

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

**SICAK EKSTRÜZYON YÖNTEMİ KULLANARAK
ALÜMİNYUM ALAŞIMI TALAŞLARIN GERİ DÖNÜŞÜMÜ İLE
PARÇACIK TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN
ÜRETİMİ**

Burak KURTOĞLU

**Danışman
Jüri Üyesi
Jüri Üyesi**

**Doç. Dr. Arif UZUN
Doç. Dr. Uğur GÖKMEN
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet AKKAŞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

KASTAMONU – 2019

TEZ ONAYI

Burak KURTOĞLU tarafından hazırlanan “**Sıcak Ekstrüzyon Yöntemi Kullanarak Alüminyum Alaşımı Talaşların Geri Dönüşümü İle Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemelerin Üretimi**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde savunulmuş ve **oy birliği** ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Doç. Dr. Arif UZUN Kastamonu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Uğur GÖKMEN Gazi Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Mehmet AKKAŞ Kastamonu Üniversitesi	

01/07/2019

Enstitü Müdürü	Prof. Dr. Hasbi YAPRAK	
----------------	------------------------	-------

TAAHHÜTNAME

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildirir ve taahhüt ederim.

Burak KURTOĞLU



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SICAK EKSTRÜZYON YÖNTEMİ KULLANARAK ALÜMİNYUM ALAŞIMI TALAŞLARIN GERİ DÖNÜŞÜMÜ İLE PARÇACIK TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ

Burak KURTOĞLU

Kastamonu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç.Dr. Arif UZUN

Bu çalışmada Al7050 talaşlarına farklı oranlarda (ağırlıkça % 5, 10 ve 15) B₄C tozları ilave edilerek bilyeli öğütücüde 200 rpm dönme hızında 5 saat boyunca karışım sağlanmıştır. Elde edilen karışımlar 600 MPa basınç altında 550°C sıcaklıkta tek yönlü olarak sıkıştırılarak 25 mm çapa sahip biyet numuneler üretilmiştir. Üretilen biyetler 120 ton kapasiteli dikey eksenli hidrolik pres yardımı ile farklı ekstrüzyon oranlarında 550°C sıcaklıkta ekstrüze edilerek 6 mm ve 12 mm çaplarında çubuk formunda numuneler üretilmiştir. Ekstrüzyon oranının ve B₄C miktarının üretilen numunelerin mekaniksel ve mikroyapısal özellikleri üzerine etkilerini belirlemek için metalografik incelemeler, XRD analizleri, yoğunluk ölçümleri, sertlik ölçümleri, basma ve çekme testleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bilyeli öğütme işleminde B₄C miktarındaki artış ile birlikte Al7050 talaşlarında boyutsal küçülme tespit edilmiştir. Ayrıca her iki ekstrüzyon oranına sahip numunelerde % 90'nın üzerinde bağıl yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Mikroyapısal gözlemler sonucunda parçacık miktarındaki artış ile birlikte talaş sınırlarında yoğun topaklanmalar tespit edilmiştir. Bu topaklanmalar beraberinde yapısal kusurlara yol açmıştır. XRD sonuçlarına göre yapıda herhangi bir reaksiyon ürününe rastlanmamıştır. Maksimum sertlik değeri %5 B₄C içeren numunelerde elde edilmiştir. 6 mm ve 12 mm çapa sahip numuneler için sırasıyla elde edilen sertlik değerleri 76.4 HV ve 75.3 HV'dir. Her iki numune türünde ilave edilen B₄C parçacıklarının maksimum çekme dayanımını (UTS) ve yüzde uzama miktarlarını düşürdüğü tespit edilmiştir. 6 mm çapa sahip numunelerin 12 mm çapa sahip numunelere kıyasla daha yüksek çekme dayanımı değerlerine sahip oldukları belirlenmiştir. B₄C içermeyen numunelerde 6 mm için 286 MPa, 12 mm için 190 MPa maksimum çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Numunelerin basma dayanımları ise B₄C miktarındaki artış ile birlikte azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Al7050 alaşımı talaş, B₄C, sıcak ekstrüzyon, mekanik özellikler

2019, 76 sayfa

Bilim Kodu: 91

ABSTRACT

MSc. Thesis

PRODUCTION OF PARCELIC REINFORCED COMPOSITE MATERIALS WITH ALUMINUM ALLOY CHEMICAL RECYCLING USING HOT EXTRUSION METHOD

Burak KURTOĞLU

Kastamonu University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Materials Science and Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Arif UZUN

In this study, B₄C powders were added to Al7050 chips in different proportions (5, 10 and 15% by weight) and the mixture was obtained in a ball mill at 200 rpm for 5 hours. The mixtures were compacted unilaterally at 550°C under 600 MPa pressure to produce billet samples with a diameter of 25 mm. The produced billets were extruded at a temperature of 550°C at different extrusion rates using a vertical axis hydraulic press with a capacity of 120 tons and 6 mm and 12 mm diameter rod-shaped samples were produced. Metallographic investigations, XRD analyzes, density measurements, hardness measurements, compression and tensile tests were used to determine the effects of extrusion rate and B₄C amount on the mechanical and microstructural properties of the produced samples. According to the results, the dimensional reduction of Al7050 chips was determined with the increase of B₄C amount in ball milling process. In addition, relative density values above 90% were obtained in the samples having both extrusion rates. As a result of the microstructural observations, the agglomerations in the chip boundaries with increase in the amount of particles were detected. These agglomerations led to structural defects. According to XRD results, no reaction products were found in the structure. The maximum hardness value was obtained in samples containing 5% B₄C. The hardness values obtained for samples with 6 mm and 12 mm diameter were 76.4 HV and 75.3 HV respectively. In both sample types, the added B₄C particles reduced the maximum tensile strength (UTS) and elongation. It was found that the samples with a diameter of 6 mm have higher tensile strength values than samples with a diameter of 12 mm. The maximum tensile strengths for samples with diameters of 6 mm and 12 mm without B₄C are 286 MPa and 190 MPa, respectively. The compressive strength of the samples decreased with the increase in the amount of B₄C.

Key Words: Al7050 alloy chip, B₄C, hot extrusion, mechanical properties

2019, 76 pages

Science Code: 91

TEŞEKKÜR

Tez danışmanlığımı üstlenerek araştırma konusunun seçimi ve yürütülmesi sırasında, değerli bilimsel uyarı ve önerilerinden yararlandığım Sayın Hocam Doç. Dr. Arif UZUN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmam boyunca deneysel ve analiz çalışmalarında destek sağlayan Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesine, Merkezi Araştırma Laboratuvarına ve Makine Mühendisi Gazi DUMAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmamı destekleyerek bu tezin oluşmasında maddi manevi büyük katkısı ve desteği olan ve bünyesinde çalışmaktan mutluluk duyduğum Kargaz Doğalgaz Dağıtım A.Ş. Yönetim Kurulu Başkanı ve Üyelerine, Genel Müdür ve Yardımcılarına, Birim Müdürlerine teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak her zaman yanımda olan ve benden desteğini esirgemeyen aileme çok teşekkür ederim.

Burak KURTOĞLU
Kastamonu, Temmuz, 2019

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
TABLolar DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI	4
2.1. Alüminyumun Genel Özellikleri	4
2.2. Alüminyumun Kullanım alanları.....	5
2.3. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması	6
2.3.1. Dövme Alaşımlar	6
2.3.2. Döküm Alaşımlar	11
3. ALÜMİNYUM TALAŞLARININ GERİ KAZANIMI	13
3.1. Doğrudan Geri Dönüşüm Yöntemiyle Alüminyum Talaşlarının Geri Dönüşütürülmesi	13
3.1.1. Doğrudan Geri Dönüşüm Yönteminin Aşamaları	16
3.2. Ağır Plastik Deformasyona (SPD) Dayanan Katı Hal Geri Dönüşüm Teknikleri	17
3.2.1. Sıcak Ekstrüzyon	18
3.2.2. Eşit Kanal Açısız Presleme (ECAP).....	19
3.2.3. Döngüsel Ekstrüzyon Sıkıştırma	20
3.2.4. Sürtünme Karıştırma Ekstrüzyonu	20
3.2.5. Yüksek Basınç Burulması (HPT)	21
3.2.6. Vidalı Ekstrüzyon	22
3.3. SPD Yöntemi ile Geri Dönüşürülmüş Numunelerin Kalitesi	22
3.4. Alüminyum ve Alaşımlarının Birleşme Davranışı	22
3.5. SPD ile Geri Dönüşürülmüş Numunelerin Mikroyapısı	25
3.6. Toz Metalurjisine (T/M) Dayalı Katı Hal Geri Dönüşüm Teknikleri	26
4. MEKANİK ALAŞIMLAMA VE ÖĞÜTME	28
4.1. Değirmen Tipleri	29
4.1.1. SPEX Karıştırıcı Değirmenleri	29
4.1.2. Gezegen Bilyeli Değirmenler	30
4.1.3. Attritor Karıştırıcılar	31
4.1.4. Ticari Öğütücüler	32

4.2. Süreç Değişkenleri	32
4.2.1. Karıştırıcı Tipi	33
4.2.2 Karıştırma Kabı	33
4.2.3 Karıştırıcı Devir Sayısı	34
4.2.4 Öğütme Zamanı	34
4.2.5. Öğütme Ortamı	35
4.2.6. Bilye Toz Ağırlık Oranı	36
4.2.7. Haznenin Doluluk Derecesi	36
4.2.8. Karıştırma Atmosferi	36
4.2.9. Süreci Kontrol Eden Etkenler	37
4.2.10. Karıştırma Sıcaklığı	38
4.3. Mekanik Alaşımlama	38
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	41
5.1. Malzemeler	41
5.2. Deneysel Numunelerin Üretimi	42
5.3. Karakterizasyon İşlemleri	44
5.3.1. Metalografik İncelemeler	44
5.3.2. XRD Analizleri	45
5.3.3. Yoğunluk Ölçümleri	46
5.3.4. Sertlik Ölçümleri	47
5.3.5. Basma ve Çekme Deneyleri	47
6. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMALAR	49
6.1. Yoğunluk Değişimi	49
6.2. Mikroyapısal Gözlemler	50
6.3. Mikrosertlik Sonuçları	56
6.4. Çekme Testi Sonuçları	58
6.5. Basma Testi Sonuçları	62
7. SONUÇLAR	66
KAYNAKLAR	67

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AMC	Alüminyum matrisli kompozitler
AMMC	Alüminyum esaslı metal matrisli kompozitler
BP-ECAC	Geri basınçlı eşit kanal açısai birleştirme
CEC	Döngüsel ekstrüzyon sıkıştırma
ECAP	Eşit kanal açısai presleme
ER	Ekstrüzyon oranı
FSE	Sürtünme karıştırma ekstrüzyonu
HPT	Yüksek basınç burulması
Kg	Kilogram
MA	Mekanik alaşımlama
MMC	Metal matrisli kompozitler
MD	Mekanik düzensizleştirme
MÖ	Mekanik Öğütme
ρ	Yoğunluk
ρ_T	Teorik yoğunluk
ρ_b	Bağıl yoğunluk
PECS	Darbeli elektrik akımı sinterleme
T/M	Toz metalurjisi
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SPD	Ağır plastik deformasyon
SPS	Spark plazma sinterleme

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Geleneksel (a) ve doğrudan dönüşüm (b) yöntemlerinde oluşan kayıplar.....	14
Şekil 3.2. Geleneksel ve doğrudan geri dönüşümün aşamaları	16
Şekil 3.3. Sıcak ekstrüzyon sürecinin şematik gösterimi, (a) soğuk sıkıştırma presleme, (b) sıcak ekstrüzyon	19
Şekil 4.1 Attritor tipi bir bilyeli değirmenin şematik gösterimi	32
Şekil 5.1. Çalışmada kullanılan Al7050 talaş formu	41
Şekil 5.2. B ₄ C tozu SEM görüntüsü	41
Şekil 5.3. Karışım sonrası elde edilen talaşlar	42
Şekil 5.4. Üretilen biyet numune	43
Şekil 5.5. Ekstrüzyon işleminde kullanılan kalıplar; a) kovan kalıp, b) ekstrüzyon kalıbı (çap: 6 mm), ekstrüzyon kalıbı (çap: 12 mm).....	43
Şekil 5.6. Ekstrüze edilmiş numuneler, a) çap: 6 mm, b) çap: 12 mm	44
Şekil 5.7. Mikroyapısal karakterizasyonda kullanılan metal mikroskobu	45
Şekil 5.8. Taramalı elektron mikroskobu	45
Şekil 5.9. Bruker D8 model X – ışını cihazı	46
Şekil 5.10. Sertlik ölçüm cihazı.....	47
Şekil 5.11. Basma ve çekme deneylerinde kullanılan universal test cihazı	48
Şekil 6.1. Numunelerdeki bağıl yoğunluk değişimi.....	50
Şekil 6.2. 12 mm çapa sahip numunelerin mikro-yapı resimleri	51
Şekil 6.3. Karıştırma sonrası elde edilen talaş yüzeylerinin SEM görüntüsü ...	52
Şekil 6.4. 12 mm çapa sahip ekstrüze edilmiş Al7050 malzemenin ekstrüzyon yönündeki kesitin SEM görüntüsü.....	53
Şekil 6.5. 12 mm çapa sahip ekstrüze edilmiş %5 B ₄ C içeren Al7050 malzemenin ekstrüzyon yönündeki kesitin SEM görüntüsü	53
Şekil 6.6. 6 mm çapa sahip numunelerin mikro-yapı resimleri	55
Şekil 6.7. Numunelere ait X – ışını kırınım desenleri (XRD).....	56
Şekil 6.8. Numunelere ait sertlik değerleri.....	58
Şekil 6.9. Çekme testi sonuçları, a) 6 mm, b) 12 mm	59
Şekil 6.10. B ₄ C miktarına bağlı çekme testi sonrası elde edilen mekanik özellikler	61
Şekil 6.11. Çekme testi sonrası kopmuş yüzeyler	62
Şekil 6.12. Basma testi sonuçları, a) 6 mm, b) 12 mm.....	63
Şekil 6.13. Basma testine tabi tutulan numuneler	64
Şekil 6.14. B ₄ C miktarına bağlı basma testi sonrası elde edilen mekanik özellikler	65

TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Dövmə alaşımların atama sistemi ve tanımlamaları	7
Tablo 2.2. Bazı 7xxx serisi alaşımların yapı ve üst sınır dəğərləri (% ağırlık oranları)	9
Tablo 2.3. Isıl işləm uygulanmış bazı dövmə alüminyum alaşımlarının çekme özellikleri ve uygulama alanları	10
Tablo 2.4. Döküm alaşımları ve standartları	12
Tablo 5.1. Al7050 talaşına ait kimyasal kompozisyon	41
Tablo 5.2. Al7050 talaş ve B ₄ C tozlarının karışım oranları	42



1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak geleneksel yöntemlerle üretilen malzemelere kıyasla daha üstün özelliklere sahip malzemelerin tercih edilmesi zorunlu hale gelmiştir (Özkaya, 2014). Endüstrideki gelişmeler artık aynı malzemeyi daha iyi özelliklere sahip bir ürün haline nasıl dönüştürebiliriz araştırılması içine girilmiştir. Bu nedenle, bilim adamları daha iyi özelliklere sahip malzemeler elde etmek için birçok araştırma gerçekleştirmişlerdir. Bu araştırmalar neticesinde diğer malzemelere kıyasla daha üstün özelliklere sahip kompozit malzemelerin ön plana çıktığı görülmüştür (Özkaya, 2014).

Teknik ve ekonomik şartlardan dolayı daha kullanışlı metallere olan ilgi giderek artmaktadır (Brungs, 1997). Bu ilginin artmasından dolayı daha fazla metal işlenmekte, test edilmekte ve çeşitli mekanik özellikleri denenmektedir. Bu metal ürünlerin imalatı sırasında farklı tiplerde ve boyutlarda talaşlar üretilmektedir. Elde edilen talaşların, oksidasyondan dolayı geleneksel geri dönüşüm işlemleriyle geri dönüşümünde önemli miktarda malzeme kaybı meydana gelmektedir. Ayrıca, harcanan çaba, tüketilen enerji ve çevre korumasının giderleri, sürecin genel maliyetini fazlasıyla arttırmaktadır (Rashid Abd vd., 2014a). Diğer yandan enerji tasarrufu dünya genelinde de zorlu bir iş olmasından dolayı geleneksel geri dönüşüm yöntemlerine alternatifler aranmaktadır.

Bu yapılan çalışmalarda temel amaç hafif malzemeler geliştirmek ve ilerleyen birincil kaynak kullanımını azaltmaktır (Rashid Abd vd., 2014a). Birincil alüminyum üretimi enerji açısından en yoğun olanlarındandır (Güley vd. 2010). Bu nedenle sürdürülebilir politikada, modern sanayi toplumlarının birincil kaynaklarını koruma ve kontrolünde, kirlilik kullanımını azaltmada odak noktası haline gelmektedir (Puga vd. 2009; Rashid Abd vd. 2014a; Cui ve Roven, 2010).

Alüminyum dökümlerin birçoğu, birtakım işleme proseslerinden sonra bileşenleri ve fonksiyonel parçaları kullanıma hazır halde getirilir. Ayrıca, işleme proseslerinde genellikle döküm ağırlığının yaklaşık %3-5'i kadar talaş şeklinde önemli miktarda atık madde oluşmaktadır (Puga vd., 2009). Bu atık talaşların geleneksel (ergitme)

yöntemleri ile geri dönüştürülmesi için enerji ihtiyacı yaklaşık olarak ton başına 10 GJ'dür (Güley vd., 2010).

Bu sebeplerden dolayı son yıllarda, demir dışı metal parçaların geri dönüşümü için geleneksel yeniden ergitme yöntemi ve katı hal veya doğrudan dönüştürme yöntemi olarak iki ana süreç önerilmiştir. Bu süreçlerin ilki olan yeniden ergitme yöntemi ile geri dönüşümde bazı sorunlar ile karşılaşabilmektedir. Bu sorunlar arasında nispeten yüksek metal kaybının olması, yüksek kimyasal tepkime için metal talaşlarının daha büyük yüzey alanına ihtiyaç duyması, malzeme işleme sırasında kullanılan soğutma yağlarının talaşlara yapışması ile talaşların ergitme işleminde, yağların yanması sonucu zehirli gazların oluşması, daha yüksek enerji tüketimi ve geri dönüşüm maliyetlerinin çok daha yüksek olması geleneksel yöntemlerle geri dönüşümün çok da elverişli olmadığını göstermektedir (Werenskiold vd., 2007).

Bu sorunların çözümü için ortaya çıkan alüminyum kompozitler, son yıllarda üstün mühendislik uygulamalarının ihtiyaçlarını karşılama kapasitesine sahip yeni bir metal matrisli kompozitler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu ihtiyaçlar arasında, yüksek dayanıklılık/ağırlık oranı, düşük maliyet ve yüksek aşınma direnci gibi gelişmiş mekanik özellikler bulunmaktadır. Ayrıca, geleneksel işleme tekniğine uygun ve alüminyum metal matris kompozitlerin üretim maliyetini azaltma ihtimali ile bu ihtiyaçlara cevap verebilmektedir. Kompozit malzemelerin performansı çoğunlukla, takviye malzemelerinin düzgün konumlandırılmasına ve doğru seçilmesine bağlı olarak değişmektedir. Alüminyum ve alüminyum esaslı metal matrisli kompozitler (AMMC) düşük yoğunluklu ve mükemmel mekanik özelliklerinden dolayı nükleer enerji endüstrisi, zırh ve denizcilik, havacılık ve otomotiv ürünleri için çeşitli çalışmalarda aşınma direnci, iyi sertlik, eğilme ve çekme dayanımı gibi geliştirilmiş mühendislik malzemelerine dönüşmüştür (Thuault vd., 2013; Domnich vd., 2011).

Bu kompozitlerin üretimi, geleneksel geri dönüşüme alternatif olan doğrudan geri dönüşüm yöntemiyle alüminyum alaşımlı talaşlar kullanılarak doğrudan geri dönüşüm yöntemi uygulanırken talaşların seçilmesi, kesme cihazlarında boyutlarının azaltılması, bağlayıcı bir faz karıştırılması, güçlendirici faz olarak seramik

parçacıkların eklenmesi (isteğe bağlı), yüksek enerjili bilyeli değirmenlerde öğütülmesi, soğuk preslenmesi (sıcak preslemede yapılabilir) ve sıcak ekstrüze edilmesi işlemleri dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir. Fakat bunun gibi doğrudan geri dönüşüm yöntemiyle üretilen malzemelerin mekanik özellikleri ergitme yöntemleriyle üretilen malzemelere göre nispeten daha düşüktür. Bunun sebebi, malzeme içinde boşluk oluşması ve iyi bir bağlanmanın gerçekleştirilememesidir (Gronostajski vd., 2000; Tekkaya vd., 2009; Fogagnola vd., 2003; Thein vd., 2006).

Bu çalışmada doğrudan veya katı hal geri dönüşüm yöntemiyle alüminyum alaşımlı talaşların (Al7050) içine seramik malzeme takviyesi (B_4C) ile talaşlarının mekanik öğütme işlemi sonrası sıcak preslenmesi ve sıcak ekstrüzyonu ile mekanik özellikleri iyileştirilmiş, düşük yoğunluklu ve sünekliği azaltılmış metal matrisli kompozitlerin sanayiye kazandırılması için kompozit malzeme üretimi hedeflenmiştir.

2. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

2.1. Alüminyumun Genel Özellikleri

Alüminyumun sahip olduğu özelliklerin hepsini bir yerde topladığımızda vazgeçilmez bir mühendislik harikası olarak karşımıza çıkmaktadır. Alüminyum düşük yoğunluğa (2.7 g/cm^3) sahip olmasından dolayı özellikle taşıma işlemlerinde kullanılan araçların imalatında rağbet görmektedir. Üzerinde oksit tabakası oluşması nedeniyle ana metal malzemesinin doğal olarak korunmasını sağlamaktadır. Saf haldeki alüminyum alaşımlama uygulanarak dayanımı yüksek bir malzeme haline dönüştürülebilir. Bu dayanım 690 MPa'a kadar çıkabilmektedir. Alüminyum malzemelerin nispeten düşük fiyatları olması ve çok yönlü olarak kullanılabilmesi, alüminyum sanayide vazgeçilmez bir ürün haline getirmiştir (Kınıkoğlu, 2006).

Alüminyumun ve alaşımlarının dayanım/yoğunluk oranı oldukça yüksektir. Bundan dolayı alüminyum ve alaşımları, hafif özellikler istenilen uçak ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyumun elektriksel iletkenliği yüksek bir malzemedir ve bakır malzemenin yaklaşık %65'i kadar iletkenlik göstermesi bakırla rekabetine neden olmaktadır. Bu nedenle elektrik iletkenliği/yoğunluk oranı, tüm metallere göre en yüksek metallerden biridir. Bundan dolayı yüksek gerilim hatlarında bakır yerine kullanılmaktadır. Alüminyumun bir başka özelliği ise korozyon dayanımının iyi olmasıdır. Atmosfer ve diğer birçok ortam içerisinde alüminyumun korozyon dayanımı dikkat çekici miktarda oldukça yüksektir. Alüminyumun demir malzemedenden daha aktif bir yapısı olmasına rağmen demirden daha fazla korozyon dayanımı göstermesinin nedeni olarak üzerinde oluşturduğu oksit tabakası gösterilmektedir. Kuru atmosfer şartlarında alüminyum yüzeyinde yaklaşık 2.5-3 nm arasında koruruyu bir oksit filmi oluşmaktadır. Ortamdaki nem miktarının artmasıyla bu film tabakasının kalınlığı artmakta ve nem miktarına doyması halinde film tabakasının kalınlığı yukarıda verilen kalınlığın iki katına çıkmaktadır. Bu oksit tabakası kendiliğinden oluştuğu gibi yapay yöntemlerle artırılması da gerçekleştirilebilmektedir. Belirtilen bu özelliklere ek olarak, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının soğuk ortamlarda veya soğuk bir şekilde

deformasyona uğraması, folyo gibi çok ince levha haline gelebilmesi ve ısı iletim kabiliyetinin yüksek olması alüminyum ve alaşımlarına büyük avantajlar sağlamaktadır. Bu üstünlüklere rağmen saf alüminyumların çekme dayanımı ve akma dayanımlarının düşük olması, oksijene olan ilgilerinin yüksek olmasından dolayı dökülebilirliklerinin kötü olması, kaynak ve lehim ile birleştirilmesinin kolay olmaması, talaşlı şekillendirilebilirliğinin iyi olmaması, bazlara ve hidroksitlere karşı dayanımının düşük olması gibi bazı dezavantajları bulunmaktadır (Yalçın ve Gürü, 2012).

2.2. Alüminyumun Kullanım Alanları

Birçok üstün özellikleri sayesinde alüminyum ve alüminyum alaşımları, metal imalatının hemen hemen her alanında kullanılabilmektedir. Alüminyumun yoğunluğunun düşük olması sebebi ile yaygın olarak uçak ve diğer taşıtlarda kullanılmaktadır. Bunların yanında kablo, perçin, mutfak eşyası, boru üretimi ve son dönemlerde kapı ve pencere imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum toz haline getirilerek boya malzemelerine katılması sonucu korozyon koruması yaparak kaplama işlemlerinde kullanılabilmektedir. Alüminyum malzemenin kullanılması ile ağırlıkta büyük avantajlar sağlanması bakır ve çelik üretiminin yerini almasını sağlamıştır. Tüketim alanlarında sıralamasını gözden geçirirsek inşaatta % 27, taşıt araçlarında % 25, ambalaj sanayiinde % 15 ve elektrikte % 10 ile ilk dört sırayı almaktadır (Yalçın ve Gürü, 2012).

