

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AA2024 MATRİSLİ B₄C PARÇACIK TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ
KOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ VE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Müh. Temel VAROL

HAZİRAN 2012
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AA2024 MATRİSLİ B₄C PARÇACIK TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ
KOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ VE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Makine Müh. Temel VAROL

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"YÜKSEK LİSANS (METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18.05.2012

Tezin Savunma Tarihi : 13.06.2012

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI

Trabzon 2012

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Temel VAROL tarafından hazırlanan**

**AA2024 Matrisli B₄C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Toz
Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 22/05/ 2012 gün ve 1457 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından 13/06/2012 tarihinde yapılan sınavda**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Kompozit malzemeler, ileri bilimsel ve teknik gelişmelerin yaşandığı mühendislik malzemelerinin bir türünü temsil etmektedir. Bu malzemeler insanoğlunun kendisini dış etkilerden korumak için geliştirdiği ilk malzemelerdir ve hayatımızın bütün alanlarına girmeye başladıkları bu yüzyılda kullanım alanları giderek artmaktadır. Maliyet performans karakteristikleri, hafiflik, mükemmel mekanik ve termal özelliklerinden dolayı kompozit malzemelere olan ilgi ve bu malzemeler üzerine yapılan araştırmalar giderek artmaktadır.

Bu çalışmada AA2024 Matrisli B₄C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitleri toz metalurjisi yöntemi ile üretildi. Üretilen tozların karakterizasyonu ve üretilen kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri araştırıldı. Çalışmada takviye boyutu olarak iki farklı başlangıç boyutuna sahip B₄C parçacıkları kullanılırken takviye oranı olarakta ağırlıkça üç farklı oran kullanılmıştır. Toz karakterizasyonu olarak öğütme süresi, takviye boyutu ve takviye oranının toz morfolojisi, toz boyutu ve toz sertliğine etkisi araştırıldı. Ayrıca kompozit özellikleri olarak öğütme süresi, takviye boyutu, takviye oranı ve presleme basıncının yoğunluk, sertlik ve çekme mukavemeti değerlerine etkisi araştırılmıştır.

Yüksek lisans çalışmamın her aşamasında desteğini esirgemeyen, bilgi ve deneyimleri ile bana yol gösteren danışmanım Yrd. Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI'ya teşekkür ederim. K.T.Ü. Makine Mühendisliği Bölümünde yaptığım deneylerde yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Genççağa PÜRÇEK'e ve çalışmalarımnda bana yardımcı olan Arş. Gör. Hüseyin İPEK'e, Arş. Gör. Fatih ERDEMİR'e, Arş. Gör. Onur SARAY'a, Arş. Gör. Faruk ÜNKER'e, Arş. Gör. Emine YOĞURTCUOĞLU'na ve Fizik Bölümü teknisyenlerinden Sadık Yılmaz BULUT'a teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak gösterdikleri özveri ve manevi desteklerinden dolayı aileme ve eşime teşekkür ederim.

Temel VAROL
Trabzon 2012

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “AA2024 Matrisli B4C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI'nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.18/05/2012

Temel VAROL

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	X
SUMMARY	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
TABLolar DİZİNİ.....	XIX
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Kompozit Malzemeler	3
1.3. Kompozitlerin Yapısı	4
1.3.1. Islatılabilirlik	5
1.4. Metal Matrisli Kompozitler	8
1.4.1. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Matris Malzemeleri.....	10
1.4.1.1. Alüminyum ve Alaşımları	10
1.4.1.2. Magnezyum ve Alaşımları	11
1.4.1.3. Titanyum ve Alaşımları	12
1.4.1.4. Bakır ve Alaşımları.....	12
1.4.2. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Malzemeleri.....	12
1.4.2.1. Alümina (Al_2O_3).....	13
1.4.2.2. Silisyum Karbür (SiC).....	13
1.4.2.3. Bor Karbür (B_4C)	13
1.5. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	14
1.5.1. Sıvı Faz Üretim Yöntemleri	15
1.5.1.1. Sıvı Metal Emdirme	15
1.5.1.2. Sprey Yöntemi.....	16
1.5.1.3. Karıştırmalı Döküm.....	17
1.5.1.4. Fiziksel Buhar Çökeltme	18

