg obtained by additive manufacturing: Defect-based modelling and prediction of fatigue strength. *Engineering Fracture Mechanics*, 187, 165-189.

Rometsch, P. A. and Schaffer, G. B. (2002). An age hardening model for Al-7Si-Mg casting alloys. *Mater. Sci. Eng. A*, A325, 424–434.

Rong, G., Xin, W., Zhou, M., Ma, T., Wang, X. and Jiang, X. (2023). Kuvılcım Plazma Sinterlemesi Kullanılarak Üretilen AlSi10Mg Alaşıımının Mikro Yapısını, Aşınma Direncini ve Elektrokimyasal Özelliklerini Keşfetme. *Malzemeler*, 16(23), 7394.

Sarsılmaz, F. (2008). Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AA7075/AA6061 kaynaklı bağlantıların mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması. *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ*, 4-16.

Sathiskumar, A., Soundararajan, R. and Sivasankaran, S. (2023). Effect of direct aging on the microstructure and mechanical behavior of AlSi10Mg Alloy: casting versus selective laser melting. *32*, 3215-3229.

Sha, G., Marceau, R. and Ringer, S. (2011). Precipitation and Solute Clustering in Aluminium: Advanced Characterisation Techniques. In *Fundamentals of Aluminium Metallurgy* p. 345-366, Elsevier.

Shan, D. and Zhen, L. (2012). “Aging Behavior and Microstructure Evolution in the Processing of Aluminum Alloys.

Sharma, R. Anesh. and Dwivedi, D. K. (2005). Influence of silicon (wt %) and heat treatment on abrasive wear behaviour of cast Al–Si–Mg alloys, *Materials Science and Engineering A* 408, 274-280.

Silvestri, A. T., Astarita, A., El Hassanin, A., Manzo, A., Iannuzzo, U., Iannuzzo, G., ... and Squillace, A. (2020). Assessment of the mechanical properties of AlSi10Mg parts produced through selective laser melting under different conditions. *Procedia Manufacturing*, 47, 1058-1064.

Subbiah, R., Bensingh, J., Kader, A. and Nayak, S. (2020). Influence of printing parameters on structures, mechanical properties and surface characterization of aluminium alloy manufactured using selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(11), 5137-5147.

Suvacı, E. (2008). Sintering Analysis, Ders notları, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.

Syrlybayev, D., Perveen, A. and Talamona, D. (2024). Çözelti ve yaşlandırma ısıt işlemleri yoluyla AlSi10Mg kafes yapılarında mekanik özelliklerin ve enerji emiliminin kontrol edilmesi. *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği. A*, 889, 145843.

Tang, H., Gao, C., Zhang, Y., Zhang, N., Lei, C., Bi, Y. and Rao, J. H. (2023). Effects of direct aging treatment on microstructure, mechanical properties and residual stress of selective laser melted AlSi10Mg alloy. *Journal of Materials Science and Technology*, 139, 198-209.

Tonelli, L., Liverani, E., Morri, A. and Ceschini, L. (2021). Role of direct aging and solution treatment on hardness, microstructure and residual stress of the A357 (AlSi7Mg0. 6) alloy produced by powder bed fusion. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 52(4), 2484-2496.

Totten, G. E. and MacKenzie, D. S. (Eds.). (2003). Handbook of Aluminium. Physical Metallurgy and Processes Vol. 1, CRC, New York, 212.

Totten, G. E. and MacKenzie, D. S. (2003a). Handbook of Aluminum: Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes: CRC press.

Totten, G. E. and MacKenzie, D. S. (2003b). Handbook of Aluminum: Volume 2: Alloy Production and Materials Manufacturing (Vol. 2), CRC press.

Töre, C. (2012). Mekanik Tasarımda Alüminyum ve Özellikleri. Makine Mühendisleri Odası, Ankara.

Treguer, P., Nelson, D. M., Van Bennekom, A. J., DeMaster, D. J., Leynaert, A. and Quéguiner, B. (1995). The silica balance in the world ocean: a reestimate. Science, 268(5209), 375-379.

Varmus, T., Konecna, R. and Nicoletto, G. (2021). Microstructure and Fatigue Performance of Additively Manufactured. University of Zilina, Univerzita 1.01026 Zilina, Slovakia, University of Parma, Parco Area delle Science 181/A, Italy.

Vatansever, F., Ertürk, A. T. ve Karabay, S. (2018). Alüminyum-Silisyum Alaşımlarının Mikroyapısal ve Mekanik Özelliklerinin T6 Isıl İşlemi İle İyileştirilmesi. Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü.

Wan, L., Hu, Z., Wu, S. and Liu, X. (2013). Mechanical properties and fatigue behavior of vacuum-assist die cast AlMgSiMn alloy. Materials Science and Engineering: A, 576, 252-258.

Wang, L. Z., Wang, S. and Wu, J. J. (2017). Experimental investigation on densification behavior and surface roughness of AlSi10Mg powders produced by selective laser melting. Optics & Laser Technology, 96, 88-96.

Yamanoğlu, R., German, R., Karagöz, S., Bradbury, W., Zeren, M., Li, W. and Olevsky, E. (2011). Microstructural Investigation of As Cast and PREP Atomised Ti-6Al-4V Alloy. Powder Metallurgy, 54(5), 604-607.

Yamanoğlu, R., Zeren, M. ve German, R. M. (2012). Solidification Characteristics of Atomized AlCu4Mg1-SiC Composite Powders. Journal of Mining and Metallurgy B: Metallurgy, 48(1), 73-79.

Yamanoğlu, R., Karakulak, E., Zeren, A. ve Zeren, M. (2013). Effect of Heat Treatment on the Tribological Properties of Al-Cu-Mg/NanoSiC Composites. Materials & Design, 49, 820-825.

Zhou, L., Mehta, A., Schulz, E., McWilliams, B., Cho K. and Sohn, Y. (2018). Microstructure, Precipitates and Hardness of Selectively Laser Melted AlSi10Mg Alloy Before and After Heat Treatment. Materials Characterization, 143, 5-17.

Zhu, S. L., Yang, X. J., Hu, F., Deng, S. H. and Cui, Z. D. (2004). Processing of porous TiNi shape memory alloy from elemental powders by Ar-sintering. *Materials Letters*, 58(19), 2369-237.