Günümüzde üretilen 1 ton alüminyumun yaklaşık 250 kilogramı ulaşım sektöründe kullanılmaktadır. Alüminyumun sağladığı hafiflik, ulaşımında hız istenilen araçlar için vazgeçilmez bir malzeme olmuştur. Bir otomobilde yaklaşık olarak 80 kg alüminyum kullanılmaktadır. Aynı işlevi çelik ve alaşımlarından beklemiş olsaydık gerekli ağırlık 160 kg daha fazla olacaktı. Bu da büyük bir maliyet ve malzeme kaybı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durum uçaklar için çok daha önemlidir. Bir uçağın yapımında kullanılan metal miktarının yaklaşık % 70'i alüminyum tarafından karşılanmaktadır (Yalçın ve Gürü, 2012).

Ambalaj sanayii, alüminyum ve alaşımlarının en çok rağbet gördüğü sektörlerden birisidir. Alüminyumun özellikle ince folyo şeklinde üretilmesi ambalaj sanayisi için çok önemli bir avantajdır. Diğer yandan mor ötesi ışınların geçmesini önlemesi ile gıdaların uzun süre bozulmadan saklanmasına olanak sağlamaktadır. Diğer taraftan, ilaç kutuları, içecek kutuları, diş macunu kapları diğer önemli kullanım alanlarıdır (Yalçın ve Gürü, 2012).

2.3. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları iki kategoride sınıflandırılmaktadır: dövme alaşımlar ve döküm alaşımlar. Dövme alaşımları işlenerek şekillendirilmektedir. Döküm alaşımlar ise erimiş halde kalıba dökülerek şekilleri belirlenmektedir. Bu alaşımların alüminyum birliği tarafından belirlenen sabit bir sınıflandırması bulunmaktadır. Alüminyum birliği, ANSI H35.1’de açıklanan her bir sınıflandırma için geniş çapta tanınan bir atama sistemi tanımlamıştır. Bu atama sistemlerinden aşağıda bahsedilmektedir (Wessel, 2004).

2.3.1. Dövme Alaşımlar

Alüminyum derneğinin alüminyum alaşımlarını tanımlandığı sistemde, her bir lisanslı alaşım için 4 basamaklı bir sayı sistemi dernek tarafından tanımlanmıştır. İlk sayı birincil alaşım elementini göstermektedir, bu süreç diğer grup alaşımlar içi de bezer özelliktedir. Son iki haneyi sırasıyla dernek atmıştır. İkinci basamak alaşımdaki değişiklikleri göstermektedir. Örneğin, 6463 daha iyi bitirme özellikleri elde etmek için demir, manganez ve krom gibi bazı alaşım elementleri üzerinde biraz daha kısıtlayıcı sınırları olan 6063’ün değişikliğidir (Wessel, 2004).

Tablo 2.1. Dövmе alaşımların atama sistemi ve tanımlamaları (Wessel, 2004)

Seri numaralar	Birincil alaşım elementleri	Bağıl korozyon direnci	Bağıl dayanım	Isıl işlem
1xxx	-	Mükemmel	Uygun	Isıl işlem uygulanmaz
2xxx	Bakır	Uygun	Mükemmel	Isıl işlem uygulanabilir
3xxx	Manganez	İyi	Uygun	Isıl işlem uygulanmaz
4xxx	Silisyum	-	-	Isıl işlem uygulanmaz
5xxx	Magnezyum	İyi	İyi	Isıl işlem uygulanmaz
6xxx	Magnezyum ve silikon	iyi	İyi	Isıl işleme uygulanabilir
7xxx	Çinko	Uygun	Mükemmel	Isıl işlem uygulanabilir

1xxx Alaşımları: Bu seri endüstride en az % 99 alüminyum içeren ticari saflıktaki alüminyum için tanımlanmaktadır. 1xxx serisi alaşım sayıları için saflık değişkenleri ve element bileşiminde temel olan demir ve silisyumdan kaynaklanan safsızlıklar tanımlanmaktadır. Bu serideki alaşımlar elektriksel iletkenlik ve kimyasal depolama işlemleri için birincil olarak kullanılmaktadır. Çünkü bu serideki alaşımların elektriksel iletkenlikleri ve korozyon direnci en iyi özelliklere sahiptir. Alaşım sayısının son iki hanesi alüminyum malzemesinin ondalık sayısının sağındaki iki haneyi gösterir. Yani diğer katkı maddelerinin yüzde kaç olduğunu göstermektedir. Örneğin, 1060 alaşımın % 99.60'ı alüminyum anlamına gelmektedir. Bu oran saf alüminyumda düşüktür (Wessel, 2004).

2xxx Alaşımları: Bu grup için birincil alaşım elementi, yüksek mukavemetli ancak korozyon direncini düşüren bakırdır. Bu alaşımlar geliştirilen ilk alaşımlar arasında yer almakta ve orijinal olarak duralumin olarak adlandırılmaktaydılar. 2024 alaşımı, belki de uçakta en iyi bilenen ve en çok kullanılan alaşımdır. Orijinal alüminyumu-bakır alaşımları çok iyi bağlanma gstermemekteydiler, ancak tasarımcılar bu sorunu daha sonra bu serinin alaşımlarında geliştirmişlerdir (Wessel, 2004).

3xxx Alaşımları: Manganez, 3xxx serisi için ana alaşım elementidir ve alaşımsız alüminyumun dayanımını % 20 arttırmaktadır. Birincil alaşımlardan oluşan 3003, 3004 ve 3105 grubundaki alaşımlarda korozyon direnci ve işlenebilirlik iyidir. 3xxx serisi alaşımlar, yağmur taşıyan ürünler, çatı kaplama ve cephe kaplama gibi mimari ürünlere çok yaygın olarak kullanılabilmektedir (Wessel, 2004).

4xxx Alaşımları: Kaynak ve lehimleme uygulamalarında erime noktasını düşürmek için 4xxx serisi alaşımlarına silisyum takviyesi yapılmaktadır. Silisyum ayrıca, dövme halinde karmaşık kalıp şekillerinin daha eksiksiz doldurulmasını sağlayan iyi akma özelliği sağlamaktadır. Alaşımlı 4043, kaynak dolgu teli için yaygın olarak kullanılmaktadır (Wessel, 2004).

5xxx Alaşımları: 5xxx serisi alaşımları yüksek mukavemet ve korozyon direnci sağlayan magnezyum içermektedir. Bu grup alaşımları gemi gövdelerinde ve diğer denizcilik uygulamalarında, kaynak telinde ve kaynaklı depolama tanklarında kullanılmaktadır. Bu serideki alaşımların dayanımı, yaklaşık % 6'ya kadar değişen magnezyum içeriği ile doğru orantılıdır (Wessel, 2004).

6xxx Alaşımları: Bu gruptaki alaşımlar magnezyum silisi (Mg_2Si) oluşturan oranlarda magnezyum ve silisyum içermektedir. Bu alaşımlar iyi bir korozyon direnci ve dayanım dengesine sahiptir. 6061 alaşımı, tüm alüminyum alaşımlarının en popüler olanlarındandır ve yumuşak karbon çeliğine benzer bir akma dayanımına sahiptir. 6xxx serisi alaşımlar çok kolay bir şekilde ekstrüzyona uğrayabilirler, bundan dolayı ekstrüzyon malzemelerinin çoğunu 6xxx serisi alaşımlar oluşturur ve çoğu zaman inşaat ve diğer yapı uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Wessel, 2004).

7xxx Alaşımları: Bu serinin birincil yapı elemanı çinkodur. 7xxx serisi iki tür alaşım içermektedir. Alüminyum-çinko-magnezyum alaşımları(örneği 7005) ve alüminyum-çinko-magnezyum-bakır alaşımları(örneği 7075 ve 7178) şeklinde sıralayabiliriz. Bu serinin alaşımları, minimum çekme dayanımı 580 MPa olan 7178 gibi en yüksek dayanıma sahip alüminyum alaşımları içerir ve uçak çerçevelerinde ve yapı bileşenlerinde kullanılmaktadır. Ayrıca bakır ile alaşımlı olan 7xxx serisi alaşımların korozyon direnci, 1xxx, 3xxx, 5xxx veya 6xxx serilerinden daha düşüktür. Bakır içermeyen 7xxx serisi alaşımları korozyona karşı dayanıklıdır ve bazı 7xxx serisi alaşımları korozyona karşı daha az dirençli alüminyum alaşımlarını katodik olarak korumak için kaplama şeklinde kullanılmaktadır (Wessel, 2004).

Tablo 2.2. Bazı 7xxx serisi alaşımların yapı ve üst sınır değerleri (% ağırlık oranları); (Rometsch ve diğ.,2014)

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr
AA7020	0.35	0.40	0.20	0.05-0.50	1.0-1.4	0.10-0.35	4.0-5.0	-	0.08-0.20
AA7022	0.50	0.50	0.50-1.0	0.10-0.40	2.6-3.7	0.10-0.30	4.3-5.2	-	-
AA7075	0.40	0.50	1.2-2.0	0.30	2.1-2.9	0.18-0.28	5.1-6.1	0.20	-
AA7079	0.30	0.40	0.40-0.8	0.10-0.30	2.9-3.7	0.10-0.25	3.8-4.8	0.10	-
AA7050	0.12	0.15	2.0-2.6	0.10	1.9-2.6	0.04	5.7-6.7	0.06	0.08-0.15
AA7150	0.12	0.15	1.9-2.5	0.10	2.0-2.7	0.04	5.9-6.9	0.06	0.08-0.15
AA7055	0.10	0.15	2.0-2.6	0.05	1.8-2.3	0.04	7.6-8.4	0.06	0.08-0.25
AA7085	0.06	0.08	1.3-2.0	0.04	1.2-1.8	0.04	7.0-8.0	0.06	0.08-0.15

Tablo 2.3. Isıl işlem uygulanmış bazı dövme alüminyum alaşımlarının çekme özellikleri ve uygulama alanları (Polmear, 2005)

Alaşımların sınıflandırılması	Temperleme	% 2'lik gerilme denemesi (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Uzama (% 50'nin içinde)	Tipik uygulamalar
7004	T6	340	400	12	Orta dayanımdaki kaynaklı yapılar
7005	T53	345	395	15	Orta dayanımdaki kaynaklı yapılar
7016	T6	315	360	12	Orta dayanımdaki kaynaklı yapılar
7020	T4	225	340	18	Orta dayanımdaki kaynaklı yapılar
7039	T61	310	415	13	Orta dayanımdaki kaynaklı yapılar
7001	T6	345	675	9	Uçak yapılarında
7009	T6	625	535	12	Uçak yapılarında
7010	T6	470	545	12	Uçak yapılarında
7049	T73	485	530	11	Uçak yapılarında
7050	T736	510	550	11	Uçak yapılarında
7075	T6	500	570	11	Uçak yapılarında
7475	T761	560	590	12	Uçak yapılarında
7178	T6	540	610	10	Uçak yapılarında
7055	T7751	610	630	12	Uçak yapılarında
7085	T7651	475	510	7	Uçak yapılarında
7090	T7E71	580	620	9	Uçak yapılarında
7091	T7E69	545	590	11	Uçak yapılarında

2.3.2. Döküm Alaşımları

Alüminyum alaşımları genellikle üç ana yöntemle dökülmektedir: kum kalıba döküm, kalıcı kalıpta döküm ve basınçlı döküm.

Kum kalıba döküm alüminyum dökümünde kullanılan en yaygın kalıp dökümlerinden birisidir. Kum kalıpta döküm işlemi çoğunlukla az sayıda üretilecek döküm parçalarına, karmaşık yapıya sahip parçaları, büyük boyutlarda üretilecek parçaların ve yapı elemanları gibi parçaların döküm işlemlerinde kullanılmaktadır (Kınıkoğlu, 2006).

Kalıcı kalıpta dökümde erimiş metal kalıcı kalıba yerçekimi, düşük basınç veya merkezkaç kuvvetinin etkisiyle dökülmektedir. Bu döküm yönteminde kum kalıba göre daha hızlı dökme, parçada daha ince bir tane yapısı sağlanmakta ve parçanın dayanımı oldukça yüksek olmaktadır. Kalıcı kalıba dökümde oluşan parçaların kum kalıba göre, gaz gözenekliliği ve büzülme olayının olması daha düşük bir ihtimaldir. Kalıcı kalıpların dezavantajı olarak bu kalıplar da boyut sınırlaması bulunmaktadır. Bundan dolayı karmaşık yapıya sahip parçaların dökümü için elverişli değildir (Kınıkoğlu, 2006).

Basınçlı döküm ise erimiş metalin yüksek hızda üretim yapılması için basınç uygulanarak kalıplara dökülmesi işlemini kapsamaktadır. Kalıp iki parça şeklindedir ve bir parça sabit diğeri hareketlidir. Erimiş metal kalıba basınç altında döküldükten sonra hareketli parça ayrılır ve sıcak parça bir itici yardımıyla sabit parçadan çıkartılır. Bu süreç döngüsel bir şekilde devam etmektedir. Bu yöntemle, yüksek hızda parçalar üretilebilir ve kısmen parçalar ikinci bir işleme tabi tutulmaz. Parçaların boyut hassasiyeti diğer döküm yöntemlerine göre oldukça yüksektir. Bu yöntem ile ince tane yapısına sahip parçalar üretilebilir ve işlem tamamen otomatik olarak gerçekleştirilebilir (Kınıkoğlu, 2006).

Döküm alaşımları, dövme alaşımlardan daha fazla oranlarda alaşım elementi içermektedir. Genellikle dövme alaşımların homojen yapısına göre daha az sünek bir yapıya sahip heterojen bir yapıyla sonuçlanmaktadır. Yani döküm alaşımlarının dövme alaşımlara kıyasla daha az sünek ve daha heterojen bir yapısı bulunmaktadır.

Ayrıca döküm alaşımları dövme alaşımlara kıyasla, dökümde akıcılığı sağlamak için daha fazla silisyum içermektedir. Alüminyum birliği, dövme alaşımlarda kullanılan 4 basamaklı sistemi döküm alaşımlarında da kullanılmaktadır. Dövme alaşımlarındaki sistem ile tek benzerliği de bu olmaktadır. Döküm alaşımlarındaki atama sisteminde 3 hane bulunmaktadır, bu üç haneyi ondalık basamak takip eder ve ondan sonra başka bir basamak takip etmektedir. Yani 3 basmaktan sonra ondalık cinsinden yazılmaktadır. İlk hane dövme alaşımlarında olduğu gibi birincil alaşım elementini göstermektedir. İkinci basamak, ticari saflıktaki alaşımı veya saflık derecesini göstermektedir. Son hane, kütük (kirlilik seviyesine bağlı olarak) ve döküm için 0 ürün biçimini göstermektedir (Wessel, 2004).

Tablo 2.4. *Döküm alaşımları ve standartları (Kınıkoğlu, 2006)*

Alüminyum, en az % 99.00 veya daha fazla	1xx.x
Ana alaşım elementlerine göre gruplanmış alüminyum alaşımları	
Bakır	2xx.x
Silisyum ve bakır ve/veya magnezyum katkısıyla	3xx.x
Silisyum	4xx.x
Magnezyum	5xx.x
Çinko	7xx.x
Kalay	8xx.x
Diğer elementler	9xx.x
Kullanılmamış seri	6xx.x

3. ALÜMİNYUM TALAŞLARININ GERİ KAZANIMI

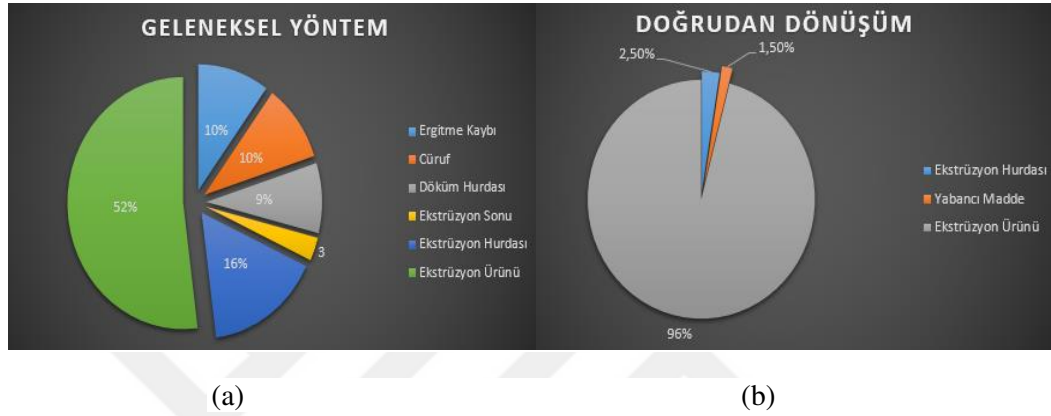
3.1. Doğrudan Geri Dönüşüm Yöntemiyle Alüminyum Talaşlarının Geri Dönüştürülmesi

Alüminyumun talaşlı imalatı sırasında üretilen talaş hurdalarının yüksek yüzey/hacim oranına sahip olması yeniden ergitme işlemi sırasında önemli malzeme kayıplarına neden olmaktadır. Bu malzeme kayıpları talaş büyüklüğüne ve şekline bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bundan dolayı yüzeyde oluşan oksit tabakası ve kirlenme seviyesi değişiklik gösterecektir (Kadir Ab vd., 2017). Sonuçta malzeme kaybı seviyesi % 20-25'lere kadar çıkabilmektedir (Paraskevas vd., 2015). Ayrıca harcanan emek ve çevre korumasının giderleri sürecin genel maliyetini arttıracaktır (Rashid Abd vd., 2014a). Burada temel amaç birincil malzeme tüketimini azaltarak, daha düşük yoğunluklu malzemeler geliştirmektir. Bu nedenle sürdürülebilir politika, modern sanayi toplumlarının birincil kaynakları koruma ve kontrolünde ve kirlilik oluşumunu azaltmada odak noktası haline gelmektedir. Dolayısıyla verimli bir geri dönüşüm süreci geliştirmek gerekmektedir (Rashid Abd vd., 2014a; Puga vd., 2009; Cui ve Roven, 2010).

Yarı mamul alüminyum ürünlerinin işlenmesinde elde edilen talaşlar, uzun spiral şekilleri, küçük boyutları, oksitlenme sonucu yüzey kirliliğinin oluşması vb. nedenlerden dolayı geleneksel (yeniden ergitme) yöntemleri ile geri dönüştürülmesi çok zordur. Bu zorluk karşısında son yıllarda işlenmiş talaşların katı hal dönüşüm yöntemleriyle haddelenmesi veya sinterlenmesi ile tekrardan üretimi gerçekleştirilebilmektedir (Puga vd., 2009; Jassim, 2016).

Alüminyum talaşların geri dönüşüm yöntemleri geleneksel ve geleneksel olmayan dönüşüm yöntemleri olarak sınıflandırılabilir (Rashid Abd vd., 2014a). Geleneksel geri dönüşümde mekanik geri dönüşüm olmamaktadır çünkü geri dönüşüm işlemi yeniden ergitme sonrası katılaşma ile gerçekleşmektedir. Bu katılaşma iri taneli yapıların oluşmasına neden olur ve mikro yapıyı kontrol etmek için ek işlemler gerektirmektedir. Ayrıca, yeniden ergitme işlemi sonrası çok sayıda cüruf oluşmaktadır. Alüminyum talaşlarının doğrudan geri dönüşüm yöntemleri geleneksel

olmayan geri dönüşüm yöntemleri olarak kabul edilmektedir. Bu yöntem diğerine göre basit ve ekonomik bir süreçtir. Daha az enerji tüketimi, emekten tasarruf ve çevreye olan zararın minimuma indirilmesini sağlaması, onu sürdürülebilir üretim süreci olarak kabul etmemizi sağlayabilmektedir (Jassim, 2016). Şekil 3.1’de geleneksel ve doğrudan dönüşüm yöntemlerinde oluşan kayıplar verilmiştir (Rashid Abd vd., 2014b).



Şekil 3.1. Geleneksel (a) ve doğrudan dönüşüm (b) yöntemlerinde oluşan kayıplar (Rashid Abd vd., 2014b)

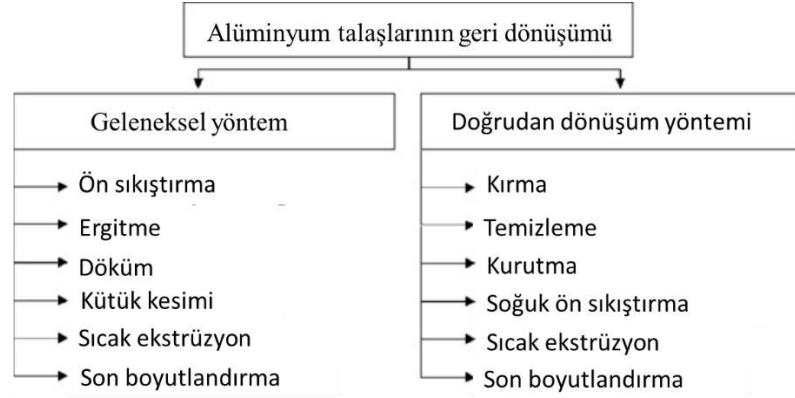
Demir dışı metallerin doğrudan geri dönüşümünün faydalarından bahsedecek olursak, saf cevherin çıkarılmasını önemli ölçüde azaltacaktır ve böylelikle yenilenemeyen kaynaklar korunmuş olacaktır. Bu metallerin madenciliği sırasında karbondioksit ve tehlikeli gaz emisyonları, önemli miktarda katı atık oluşması ve arazinin tahrip edilmesi gibi birçok olumsuz çevresel etkiler ortaya çıkmaktadır (Gaustad vd., 2012). Bundan dolayı katı hal geri dönüşüm süreci, özellikle hurda talaşların geri kazandırılması için uygun bir seçim olarak kabul edilebilir ve hurdaların doğrudan katı ürünlere dönüştürerek üstün mekanik özellikli yarı mamul ürünler elde edilebilir (Wan vd., 2017).

Alüminyum alaşımlarına artan talep ile (özellikle Al-Si alaşımları) otomotiv motor parçaları imalatında, alüminyum alaşımlarının üretiminde, özellikle geleneksel döküm ve sonrasındaki işleme süreçlerinde önemli miktarda hurda talaşlar oluşmaktadır (Paraskevas vd. 2014; Chiba vd., 2015; Abdollahi vd., 2014; Fuziana vd., 2014). Ayrıca alüminyum alaşımının geleneksel yöntemlerle geri dönüşümü zor

bir prosestir (Wang vd., 2019). Alüminyum yarı mamullerin işlenmesi sırasında takım ömrünün uzatılması açısından soğutucu yağlar kullanılmaktadır (Wang vd., 2011). Bu yağlar talaş yüzeylerine yapışmakta ve talaşlardan arındırılması zorlu bir süreç gerektirmektedir. Geleneksel yöntemlerle bu tür hurdaların geri kazanılması yüksek maliyetlere sebep olmaktadır. Bundan dolayı katı hal geri dönüşüm yöntemlerine (doğrudan geri dönüşüm yöntemi de denilebilir) olan ilgi ileriki yıllarda giderek artması beklenmektedir (Wang vd., 2019).

Doğrudan dönüşüm yöntemi ile genellikle takviye malzemesi olarak SiC, B₄C, Al₂O₃, grafit benzeri malzemeler katılarak dayanımı ve mekanik özellikleri arttırılmış alüminyum matrisli kompozitler üretilmektedir (Bodukuri vd., 2016). Takviye malzemeleriyle güçlendirilen alüminyum matrisli kompozitler düşük yoğunlukları, yüksek dayanım özellikleri ve iyi aşınma direnci gibi diğer alaşımlara göre üstün özelliklere sahiptir. Bu özelliklerin hepsini tek bir malzemede toplama durumumuz her zaman gerçekleşmeyebilir. Malzemede istenilen mekanik ve fiziksel özellikleri sağlamak için en doğru takviye elemanı seçilmelidir. Takviye elemanı ile matris arasındaki bağ ne kadar kuvvetli olursa o kadar güçlü bağa sahip malzeme elde edilir. Alüminyum ve alaşımlarının mekanik özelliklerini arttırmak için seramik malzemeler sıklıkla kullanılmaktadır (Çolak ve Turhan, 2016).

Alüminyum ve alüminyum alaşımlı talaşların ekstrüzyon yoluyla kompakt metale doğrudan dönüştürülmesi durumunda atık, safsızlıkların giderilemediği (% 1.5) ve ekstrüzyon atıklarının % 2.5'e kadar olduğu talaşların bir parçasıdır. Böylece ürünün nihayetinde % 96'sı geri kazanılmış olmaktadır (Samuel, 2003). Alüminyum ve alaşımlarının geleneksel geri dönüşümünün ve bunların doğrudan dönüşümünün akış aşamaları Şekil 3.2'de verilmiştir (Tekkaya vd., 2009).



Şekil 3.2. Geleneksel ve doğrudan geri dönüşümün aşamaları (Tekkaya vd., 2009)

3.1.1. Doğrudan Geri Dönüşüm Yönteminin Aşamaları

Doğrudan Geri Dönüşüm Yöntemiyle Üretilen Ürünler İçin Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlı Talaşların Hazırlanması:

Alüminyum ve alüminyum alaşımlı talaşların hazırlanmasında:

- Talaşların ayrılması,
- Saf talaşların temizlenmesi,
- Talaşların toz haline getirilmiş bir ürünle birleştirilmesi,

işlemlerinden oluşmaktadır. Alüminyum ve alüminyum alaşımlı talaşlar kimyasal bileşimlerine göre ayrıştırılmalı ve üretim tesislerinde çok çabuk kirlenmelerini önlemek için bölümlere ayrılmalıdır. Bu işlemler istenilen kimyasal yapıya sahip malzeme üretmek için yapılan işlemleri kolaylaştıracaktır. Aksi durumda talaşların sonradan ayrılma işlemleri imkânsız hale gelecektir. Alüminyum ve alüminyum alaşımlı talaşlar genellikle talaşlı imalatla kullanılan soğutucu maddeler ve yağlayıcılarla kirlenmektedir. Bu yağ emülsiyonlarının talaştan temizlenmesi kimyasal bir yöntemle gerçekleştirilebilmektedir. Bir diğer husus da talaş boyutudur. Kompozit malzeme üretebilmek için talaş boyutlarının 4-0,5 mm arasında olması uygun görülmektedir (Gronostajski vd., 2000).