1.5.1.5.	Kompozit Döküm	19
1.5.1.6.	In-situ Yöntemi.....	19
1.5.1.7.	Sıkıştırılmalı Döküm Yöntemi	20
1.5.2.	Katı Faz Üretim Yöntemleri	21
1.5.2.1.	Difüzyonla Bağlama	21
1.5.2.2.	Toz Metalurjisi	22
1.5.2.2.1.	Toz Üretimi	23
1.5.2.2.2.	Toz Özellikleri ve Karakterizasyonu.....	25
1.5.2.2.3.	Tozların Preslenmesi	28
1.5.2.2.4.	Sinterleme.....	30
1.6.	Mekanik Alaşımlama.....	33
1.6.1.	Mekanik Alaşımlama İşlemi.....	35
1.6.2.	Mekanik Alaşımlamanın Avantajları.....	35
1.6.3.	Öğütme Sistemi	36
1.6.3.1.	Sünek-Sünek sistem.....	36
1.6.3.2.	Sünek-Gevrek Sistem	39
1.6.3.3.	Gevrek-Gevrek Sistem	40
1.6.4.	Öğütücü Türleri	40
1.6.5.	İşlem Parametreleri.....	43
1.6.5.1.	Değirmen Tipi	44
1.6.5.2.	Öğütücü Kap.....	44
1.6.5.3.	Öğütme Hızı	45
1.6.5.4.	Öğütme Zamanı	46
1.6.5.5.	Bilye-toz Ağırlık Oranı (BPR)	46
1.6.5.6.	Öğütücü Kap Doluluk Oranı	47
1.6.5.7.	İşlem Kontrol Katkısı (PCA).....	47
1.6.5.8.	Öğütücü Bilyelerin Cinsi ve Boyutu	48
1.6.5.9.	Öğütme Atmosferi	49
1.6.5.10.	Öğütme Sıcaklığı	49
1.7.	Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....	50
2.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	52
2.1.	Malzeme	53
2.2.	Mekanik Alaşımlama İşlemleri	54

2.3.	Parçacık Morfolojisi	55
2.4.	Parçacık Boyutu.....	56
2.5.	X-Işınları Kırınımı.....	56
2.6.	Mikrosertlik	57
2.7.	Sıcak Presleme.....	58
2.9.	Metalografi Çalışmaları	59
3.	BULGULAR	61
3.1.	Toz Karakterizasyonu	61
3.1.1	Toz Morfolojisi.....	61
3.1.2.	Öğütme Zamanı ile Toz Morfolojilerinin Değişimi	62
3.1.2.1.	Al 2024	62
3.1.2.2.	Al 2024-%5K.....	64
3.1.2.3.	Al 2024-%10K.....	67
3.1.2.4.	Al 2024-%20K.....	69
3.1.2.5.	Al 2024-%5İ	71
3.1.2.6.	Al2024-%10İ	73
3.1.2.7.	Al 2024-%20İ	75
3.1.3.	Takviye Parçacıklarının Matris Tozlarına Gömülmesi	78
3.1.4.	Toz Boyutu	84
3.1.4.1.	1. Grup Kompozit Tozlar	85
3.1.4.2.	2. Grup Kompozit tozlar.....	85
3.1.5.	Toz Sertliği	86
3.1.5.1.	1. Grup Kompozit Tozlar	86
3.1.5.2.	2. Grup Kompozit tozlar.....	87
3.1.6.	Faz Karakterizasyonu	87
3.2.	Kompozit Malzeme Özelliklerinin İncelenmesi.....	90
3.2.1.	200 Mpa Basınçla Preslenen Numunelerin İçyapı İncelemeleri	90
3.2.1.1.	Al2024	91
3.2.1.2.	Al2024-%5K.....	91
3.2.1.3.	Al2024-%10K.....	94
3.2.1.4.	Al2024-%20K.....	96
3.2.1.5.	Al2024-%5İ	99
3.2.1.6.	Al2024-%10İ	102