Alüminyum ve Alüminyum Alaşımli Talaşların Takviye Fazları İle Karıştırılması:

Başlangıçta bilyeli bir değirmen kullanılmıştır. Değirmen sabit bir hazneye sahiptir. Değirmen içerisine çeşitli çaplarda çelik bilyeler ile birlikte hazırlanmış olan talaşlar ve takviye elemanı eklenerek yatay bir ekseninde dönme hareketi yaparak karıştırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Böylelikle talaşlar ve takviye elemanı soğuk kaynaklanmış olmaktadır. Çelik bilye oranı değirmen hacminin % 45'ini aşmamalıdır (Gronostajski vd., 2000).

Karışımların Sıkıştırılması:

Karıştırılan ve öğütülen talaşlar sıcak veya soğuk olarak preslenmektedir. Bu presleme basıncı kalıbın şekline göre değişiklik gösterebilmektedir. Bazı durumlarda alüminyum ve alüminyum alaşımli talaşların ve takviye fazlarının daha iyi difüzyonu için ön sıkıştırma yapılabilir. Parçacıklar arasındaki temas durumu oksit tabakalarının varlığının artmasıyla birlikte azalmaktadır. Bundan dolayı, oksit tabakasını ezerek ve yüksek basınç ve sıcaklık altında difüzyon hareketini gerçekleştirerek parçacıklar arasında difüzyon bağına arttırmak için sıcak ekstrüzyon işlemi uygulanabilmektedir. Bu ekstrüzyon sıcaklığı alüminyum malzemenin ergime sıcaklığının 50 ila 100 °C altında seçilmelidir (Gronostajski vd., 2000).

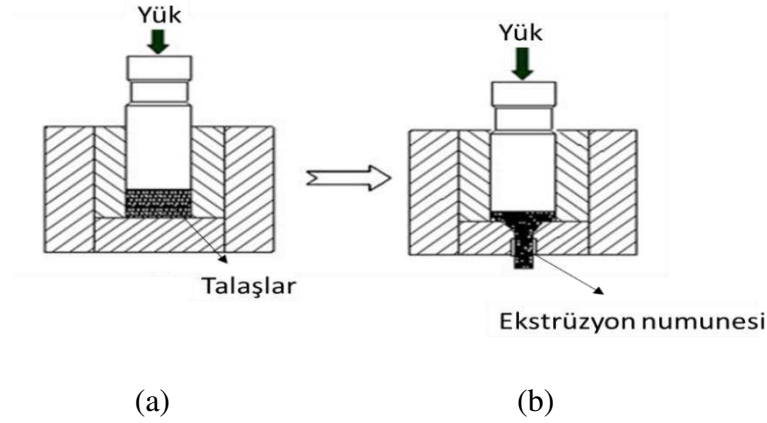
3.2. Ağır Plastik Deformasyona (SPD) Dayanan Katı Hal Geri Dönüşüm Teknikleri

Metal şekillendirme işlemleri olarak tanımlanan SPD teknikleri, metallerin, alaşımların ve intermetaliklerin mikro yapılarının iyileştirilmesi için kullanılan tekniklerdir (Azushima vd., 2008; Estrin ve Vinogradov, 2013; Sakai vd., 2014). Bu teknikler ile dökme metal üzerine çok büyük plastik deformasyon uygulayarak, mikrometrenin altında (100-1000 nm) ve nanometre (<100 nm) aralığındaki boyutlarda ultra ince taneli ve hatta nano yapıli metal malzeme üretilebilmektedir (Estrin ve Vinogradov, 2013). Bu sonuçlara bakılarak SPD teknikleri ile malzeme üzerinde büyük kayma deformasyonları oluşturarak talaşların birleştirilmesi sağlanabilmektedir. Ayrıca, ince mikro yapıya sahip talaşlarla birleştirilmiş ürünün mekanik özellikleri referans alınan orijinal kütük (ingot) ile karşılaştırıldığında talaşlı

birleştirilmiş ürünün mekanik özellikleri genellikle daha iyi çıkmaktadır (Anilchandra ve Surappa, 2013; Misiolek vd., 2012).

3.2.1. Sıcak Ekstrüzyon

Sıcak ekstrüzyon işlemi çok yaygın kullanılan katı hal geri dönüşüm tekniğidir ve yaygın kullanılan bu geri dönüşüm tekniği, ilk önce talaşların ufalanması, temizlenmesi ve kurutulması, soğuk ön sıkıştırma yapıldıktan sonra en son işlem olan sıcak ekstrüzyon olmak üzere üç ana süreçten oluşmaktadır (Ji vd., 2009). Örneğin Gronostajski vd., (1997), alüminyum ve alaşımlı talaşları sıcak ekstrüzyon tekniğiyle geri dönüştürmüştür. Bir başka çalışmada Tekkaya vd. (2009), freze ve tornalama talaşlarını tekrardan kullanmak için doğrudan sıcak ekstrüzyon tekniğini ileri sürmüşlerdir. Ancak bu teknik tek başına yeterli olmayabilir. Çünkü talaşların hava atmosferinde takviye faz kullanılmadan mekanik öğütülmesi, taneler arasındaki bağlanmayı güçleştiren oksit parçacıklarının oluşmasına neden olmaktadır (Samoshina ve Bryantsev, 2012). Bir diğer çalışmada Fogagnola vd., (2003), soğuk sıkıştırma esnasında presleme süresinin uzun tutulmasını, güvenli talaş bağı elde etmek için tek başına yeterli olmadığını belirtmiştir. Bu nedenle, ekstrüzyon işlemi gibi ek bir kayma kuvveti, preslenmiş kütük halinde talaşlı birleştirilmiş ürün elde etmek için uygulanmıştır. Bir başka çalışmada Chiba vd., (2011), AC₄CH (ticari) alüminyum alaşımlı talaşların soğuk ekstrüzyon ve ardından soğuk haddeleme işlemi ile geri dönüşüm olasılığını incelemiştir. Elde edilen sonuçlarda, geri dönüştürülmüş malzemenin mekanik özelliklerinin orijinal külçe (ingot) ile karşılaştırılabilir olduğunu ve bu sonucun talaşlar arasında yeterli bağın oluştuğunu göstermektedir. Sıcak ekstrüzyon işlemi şekil 3.3'te talaşların önce sıcak veya soğuk olarak preslendiği ve ardından sıcak ekstrüze edildiği sistem şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Sıcak ekstrüzyon sürecinin şematik gösterimi, (a) soğuk sıkıştırma-presleme, (b) sıcak ekstrüzyon (Ji vd., 2009)

3.2.2. Eşit Kanal Açısız Presleme (ECAP)

Günümüzde ECAP, ultra ince malzemelerin yüksek açılı tane sınırları ile sadece kayma kuvveti kullanarak, kütük (bulk) üretmek için kullanılan SPD tekniğidir (Valiev ve Langdon, 2006). Bu işlemin en büyük avantajı, düşük yükler altında bile yığın (bulk) katılara, son derece büyük, tek yönlü, tek biçimli deformasyonlar oluşturulabilmesidir (Segal, 1995). Bu sistem, numune ile oluşan çok yoğun bir kayma gerilmesine rağmen, numunenin kesit boyutları değişmeden kalmasına ve tekrar eden deformasyonlara izin vermektedir (Horita vd., 2000; Haase vd., 2012; Valiev ve Langdon, 2006; Langdon, 2007; Azushima vd., 2008; Estrin ve Vinogradov, 2013). ECAP genellikle dökme malzemelerin ağır plastik deformasyonuna uygulanmasına rağmen metalik parçacıklara ve tozları birleştirmek içinde kullanılabilir. Bununla ilgili çalışmalarda bulunan Matsuki vd., (2000), 2024Al-3Fe-5Ni alaşım tozunun birleştirilmesi için ECAP işleminin kullanılabileceğini göstermiştir. Elde edilen sonuçlarda çok ince bir mikro yapı ile neredeyse tamamen yoğun bir malzeme üretilmiştir. Xia vd., (2007), saf Al parçacıkları, geri basınçlı eşit kanal açısız birleştirme (BP-ECAC) kullanarak tek bir geçişte çok yüksek yoğunluklu dökme malzemeleri başarılı bir şekilde birleştirmiştir. Ayrıca, BP-ECAC üzerinden ECAP'a kıyasla, geri basınçsız da parçacıkların daha iyi bağlandığı gösterilmiştir (Xia ve Wu, 2005). Bununla ilgili olarak, iyi karıştırılmış tozlar, yani karbon nanoparçacıklar ve saf Al parçacıklar, tamamen yoğun olan Al-C nanokompozitlerine dönüştürülmüş ve nanokompozitler önemli

ölçüde daha yüksek mekanik özellikler göstermiştir. Bu durumu ince ve dengeli tane yapılarının oluşmasına ve C parçacıklarının Al matrisine homojen bir şekilde dağılması olarak açıklayabiliriz (Goussous vd., 2009). Benzer şekilde, yeni ultra ince Al parçacıklarının BP-ECAP ile birleştirilmesi sırasında, tamamen yoğun nanokristal Al ve şekilsiz γ -Al₂O₃'ten oluşan Al₂O₃ nanokompozitler başarılı bir şekilde analiz edilmiştir (Xu vd., 2009). Taneli yapıya sahip metal talaşların katı hal geri dönüşümü için ECAP işlemi, talaşlar arasında iyi bir bağlanma gerçekleşmesi için önemli bir etkiye sahip olduğu yapılan araştırmalar sonucunda kanıtlanmıştır.

3.2.3. Döngüsel Ekstrüzyon Sıkıştırma (CEC)

CEC işleminde, kalıbın içinde bulunan numune ekstrüzyon ve sıkıştırma işlemine tabi tutulmaktadır ve bu iki süreç her geçişte değişmektedir. Katı hal geri dönüşümü için önceden soğuk sıkıştırılmış metal talaşların CEC işlemi, elde edilen kütüğü (billet) D çaplı silindirik bir odadan nispeten daha küçük olan d çaplı silindirik bir odaya itmesiyle gerçekleşmektedir (Richert vd., 1999). Bu çalışmaya örnek olarak Peng vd., (2009), Mg-10Gd-2Y-0.5Zr alaşımlı talaşların geri dönüşümü için CEC yöntemini uygulamışlardır. Ara yüzlerde talaş yapışmasından dolayı derin çatlakların, 673 K'de 6 geçişten sonra neredeyse tamamen kaybolduğu ve ayrıca ince eşdeğerli taneler ve ikinci faz parçacıklarının geri dönüştürülmüş numunede gözlemlendiğini belirtmişlerdir.

3.2.4. Sürtünme Karıştırma Ekstrüzyonu (FSE)

Sürtünme karıştırma kaynağı (FSW), bir omuz (shoulder) ve özel olarak tasarlanmış bir pimin yer aldığı döner bir aletin birleştirilecek olan iki kelepçeli plaka veya levhanın alın yüzeyleri boyunca geçtiği katı hal birleştirme işlemidir (Nandan vd., 2008). FSW sırasında dönen alet tarafında üretilen sürtünme ısısı kaynak yapılan malzemelerin yumuşatılması için kullanılmasının yanı sıra çalışma bölgesine yüksek sıcaklıkta önemli plastik deformasyon uygulanması ve ince mikro yapılı malzeme oluşmasına neden olmaktadır (Mishra ve Ma, 2005; Nandan vd., 2008; Hosseini vd., 2012). Bundan dolayı FSW tekniğine dayanarak, yeni bir teknik olan sürtünme karıştırma ekstrüzyonu (FSE) geliştirilmiştir ve bu tekniği diğer tekniklerden ayıran

en önemli özelliği, sürtünme ısısının, malzemelerin yumuşatılması dışında ekstrüzyon işleminde de kullanılabilmesidir. FSE için önemli olan sıcak çatlak ve soğuk yırtılma hatalarının çok yüksek veya çok düşük ekstrüzyon sıcaklıklarında ortaya çıkmasıdır (Tang ve Reynolds, 2010). Tang ve Reynolds (2010), işleme talaşlarından FSE aracılığıyla AA2050 ve AA2195 tellerini imal etmiş ve ekstrüzyon tellerinde tamamen eş merkezli yeniden kristalize edilmiş mikro yapı gözlemlemişlerdir.

3.2.5. Yüksek Basınç (Press) Burulması (HPT)

Son zamanlarda HPT süreci birçok araştırmacı tarafından en etkili tane arttırma yöntemi olarak kabul edilmektedir. Üst ve alt örs arasına tutulan numune, birkaç GPa'dan yüksek hidrostatik basınçta ve alt örslerin döndürülmesi ile eş zamanlı burulma gerinimine maruz bırakılmaktadır (Valiev vd., 2000; Zhilyaev vd., 2003; Zhilyaev ve Langdon, 2008; Estrin ve Vinogradov, 2013). Uygulamada HPT işlemi sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış olmak üzere iki türe ayrılabilir (Zhilyaev vd., 2007). İlk durumda, yaklaşık 1 mm kalınlığında ince disk, ana malzemenin dışına doğru uygun serbestlikte akmasıyla üretilebilmektedir. İkinci durumda, yaklaşık 8 mm yüksekliğinde kütük (bulk) numune üretimi yapılırken dışa doğru akış yoktur (Zhilyaev vd., 2007; Sakai vd., 2005). Ayrıca, HPT işlemi tozların birleştirilmesi içinde kullanılabilir (Valiev vd., 1996; Shen vd., 1995). Üretilen ürünler yüksek yoğunluklu ve ince tane yapısına sahiptir. İşleme ile üretilmiş talaşların yeniden kullanılması çalışmasında HPT'nin talaşların katı hal geri dönüşümü için alternatif bir işlem olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, alüminyum talaşların HPT tekniği ile başarılı bir şekilde geri dönüşümünün de gerçekleştirilebildiği belirtilmiştir (El Aal vd., 2013). El Aal vd. (2013), HPT sürecinin $AlSi_8Cu_3$ alaşımlı talaşları birleştirmek için uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Araştırmacılar oda sıcaklığında 10 devir boyunca 8 GPa burulma gerinimi uygulanan bir baskı ile tam yoğun katı (bulk) numuneler elde ettiler. Bununla birlikte daha yüksek açılı tane sınırları ve homojen deformasyonlara sahip ince mikro yapılar sayesinde nispeten daha yüksek mikro sertlik oluştuğunu gözlemlediler.

3.2.6. Vidalı Ekstrüzyon

Widerøe vd. (2013), vidalı ekstrüzyon işlemini AA6060 tozlarının (granüllerinin) birleşmesi için kullanmış ve dönme hareketinin aksenal sıkıştırma kuvvetini azalttığını bulmuşlardır. Widerøe ve Welo (2013), kontrast (contrast) madde ve ekstrüdat hız ölçümleri kullanarak, alüminyum tanelerin vida ekstrüzyonu sırasında ki hareketini görselleştirdi ve ekstrüzyon işleminin gelecekte tasarımını kolaylaştıracak ekstrüzyon basıncı oluşturma mekanizması şeklinde bir model hazırlamışlardır. Bu model bir ekstrüzyon odası, vida ve kalıptan oluşmaktadır.

3.3. SPD Yöntemi ile Geri Dönüştürülmüş Numunelerin Kalitesi

Yapılan çalışmalarda, SPD ile geri dönüştürülmüş numunelerin son kalitesini belirleyen ana etkenler arasında deformasyon şartlarına bağlı olarak malzemenin yoğunluğu ve mikro yapısı yer almaktadır. Yoğunluk ve kompaktlık, doğrudan birleştirme halini gösterirken tane yapısı, takviye fazı, mikro yapıdaki boşluklar, kayma hareketi ve diğer etmenlerde dahil olmak üzere talaşlı birleştirilmiş ürünlerde malzemenin mekanik özellikleri üzerine etki etmektedir (Misiolek vd., 2012).

3.4. Alüminyum ve Alaşımlarının Birleşme Davranışı

Birleştirilmiş talaşların mekanizma analizi:

Peng vd., (2010) tarafından talaş takviyesinin, fiziksel ve metalurjik mekanizmaların birlikte hareketine katkı sağladığı bildirilmiştir. Bu hareketlenme sonucunda alüminyum ve alaşımlarının birleşmesini engelleyecek oksit tabakaları oluşmaktadır. Bu oksit tabakalarının kayma hareketi sonucu kırılması mümkündür. Bu kırılma sonucu talaş yüzeyleri arasında doğrudan temas sağlanır ve talaşlar arasında bağlar oluşturulur. Bu bağların oluşmasını kolaylaştıran etkenlerden birisi soğuk ön sıkıştırma yapılması ve soğuk ön sıkıştırma sonrası talaşlar arasında fiziksel olarak birleşmenin sağlanmasıdır. Talaşlara uygulanan kayma gerilmesinin oksit tabakalarının kırılması için gerekli olan kayma gerilmesinden daha fazla olması gerekmektedir. Kayma hareketi sonrası numune incelendiğinde çatlaklar, boşluklar veya gözenekler talaşlar arasında oluşan ara yüzler etrafında dağılmış olarak

gözlenmiştir (Güley vd., 2013; Mabuchi vd., 1995). Kayma deformasyonunun neden olduğu ara yüzler ve kristal yapı hataları (kayma ve tane sınırı gibi) atomların difüzyon yolları olarak düşünülebilir (Peng vd., 2010). Ayrıca ilave alüminyum tozlarının talaşların dolgu ve bağlayıcı madde olarak kullanılması halinde malzeme özellikleri üzerinde etkili olabileceği bulunmuştur (Sherafat vd., 2009). Kırılmış tane yapısına sahip oksitler yeniden kristalize edilmiş taneler arasındaki sınırı hareket ettirebilmektedir (Güley vd., 2013). Döngüsel ekstrüzyona bakarsak, oksit filmlerinin çok geçişli kayma hareketleri nedeniyle küçük parçacıklara ayrılması kolaydır ve bu talaşlar arasındaki gözeneklerin daha kolay kapanmasına neden olmaktadır (Peng vd., 2010).

Talaş birleştirmeyi etkileyen faktörler:

Genellikle aşağıdaki faktörler talaş birleştirmeyi etkileyen faktörler olarak sınıflandırılmaktadır: Talaş özellikleri, kalıp geometrisi, takviye fazının içeriği, ekstrüzyon oranı ve hızı, kütük sıcaklığı ve benzeri değişkenler sayılabilir. Yukarıda bahsedildiği gibi oksit tabakalar talaşların bağlanmasını önleyebilmektedir. İnce alüminyum hurdaları ve talaşları genellikle daha geniş bir yüzey alanına sahiptir. Birim hacim başına toplam yüzey alanı ($S: \text{mm}^2/\text{mm}^3$), talaşların yüzeylerinde oksidasyon oluşma olasılığının yüksek olması nedeniyle önemli bir değişkendir. Bu nedenle oksit içeriği talaş büyüklüğü ile yakından ilgilidir ve geri dönüştürülmüş numunedeki oksijen yoğunluğunun toplam yüzey alanı hacmi ile doğrusal olarak arttığı kanıtlanmıştır (Hu vd., 2008; Wu vd., 2009). S değeri ne kadar yüksek olursa oksit kirlenmesinin de o kadar ağır olduğu anlamına gelmektedir. Bu nedenle talaşlarda iyi bir bağlanma sağlamak için yüksek miktardaki oksit tabakasının kırılması gerekmektedir. Dolayısıyla özel yüzeyleri daha küçük olan nispeten daha büyük talaşların kullanılması katı hal bağını arttıracaktır (Peng vd., 2010; Pepelnjak vd., 2012). Bu anlatılanlara ek olarak takım talaş açısının geri dönüştürülmüş numunelerin kalitesi üzerindeki etkisi Anilchandra ve Surappa (2010) tarafından araştırılmıştır. Araştırmacılar negatif talaş açılı takımdan kırılğan, tırtıklı ve kıvrılmış talaşların üretilbildiğini bulmuşlardır. Soğuk sıkıştırma sırasında tırtıklı talaşların daha fazla toz haline geldiği ve talaşlar arasındaki gözenekliliği doldurarak daha iyi yoğunlaşmanın sağladığı belirtilmiştir. Sıkıştırmayı daha kolay hale getirmek için

düzensiz uzun sarmal talaşların farklı öğütme işlemleriyle küçük ve düzenli hale indirgenmesi gerekmektedir. Farklı tip öğütme işlemlerinde uygun talaş boyutunun 2 mm'nin altında olması önerilmektedir (Badarulzaman vd., 2014). Bu durumda talaşların fiziksel olarak birleşmesine neden olan önemli yeniden düzenlemeler gözlenmiştir (Gronostajski vd., 1997). Sıcak ekstrüzyon ile geri dönüşüme bakıldığında genellikle ilk önce soğuk ön sıkıştırma yapılmaktadır. Bu sıkıştırma katmanlarının sayısının kütük yoğunluğu ile yakından ilgili olduğu kabul edilmektedir. Dört katmanlı kütük malzemenin çok katmanlı olarak sıkıştırmanın temsili olarak kullanılabileceği bulunmuştur (Misiolek vd., 2012). Ekstrüzyon işleminde yumuşak matrisin plastik gözeneklere akışını mümkün kılmak ve aynı zamanda atom difüzyon hızını arttırmak ve böylece talaşların iyi bir şekilde birleşmesini sağlamak için daha yüksek ekstrüzyon sıcaklığı gerekli olmaktadır (Gronostajski vd., 1996, 1997). Sıcaklık alüminyum kütük için genellikle 500-550 °C aralığında kontrol edilmektedir (Gronostajski vd., 2001). Ek olarak ekstrüzyon hızını veya koç (ram) hızını yavaşlatmak yumuşak matrisin plastik akış süresini uzatmak için faydalı bir işlemdir (Gronostajski vd., 1996, 1997). Makro ve hatta mikro boyutta bulunan çatlaklar göreceli şekilde yüksek koç hızından oluşmaktadır. Ekstrüzyon oranı (ER) iyi talaş bağının oluşması için önemli bir değişkendir. ER ne kadar yüksek olursa talaşlara uygulanan sıkıştırma kuvveti de o kadar büyük olmakta ve oksit tabakalarının kırılması doğru orantılı bir şekilde kolaylaşmaktadır (Hu vd., 2010). ER'nin talaşların birleştirilmesi üzerindeki etkileri Peng vd. (2010) tarafından incelenmiştir. İncelemelerde nispeten yüksek ER değeri altında ve yüksek sıcaklıkta atom difüzyonu nedeniyle talaşlar arasındaki ara yüzlerin neredeyse çözüldüğünü ve gözeneklerin neredeyse kaybolduğunu gözlemlemişlerdir. Gerekli ER'den daha az ER'li alüminyum talaşlarından profil üretilmesinde düz kalıbın daha iyi talaş yapışmasını garanti etmesi güçtür (Güley vd., 2011; Haase vd., 2012). Sonuç olarak talaşlar üzerindeki basıncı arttırmak için sıcak ekstrüzyon kalıbında yeni bir malzeme akış yolu oluşturulması önerilmektedir. Güley vd. (2013), kalıp tasarımının talaşların bağlanması üzerine etkisini araştırmışlardır. Araştırmalarında düz kalıptan farklı olarak porthole kalıbı kullanmışlar ve malzeme akışının yeniden tasarlanması sonucu 10 °C'lik düşük bir ER altında bile ekstrüdat üretimine izin verdiğini görmüşlerdir. Porthole kalıbı için talaşlarının kaynaklanma bölgesindeki sıcaklığın yassı kalıba göre 20 °C daha yüksek olduğu bulunmuştur. Güley vd. (2013), kalıp tasarımının

FEM simülasyonları ile ekstrüdatlardaki gerilme dağılımları üzerindeki etkisini araştırmalarında, porthole kalıbı için kalıp çıkışındaki etkili gerginliğin, düz yüzölçümlü kalıp için neredeyse iki kat daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Takviye fazının yoğunluk değeri gibi diğer faktörlerde göz ardı edilmemelidir (Gronostajski vd., 1996; Samuel, 2003). Takviye yapısının uygun olması talaşlar arasındaki gözeneklerin ilave fazlar tarafından yeterince doldurulabildiği gerçeğine sahip olarak geri dönüştürülmüş ürünün yoğunluğunun artırılmasına yardımcı olmaktadır. Fakat ilave fazın aşırı eklenmesi matris malzemenin gözeneklere akışını engellemektedir.

3.5. SPD ile Geri Dönüştürülmüş Numunelerin Mikroyapısı

Alüminyum talaşlarının SPD yöntemleriyle iyi bir şekilde birleştirilmesinden sonra geri dönüştürülmüş numunelerin mekanik özellikleri temel olarak tane yapısının ince olması, takviye fazlarının düzgün dağılması, intermetaliklerin tane sınırlarında çökmesi gibi özellikler sergilemektedir (Chino vd., 2005). Katı hal geri dönüşüm işlemlerinde demir dışı metaller (Al, Mg gibi) genellikle sertleşme ve yumuşatma işlemlerine maruz bırakılmaktadır. Bu nedenle talaşlı birleştirilmiş numunelerde ince tane yapısı ile homojen dağılmış mikro yapının oluşmasını açıklayan durum dinamik yeniden kristalleşme olayı gösterilebilmektedir. Araştırmalarda dinamik yeniden kristalleşmenin deformasyon sıcaklığına ve gerilme oranına bağlı olduğunu bulunmuştur (Hu vd., 2012). SPD tekniklerinin yaygın işlem değişkenleri ince tane yapısı elde etmek için uygun hale getirilmektedir. İşlem sıcaklığının tam katılma ve yeniden kristalleşme sıcaklığı arasında seçilmesi önerilmektedir (Yusuf vd., 2013). Uygun yüksek sıcaklık, tamamen yeniden kristalize edilmiş kazanımlara yol açabilirken, çok yüksek sıcaklıklarda kazanç düşük olmaktadır (Zhao vd., 2011; Güley vd., 2013). Ayrıca ekstrüzyon oranı işlenebilirliğin derecesi ile pozitif olarak ilişkilendirilmektedir (Murai vd., 2003). Ekstrüzyon oranı arttıkça, dinamik yeniden kristalleşmenin boyutu doğru orantılı bir şekilde artış göstermektedir (Zhao vd., 2011; Wen vd., 2008). Daha yüksek ekstrüzyon oranı altında gerçekleşen büyük sıkıştırma kuvveti ayrıca bazı kaba intermetaliklerin yerinden kayma hareketini engelleyebilecek küçük parçacıklara ayrılmasını da sağlayabilir. Zhang vd., (2011) ekstrüzyon oranının doğrudan geri dönüşüm yöntemiyle üretilen AZ31B alaşımları üzerindeki etkisini incelemiştir. Chino vd., (2006), yüksek ekstrüzyon oranı

(1600:1) için tane büyüklüğünün, düşük ekstrüzyon oranı (45:1) için olandan belirgin şekilde daha büyük olduğunu gözlemlemişler ve son tane büyüklüğünün tane büyümesi ve dinamik yeniden kristalleşme ile rekabet içinde olduğu sonucuna varmışlardır. Aynı zamanda, kirletici oksit maddeleri parçalanmış ve tane büyümesini engelleyen daha yüksek ekstrüzyon oranlarıyla daha düzgün bir dağılım göstermiştir. Özetlemek gerekirse SPD yöntemiyle talaşların birleştirilmesi sonucu elde edilen ürünün ince taneli mikro yapısı iyi mekanik özelliklere yol açmıştır. Ayrıca ağır deformasyondan kaynaklanan yüksek kayma yoğunluğu, dayanıklılığı daha da arttırabilmektedir. Kirletici oksitlerin az miktarının dağılması ürünün daha da güçlü bir yapısı olmasına neden olmuştur (Samoshina ve Bryantsev, 2012). Buna ek olarak, aşırı miktarda kirletici oksit maddelerinin varlığı gerilme yoğunluğunun bulunduğu alan çevresinde mikro boyutta boşlukların oluşmasına neden olabileceği gibi, bununla mikro çatlakla birleşebileceği ve daha sonra düşük sünekliğe neden olacağı bildirilmiştir (Hu vd., 2008; Wu vd., 2009).

3.6. Toz Metalurjisine (T/M) Dayalı Katı Hal Geri Dönüşüm Teknikleri

Son zamanlarda T/M tekniğinin katı hal geri dönüşüm yöntemlerinde başarıyla uygulandığı bilinmektedir. Santrifüjlü atomizasyon işlemi ile toz elde etmek için alüminyum hurdaların ergitilmesi gerekmektedir. Bu nedenle atıkların tekrar erimesini önlemek ve tamamen katı hal dönüşümü sağlamak için başka bir toz üretim yöntemi olan mekanik öğütme yöntemi denenmiştir (Wan vd., 2017). Hong vd., (2000), inert bir argon ile birlikte oksijenli bir ortamda kuru bilyeli öğütme işlemi ile alüminyum folyo hurdasından pul şeklinde tozlar ürettir ve toz boyutunun/şeklinin bilyeli öğütme koşullarına dayandığını bulmuşlardır. Ayrıca, alüminyum folyo hurdasından ıslak bilyeli öğütme işlemi ile de pul şeklinde tozlar üretilebilmektedir. Katkı maddesi olarak ağırlıkça % 1-3 aralığındaki mineralin folyoya ve ağırlıkça % 2-3 aralığında oleik asidin katkı maddesi olarak en uygun değerinde olduğu doğrulanmıştır. Bunlara ek olarak, T/M tekniğine dayanan katı hal geri dönüşüm yönteminde toz üretim süreci bu durumda değerlendirilmeyebilir (Hong ve Kim, 2001). Susniak vd., (2013) çalışmalarında, $AlSi_5Cu_2$ talaşlarına α -SiC tozu ($\sim 2 \mu m$) takviye edilmesi ile doğrudan bilyeli öğütme yapılarak mekanik alaşımlandırma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra homojen bir şekilde dağılmış kompozit

yapılı tozlar elde etmişlerdir. Guluzade vd., (2013), diğer araştırmacılardan farklı olarak 0.5-1 mm büyüklüğündeki AlMn₁SiCu talaşlarını, takviye fazı olarak 1040 çelik talaşları ile mekanik karıştırıcı kullanarak karıştırmışlardır. Daha sonra soğuk presleme ve sinterleme işlemlerinden geçirerek çelik takviyeli Al matrisli kompozitler üretmişlerdir. Darbeli elektrik akımı sinterlemesi (PECS) olarak da adlandırılan Spark plazma sinterlemesi (SPS), düşük sıcaklıkta ve bir akımın (yani darbeli DC) kombinasyonu altında kısa sürede ve basınçta tozların sinterlenmesini mümkün kılan gelecek vadede bir yöntemdir. SPS işlemleri diğer sinterleme işlemlerine göre birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlar: kullanım kolaylığı, yüksek sinterleme hızı, düşük sinterleme sıcaklığı, yüksek tekrarlanabilirlik ve daha ince sinterleme numunelerinin daha ince taneli bir yapı göstermesi olarak sıralayabiliriz (Munir, 2006). Son zamanlarda, SPS yöntemi alüminyum hurdaları için yeni bir katı hal geri dönüşüm işlemi olarak kullanılmaya başlanmıştır (Paraskevas vd., 2014, 2015). Dinamik hurda preslemesi, numuneden geçen ritimli elektrik akımı ile birlikte oksit tabakalarının etkin bir biçimde kırılmasını sağlamak ve hapsolmuş gazların serbest kalmasına ve yeni oluşan metal yüzeylerin birbirine temasını gerçekleştirerek talaşların daha iyi birleşmesine yol açmaktadır. Böylece boşluksuz geri dönüştürülmüş bir malzeme üretilmiş olmaktadır (Munir, 2006).

4. MEKANİK ALAŞIMLAMA VE ÖĞÜTME

Mekanik alaşımlama, toz parçacıklarının yüksek enerjili bir bilyeli değirmende tekrarlanan kaynaklanması, kırılması ve yeniden birleştirilmesini kapsayan katı hal toz işleme yöntemidir. Yüksek enerjili bilyeli değirmenlerde toz parçacıklarının işlenmesini sağlamak için literatürde yaygın olarak kullanılan iki farklı yöntem bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi mekanik alaşımlama (MA) diğeri de mekanik öğütmedir. Mekanik alaşımlama toz karışımlarının (farklı metallere veya alaşımlardan/bileşiklerden) birlikte öğütüldüğü süreci göstermektedir. Homojen bir alaşım elde etmek için malzeme takviyesi bu sürece dahil edilmektedir. Diğer taraftan, homojenizasyon için malzeme takviyesinin gerekli olmadığı durumlarda saf metaller, metaller arası veya önceden hazırlanmış tozlar gibi tek biçimli (genellikle stokiometrik) bileşim tozlarının öğütülmesi Mekanik Öğütme (MÖ) olarak adlandırılmaktadır. İntermetalikler de uzun mesafeli düzenin bozulması ve düzensiz faz oluşmasına mekanik düzensizleştirme (MD) denir. MA/MÖ'ye göre MÖ/MD'nin avantajı, tozların zaten alaşımlı olmasından ve sadece parçacık büyüklüğünde ve/veya diğer dönüşümlerde bir azalmanın mekanik olarak indüklenmesi gerektiğinden işlem için gereken sürenin kısa olmasıdır. Örneğin MÖ, MA'nın aynı efekti elde etmesi için gereken sürenin yarısına ihtiyacı vardır. Buna ilave olarak tozların MÖ'sü, kısaltılmış işlem süresine bağlı olarak bileşen tozların oksidasyonunu azaltmaktadır (Suryanarayana, 2001).

MA işlemi, tozların doğru oranda karıştırılması ve toz karışımının öğütme ortamı ile birlikte öğütücünün içine yüklenmesi (genellikle çelik bilyeler) ile başlar. Bu karışım daha sonra her bir toz parçacıklarının yapısı başlangıçtaki toz karışımındaki elementlerin oranı ile aynı olduğunda sabit bir duruma ulaşana kadar istenilen süre boyunca öğütülmektedir. Öğütülmüş toz daha sonra yığın halinde birleştirilir ve istenen mikro yapı ve özellikleri elde etmek için ısıtma işlemi uygulanır. Bu nedenle MA sürecinin önemli bileşenleri ham maddeler, değirmen ve işlem süresidir (Suryanarayana, 2001). MA için kullanılan hammaddeler 1-200 µm aralığında parçacık boyutlarına sahip ticari saflıkta olan tozlardır. Dağılım (dispersiyon) ile güçlendirilmiş malzemeler genellikle karbür, nitrid ve oksit ilaveleri içermektedir. Oksitler en yaygın olanlardır ve bu alaşımlar oksit dağılımıyla güçlendirilmiş

materyaller olarak bilinmektedirler. MA'nın ilk aşamasında toz miktarı, bir matris veya bir bağlayıcı olarak işlev görmesi için en az % 15 hacimli, sünek olarak sıkıştırılabilir bir şekilde deforme olabilen metal tozundan oluşmaktadır. Bununla birlikte, son yıllarda tamamen kırılğan maddelerin karışımları da başarılı bir şekilde öğütülmüş ve alaşım oluşumu gerçekleştirilmiştir. Böylece öğütme sırasında sünek bir metal tozunun olması şartı ortadan kalkmıştır. Sünek-sünek, sünek-gevrek ve gevrek-gevrek toz karışımları yeni alaşımlar üretmek için öğütülebilmektedir. Son zamanlarda katı toz parçacıkları ile sıvı karışımların öğütülmeside gerçekleştirilmektedir.

Metal tozları bazen sıvı bir ortamda öğütülür ve buna ıslak öğütme denilmektedir. Sıvının olmaması durumunda kuru öğütme olarak adlandırılabilir. Kriyojenik sıcaklıklarda gerçekleştirilen öğütme işleminde (Cryomilling) ıslak öğütmeye örnek olarak kabul edilebilir. Daha ince yapıları ürünler elde etmek için ıslak öğütmenin kuru öğütmeden daha uygun bir yöntem olduğu bildirilmiştir. Çünkü ıslak öğütmedeki çözücü moleküller yeni oluşmuş parçacıkların yüzeylerinde absorbe olurlar ve parçacıkların yüzey enerjilerini düşürmektedirler. Islak öğütmede toz parçacıkların daha az topaklanma faktörü mevcuttur. Bununla birlikte, ıslak öğütmenin dezavantajlarından birtaneside toz kirliliğinin artmasıdır. Bu nedenle MA/MÖ işlemlerinin çoğu kuru olarak gerçekleştirilmektedir (Suryanarayana, 2001).

4.1. Değirmen Tipleri

Mekanik olarak alaşımlı tozların üretilmesi için farklı tiplerde yüksek enerjili öğütme donanımları kullanılmaktadır. Kapasiteleri, öğütme verimleri, soğutma ve ısıtma vb. ilave düzenlemeler bakımından farklılık göstermektedirler.

4.1.1. SPEX Karıştırıcı Değirmenleri

Tek seferde yaklaşık 10-20 g toz öğüten SPEX değirmenleri gibi karıştırıcı değirmenleri en yaygın olarak laboratuvar araştırmaları için kullanılmaktadır. Değirmenin yaygın kullanılan çeşidi kelepçe (clamps) içine sabitlenmiş ve enerjik olarak dakikada birkaç kez ileri geri sallanan, numune ve öğütme toplarını içeren tek bir hazneye sahip olanıdır. Haznenin her bir sallanmasında bilyeler numuneye ve

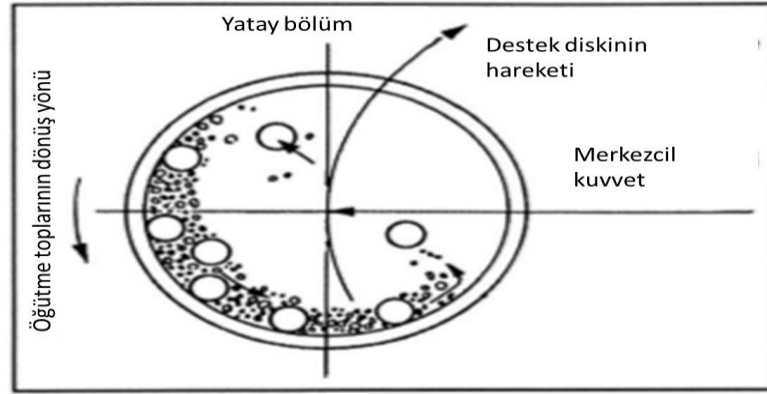
şışenin uçlarına çarparak hem öğütme hem de karıştırma gerçekleştirilir. Kelepçe hareketinin genişliği ve devir sayısı nedeniyle bilye hızları yüksektir (5 m/s düzeyinde). Bu nedenden dolayı bu değirmenlere yüksek enerjili değirmenler denilmektedir. Bu cihazlarda uzun öğütme sürelerine imkân tanımak için zorunlu olarak soğutucu içermektedirler. SPEX değirmenleri için çeşitli hazne malzemeleri mevcuttur ve bunlar arasında sertleştirilmiş çelik, alümina (alüminyum oksit), tungsten karbid, zirkonya, paslanmaz çelik, silisyum nitrür, akik, plastik ve metakrilat bulunmaktadır.

4.1.2. Gezegen Bilyeli Değirmenler

MA deneyleri yapmak için popüler değirmenlerden biride gezegen bilyeli değirmenlerdir. Bu değirmenler tek seferde birkaç yüz gram toz öğütmek için elverişlidirler. Gezegen bilyeli değirmen, adını haznenin gezegen benzeri hareketine borçludur. Bu olay dönen bir destek diskinde gerçekleşir ve özel bir tahrik mekanizması kendi eksenini etrafında dönmelerine neden olmaktadır. Destek diskinin dönmesi ile hazneler kendi eksenini etrafında dönmeye başlar ve bir merkezkaç kuvveti oluştururlar. Oluşan bu merkezkaç kuvveti öğütülecek malzemelere ve öğütme bilyeleriyle birlikte haznelere etki etmektedir. Hazneler ve destek diski ters yönde döndürüldüğünde merkezkaç kuvvetleri dönüşümlü olarak benzer ve ters yönlerde hareket etmektedir. Bu durum, öğütücü bilyelerin haznenin iç duvarına sürtünmesinden dolayı malzemenin öğütülmesine sebep olmaktadır (sürtünme etkisi). Hareketin devamında bilyeler haznenin duvarından ayrılarak içerisinde serbestçe hareket ederken haznenin karşı duvarına çarparlar (çarpma etkisi). Diskin ve haznenin dönüş hızları önceki sürümlerde kontrol edilemese de modern sürümlerde kontrol edilmesi mümkün hale gelmiştir. Tek bir değirmende iki veya dört karıştırma yeri bulunabilir. Son zamanlarda tek karıştırma yerine sahip değirmenler de geliştirilmiştir. Öğütme hazneleri ve bilyeler farklı malzemeden imal edilebilmektedir. Silisyum, nitrür, sinterlenmiş korindon, zirkonya, krom çeliği, Cr-Ni çeliği, tungsten karbür ve plastik poliamid olarak sıralayabiliriz. Bu tür değirmendeki bilyelerin doğrusal hızı SPEX değirmenlerinkinden daha yüksek olsa da etki sıklığı SPEX değirmenlerinden çok daha fazladır (Suryanarayana, 2001).

4.1.3. Attritor Karıştırıcılar

Geleneksel bir bilyeli değirmen, küçük çelik bilyeler ile yarısına kadar doldurulmuş dönen yatay bir tamburdan oluşmaktadır. Tambur döndükçe bilyeler öğütülmekte olan tozlar üzerine düşer ve öğütme hızı dönme hızının artmasıyla artmaktadır. Bununla birlikte yüksek hızlarda çelik bilyeler üzerine etki eden merkezkaç kuvveti yerçekimi kuvvetini aşar ve çelik bilyeler tambur çeperlerine sabitlenir. Bu noktada öğütme işlemi durmaktadır. Attritor (daha yüksek enerji üretebilen bir bilyeli değirmen) içinde bir dizi çark bulunan dikey bir tamburdan oluşmaktadır. Birbirine kademeli olarak dik açılı bir şekilde ayarlanan çarklar, bilyelere hareket enerjisi verir. Böylece bilyeler arasında, bilyeler ve kap duvarları arasında ve bilyeler ile karıştırıcı mil ve çarklar arasında oluşan darbelerden dolayı, toz büyüklüğünde azalma meydana gelmektedir. Bu olay parçacıklar arasındaki çarpışmalar ve bilye hareketleri ile gerçekleşmektedir. Burada tambur içindeki çarkların dönmesi için güçlü bir motor gücüne ihtiyaç bulunmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı Attritorlar aynı anda çok miktarda tozun (yaklaşık 0.5 ila 40 kg arasında) öğütülebildiği değirmenlerdir. Öğütme ortamının hızı gezegen veya SPEX öğütücülerinkinden çok daha düşüktür (yaklaşık 0.5 m/s). Farklı boyutlarda ve kapasitelerde Attritor'ler bulunmaktadır. Öğütme tankları veya kapları, alümina, silisyum karbür, silisyum nitrür, zirkonya, kauçuk ve poliüretan ile kaplanmış paslanmaz çelik veya sadece paslanmaz çelik olarak bulunmaktadır. Ayrıca çeşitli öğütme ortamları olarak cam, çakmaktaşı taşları, sabuntaşı (steatite) seramik, mullit, silisyum karbür, silisyum nitrür, sialon (yüksek sıcaklık refrakter malzemesi), alümina, zirkonyum silikat, zirkonya, paslanmaz çelik, karbon çeliği, krom çeliği ve tungsten karbür de bulunmaktadır. Bu Attritor'un kullanımı basittir. Öğütülecek toz, öğütme ortamındaki sabit depoya koyulur. Bu karışım daha sonra yaklaşık 250 rpm gibi yüksek bir devirde dönen, kolları olan bir shaft ile karıştırılmaktadır. Bu araçların hem kaymasına hem de malzeme üzerine kuvvet etkimesine neden olmaktadır. Laboratuvar Attritor'u bilyeli değirmenlere göre 10 kat daha hızlı çalışmaktadır.



Şekil 4.1. Attritor tipi bir bilyeli değirmenin şematik gösterimi (Suryanarayana, 2001)

4.1.4. Ticari Öğütücüler

MA için ticari değirmenlerin büyüklüğü yukarıda açıklanan değirmenlerden çok daha büyüktür ve tek seferde birkaç yüz pound işleyebilmektedir. Ticari üretimlerde mekanik alaşımlama, yaklaşık 1250 kg (3000 lb) kapasiteye kadar bilyeli değirmenlerde gerçekleştirilebilmektedir. Öğütme süresi değirmenin enerjisinin artmasıyla azalmaktadır. Bir SPEX değirmeninde 20 dakikada gerçekleşecek öğütme işleminin, Invicta BX 920/2 tipi düşük enerjili bir öğütücüde 20 saatlik bir süreye eşdeğerdir. Deneyimler sonucunda değirmenlerin verimliliklerine bağlı olarak, SPEX değirmeninde birkaç dakika sürebilecek bir iş, Attritor değirmeninde birkaç saat, ticari değirmenlerde ise birkaç gün sürebileceği kanısına varılmıştır.

4.2. Süreç Değişkenleri

Mekanik alaşım karmaşık bir işlemdir ve bu nedenle istenen ürün fazını ve/veya mikro yapısını elde etmek için çeşitli değişkenlerin uygun olması gerekmektedir. Tozun son yapısı üzerinde etkili olan önemli parametrelerden bazılarını şöyle sıralayabiliriz:

- Karıştırıcı tipi,
- Karıştırıcı kabı,
- Karıştırıcı devri,
- Karıştırma zamanı,

- Öğütme ortamının türü, boyutu ve ortalama boyut dağılımı,
- Bilye-toz ağırlık oranı,
- Şişeyi doldurma derecesi,
- Karıştırma atmosferi,
- Süreci kontrol eden etkenler ve
- Karıştırma sıcaklığı.

Tüm bu işlem değişkenleri tamamen bağımsız değildir. Örnek vermek gerekirse en uygun öğütme süresi, öğütme tipine, öğütme ortamının boyutuna, öğütme sıcaklığına, toz-bilye oranının vb. bağlıdır (Suryanarayana, 2001).

4.2.1. Karıştırıcı Tipi

Yukarıda açıklandığı gibi MA'yı gerçekleştirmek için çeşitli değirmen tipleri mevcuttur. Bu değirmenler kapasiteleri, çalışma hızları ve öğütme sıcaklığını ve tozların kirlenmesini en aza indirmeye derecesini değiştirerek işlemi kontrol etme yetenekleri bakımından farklılık gösterir. Tozun türüne, tozun miktarına ve istenen son yapıya bağlı olarak uygun bir değirmen seçilebilir. Bununla birlikte, en yaygın olarak SPEX sallama değirmenleri alaşım eleme amaçları içinde kullanılabilmektedir. Özel uygulamalar için özel tasarım değirmenler kullanılmaktadır (Suryanarayana, 2001).

4.2.2. Karıştırma Kabı

Öğütme kabı için kullanılan malzeme (öğütme kabı, hazne, kavanoz veya kase kullanılan diğer terimlerden bazılarıdır), öğütme ortamının kabın iç duvarları üzerindeki etkisi nedeniyle, bazı malzemeler kalıp duvarından kopup toza karışabilmektedir. Bu tozu kirletir veya tozun kimyasını değiştirmektedir. Öğütme kabının malzemesi tozdan farklı ise, toz öğütme kabı malzemesi ile kirlenmiş olabilir. Diğer taraftan, eğer iki malzeme aynı ise tozun içine eklenen elementin ilave miktarını denkleştirmek için uygun önlemler alınmadıkça kimya değişebilmektedir. Sertleştirilmiş çelik, takım çeliği, sertleştirilmiş krom çeliği, ısıl işlem çeliği, paslanmaz çelik, WC-Wo, WC kaplı çelik ve yatak çelikleri öğütme kaplarında

kullanılan en yaygın malzeme türlerindendir. Bazı özel malzemeler özel amaçlar için kullanılır. Bunlar bakır, titanyum, sinterlenmiş korindon, itriya dengeli zirkonya (YSZ), kısmen dengeli zirkonya + itriya, safir, akik, sert porselen, Si_3N_4 ve Cu-Be olarak sayılabilir. Kabın şekli de kabın iç tasarımı gibi önemli olabilmektedir. Alaşımlamanın yassı uçlu haznede yuvarlak uçlu kaptakinden önemli ölçüde daha yüksek oranda gerçekleştiği bulunmuştur (Suryanarayana, 2001).

4.2.3. Karıştırıcı Devir Sayısı

Öğütücünün dönüş devir sayısını arttırdıkça tozlara etki eden enerjide artmaktadır. Ancak, öğütücü tasarımına bağlı olarak kullanılabilecek maksimum devir sayısında belirli sınırlamalar bulunmaktadır. Örneğin, geleneksel bir bilyeli değirmende dönme devrinin arttırılması, bilyelerin hareketliliğini arttıracaktır. Kritik devrin üzerine çıkıldığı durumda bilyeler şişenin duvarlarına sabitlenir ve tozlara hiçbir darbeye bulunmazlar. Bu nedenle maksimum çarpma enerjisi üretmek için bilyelerin maksimum yükseklikten düşmesi gerekmektedir ve bilyeleri maksimum yükseklikten düşmesi için devir sayısının kritik değerin hemen altında olması gerekmektedir. Maksimum devri başka bir sınırlayan değer ise, yüksek devirde (veya öğütme yoğunluğunda) haznenin sıcaklığının yüksek bir değere ulaşmasıdır. Bu durum homojenleşmeyi ve/veya alaşımlamayı teşvik etmek için difüzyonun gerekli olduğu bazı hallerde avantaj sağlayabilmektedir. Ancak, bazı durumlarda sıcaklık artışı dezavantaja dönüşebilir. Çünkü artan sıcaklık dönüşüm sürecini hızlandırır ve tam doygunluğa ulaşmamış katı çözeltilerin veya öğütme sırasında diğer alaşımlanmış fazların ayrılmasına neden olabilmektedir. Bunlara ilave olarak sıcaklık artışı tozların kirlenmesine neden olabilmektedir. Elde edilen maksimum sıcaklık değirmen türlerine göre değişebilmektedir (Suryanarayana, 2001).

4.2.4. Öğütme Zamanı

Öğütme zamanı en önemli değişkenlerden biridir. Genellikle zaman toz parçacıklarının soğuk kaynaklanması ve kırılması arasında sabit bir durum elde etmek için kullanılır. Gerekli süreler öğütme türüne, öğütme yoğunluğuna, bilye toz oranına ve öğütme sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Öğütme zamanı tüm bu

parametrelerin birlikte hareketine bağılı olarak ayarlanmalıdır. Fakat tozun gerekenden daha fazla öğütölmesi durumunda toz kirliliğı artmakta ve istenmeyen bazı fazlar oluşabilmektedir. Bu nedenle tozun öğütölmesi gereken süre belirlenerek öğütme işlemleri gerçekleştirilir.