3.2.1.7.	Al2024-%20İ	105
3.2.2.	200 Mpa Basınçla Preslenen Numunelerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	107
3.2.2.1.	1. Grup Kompozitlerin Yoğunluk Değerleri.....	107
3.2.2.2.	1. Grup Kompozitlerin Sertlik Değerleri	108
3.2.2.3.	1. Grup Kompozitlerin Çekme Mukavemeti Değerleri	109
3.2.2.4.	2. Grup Kompozitlerin Yoğunluk Değerleri.....	110
3.2.2.5.	2. Grup Kompozitlerin Sertlik Değerleri	111
3.2.2.6.	2. Grup Kompozitlerin Çekme Mukavemeti Değerleri	111
3.2.3.	400 Mpa Basınçla Preslenen Numunelerin İçyapı İncelemeleri	112
3.2.3.1.	Al2024-%5K.....	112
3.2.3.2.	Al2024-%10K.....	114
3.2.3.3.	Al2024-%20K.....	117
3.2.3.4.	Al2024-%5İ	119
3.2.3.5.	Al2024-%10İ	121
3.2.3.6.	Al2024-%20İ	124
3.2.4.	400 Mpa Basınçla Preslenen Numunelerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	126
3.2.4.1.	1. Grup Kompozitlerin Yoğunluk Değerleri.....	126
3.2.4.2.	1. Grup Kompozitlerin Sertlik Değerleri	127
3.2.4.3.	1. Grup Kompozitlerin Çekme Mukavemeti Değerleri	127
3.2.4.4.	2. Grup Kompozitlerin Yoğunluk Değerleri.....	128
3.2.4.5.	2. Grup Kompozitlerin Sertlik Değerleri	128
3.2.4.6.	2. Grup Kompozitlerin Çekme Mukavemeti Değerleri	129
3.2.5.	600 Mpa Basınçla Preslenen Numunelerin İçyapı İncelemeleri	130
3.2.5.1.	Al2024-%5K.....	130
3.2.5.2.	Al2024-%10K.....	132
3.2.5.3.	Al2024-%20K.....	135
3.2.5.4.	Al2024-%5İ	137
3.2.5.5.	Al2024-%10İ	139
3.2.5.6.	Al2024-%20İ	142
3.2.6.2.	1. Grup Kompozitlerin Sertlik Değerleri	145
3.2.6.3.	1. Grup Kompozitlerin Çekme Mukavemeti Değerleri	145
3.2.6.4.	2. Grup Kompozitlerin Yoğunluk Değerleri.....	146
3.2.6.5.	2. Grup Kompozitlerin Sertlik Değerleri	146

3.2.6.6.	2. Grup Kompozitlerin Çekme Mukavemeti Değerleri.....	147
3.2.7.	Fiziksel ve Mekanik Özelliklerin Sıkıştırma Basıncı ile Değişimi	147
3.2.7.1.	Yoğunluk	148
3.2.7.2.	Sertlik	150
3.2.7.3.	Çekme Mukavemeti.....	152
4.	İRDELEME	153
5.	SONUÇLAR.....	157
6.	ÖNERİLER	159
7.	KAYNAKLAR.....	160
	ÖZGEÇMİŞ	171

ÖZET

AA2024 MATRİSLİ B₄C PARÇACIK TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ
KOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ VE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Temel VAROL

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI
2012, 170 Sayfa,

Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi kullanılarak AA2024-B₄C kompozit malzemeleri üretildi. Al2024-B₄C kompozit toz karışımlarını hazırlamak için geleneksel toz metalurjisi (TM) ve mekanik alaşımlama (MA) yöntemi kullanıldı. Farklı boyut (49 µm ve 5µm) ve miktarlardaki (ağırlıkça %5, %10 ve %20) B₄C parçacıkları Al2024 matris tozları ile karıştırıldı ve bu tozlar farklı öğütme zamanları için (10 saate kadar) gezegen tip bilyeli öğütücüde öğütüldü. Öğütülen tozlardaki yapısal ve morfolojik değişimler X ışınları kırınım cihazı ve taramalı elektron mikroskobu ile araştırıldı. Sonuçlar 7µm lik minimum toz boyutuna sahip kompozit tozlara 10 saatlik öğütme sonucunda ulaşıldığını göstermiştir. SEM görüntüleri matris tozları (Al2024) içerisinde B₄C tozlarının 5 saatlik öğütme sonrasında homojen olarak dağıldığını ortaya koymuştur. Diğer bir deyişle B₄C tozlarının matris tozları (Al2024) içerisinde homojen dağılımı geleneksel toz metalurjisinden ziyade mekanik alaşımlama yöntemi ile sağlanmıştır. Ayrıca öğütme zamanı, B₄C miktarı ve B₄C partiküllerinin boyutu üretilen kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine önemli etkiye sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Metal Matrisli Kompozitler, Toz Metalurjisi, Mekanik Alaşımlama, B₄C parçacıkları

Master Thesis

SUMMARY

THE PRODUCTION OF AA2024 MATRIX-B₄C PARTICLE REINFORCED COMPOSITES BY POWDER METALLURGY METHOD AND INVESTIGATION OF THEIR PROPERTIES

Temel VAROL

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Metallurgy and Materials Engineering
Supervisor: Asst. Assoc. Dr. Aykut ÇANAKÇI
2012, 170 Pages

In this study, AA2024-B₄C metal matrix composite (MMCs) materials were produced by using powder metallurgy technique. Classical powder metallurgy (PM) and mechanical alloying (MA) method were used to prepare mixture of Al2024-B₄C composite powders. Different amounts of B₄C particles (5 wt.%, 10 wt.%, 20wt. %) having various sizes of 49µm and 5µm were mixed with Al 2024 powder particles and they were milled for different times (0h from to 10h) in a planetary ball mill. The structural evolutions and morphological changes of the milled powders were investigated by X-ray diffractometry (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The results showed that the formation of Al2024-B₄C composite powders with minimum particle size of 7 µm is obtained after 10 h milling. The SEM micrographs demonstrated a uniform distribution of B₄C particles in aluminum powders after 7h milling of an Al2024-B₄C powder mixture. In other words, more homogenous dispersion of B₄C powder powders were obtained in Al 2024 matrix using the MA technique according to classical PM method. Moreover, milling time, B₄C content and the size of B₄C particles had an important effect on the physical and mechanical properties of produced composites.

Keywords: Metal Matrix Composites, Powder Metallurgy, Mechanical Alloying, B₄C particles