4.2.5. Öğütme Ortamı

Sertleştirilmiş çelik, takım çeliğı, sertleştirilmiş krom çeliğı, ısıl işlemleri çelik, paslanmaz çelik, WC-Co veya yatak çelikleri öğütme ortamı olarak kullanılan en yaygın malzemelerdir. Öğütme ortamının yoğunluğu bilyelerin tozlar üzerinde yeterli darbe kuvvelerini oluşturacak kadar yoğunlukta olmalıdır. Ayrıca, öğütme kabında olduğu gibi öğütme ortamı içinde bazı özel malzemeler kullanılmaktadır. Bunlar bakır, titanyum, niyobyum, zirkonya (ZrO_2), akik, itriya dengeli zirkonya (YSZ), kısmen dengeli zirkonya + itriya, safir, silisyum nitrür (SiN_4) ve Be-Cu olarak sıralayabiliriz. Kirlilik bulaşmasının önlemek için mümkün olduğu kadar öğütme kabının ve öğütme tozunun aynı malzemeden olduğuna dikkat edilmelidir. Öğütme ortamının büyüklüğü aynı zamanda öğütme verimini de etkilemektedir. Genellemek gerekirse bilye ağırlığı attıkça yani bilye yoğunluğunu arttırsak bilyelerden toza aktarılan enerjide bu oranda artmaktadır. Tozun son yapısının kullanılan öğütme ortamının boyutuna bağılı olarak değıştiğı bildirilmiştir. Öğütme ortamında kullanılan bilyelerin çaplarının farklı olması gerektiğı önerilmektedir. Çünkü farklı bilye çapları öğütme işleminde daha fazla darbe oluşturma özelliğine sahiptir. Bununla birlikte bilyelerin küçük çaplarda seçilmesi sürtünme yüzeyini arttıracak ve daha fazla tozla temas sağlanarak daha homojen bir karışım elde edilebilecektir. Öğütme işlem sırasında tozlar bilyelerin darbelerinden dolayı kap duvarlarına sıvanmaktadır. Bu avantajlı bir durumdur çünkü tozların kalıp duvarlarına sıvanması karışımın kap duvarlarından kaynaklanan kirlenmesini önleyecektir. Ama heterojen bir karışım oluşmasını önlemek için kap duvarlarına sıvanan toz tabakası kalınlığının minimum seviyede tutulması gerekmektedir. Bu toz kaplamanın dezavantajını söylemek gerekirse toz tabakasını kap duvarların temizlemek zordur ve bu durum verimi düşürmektedir. Bu durumu ortadan kaldırmak için küçüklü büyüklü bilyeler kullanılarak tozların kalıp duvarlarına sıvanması minimuma indirilebilir (Suryanarayana, 2001).

4.2.6. Bilye-Toz Ağırlık Oranı

Bilye ağırlığının toza oranı, bazen enerji oranı olarak da adlandırılabilir ve öğütme işleminde önemli bir parametredir. Bu oran 1:1 gibi küçük bir değerden 220:1 gibi büyük bir değere kadar değişebilmektedir. SPEX değirmeni gibi küçük kapasiteli değirmenlerde genellikle bu oran 10:1 olarak belirlenmektedir. Ancak, Attritor gibi yüksek kapasiteli bir değirmende gerçekleştirilen öğütme işlemlerinde bu oran 50:1'e kadar yüksek bir oranda ve hatta 100:1 gibi daha yüksek bir oranda da kullanılabilir. Bilye: toz oranı öğütme işlemindeki tozun belirli bir faza gelebilmesi için geçen zamanda önemli bir etkiye sahiptir. Bilye: toz oranı yükseldikçe gereken süre kısalmaktadır. Yüksek bilye: toz oranı olması halinde bilyelerin ağırlık oranındaki artış nedeniyle birim zamanda gerçekleşen çarpışma sayısı artacak ve toz parçacıklarına aktarılan enerji miktarı bu duruma bağlı olarak artış gösterecektir ve alaşımlama süresi kısalmış olacaktır (Suryanarayana, 2001).

4.2.7. Haznenin Doluluk Derecesi

Toz parçacıkları arasındaki alaşımlama, üzerlerine uygulanan darbe kuvvetleri nedeniyle olduğundan, tozların ve toz parçacıklarının öğütme kabı içerisinde serbestçe dolaşabilecekleri için bir alana ihtiyaçları bulunmaktadır. Bu sebepten dolayı haznenin toz ve bilyelerle doldurma oranı önemlidir. Eğer bilyelerin ve tozların miktarı çok düşükse üretim oranı da o kadar düşüktür. Öte yandan miktar büyükse bu durumda da bilyelerin hareket etmesi için yeterli alan oluşmamakta ve bilyelerin enerji aktarımı düşük olmaktadır. Bu nedenle şişenin fazla doldurulmasına müsaade edilmemelidir. Genellikle haznenin % 50'si boş bırakılmaktadır (Suryanarayana, 2001).

4.2.8. Karıştırma (öğütme) Atmosferi

Öğütme atmosferinin en önemli etkilerinden birisi de tozun kirlenmesidir. Bu nedenle tozlar havası boşaltılmış, argon veya helyum gibi inert gaz doldurulmuş kaplarda öğütülmesi gerekmektedir. Yüksek saflıktaki argon tozun oksitlenmesini ve/veya

kirlenmesini önleyen en yaygın kullanılan gazlardandır. Mesela oksijenli bir ortamda öğütülmüş Ti-48Al-2W (% olarak) tozunun 20 saatlik öğütülmesi işleminden sonra ağırlıkça % 1.5'inin oksitlendiği bildirilmektedir. Aynı tozu azot atmosferinde aynı süre boyunca öğütme işlemi gerçekleştirilmesi durumunda ise ağırlıkça % 4.7 oksitlenme gerçekleştiği gözlenmiştir. Genellikle tozların haznenin içine doldurulması ve boşaltılması esnasında atmosfer kontrollü eldivenli kutular içerisinde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu eldiven kutuları tekrar tekrar boşaltılmakta ve argon gazı ile doldurulmaktadır.

Öğütme işlemi sırasında belirli amaçlar için farklı atmosferler kullanılabilmektedir. Nitrid üretmek için azot veya amonyak atmosferleri kullanılmaktadır. Hidrid üretmek için hidrojen atmosferi kullanılmaktadır. Özellikle tozların doğada duyarlı olmasından dolayı haznede hava olması tozlarda oksitler ve nitrid üretimine neden olmaktadır. Bu nedenle öğütme sırasında inert gaz bulunduran bir atmosfer bulunmasına dikkat edilmelidir. Atmosfer tipinin son fazın yapısını etkilediği görülmektedir. Örneğin, Cu-Fe tozları farklı atmosferlerde öğütülmesi durumunda son faz yapılarının farklı olduğu ortaya çıkmıştır. Toz argon atmosferinde öğütüldüğünde amorf bir yapı oluşmamış ve X ışını kırınım modelinde Cr, tepe noktalarda kalmıştır. Diğer taraftan toz argon veya azot atmosferi içeren hava ortamında öğütüldüğünde ise toz tamamen şekilsiz bir yapı haline dönüşmüştür (Suryanarayana, 2001).

4.2.9. Süreci Kontrol Eden Etkenler

Özellikle öğütme işlemi sırasında üzerine uygulanan ağır plastik deformasyonlar nedeniyle süneklik özelliği bulunduran tozlar birbirlerine soğuk kaynak olmaktadır. Fakat toz parçacıkları arasındaki gerçek alaşımlama ancak soğuk kaynak ve parçacıkların kırılması sırasında aralarında bir denge oluşması durumunda gerçekleşmektedir. Soğuk kaynağın etkisini azaltmak için öğütme sırasında karışıma işlem kontrol maddesi (PCA) (ayrıca kayganlaştırıcı veya yüzey aktif madde olarak da bilinir) eklenmektedir. PCA'lar katı, sıvı veya gaz şeklinde olabilmektedir. Bu maddeler genellikle yüzey aktif maddeler olarak bilinen organik bileşiklerdir. Kullanılması zorunlu değildir. PCA, toz parçacıklarının yüzeyinde emilir ve toz

parçacıkları arasındaki soğuk kaynaklanmayı en aza indirir ve tozların topaklanmasını engellemektedir. Parçacıkların yüzeyine emdirilen yüzey aktif maddeler, soğuk kaynaklanmaya etki eder ve yüzey gerilimini azaltmaya yardımcı olmaktadır. Uygulamalarda PCA kullanımı, toplam toz yükünün yaklaşık % 1 ila 5'i arasında değişen bir miktarda eklenmesi mevcuttur. PCA'ların en önemlileri olarak stearik asit, heksan, metanol ve etanol olarak bilinmektedir. Kullanılan PCA'nın niteliği, miktarı ve öğütülmüş toz tipi toz parçacıklarının son boyutunu, şeklini ve saflığını belirlemektedir. PCA miktarının artırılması büyük düzeyde parçacık boyutunu düşürmektedir. Metal ile PCA'daki olası etkileşimlere bakılarak bir PCA'ya karar vermek gerekmektedir (Suryanarayana, 2001).

4.2.10. Karıştırma Sıcaklığı

Karıştırma sıcaklığı öğütülmüş tozun oluşumuna karar vermede önemli bir değişkendir. Difüzyon işlemleri, son ürün fazının katı bir çözelti, intermetalik, nano yapı veya amorf bir faz olmasına bakılmaksızın alaşım fazlarının oluşumunda önemli bir yere sahip olmasından dolayı öğütme sıcaklığı da sistemde önemli bir yere sahiptir.

4.3. Mekanik Alaşımlama

Yüksek enerjili öğütme işlemlerinde toz parçacıkları tekrar tekrar yassılaştırılır, soğuk kaynak yapılır, kırılır ve yeniden kaynaklanmaktadır. Ne zaman iki çelik bilye çarpırsa çelik bilyeler arasında tozlar sıkışmaktadır. Öğütme sırasında bilyelerin darbe kuvvetleri, sertleşmeye ve kırılmaya neden olan toz parçacıklarının plastik deformasyonuna neden olmaktadır. Oluşan yeni yüzeyler parçacıkların birbirine kaynaklanmasına neden olur ve parçacık boyutunda büyük bir artışa neden olmaktadır. Öğütmenin ilk aşamalarında parçacıklar yumuşak olduğundan (sünek-sünek veya sünek-gevrek malzeme kombinasyonu kullanıyorsak), birbirlerine kaynaklanma ve büyük parçacıklar oluşturma eğiliminde olmaktadır. Bazı durumlarda başlangıç parçacık boyutunun üç katı büyüklükte parçacık boyutu oluşturabilmektedir. Deformasyon devam etmesi durumunda parçacıklar yorulmaya uğrar ve/veya kırılabilir pulların parçalanması ile sertleşir ve kırılır. Bu mekanizma

tarafından oluşturulan parçalar güçlü topaklanma kuvvetleri olmaması halinde boyut olarak küçülmeye devam etmektedir. Bu evrede kırılma hareketi soğuk kaynaklanma hareketine göre daha baskın durumdadır. Öğütme bilyelerinin etkisinin devam etmesi durumunda, parçacıkların yapısı düzenli bir şekilde incelmeye devam etmekte ancak parçacık boyutu sabit kalmaktadır. Sonuçta tabakalar arasındaki boşluklar azalmakta ve bir tabakadaki parçacık sayısı artmaktadır. Bununla birlikte geleneksel bilyeli değirmenlerde parçacık boyutunun küçültme verimliliğinin çok düşük (yaklaşık % 0.1) olduğu unutulmamalıdır. Yüksek enerjili bilyeli öğütme değirmenlerindeki verimlilik biraz daha yüksek (genelde % 1'i geçmemektedir) olabilmektedir. Geriye kalan enerji genellikle ısı şeklinde kaybolmaktadır. Ancak toz parçacıklarının elastik ve plastik deformasyonlarında çok az bir etkisi bulunmaktadır (Suryanarayana, 2001).

Belirli bir öğütme işleminden sonra ortalama parçacık boyutunu artırma eğiliminde olan kaynaklanma oranı ile ortalama parçacık boyutunu azaltma eğiliminde olan kırılma oranı arasında sağlanan dengeye kararlı durum dengesi denilmektedir. Küçük parçacıkların kırılmaları çok zordur ve bu yüzden küçük parçacıklar kendisinden büyük parçalara kaynaklanma eğilimi göstermektedir. Bu durumda her parçacık başlangıçtaki bileşenlerinin tümünü başlangıçtaki karışım oranlarıyla birlikte içermekte ve gerilme enerjisinin birikmesi nedeniyle parçacık sertliği en üst seviyeye çıkmaktadır. Bu aşamada parçacıkların boyut dağılımı dardır. Çünkü ortalamadan büyük olan parçacıkların küçülmeleri ile ortalamadan küçük olan kırık parçaların topaklanma ile büyümelerinin aynı zamanda gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır.

Yukarıda da anlatıldığı gibi mekanik alaşımlama sırasında taneciklere ağır plastik deformasyonlar uygulanmaktadır. Bunlar kaymalar, boş yerler, istifleme hataları ve artan tane sınırları gibi çeşitli kristal yapı hatalarının varlığıyla görünmektedir. Bu yapıdaki hataların varlığı çözünen elementlerin dağılımını arttırmaktadır. Ayrıca, arındırılmış mikro yapısal özellikler difüzyon mesafelerini azaltmaktadır. Bunlara ilave olarak öğütme işlemi sırasında sıcaklığın hafif yükselmesi difüzyon davranışını daha da kolaylaştırmakta ve sonuçta, bileşenler arasında gerçek alaşımlama oluşmasına neden olmaktadır. Bu alaşımlama genellikle oda sıcaklıklarında gerçekleştirilmektedir. Fakat bazen alaşımlama işleminin

gerçekleşmesi için toz parçacıkların yüksek sıcaklıklarda tavllanması gerekmektedir. Bu özellik intermetaliklerin oluşması istendiğinde uygulanabilir (Suryanarayana, 2001).

Herhangi bir sistemde belirli bir yapı geliştirmek için süre, başlangıçtaki parçacık boyutuna ve özelliklerine bağlı olduğu kadar mekanik alaşımlama işleminin gerçekleşmesinde ekipmanlara ve işlem değişkenlerinede bağlıdır. Ancak, çoğu durumda içyapının (parçacık büyüklüğü, kristalize boyut, lamel boşlukları vb.) incelme hızı işlem süresi ile kabaca logaritmik olarak değiştiği için parçacığın başlangıç boyutu önemsiz sayılabilmektedir (Suryanarayana, 2001).

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Malzemeler

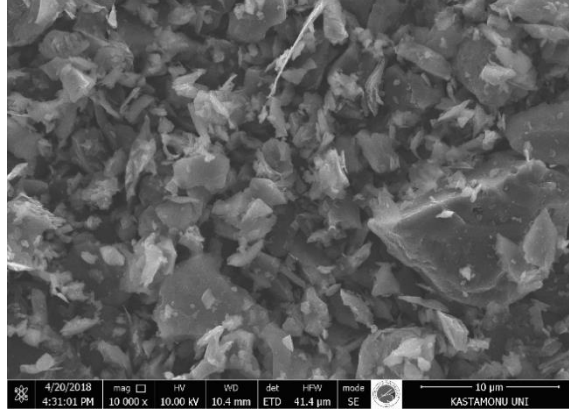
Deneysel çalışmalar öncelikli olarak Al7050 serisi bulk malzemelerden talaş üretimi ile başlamıştır. Bu işlem için freze tezgâhı kullanılarak Şekil 5.1’de verilen formda talaş üretimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan talaşlara ait kimyasal kompozisyon Tablo 5.1’de verilmiştir. Üretilen talaşlar aseton ve alkol banyosundan geçirildikten sonra kurutma işlemleri ile temizlenmiştir. Çalışmada ayrıca takviye elemanı olarak Bor optik firmasından temin edilen %95 saflıkta 10 mikron altı B₄C tozları kullanılmıştır (Şekil 5.2).



Şekil 5.1. Çalışmada kullanılan Al7050 talaş formu

Tablo 5.1. Al7050 talaşına ait kimyasal kompozisyon

Element	Al	Zn	Mg	Cu	Si	Fe	Zr	Ti	Cr	Diğer
Oran (%)	88,24	6,53	2,25	2,28	0,07	0,08	0,133	0,032	0,004	0,02



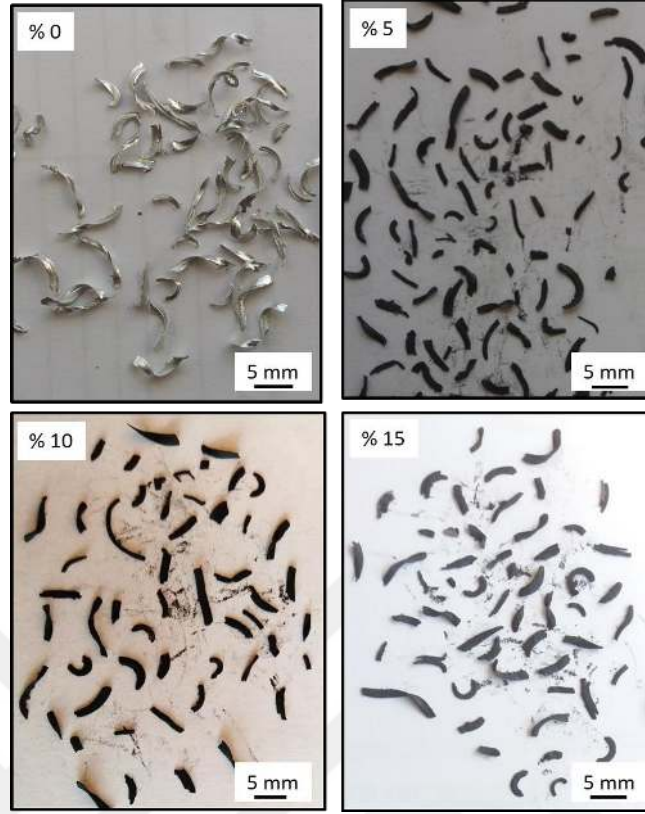
Şekil 5.2. B_4C tozu SEM görüntüsü

5.2. Deneysel Numunelerin Üretimi

Kurutma işlemi sonrası Al7050 talaşlara farklı oranlarda (ağırlıkça % 5, 10 ve 15) B_4C tozları ilave edilerek bilyeli öğütücüde 200 rpm dönme hızında 5 saat boyunca homojen bir karışım yapılmıştır. Karışım oranlarına ait detaylı bilgi Tablo 5.2’de verilmiştir. Çalışmada kullanılan bilye/malzeme ağırlık oranı 30:1’dir. Karışım sonrası elde edilen ürünler Şekil 5.3’te gösterilmektedir.

Tablo 5.2. Al7050 talaş ve B_4C tozlarının karışım oranları

Karışım oranı (%)	Al7050 talaş (g)	B_4C (g)	Toplam ağırlık	Üretimde kullanılan Talaş/ B_4C miktarı
5	14,25	3	17,25	15 x 6 (karışım) =90
10	13,5	6	19,5	15 x 6 (karışım) =90
15	12,75	9	21,75	15 x 6 (karışım) =90

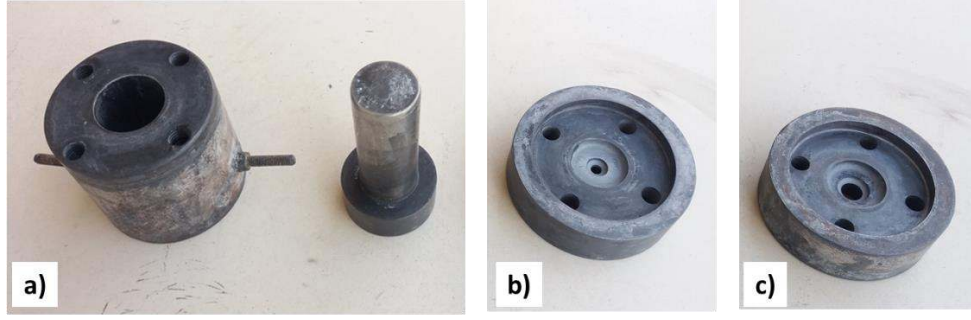


Şekil 5.3. Karışım sonrası elde edilen talaşlar

Elde edilen karışımlar şematik olarak Şekil 5.5a’da verilen kalıp içerisinde tek yönlü olarak 600 MPa basınç altında 550°C sıcaklıkta sıkıştırılarak 25 mm çapında ~57 mm uzunluğunda biyet hale getirilmiştir (Şekil 5.4). Çalışmada sıcak presleme yöntemi ile üretilen biyetler 120 ton kapasiteli dikey eksenli hidrolik pres yardımı ile farklı oranlarda 550°C sıcaklıkta ekstrüze edilmiştir. Bunun için 2 farklı ekstrüzyon kalıbı tasarlanmıştır (Şekil 5.5). Ekstrüzyon işlemi sonrası üretilen numunelere ait resimler Şeki 5.6’de verilmiştir.



Şekil 5.4. Üretilen biyet numune



Şekil 5.5. Ekstrüzyon işleminde kullanılan kalıplar; a) kovan kalıp, b) ekstrüzyon kalıbı (çap: 6 mm), c) ekstrüzyon kalıbı (çap: 12 mm)



Şekil 5.6. Ekstrüze edilmiş numuneler, a) çap: 6 mm, b) çap: 12 mm

5.3. Karakterizasyon İşlemleri

5.3.1. Metalografik İncelemeler

Metalografik incelemeler, standart metalografik prosedüre göre alüminyum ve kompozit malzemeler hazırladıktan sonra Nikon marka metal mikroskopunda gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.7’de mikroyapı çalışmalarında kullanılan metal mikroskopunun fotoğrafı verilmiştir. Metalografik işlemler sıcak bakalite alınan numunelerin sırasıyla 120, 280, 320, 600, 800, 1200, 1500 ve 2000 mesh SiC zımparalar ile zımparalanması ve elmas solüsyonla parlatılması işlemini içermektedir. Hazırlanan numuneler keller çözeltisinde dağlanarak mikroskobik incelemeler için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 5.7. Mikroyapısal karakterizasyonda kullanılan metal mikroskobu

Üretilen numunelerin mikroyapısal karakterizasyonu için enerji dağılımlı spektrometri içeren FEI Quanta FEG 250 taramalı elektron mikroskobu (SEM) da kullanılmıştır (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. Taramalı elektron mikroskobu

5.3.2. XRD Analizleri

Alüminyum alaşımı ve B_4C takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin XRD difraksiyon paternleri $Cu-K\alpha$ radyasyonu kullanarak Bruker D8 model X – ışınları cihazında (Şekil 5.9) elde edilmiştir. Ölçümler 2θ açısında 3° 'den 90° 'ye kadar $0,15^\circ$ adımda 1.5 s aralıklarla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.9. Bruker D8 model X – ışıını cihazı

5.3.3. Yoğunluk Ölçümleri

Numunelerin yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibine göre yapılmıştır. Bu yöntemde numunelerin hacim- kütle ilişkisi kurularak hesaplama yapılmıştır (Eşitlik 5.1). Ölçümlerde numunelerin önce havada kuru ağırlığı (m_k), sonra da saf su (m_s) içerisindeki ağırlıkları tartılarak Eşitlik 5.1 yardımı ile yoğunluğu belirlenmiştir.

$$\rho = m_k \times \rho_{su} / (m_k - m_s) \quad (5.1)$$

Hazırlanan numunelerin teorik yoğunlukları (ρ_T) ise karışım kuralına göre hesaplanmıştır. Buna göre numuneyi oluşturan her bir bileşenin ağırlıkça yüzde oranları ile yoğunlukları çarpılmış ve elde edilen değerler toplanarak teorik yoğunluk hesaplanmıştır (Eşitlik 5.2).

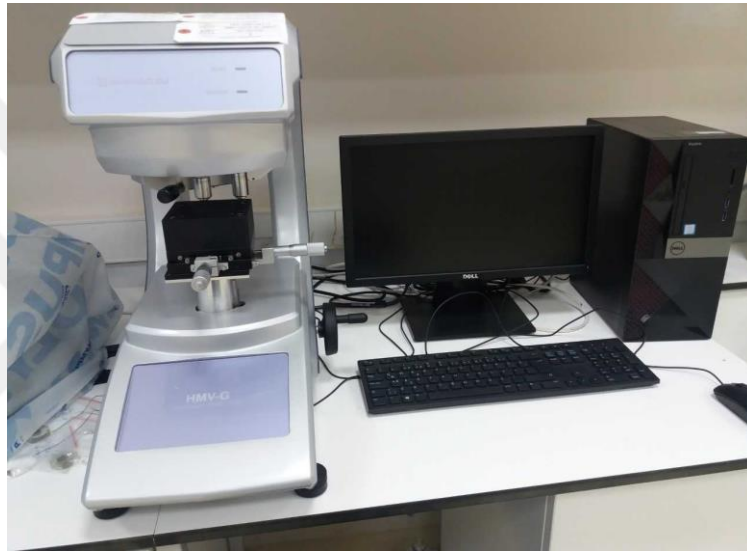
$$\rho_T = [(\%W_1) \times \rho_1] + [(\%W_2) \times \rho_{12}] + \dots + [(\%W_n) \times \rho_n] \quad (5.2)$$

Bağıl yoğunluk (ρ_b) değerleri ise gerçek yoğunluğun teorik yoğunluğa oranlanması ile elde edilmektedir (Eşitlik 5.3).

$$\rho_b(\%) = \rho / \rho_T \times 100 \quad (5.3)$$

5.3.4. Sertlik Ölçümleri

Sertlik ölçümleri, metalografik numuneler üzerinde tepe açısı $136^{\circ} \pm 30''$ olan piramit elmas batıcı uçlu mikrosertlik cihazı ile yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümü HMV SHIMADZU marka mikrosertlik cihazında (Şekil 5.10) 15 saniye süreyle uygulanan 300 gr yük altında Vickers sertlik değeri (HV0,3) cinsinden gerçekleştirilmiştir. Sertlik değerleri, en az 5 ölçümün ortalaması alınarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.10. Sertlik ölçüm cihazı

5.3.5. Basma ve Çekme Deneyleri

Üretilen çubuk numuneler ezilme davranışlarının belirlenmesi için 1 mm/dak deformasyon hızında basma testlerine tabii tutulmuştur. Bu deneyler için Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Shimadzu marka Autograph AGS-X model universal test cihazı marka universal test cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.11). Aynı cihazda numunelerin çekme gerilmeleri altındaki mekanik özelliklerini belirlemek için 1 mm/dak deformasyon hızında çekme testleri uygulanmıştır. Bu test için numuneler ASTM E8 standartına göre hazırlanmıştır.



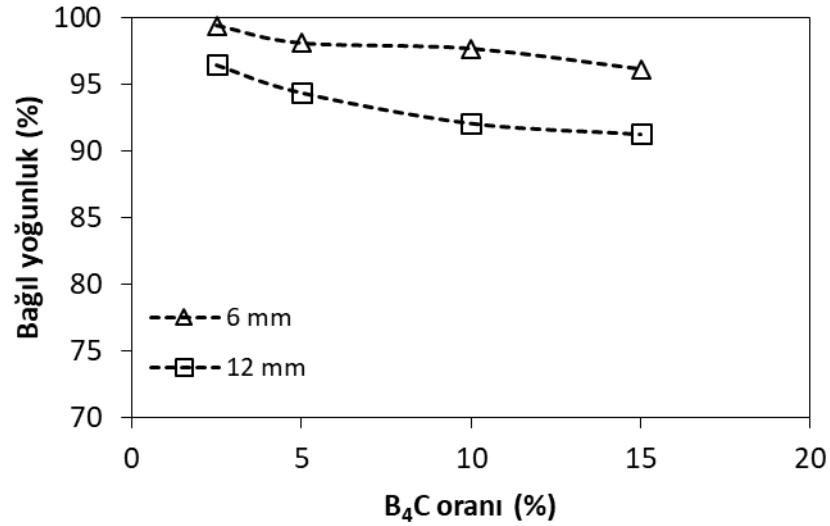
Şeki 5.11. Basma ve çekme deneylerinde kullanılan üniversal test cihazı

6. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMALAR

6.1. Yoğunluk Değişimi

Genel olarak mühendislik malzemelerinin özellikleri ve özellikle kompozit malzemelerin özellikleri bağıl yoğunluk değerlerine bağıl olarak değişkenlik sergilemektedir. Bu değer numune içerisindeki mikroyapı özellikleri ile ilişkilendirilebilir. Numune içerisindeki gözenek miktarı arttıkça bağıl yoğunluk değerleri azalmaktadır. Bu bakımdan gözenek, mekanik özellikleri doğrudan etkileyen bir unsur olarak düşünülebilir. Mikroyapıdaki olası gözenekten dolayı yük taşıma yüzeyi daha küçük seviyelere düşer ve aynı zamanda kesitsel ve bölgesel stres konsantrasyonunda çok boyutlu gerilime neden olabilir (Tekmen vd., 2003). Bu çalışmada sıcak ekstrüzyon yöntemi ile üretilen numunelere ait bağıl yoğunluk değerleri Şekil 6.1’de verilmiştir. Grafiğe bakıldığında her iki ekstrüzyon oranına sahip numunelerde % 90’nın üzerinde bağıl yoğunluk değerleri elde edilmiştir. En yüksek bağıl yoğunluk değeri yaklaşık % 99 ile B₄C içermeyen 6 mm çapa sahip numunede elde edilmiştir. En düşük değer ise 12 mm çapında % 15 B₄C içeren numunede elde edilmiştir. Elde edilen bu değer yaklaşık % 91 seviyesindedir. Bu durum 6 mm çapında üretilen numunelerin ekstrüzyon işlemi esnasında daha fazla deformasyona uğramalarından kaynaklıdır. Bilindiği üzere kompozit malzemelerde gözeneklilik miktarını düşürmek için haddeleme, ekstrüzyon veya dövme gibi ikincil işlemler uygulanmaktadır. Bu yöntemler sayesinde numune içerisindeki gözenek miktarı azalırken bağıl yoğunluk değerleri artmaktadır (Tekmen vd., 2003; Fard ve Akhlaghi, 2007; Kennedy ve Wyatt, 2000). Yapılan bu çalışmada da aynı hacimsel orana sahip biyet numuneler 6 mm çapa düşürülürken 12 mm çapa sahip numuneye kıyasla daha fazla deformasyona uğramaktadır. Grafiğe bakıldığında bağıl yoğunluk değerlerine yalnızca ekstrüzyon oranının değil aynı zamanda B₄C miktarının da etki ettiği görülmektedir. Örneğin 12 mm çapında parçacık içermeyen numunde bağıl yoğunluk değeri yaklaşık % 97 iken 6 mm çapa sahip ve % 15 B₄C içeren numunelerin bağıl yoğunluk değerleri yaklaşık olarak aynıdır. B₄C miktarındaki artışa bağıl olarak her iki ekstrüzyon oranında üretilen numunelerde bağıl yoğunluk değerleri azalmıştır. Bu durumun ekstrüzyon işlemi esnasında B₄C parçacıklarının

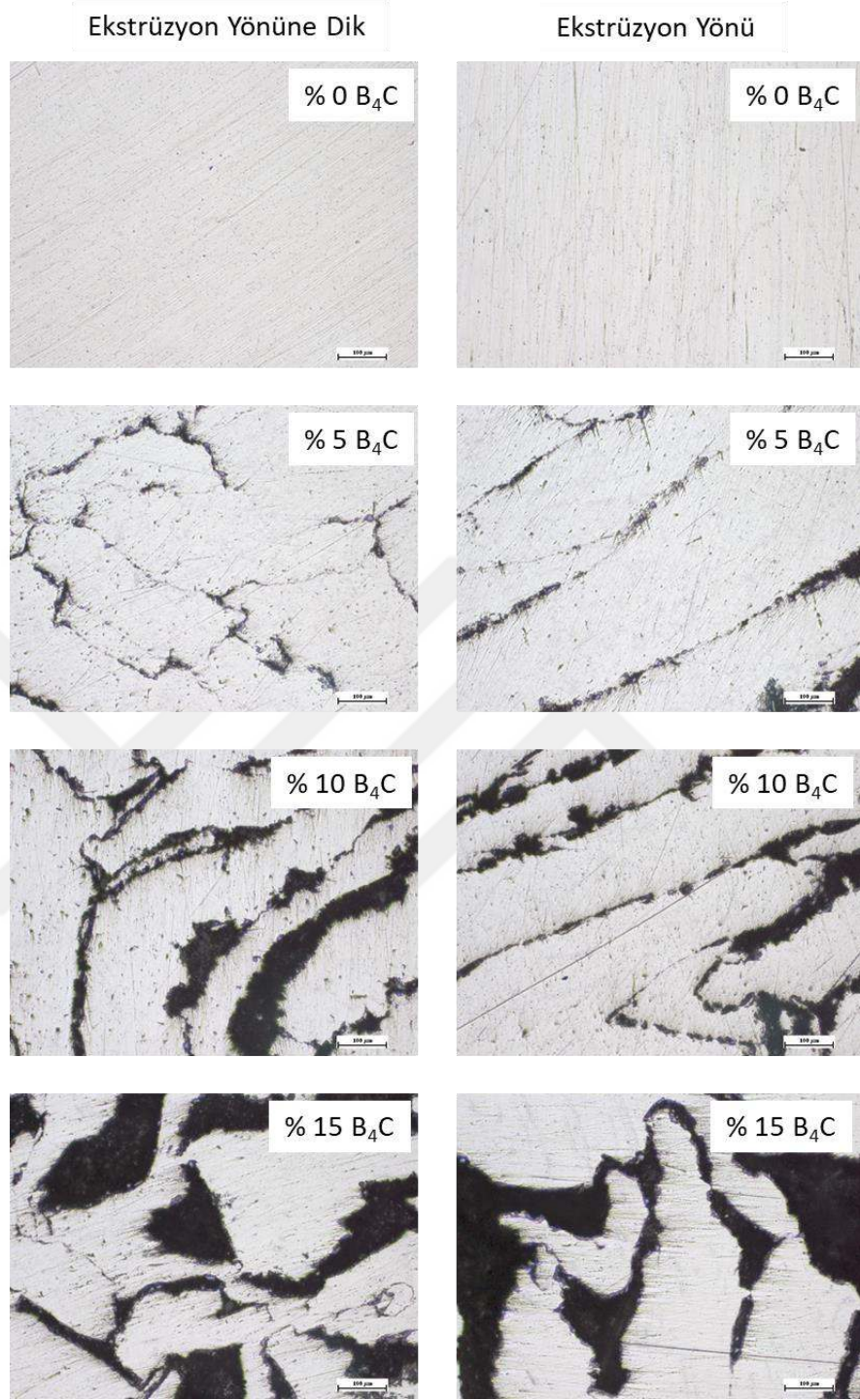
deformasyonu güçleştirici yönde hareket etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Başka bir ifade ile parçacık içermeyen numuneler daha kolay deformasyona uğramaktadır.



Şekil 6.1. Numunelerdeki bağıl yoğunluk değişimi

6.2. Mikroyapısal Gözlemler

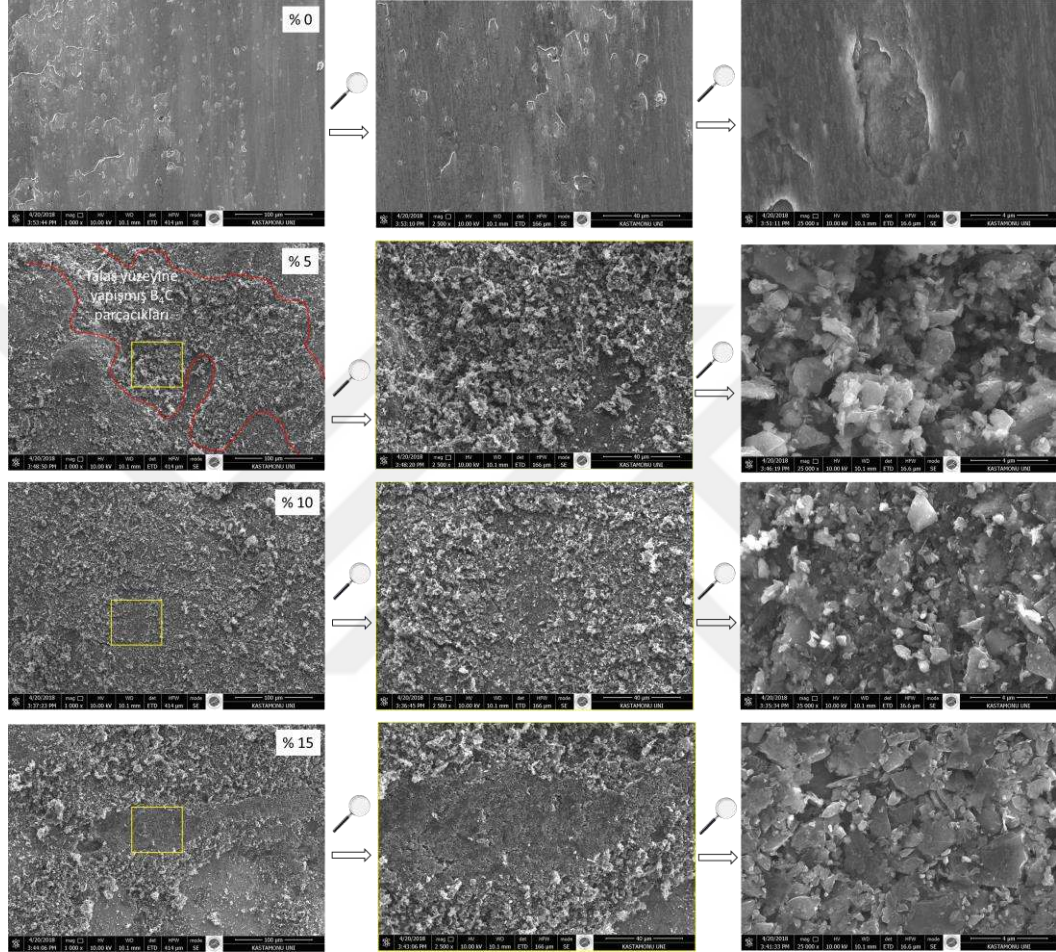
Şekil 6.2’de 12 mm çapa sahip numunelerin ekstrüzyon yönüne dik ve ekstrüzyon yönünde alınan kesitlerinin mikroyapı resimleri verilmiştir. Resimlerde bakıldığında parçacık içermeyen numunede ekstrüzyon yönünde talaş sınırları görülmektedir. Bununla birlikte, ekstrüze edilmiş bu numunede gözlemlenebilir herhangi bir çatlak veya gözeneklilik görülmezken B₄C bileşimi oransal olarak farklı olan numunelerde çok yoğun bir mikro yapı ortaya çıkarmakta ve tespit edilmesi zor olan çatlak veya boşluk içermektedir. B₄C içeren numunelerde belirgin tane sınırına benzer bölgelerin oluştuğu görülmektedir. Bu bölgeler parçacık miktarındaki artış ile birlikte daha da belirgin hale gelmiştir. Koyu renkli bu bölgeler B₄C parçacıklarının oluşturduğu lokasyonlardır. Bu bölgeler ağırlıkça artan B₄C parçacıklarının karışım esnasında talaş yüzeylerine daha fazla oranda yapışması ile meydana gelmiştir (Şekil 6.2). Ayrıca, parçacık oranındaki artış ile talaşlar çok daha fazla miktarda kırılmıştır.



Şekil 6.2. 12 mm çapa sahip numunelerin mikro-yapı resimleri

Al7050 talaşları ile B₄C parçacıklarının karışımı sonrasında elde edilen malzemelere ait şekil 6.3'teki SEM görüntülerinde seramik parçacıkların talaş yüzeylerine bölgesel olarak yerleştiği açıkça görülmektedir. Bu bölgeler B₄C miktarındaki artışa bağlı olarak artmıştır. B₄C içermeyen talaşların yüzeyleri ile B₄C içeren talaşların

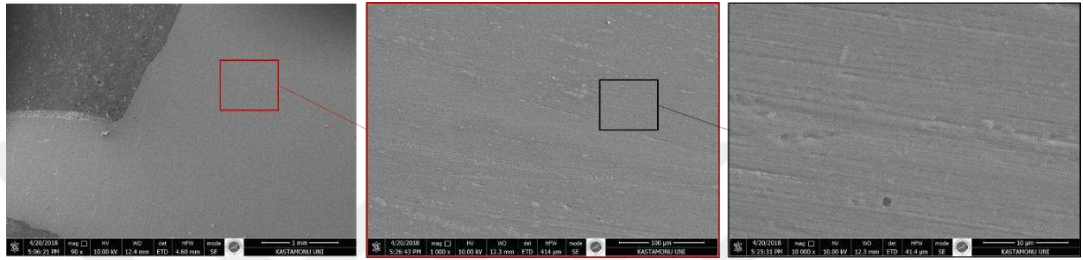
yüzey morfolojileri arasındaki fark dikkat çekicidir. Mekanik olarak sağlanan karışım parçacıkların talaş yüzeylerine yapışmasına veya gömülmesine etki etmiştir. Özellikle oransal olarak daha fazla B₄C içeren numunelerde bu durum çok daha belirgindir.



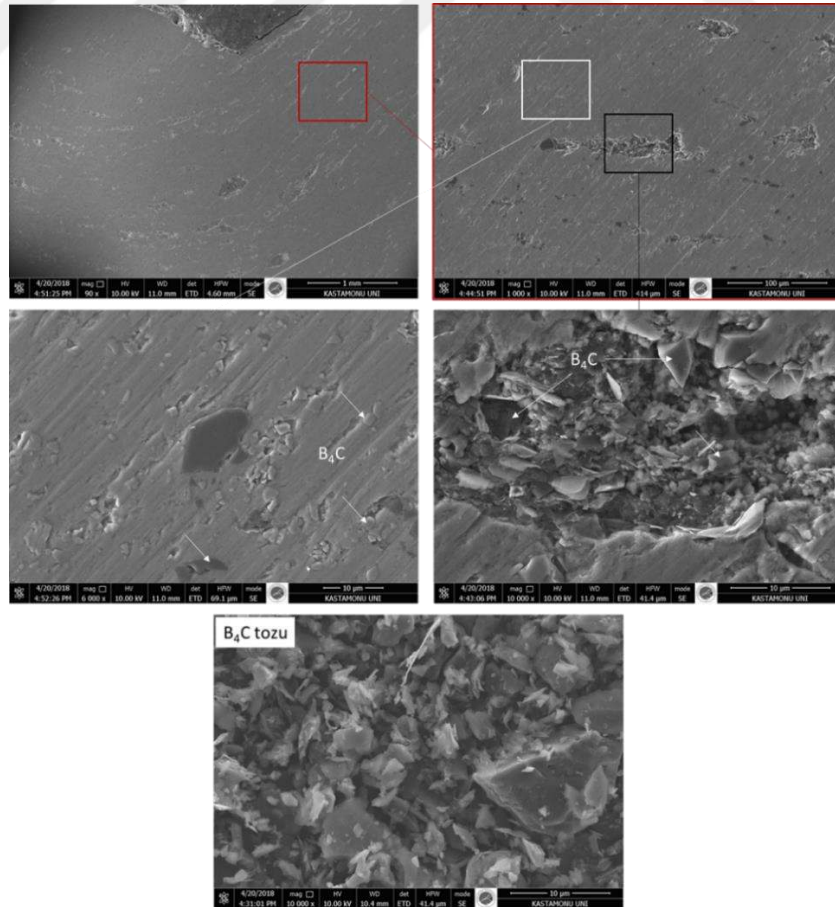
Şekil 6.3. Karıştırma sonrası elde edilen talaş yüzeylerinin SEM görüntüsü

Şekil 6.4’de 12 mm çapa sahip ekstrüze edilmiş Al7050 malzemenin ekstüzyon yönündeki kesitinin SEM görüntüsü verilmektedir. Görüntülere bakıldığında malzeme yüzeyinde önemli ölçüde gözeneğe rastlanmamaktadır. Yalnızca daha büyük büyütmede numune yüzey hazırlama işlemleri esnasında oluşmuş olan çok az miktarda çiziklere rastlanılmıştır. Talaşların birbiri ile olan temas yüzeyleri nispeten gözlemlenmiştir. Şekil 6.5’te ise ekstrüze edilmiş %5 B₄C içeren Al7050 malzemenin ekstüzyon yönündeki kesitinin SEM görüntüsü verilmektedir. %5 B₄C içeren Al7050 malzemenin yüzey görüntüsü parçacık içermeyen Al7050 numuneye

kıyasla daha fazla kusur içermektedir. Bu durumun yüzey hazırlama işlemleri ile birlikte B_4C parçacıklarının etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Talaş yüzeyleri üzerinde konumlanan B_4C parçacıkları sıcak presleme ve ekstrüzyon işlemi ile birlikte malzeme ara yüzeyinde zaman zaman topaklanma şeklinde yer almıştır. Bu topaklanma şekilleri ekstrüzyon yönü boyunca yer yer yönlenmiş durumdadır. Bununla birlikte deformasyon esnasında B_4C parçacıklarının yer yer yapı içerisinde dağıldığı gözlemlenmiştir.

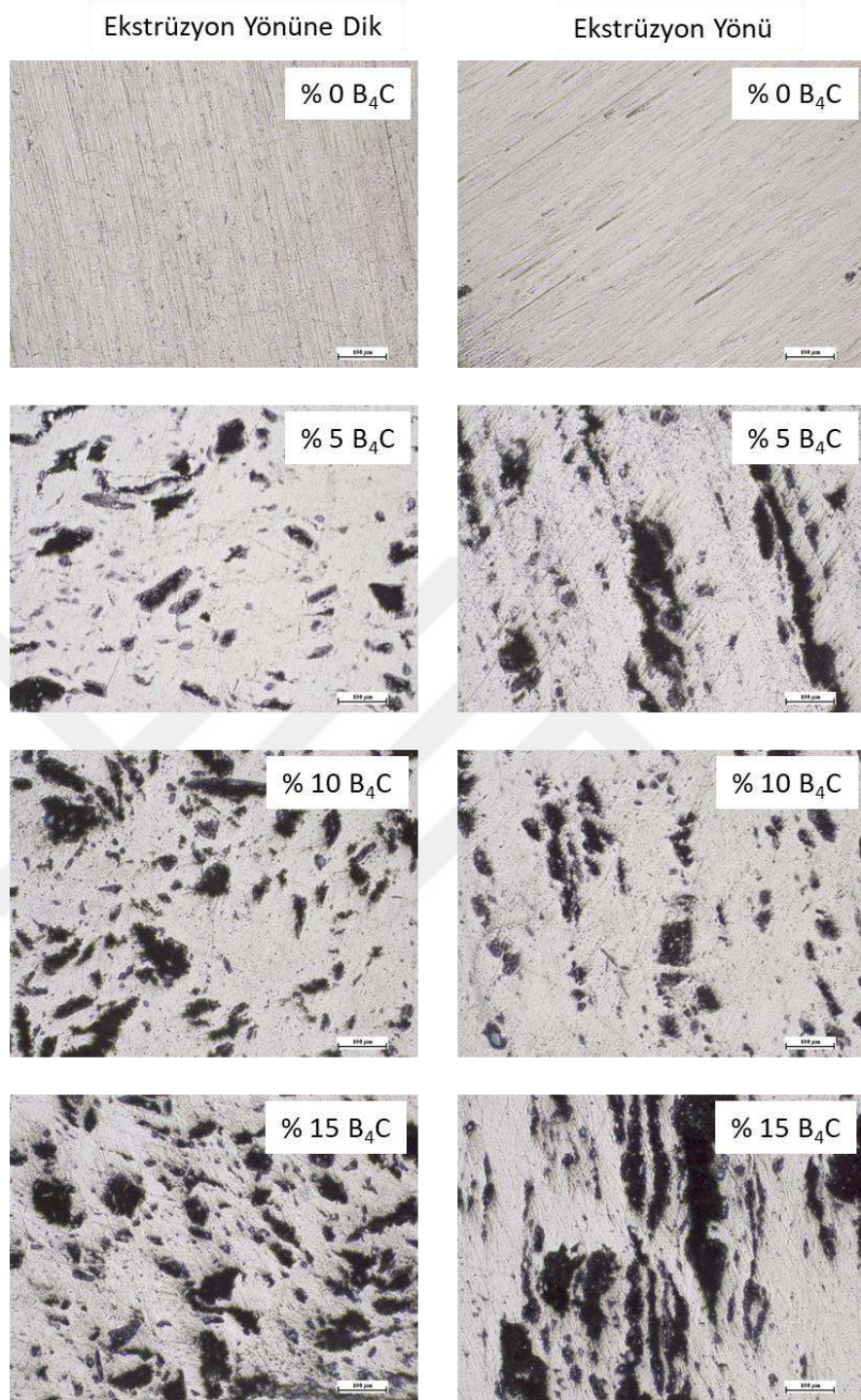


Şekil 6.4. 12 mm çapa sahip ekstrüze edilmiş Al7050 malzemenin ekstrüzyon yönündeki kesitinin SEMgörüntüsü



Şekil 6.5. 12 mm çapa sahip ekstrüze edilmiş %5 B₄C içeren Al7050 malzemenin ekstrüzyon yönündeki kesitinin SEM görüntüsü

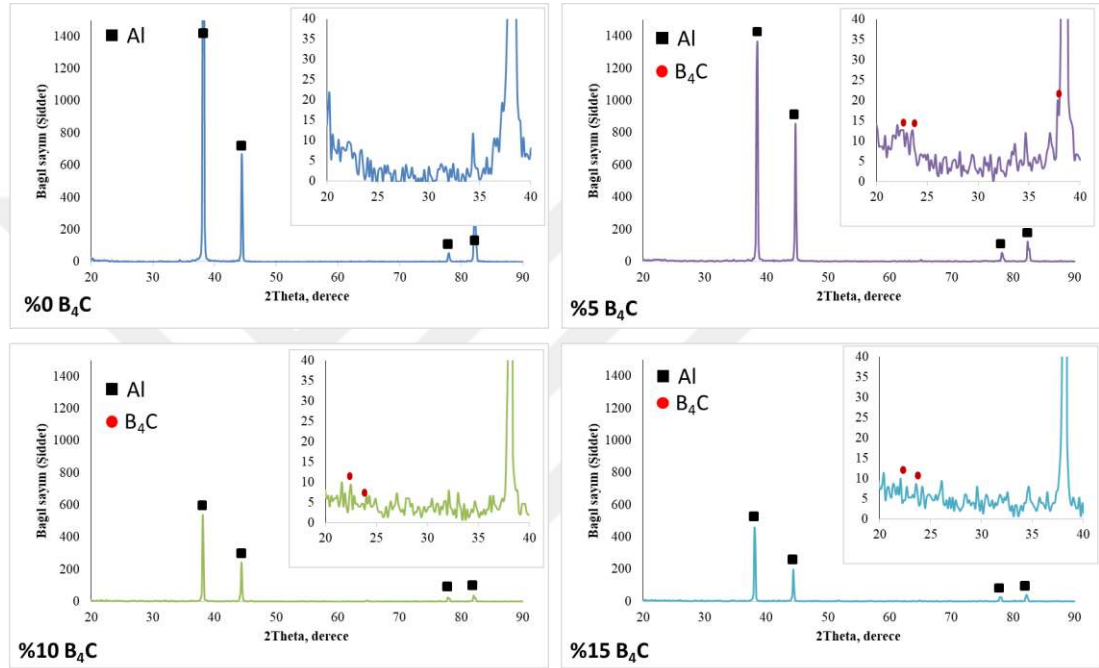
Şekil 6.6’da 6 mm çapa sahip numunelerin ekstrüzyon yönüne dik ve ekstrüzyon yönünde alınan kesitlerinin mikroyapı resimleri verilmiştir. Resimlerde bakıldığında parçacık içermeyen numunede ekstrüzyon yönünde talaş sınırları görülmektedir. Bununla birlikte, ekstrüde edilmiş bu numunede gözlemlenebilir herhangi bir çatlak veya gözeneklilik görülmezken B₄C bileşimi oransal olarak farklı olan numunelerde çok yoğun bir mikroyapı ortaya çıkarmakta ve tespit edilmesi zor olan çatlak veya boşluk içermektedir. B₄C içeren numunelerde belirgin tane sınırına benzer bölgelerin olduğu görülmektedir. Bu bölgeler parçacık miktarındaki artış ile birlikte daha da belirgin hale gelmiştir. Koyu renkli bu bölgeler B₄C parçacıklarının oluşturduğu lokasyonlardır. Bu bölgeler ağırlıkça artan B₄C parçacıklarının karışım esnasında talaş yüzeylerine daha fazla oranda yapışması ile meydana gelmiştir (Şekil 6.6). Ayrıca, parçacık oranındaki artış ile talaşlar çok daha fazla miktarda kırılmıştır.



Şekil 6.6. 6 mm çapa sahip numunelerin mikro-yapı resimleri

Şekil 6.7’de farklı oranlarda B_4C içeren Al7050 talaşların ekstrüzyonu sonucu üretilen numunelerin XRD sonuçları verilmiştir. Tüm numunelerde en şiddetli pik olarak sadece alüminyum piki tespit edilmiştir. B_4C ve Al7050 arasında herhangi bir reaksiyon ürününe rastlanılmamıştır. Literatürde alüminyumun katı fazda olduğu

sıcaklıklarda öğütme ve plastik deformasyon işlemi gibi adımlarla üretilen alüminyum matrisli kompozitlerde matris/takviye elemanı arasında reaksiyon ürünlerinin oluşmadığı bildirilmiştir (Viala vd., 1997; Mindivan, 2010). Ayrıca parçacık miktarındaki artış ile birlikte Al piklerinin şiddetinde azalma gözlemlenmiştir. Bu durumun B_4C miktarındaki artışa bağlı olarak kristal kafes yapısındaki düzensizliklerin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



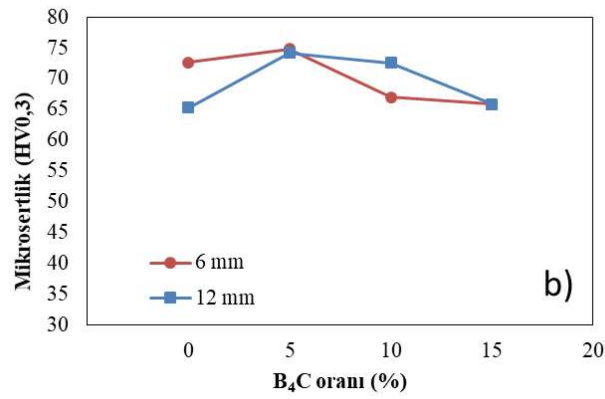
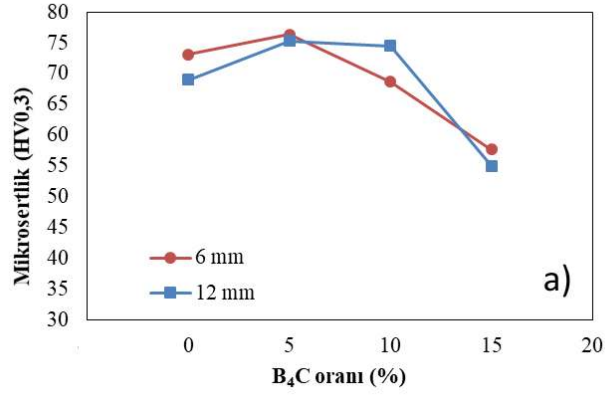
Şekil 6.7. Numunelere ait X – ışını kırınım desenleri (XRD)

6.3. Mikrosertlik Sonuçları

Şekil 6.8’de 6 mm ve 12 mm çapa sahip numunelerin ekstrüzyon yönünde (Şekil 6.8a) ve ekstrüzyon yönüne dik (Şekil 6.8b) kesit yüzeylerinden alınan sertlik değerleri verilmiştir. Şekil 6.8a’da verilen grafiğe göre her iki numune türünde de maksimum sertlik değeri %5 B_4C içeren numunede elde edilmiştir. 6 mm ve 12 mm çapa sahip numuneler için sırasıyla elde edilen sertlik değerleri 76.4 HV ve 75.3 HV’dır. %5 B_4C içeren her iki numune arasında elde edilen sertlik değerleri arasındaki fark oldukça düşüktür. Parçacık miktarındaki artış ile birlikte sertlik değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu azalma %15 B_4C içeren numunelerde çok daha belirgindir. 6 mm ve 12 mm çapa sahip numuneler için sırasıyla elde edilen

sertlik değerleri 57.7 HV ve 55.0 HV'dir. Elde edilen maksimum sertlik değerleri ile minimum sertlik değerleri arasındaki fark 6 mm ve 12 mm çapa sahip numunelerde sırasıyla % 32 ve %37'dir. Dolayısıyla %5'ten daha fazla orandaki parçacık miktarı numunelerin sertlik değerlerinde önemli ölçüde azalmaya neden olmuştur. Bu durum parçacıklar arası tespit edilmesi g olan boştuklardan ve yapısal düzensizliklerden kaynaklanmıştır.

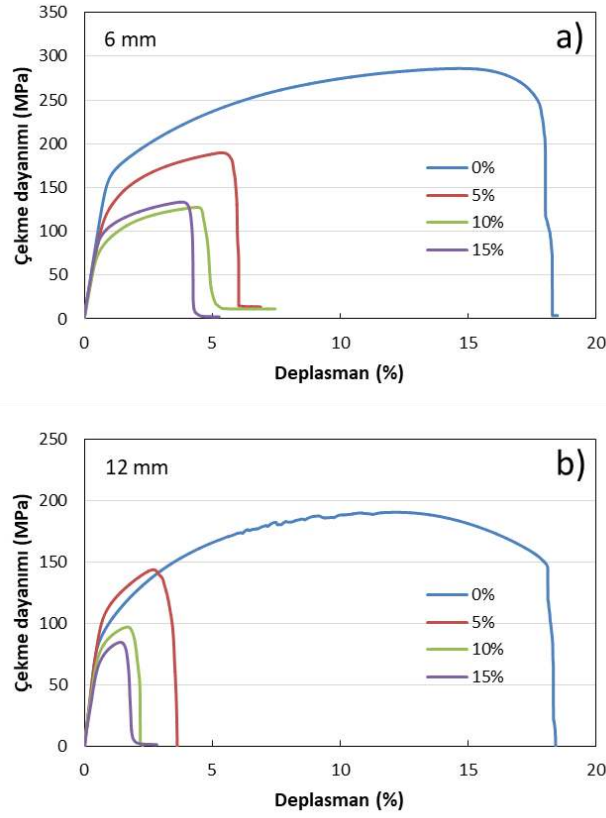
Şekil 6.8b'de verilen grafiğe göre 6 mm ve 12 mm çapa sahip numuneler için ekstrüzyon yönüne dik yöndeki maksimum sertlik değeri %5 B₄C içeren numunelerde elde edilmiştir. Her iki numune türünde elde edilen sertlik değerleri sırasıyla 74.8 HV ve 74.2 HV'dir. Her iki sonuç arasında önemli bir farklılık tespit edilmemiştir. Bu sonuçlara göre belirtilen çaptaki numuneler için ekstrüzyon oranındaki değişimin sertlik değişimi üzerine önemli bir etkiye sahip olmadığı anlaşılmaktadır. Ekstrüzyon yönündeki sertlik değişimlerine benzer şekilde parçacık miktarındaki artışı ile birlikte sertlik değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Her iki numune türünde de minimum sertlik değerleri %15 B₄C içeren numunelerde elde edilmiştir. 6 mm ve 12 mm çapa sahip bu numunelerdeki sertlik değerleri (65,9 HV) birbirini ile aynıdır. Elde edilen maksimum sertlik değerleri ile minimum sertlik değerleri arasındaki fark 6 mm ve 12 mm çapa sahip numunelerde sırasıyla yaklaşık % 14 ve %13'tür. Ekstrüzyon yönünde elde edilen sertlik değerleri ile ekstrüzyon yönüne dik yönde elde edilen sertlik değerleri arasında sertlik değişimi parçacık miktarındaki artışı ile birlikte artarken, parçacık miktarındaki azalma ile birlikte de azalmıştır. Örneğin 6 mm çapa sahip %5 B₄C içeren numunelerde ekstrüzyon yönünde ve ekstrüzyon yönüne dik yönde elde edilen sertlik değerleri sırasıyla 76,4 HV ve 74,8 HV'dir. Aynı numunede parçacık oranı %15 iken sertlik değerleri sırasıyla 57,7 HV ve 65,9 HV'dir. Genel olarak elde edilen sonuçlara göre sertlik üzerine parçacık miktarındaki artışın deformasyon miktarında artışa kıyasla daha fazla etki ettiği anlaşılmaktadır.



Şekil 6.8. Numunelere ait sertlik değerleri

6.4. Çekme Testi Sonuçları

Şekil 6.9’da 6 mm ve 12 mm çapa sahip numunelerin çekme testi sonrası elde edilen çekme dayanımı- deplasman eğrileri verilmiştir. Elde edilen eğrilerde her iki numune türünde ilave edilen B₄C parçacıklarının maksimum çekme dayanımını (UTS) ve yüzde uzama miktarlarını düşürdüğü açıkça görülmektedir. Bununla birlikte çekme yüklemelerine karşı malzemelede belirgin bir plastik şekil değişimine rastlanmamıştır. B₄C parçacıklarının varlığından kaynaklanan ara yüzey bağlanmaması gibi lokalize hatalar, düşük uzama değerlerinin elde edilmesine neden olabilir.



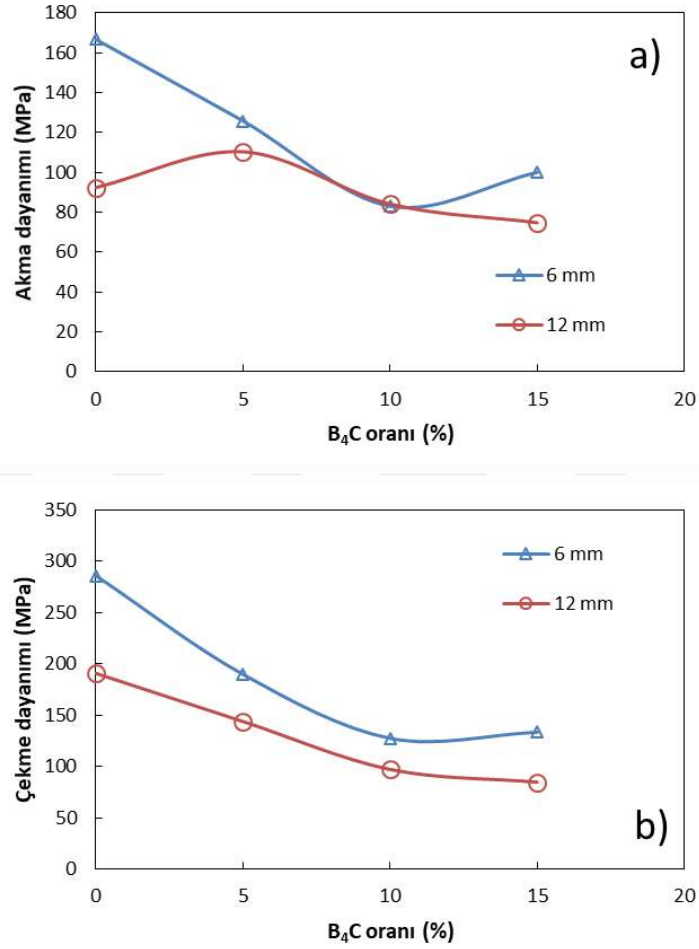
Şekil 6.9. Çekme testi sonuçları, a) 6 mm, b) 12 mm

Görülebileceği gibi, plastik deformasyon sırasında gerilmeler ve akma noktası (% 0.2) karşılaştırırken mekanik mukavemette azalma meydana gelmiştir. Tüm numuneler biyet üretim yönteminden bağımsız olarak farklı değerlerde akma gerilmesi sergilemişlerdir (Şekil 6.9a). 6 mm çapa sahip B_4C içermeyen numunelerde yaklaşık olarak 166 MPa akma dayanımı elde edilmiştir. Bu değer parçacık oranındaki artış ile birlikte azalmıştır. %5, %10 ve %15 B_4C içeren numunelerde akma dayanımı değerleri sırasıyla 125 MPa, 83 MPa ve 100 MPa'dır. Parçacık ilavesi ile numunelerin akma dayanımında %25'in üzerinde azalma meydana gelmiştir. Talaşlardan çekilmiş çubuklar, her talaş sınırında ve herhangi bir yönde çok sayıda kaynaklanmış ara yüzeyden oluşmaktadır. Tüm kesit boyunca talaşların bu şekilde kaynaklanması, özelliklerin homojenleşmesine yol açabilir fakat enine bir kaynaklanma olduğunda büyük metalurjik kusurlar oluşabilir (Tekkaya vd., 2009). B_4C parçacıkları özellikle talaş yüzeylerine mekanik olarak yapıştıkları için talaşların bütün kesit boyunca kaynaklanmalarını engelleyici bariyerler oluşturmuşlardır. B_4C içeren ve içermeyen numuneler arasındaki çekme deneylerinde karşılaştırılabilir

sonuçlar göz önüne alındığında, talaşları çevreleyen dikiş kaynaklarının mekanik özelliklerinin parçacık içermeyen numunelerde çok daha iyi olduğu görülebilir (şekil 6.10). 12 mm çapa sahip B₄C içermeyen numunelerde yaklaşık olarak 92 MPa akma dayanımı elde edilmiştir. Bu değer %5 B₄C oranındaki artış ile birlikte bir miktar artarken, %10 ve %15 seviyelerinde B₄C içeren numunelerde tekrardan azalmıştır. %5, %10 ve %15 B₄C içeren numunelerde akma dayanımı değerleri sırasıyla 110 MPa, 84 MPa ve 74MPa'dır. 6 mm ve 12 mm çaplara sahip numunelerin akma dayanımları karşılaştırıldığında ekstrüzyon oranındaki artışın akma dayanımına pozitif yönde etki ettiği görülmüştür. Alüminyum alaşımı ve B₄C parçacıkları arasında net bir uyumsuzluk gözlenmesede parçacıklar arasında gözlenmiştir. Görünüşe göre parçacık miktarı oransal olarak fazla seçildi. İleride yapılacak olan çalışmalar için, ana malzeme ile uyum sağlaması adına daha az miktarlarda parçacıkların kullanılması önerilmektedir.

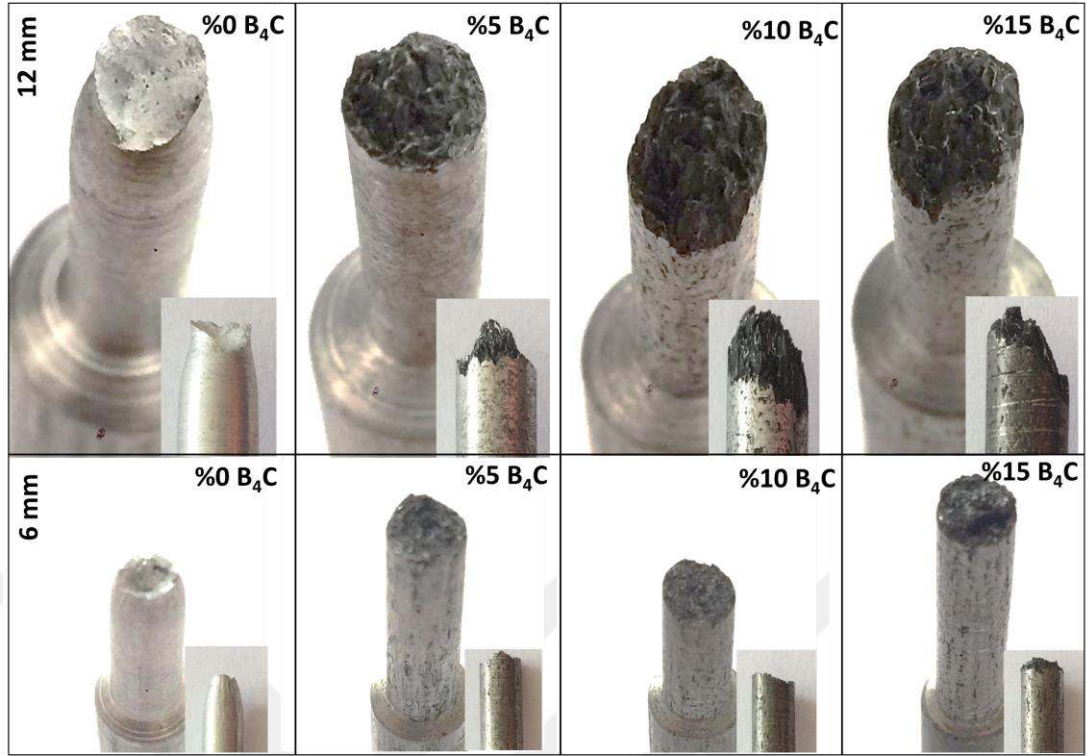
Şekil 6.10b'de malzemelerin maksimum çekme dayanımlarına ilişkin grafik gösterilmektedir. Her iki malzeme türünde de B₄C miktarındaki artışa bağlı olarak çekme dayanımlarında azalma meydana gelmiştir. Bununla birlikte 6 mm çapa sahip numuneler 12 mm çapa sahip numunelerden daha yüksek çekme dayanımı değerlerine sahiptir. B₄C içermeyen numunelerde 6 mm için 286 MPa, 12 mm için 190 MPa maksimum çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Ekstrüzyon oranındaki 2 kat değişim ile parçacık içermeyen numunelerin maksimum çekme dayanımları arasında yaklaşık %50 fark elde edilmiştir. Bu fark B₄C miktarındaki artış ile birlikte azalmıştır. Örneğin %5 B₄C içeren 6 mm ve 12 mm çapa sahip numunelerde sırasıyla 189 MPa ve 143 Mpa maksimum çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Her iki numunenin çekme dayanımı değerleri arasındaki fark yaklaşık %32'dir. Nanokompozitlerin ve kompozitlerin mukavemetinin, nano ve micro ölçekli parçacıkların varlığına bağlı güçlendirme mekanizmaları nedeniyle, matris alaşımından daha yüksek olduğu bilinmektedir. Bu parçacıkların matrisin güçlendirilmesindeki rolü; (i) Hall-Petch mekanizması (Abdollahi vd., 2014b; El-Kady ve Fathy, 2014), (ii) Orowan güçlendirme mekanizması (Yazdabadi vd., 2013) (iii) termal uyumsuzluk ve (iv) yük taşıma etkileri (Zhang ve Chen, 2006; Yazdabadi vd., 2013) gibi faktörlere bağlanmaktadır. Bu mekanizmalarda esasında plastik deformasyon esnasında takviye parçacıklarının çevresinde üç boyutlu gerilme ve

gerilme konsantrasyonlarının oluşması beklenmektedir. Bu sayede dayanım artışı meydana gelmektedir. Yapmış olduğumuz çalışmada B_4C parçacıkları etrafında yeterli düzeyde gerilim yığılmasının meydana gelmediği öngörülmektedir. Bunun nedeni yığıntı halde bulunan seramik parçacıklarının kendi aralarında yük transferi için süreklilik arzetmemesinden kaynaklıdır.



Şekil 6.10. B_4C miktarına bağlı çekme testi sonrası elde edilen mekanik özellikler

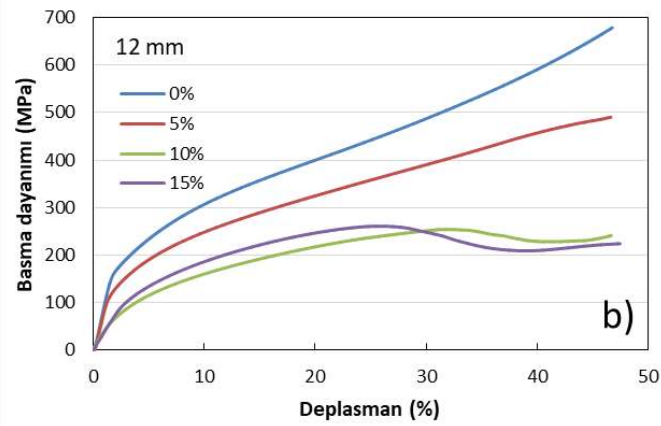
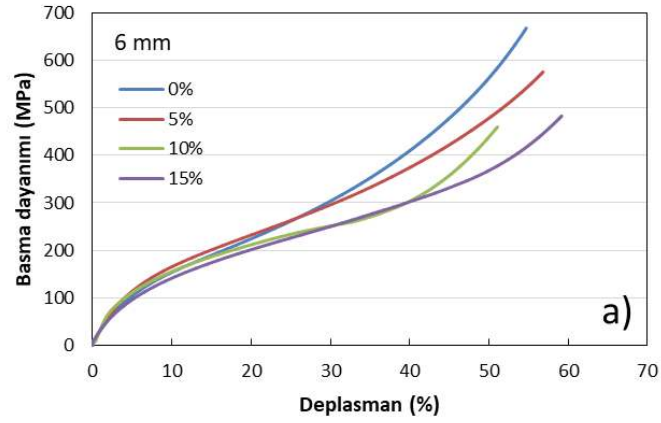
Şekil 6.11’de çekme testi sonrası numunelerin kopma yüzeylerinin makro resimleri verilmiştir. Resimlerde görüldüğü gibi B_4C içermeyen numunelerde belirgin bir boyun verme bölgesi gözlemlenirken, B_4C içeren numunelerde ise bu bölgenin oluşumu net değildir. Parçacık içeren numunelerde kopan yüzeyler nispeten gevrek kırılmayı temsil etsede esasında parçacıkların talaş yüzeylerindeki bağlanmayı zayıflatması sonucu oluşmuş yüzeyler olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 6.11. Çekme testi sonrası kopmuş yüzeyler

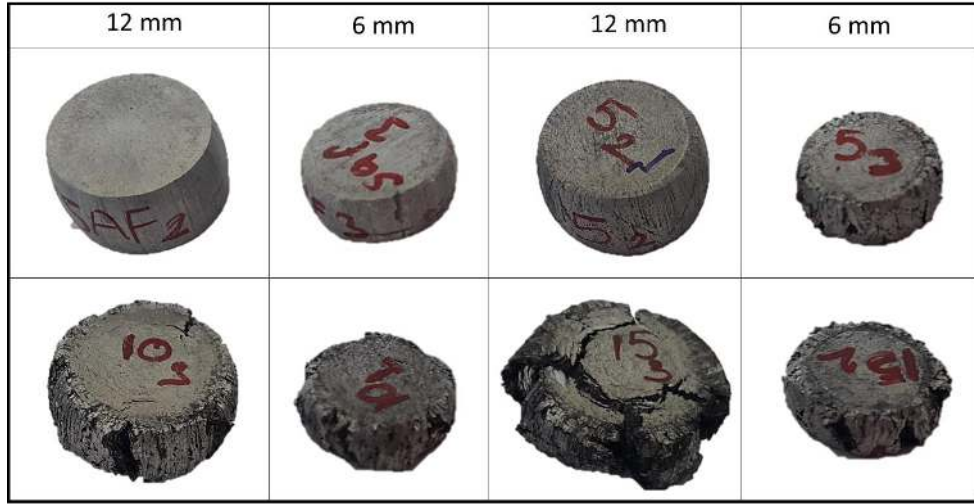
6.5. Basma Testi Sonuçları

Şekil 6.12a-b basma yüklemeleri altında elde edilen gerilim – gerinim eğrileri verilmiştir. 6 mm çapa sahip numunelerde yaklaşık %10 birim şekil değiştirmeye kadar basma dayanımında önemli bir farklılık gözlenmezken, bu noktadan sonra parçacık miktarındaki artışın numunenin basma dayanımına azalan yönde etki ettiği açıkça görülmektedir. Benzer durum 12 mm çapa sahip numuneler içinde geçerlidir. Fakat numunelerin deformasyon davranışlarındaki fark başlangıçtan itibaren oluşmaya başlamıştır. Küçük çaplı numunelerde daha yoğun yapısal oluşum elde edildiğinden basma kuvvetleri karşısında nispeten daha kararlı davranış gözlenmiştir.



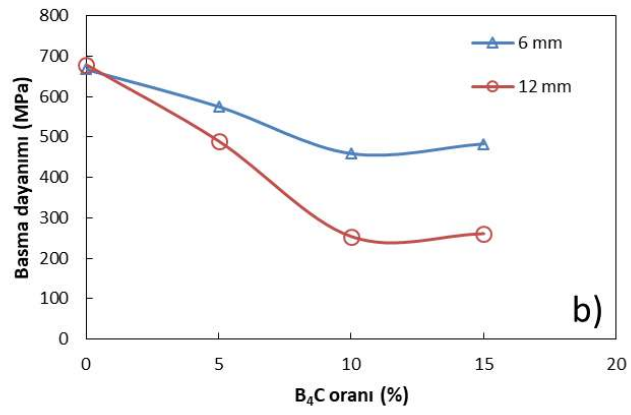
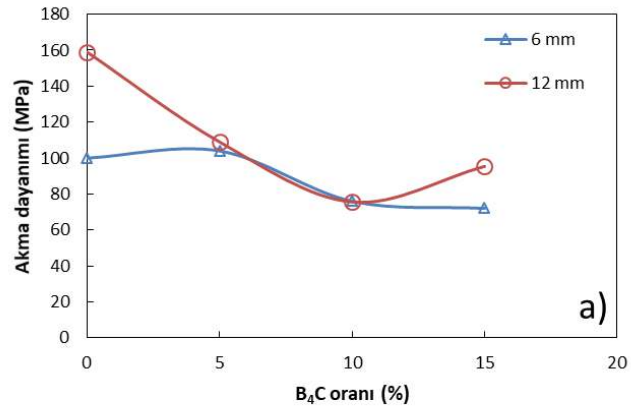
Şekil 6.12. Basma testi sonuçları, a) 6 mm, b) 12 mm

Şekil 6.13'te basma testi sonrası deformasyona uğramış numuneler gösterilmektedir. Resimlere bakıldığında B₄C içermeyen numunelerin diğer numunelere kıyasla sünek bir deformasyon davranışı sergiledikleri açıkça görülmektedir. Özellikle %10 ve %15 B₄C içeren numunelerde artan gerilimle birlikte yanal yüzeylerde çatlaklar veya yırtılmalar meydana gelmiştir. Bu durum numunelerin şekil değiştirme kabiliyetlerinin azaldığını göstermektedir.



Şekil 6.13. Basma testine tabi tutulan numuneler

Şekil 6.14'te gösterildiği gibi 6 mm çapa sahip numuneler için basma akma dayanımı %5 B₄C'ye kadar önemli ölçüde değişmezken (%0 B₄C-100 MPa __ %5 B₄C -104 MPa), artan parçacık miktarı ile birlikte bu değer azalmıştır. %10 ve %15 B₄C içeren numunelerde sırasıyla 76 MPa ve 72 MPa akma dayanımı elde edilmiştir. Bu durumda akma dayanımı en fazla %38 oranında azalmıştır. Buna karşın 12 mm çapa sahip parçacık içermeyen numunede 159 MPa akma dayanımı elde edilmiştir. Elde edilen bu değer %10 B₄C içeriğine kadar hızla azalmış (76 MPa) ve akabinde tekrardan artmıştır (%15 B₄C-95MPa). Bu durumda akma dayanımı en fazla %52 oranında azalmıştır.



Şekil 6.14. B₄C miktarına bağlı basma testi sonrası elde edilen mekanik özellikler

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada Al7050 talaşlarına farklı oranlarda (ağırlıkça % 5, 10 ve 15) B₄C tozları ilave edilerek sıcak ekstrüzyon yöntemi ile 6 mm ve 12 mm çaplarında çubuk formunda numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerin mekaniksel ve mikroyapısal özellikleri üzerine ekstrüzyon oranının ve B₄C miktarının etkilerini belirlemek için metalografik incelemeler, XRD analizleri, yoğunluk ölçümleri, sertlik ölçümleri, basma ve çekme testleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre;

- ✓ Bilyeli öğütme işleminde Al7050 talaşlarına ilave edilen B₄C miktarındaki artış ile birlikte talaşlarda boyutsal küçülme tespit edilmiştir.
- ✓ 6 mm ve 12 mm çaplara sahip numunelerde % 90'nın üzerinde bağıl yoğunluk değerleri elde edilmiştir. En yüksek bağıl yoğunluk değeri yaklaşık % 99 ile B₄C içermeyen 6 mm çapa sahip numunede tespit edilmiştir.
- ✓ B₄C miktarındaki artış ile birlikte talaş sınırlarında yoğun parçacık topaklanmaları tespit edilmiştir. Bu topaklanmalar beraberinde yapısal kusurlara yol açmıştır.
- ✓ Al7050 talaşlarından üretilmiş malzemelerde %5 B₄C katkısı sertlikte artışa neden olmuştur. 6 mm ve 12 mm çapa sahip numuneler için sırasıyla elde edilen sertlik değerleri 76.4 HV ve 75.3 HV'dir.
- ✓ XRD sonuçlarına göre Al7050 talaşları ile B₄C parçacıkları arasında herhangi bir reaksiyon ürününe rastlanmamıştır.
- ✓ B₄C parçacıklarının maksimum basma dayanımını, çekme dayanımını (UTS) ve yüzde uzama miktarlarını düşürdüğü tespit edilmiştir.
- ✓ 6 mm çapa sahip numunelerin 12 mm çapa sahip numunelere kıyasla daha yüksek çekme dayanımı değerlerine sahip oldukları belirlenmiştir. B₄C içermeyen numunelerde 6 mm için 286 MPa, 12 mm için 190 MPa maksimum çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Abdollahi, M., Abdi Behnagh, R., Javad, G., Givi Mohammad Kazem Besharati., (2014a). Solid State recycling of aluminum alloy chips through friction stir extrusion (FSE), *In: Proceedings of Iran International Aluminum Conference (IIAC2014)*, Tehran, I.R.Iran.
- Abdollahi, A., Alizadeh, A., & Baharvandi, H. R. (2014b). Dry sliding tribological behavior and mechanical properties of Al2024–5 wt.% B4C nanocomposite produced by mechanical milling and hot extrusion. *Materials & Design*, 55, 471-481.
- Anilchandra, A. R., Surappa, M. K., (2010). Influence of tool rake angle on the quality of pure magnesium chip-consolidated product, *Journal of Materials Processing Technology*, 210(3), 423-428.
- Anilchandra, A.R., Surappa M.K., (2013). Microstructure and tensile properties of consolidated magnesium chips, *Materials Science and Engineering:A* 560, 759-766.
- Azushima, A., Kopp, R., Korhonen, A., Yang, D. Y., Micari, F., Lahoti, G. D., Groche, P., Yanagimoto, J., Tsuji, N., Rosochowski, A., Yanagida, A., (2008). Severe plastik deformation (SPD) processes for metals, *CIPR Annals* 57(2), 716-735, (2008).
- Badarulzaman, U. A., Karim, S. R., Lajis, M. A., (2014). Fabrication of Al-Sn composites from direct recycling aluminium alloy 6061, *Applied Mechanics and Materials*, 465-466, 1003-1007.
- Bodukuri, A. K., Eswaraiah K., Rajendar K., Sampath V., (2016). Fabrication of Al-SiC-B4C metal matrix composite by powder metallurgy technique and evaluating mechanical properties, *Perspectives in Science* 8, 428-431.
- Brungs, D., (1997). Light weight design with light metal casting, *Materials and Desing*, 18, 285-291.
- Chiba, R., Nakamura, T., Kuroda, M., (2011). Solid-state recycling of aluminum alloy swarf through cold profile extrusion and cold rolling, *Journal of Materials Processing Technology* 211(11), 1878-1887.
- Chiba, R., Yoshimura, M., (2015). Solid-state recycling of aluminum alloy swarf into channel by hot extrusion, *J.Manuf.Processes*, 17, 1-8.
- Chino, Y., Seol, J. L., Nakaura, Y., Ohori, K., Mabuchi, M., (2005). Mechanical properties of Mg Al-Ca alloy recycled by solid-state recycling, *Materials Transactions* 46, 2592-2595.

- Chino, Y., Hoshika, T., Lee, J. S., (2006). Mechanical properties of AZ31 Mg alloy recycled by severe deformation, *Journal of Materials Research* 21(3), 754-760.
- Cui, UI J., Roven, H. J., (2010). Recycling of automotive aluminum, *Transactions of nonferrous metals society of china*, 20, 2057-2063.
- Çolak, N. Y., Turhan, H., (2016). Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen Al-Si/B₄C kompozit malzemenin mikro yapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması, *Fırat Üniv.Müh. Bil.Dergisi* 28(2), 259-266.
- Domnich, V., Reynaud, S., Haber, R. A., Chhowella, M., (2011). Boron carbide: structure, properties and stability under stresses, *J Am Ceram Soc*, 94(11), 3605-3628.
- El Aal, M. I., Yoon, E. Y., Kim, H. S., (2013). Recycling of AlSi8Cu3 alloy chips via high pressure torsion, *Materials of Science and Engineering:A*, 560, 121-128.
- El-Kady, O., & Fathy, A. (2014). Effect of SiC particle size on the physical and mechanical properties of extruded Al matrix nanocomposites. *Materials & Design* (1980-2015), 54, 348-353.
- Estrin, Y., and Vinogradov, A., (2013). Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science, *Acta Materialia* 61(3), 782-817.
- Fard,, R. R., & Akhlaghi, F., (2007). Effect of extrusion temperature on the microstructure and porosity of A356-SiCp composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 187, 433-436.
- Fogagnola, J. B., Ruiz-Navas, E. M., Simon, M. A., Martinez, M. A., (2003). Recycling of aluminium alloy and aluminium matrix composite chips by pressing and hot extrusion, *Journal of Materials Processing Technology* 143-144, 792-795.
- Fuziana, Y. F., Warikl, A. R. M., Lajis, M. A, Azam, M. A., Muhammad, N. S., (2014). Recycling aluminium (Al 6061) chip through powder metallurgy route, *Mater. Res. Innovations*, 354-358.
- Gaustad, G., Olivetti, E., Kirchain, R., (2012). Improving aluminium recycling: a survey of sorting and impurity removal technologies, *Resour. Conserv. Recycl.*, 58, 79-87.
- Goussous, S., Xu, W., Wu, X., Xia, K., (2009). Al-C nanocomposites consolidated by back pressure equal channel angular pressing, *Composites Science and Technology*, 69, 1997-2001.

- Gronostajski, J. Z., Marciniak, H., (1996). Matuszak A., Production of composites on the base of AlCu4 alloy chips, *Journal of Materials Processing Technology*, 60, 719-722.
- Gronostajski, J. Z., Kaczmar, J. W., Marciniak, H., Matuszak, A., (1997). Direct recycling of aluminum chips into extruded products, *Journal of Materials Processing Technology* 64(1-3), 149-156.
- Gronostajski, J. Z, Marciniak, H., Matuszak, A., (2000). New methods of aluminum and aluminum alloy chips recycling, *Journal of Materials Processing Technology*, 106, 34-39.
- Gronostajski, J. Z., Marciniak, H., Matuszak, A., Samuel, M., (2001). Aluminium-ferro-chromium composites produced by recycling of chips, *Journal of Materials Progressing Technology*, 119, 251-256.
- Guluzade, R., Avcı, A., Demirci, M. T., Erkendirici, Ö. F., (2013). Fracture toughness of recycled AISI 1040 steel chips reinforced AlMg1SiCu aluminum chip composites, *Materials & Desing* 52, 345-352.
- Güley, V., Ben Khalifa, N., Tekkaya, A. E., (2010). Direct recycling of 1050 aluminum alloy scrap material mixed with 6060 aluminum alloy chips by hot extrusion, *International Journal of Material Forming Springer*, 3, 853-856.
- Güley, V., Khalifa, N. B., Tekkaya, A. E., (2011). The effect of ekstrusion ratio and material flow on the mechanical properties of aluminum profiles solid state recycled from 6060 aluminum alloy chips, *AIP Conference Proceedings* 1353, 1604-1609.
- Güley, V., Güzel, A., Jager, A., Ben Khalifa, N., Tekkaya, A. E., Misiolek, W. Z., (2013). Effect of die desing on the welding quality during solid state recycling of AA6060 chips by hot extrusion, *Materials Science & Engineering A* 574, 163-175.
- Haase, M., Khalifa, N. B., Tekkaya, A. E., Misiolek, W. Z., (2012). Improving mechanical properties of chip-based aluminum extrudates by integrated extrusion and equal channel angular pressing (İECAP), *Materials Science and Engineering:A*, 539, 194-204.
- Hong, S. H., Lee, W. D., Kim, B. K., (2000). Manufacturing of aluminum flake powder from foil scrap by dry ball milling process, *Journal of Materials Processing Technology* 100, 105-109.
- Hong, S. H., Kim, B. K., (2001). Fabrication of aluminum flake powder from foil scrap by a wet ball milling process, *Materials Letters* 51(2), 139-143.

- Horita, Z., Furukawa, M., Nemoto, M., Langdon, T. G., (2000). Development of fine grained structures using severe plastic deformation, *Materials Science and Technology*, 16, 1239-1245.
- Hosseini, A., Azarsa E., Davoodi B., & Ardahani Y., (2012). Effect of process parameters on the physical properties of wires produced by friction extrusion method. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 3(1), 592.
- Hu, M., Ji, Z., Chen, X., (2010). Effect of extrusion ratio on microstructure and mechanical properties of AZ91D magnesium alloy recycled from scraps by hot extrusion, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20(6), 987-991.
- Hu, M., Ji, Z., Chen, X., Zhang, Z., (2008). Effect of chip size on mechanical property and microstructure of AZ91D magnesium alloy prepared by solid state recycling, *Materials Characterization*, 59(4), 385-389.
- Hu, M., Ji, Z., Chen, X., Wang, Q., Ding, W., (2012). Solid-state recycling of AZ91D magnesium alloy chips, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 22, s68-s73.
- Jassim, K. A., (2016). Using sustainable manufacturing process to produce solid shaft from Al-Zn alloys chips and copper chips without melting, *procedia CIRP*, 40, 13-17.
- Ji, Z. S., Wen, L. H., Li, X. L., (2009). Mechanical properties and fracture behavior of Mg-2.4Nd-0.6Zn-0.6Zr alloys fabricated by solid recycling process, *Journal of Materials Processing Technology* 209(4), 2128-2134.
- Kadir Ab, I. M., Mustapa, S. M., Latif, A. N., Mahdi, S. A., (2017). Advances in Material Processing Technology Conference, *Procedia Engineering* 184, 687-694.
- Kennedy, A. R., & Wyatt, S. M., (2000). The effect of processing on the mechanical properties and interfacial strength of aluminium/TiC MMCs. *Composites science and technology*, 60(2), 307-314.
- Kınıkoğlu, N. G., (2006). *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Literatür Yayınları*: 65, İstanbul, 499-506.
- Langdoan, T. G., (2007). The principles of grain refinement in equal-channel angular pressing, *Materials Science and Engineering:A*, 462, 3-11.
- Mabuchi, M., Kubota, K., Higashi, K., (1995). New recycling process by extrusion for machined chips of AZ91 magnesium and mechanical properties of extruded bars, *Materials Transactions, JIM*, 36(10), 1249-1254.

- Matsuki, K., Aida, T., Takeuchi, T., Kusui, J., Yokoe, K., (2000). Microstructural characteristics and superplastic-like behavior in aluminum powder alloy consolidated by equal-channel angular pressing, *Acta Materialia*, 48(10), 2625-2632.
- Mindivan, H. (2010). Reciprocal sliding wear behaviour of B4C particulate reinforced aluminum alloy composites. *Materials Letters*, 64(3), 405-407.
- Mishra, R. S., Ma, Z. Y., (2005). Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering: Reports*, 50, 1-78.
- Misiolek, W. Z., Haase, M., Khalifa, B. N., Tekkaya, A. E., (2012). Kleiner M., High quality extrudates from aluminum chips by new billet compaction and deformation routes, *CIPR Annals* 61(1), 239-242.
- Munir, A. Z., Anselmi-Tamburini, U., (2006). The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: A review of the spark plasma sintering method, *J. Mater. Sci.* 41, 763-777.
- Murai, T., Matsuoka, S., Miyamoto, S., Oki, Y., (2003). Effects of extrusion conditions on microstructure and mechanical properties of AZ31B magnesium alloy extrusions, *Journal of Materials Processing Technology* 141, 207-212.
- Nandan, R., DebRoy, T., Bhadeshia, H. K. D. H., (2008). Recent advances in friction-stir welding Process, weldment structure and properties, *Progress in Materials Science*, 53(6) 980-1023.
- Özkaya, S., (2014). Alüminyum-B4C parçacık takviyeli metal matrisli nanokompozitlerin üretimi, iç yapı, fiziksel, mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Paraskevas, D., Vanmeensel, K., Vleugels, J., Dewulf, W., Deng, Y., Duflou, J.R., ve diğ., (2014). Plasma sintering as a solid-state recycling technique: the case of aluminium alloy scrap consolidation, *Materials*, 7(8), 5664-5687.
- Paraskevas, D., Vanmeensel, K., Vleugels, J., Dewulf, W., Duflou, J. R., (2015). The use of Spark Plasma Sintering to fabricate a two-phase material from blended aluminium alloy scrap and gas atomized powder, 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing, *procedia CIRP* 26, 455-460.
- Peng, T., Wang, Q. D., Lin, J. B., (2009). Microstructure and mechanical properties of Mg-10Gd2Y-0.5Zr alloy recycled by cyclic extrusion compression, *Materials Science and Engineering: A*, 516, 23-30.
- Peng, T., Wan, Q. D., Han, Y. K., Zheng, J., Guo, W., (2010). Consolidation behavior of Mg-10Gd2Y-0.5Zr chips during solid-state recycling, *Journal of Alloys and Compounds*, 503, 253-259.

- Pepelnjak, T., Kuzman, K., Kacmarcik, I., Plancak, M., (2012). Recycling of AlMgSi1 aluminium chips by cold compression, *Metalurgija* 51(4), 509-512.
- Polmear, I. J., (2005). Wrought aluminium alloys, *Light Alloys*(Fourth Edition), 97-204.
- Puga, H., Barbosa, J., Soares, D., Silva, F., Ribeiro, S., (2009). Recycling of aluminum swarf by direct incorporation in aluminum melts, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 5195-5203.
- Rashid Abd, W. M., Yacob, F. F., Lajis, M. A., Asyadi, M., Abid, A. M., Mohamed, E., and Ito, TO T., (2014a). A review: The potential of powder metallurgy in recycling aluminum chips, 2301-2309.
- Rashid Abd, W. M., Yacob, F. F., , Lajis, A. M., Asyadi, M., Abid, A. M., Mohamad, E., Ito, TO T., (2014b). A review: The potential of powder metallurgy in recycling aluminum chips(Al 6061 Al 7075), *Conference: 24th design engineering system division JSME conference Japan society of mechanical engineers*, 14-27.
- Richert, M., Liu, Q., Hansen, N., (1999). Microstructural evolution over a large strain range in aluminum deformed by cyclic-extrusion-compression, *Materials Science and Engineering:A*, 260, 275-283.
- Rometsch, P. A., Zhang, Y., Knight, S., (2014). Heat treatment of 7xxx series aluminum alloys Some recent developments, *Trans. Nonferrous Met. Sec. China*, 24, 2003-2017.
- Sakai, G., Nakamura, K., Horita, Z., Langdon, T. G., (2005). Developing high-pressure torsion for use with bulk samples, *Materials Science Engineering:A*, 406, 268-273.
- Sakai, T., Belyakov, A., Kaibyshev, R., Miura, H., Jonas, J. J., (2014). Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions, *Progress in Materials Science* 60, 130-207.
- Samoshina, M., Bryantsev, P., (2012). Mechanically alloyed composite materials based on the Al-Mg-Li system strengthened by oxides, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 31, 1-6.
- Samuel, M., (2003). A new technique for recycling aluminum scrap. *Journal of materials processing technology* 135, pages 117-124.
- Segal, V. M., (1995). Materials processing by simple shear, *Materials Science and Engineering:A* 197(2), 157-164.

- Shen, H., Li, Z., Günther, B., Korznikov, A. V., Valiev, R. Z., (1995). Influence of powder consolidation methods on the structure and thermal properties of a nanophase Cu 50 wt%Ag alloy, *Nanostructured Materials*, 6, 385-388.
- Sherafat, Z., Paydar, M. H., Ebrahimi, R., (2009). Fabrication of Al7075/Al, two phase material, by recycling Al7075 alloy chips using powder metallurgy route, *Journal of Alloy and Compounds*, 487, 395-399.
- Suryanarayana, C., (2001). Mechanical alloying and milling, *Progress in material Science* 46, 1-184.
- Susniak, M., Karwan-Baczewska, J., Dutkiewicz, J., Actis Grande, M., Rosso, M., (2013). Structure investigation of ball milled composite powder based on AlSi5Cu2 alloy chips modified by SiC particles, *Archives of Metallurgy and Materials* 58(2), 437-441.
- Tang, W., Reynolds, A. P., (2010). Production of wire via friction extrusion of aluminum alloy machining chips, *Journal of Materials Processing Technology*, 210(15), 2231-2237.
- Tekkaya, A. E., Schikorra, M., Becker, D., Biermann, D., Hammer, N., Pantke, K., (2009). Hot profile extrusion of AA-6060 aluminium chips, *Journal of Materials Processing technology*, 209, 3343-3350.
- Tekmen,, C., Ozdemir,, I., Cocen,, U., & Onel,, K., (2003). The mechanical response of Al–Si–Mg/SiCp composite: influence of porosity. *Materials Science and Engineering: A*, 360(1-2), 365-371.
- Thein, M. A., Lu, L., Lai, M. O., (2006). Mechanical properties of nanostructured Mg-5 wt% Al-% AlN composite synthesized from Mg chips, *Composite Structure* 75, 206-212.
- Thuault, A., Marinel, S., Savary, E., Heuguet, R., Saunier, S., Goeuriot, D., & Agrawal, Det al., (2013). Processing of reaction-bonded B4C–SiC composites in a singlemode microwave cavity, *Ceram., Int.*, 39, 1215-1219.
- Valiev, R. Z., Mishral, R. S., Grozal, J., Mukherjee, A. K., (1996). Processing of nanostructured nickel severe plastic deformation consolidation of ball-milled powder, *Scripta Materialia*, 34(9), 1443-1448.
- Valiev, R. Z., Islamgaliev, R. K., Alexsandrov, I. V., (2000). Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, *Progress in Materials Science*, 45(2), 103-189.
- Valiev, R. Z., Langdon, T. G., (2006). Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement, *Progress in Materials Science* 51(7), 881-981.

- Viala, J. C., Bouix, J., Gonzalez, G., & Esnouf, C. (1997). Chemical reactivity of aluminium with boron carbide. *Journal of Materials Science*, 32(17), 4559-4573.
- Wan, B., Chen, W., Lu, T., Liu, F., Jiang, Z., Mao, M., (2017). Review of solid state recycling of Aluminum chips, *Resources, Conservation & Recycling* 125, 37-47.
- Wang, Y., Xu, H., Hu, M., Sugiyama, S., Ji, Z., (2019). Enhanced mechanical properties of a chip based Al-Si-Cu-Fe alloy with an in-situ emulsion decomposition recycled by solid state processing, *Result in Physics* 12, 718-724.
- Wang, Z., Ji, Z., Hu, M., Xu, H., (2011). Evolution of the semi-solid microstructure of ADC12 alloy in a modified SIMA process, *Materials Characterization* 62, 925-930.
- Wen, L., Ji, Z., Li, X., (2008). Effect of extrusion ratio on microstructure and mechanical properties of Mg-Nd-Zn-Zr alloys prepared by a solid recycling process, *Materials Characterization* 59(11), 1655-1660.
- Werenskiold, J. C., Auran, L., Roven, H. J., Ryum, N., Reiso, N., Screw extruder continuous extrusion of materials with high viscosity, U.S. Patent Application, 12, 497-515, (2007).
- Wessel, K. J., (2004). *Handbook of Advanced Materials Enabling New Design*, Wiley Interscience USA, 325-337.
- Widerøe, F., Welo, T., (2013). Using contrast material techniques to determine metal flow in screw extrusion of aluminium, *Journal of Materials Processing Technology*, 213(7), 1007-1018.
- Widerøe, F., Welo, T., Vestøl, H., (2013). A new testing machine to determine the behaviour of aluminium granulate under combined pressure and shear, *International Journal of Material Forming*, 6, 199-208.
- Wu, S., Ji, Z., Zhang, T., (2009). Microstructure and mechanical properties of AZ31B magnesium alloy recycled by solid-state process from different size chips, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 5319-5324.
- Xia, K., Wu, X., (2005). Back pressure equal channel angular consolidation of pure Al particles, *Scripta Materialia*, 53(11), 1225-1229.
- Xia, K., Wu, X., Honma, T., Ringer, S. P., (2007). Ultrafine pure aluminum through back pressure equal channel angular consolidation (BP-ECAC) of particles, *Journal of Materials Science*, 42(5), 1551-1560.
- Xu, W., Wu, X., Honma, T., Ringer, S. P., Xia, K., (2009). Nanostructured Al-Al₂O₃ composite formed in situ during consolidation of ultrafine Al

particles by back pressure equal channel angular pressing, *Acta Materialia*, 57(14), 4321-4330.

Yalçın, H., Gürü, M., (2012). *Malzeme Bilgisi*, Palme Yayıncılık: 203, Ankara, 143-149.

Yazdabadi, H. G., Ekrami, A., Kim, H. S., & Simchi, A. (2013). An investigation on the fatigue fracture of P/M Al-SiC nanocomposites. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44(6), 2662-2671.

Yusuf, N. K., Lajis, M. A., Daud, M. I., Noh, M. Z., (2013). Effect of operating temperature on direct recycling aluminium chips (AA6061) in hot press forging process, *Applied mechanics and Materials* 315, 728-732.

Zhang, T., Ji, Z., Wu, S., (2011). Effect of extrusion ratio on mechanical and corrosion properties of AZ31B alloys prepared by a solid recycling process, *Materials & Design*, 32(5), 2742-2748.

Zhang, Z., & Chen, D. L. (2006). Consideration of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites: A model for predicting their yield strength. *Scripta Materialia*, 54(7), 1321-1326.

Zhao, Z., Chen, Q., Yang, L., Shu, D., Zhao, Z. X., (2011). Microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Y-Zr alloy prepared by solid state recycling, *Transactions of Nonferrous Metal Society of China* 21, 265-271.

Zhilyaev, A. P., Nurislamova G.V., Kim B.K., Bora M.D., Szpunar J.A., Langdon T.G., (2003). Experimental parameters influencing grain refinement and microstructural evolution during high-pressure torsion, *Acta Materialia*, 51(3), 753-765.

Zhilyaev, A. P., McNelley, T. R., Langdon, T. G., (2007). Evolution of microstructure and microtexture in fcc metals during high-pressure torsion, *Journal of Materials Science*, 42(5), 1517-1528.

Zhilyaev, A. P., Langdon, T. G., (2008). Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications, 53(6), 893-979.