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Matris Malzemeleri.....	3
Şekil 1.2. Kompozit malzemelerin takviye malzemesine göre sınıflandırılması.....	4
Şekil 1.3. Kompozit malzemedeki matris-takviye bağı oluşumunda ara yüzey ve ara fazlar.....	5
Şekil 1.4. Islatılabilirlik.....	6
Şekil 1.5. Katı altlık üzerinde duran bir sıvı damlasının katı yüzeyi ile yaptığı temas açısı.....	7
Şekil 1.6. Takviye malzemesinin geometrisine göre metal matrisli kompozitler.....	9
Şekil 1.7. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	15
Şekil 1.8. Basınçlı İnfiltrasyon deney düzeneğinin şematik resmi.....	16
Şekil 1.9. Sprey Çökeltme Düzeneği.....	17
Şekil 1.10. Vortex yöntemini şematik gösterimi.....	17
Şekil 1.11. Karıştırmalı döküm düzeneği ve kullanılan donanım.....	18
Şekil 1.12. Kompo-Döküm İşlem Akış Şeması.....	19
Şekil 1.13. Sıkıştırılmalı Döküm Yöntemini aşamalarını gösteren sistematik diyagram.....	20
Şekil 1.14. Difüzyonla Bağlama.....	21
Şekil 1.15. Toz metalurjisi parçalara örnekler.....	22
Şekil 1.16. Geleneksel toz metalurjisi işlemi aşamaları.....	23
Şekil 1.17. Atomizasyon yöntemleri.....	24
Şekil 1.18. T/M kapsamı içerisinde toz bileşenleri.....	25
Şekil 1.19. En yaygın toz parçacık şekilleri.....	26
Şekil 1.20. Görünür yoğunluk ölçüm cihazı.....	27
Şekil 1.21. Dar bir huniden dökülen toz kümesinin yığılma açısıyla gösterilen parçacıklar arası sürtünme.....	27
Şekil 1.22. Presleme işleminin basamakları.....	29
Şekil 1.23. Presleme esnasında tozların görünümü.....	29

Şekil 1.24. Tek etkili presle imal edilmiş parçada yoğunluk dağılımı.....	30
Şekil 1.25. Mikroskopik ölçekte sinterleme.....	31
Şekil 1.26. Farklı sinterleme sürelerinin kompozit mikroyapısına etkisi.....	32
Şekil 1.27. Sinterlemede tipik ısı işlem çevrimi.....	33
Şekil 1.28. Sünek-Sünek sistemde mekanik alaşımlama safhalarının gelişimi.....	37
Şekil 1.29. Mekanik alaşımlama esnasında bilye-toz-bilye çarpışması.....	37
Şekil 1.30. Al 6061 alaşım tozlarının 6 ve 24 saatlik öğütme sonundaki morfolojileri.....	39
Şekil 1.31. Sünek-Gevrek sistemde mekanik alaşımlama safhalarının gelişimi.....	39
Şekil 1.32. Al6061-%5AlN karışım tozlarının 4.5 ve 10 saatlik öğütme sonundaki morfolojileri.....	40
Şekil 1.33. SPEX tipi karıştırıcı.....	41
Şekil 1.34. Planetary tip bilyeli öğütücülerde bilye-toz etkileşimi.....	42
Şekil 1.35. Planeter tip (Fritsch marka) bilyeli öğütücü ve öğütme kabı ve bilyeler.....	42
Şekil 1.36. Atritör cihazı.....	43
Şekil 1.37. Artan öğütme süresi ile parçacık morfolojisi ve parçacık boyutunun değişimi.....	46
Şekil 2.1. Deneysel çalışmalardaki iş akış şeması.....	52
Şekil 2.2. Elek Ünitesi.....	54
Şekil 2.3 Öğütme elemanları	55
Şekil 2.4. Taramalı elektron mikroskobu.....	55
Şekil 2.5. Partikül boyutu ölçüm cihazı.....	56
Şekil 2.6. X ışınları analiz cihazı.....	56
Şekil 2.7. Mikrosertlik ölçüm cihazı.....	57
Şekil 2.8. Brinell Sertlik Ölçüm Cihazı.....	58
Şekil 2.9. Isıtma ve preslemede kullanılan ekipmanlar.....	59
Şekil 2.10. Üretilen çekme numuneleri.....	60
Şekil 2.11. Metalografi çalışmalarında kullanılan cihazlar.....	60
Şekil 3.1. Başlangıç tozlarının farklı büyütmelelerdeki morfolojisi	61

Şekil 3.2. Al2024 alaşım tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 0.5 saat, (c-d) 1saat, (e-f) 2 saat.....	62
Şekil 3.3. Al2024 alaşım tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 5 saat, (c-d) 7 saat, (e-f) 10 saat.....	63
Şekil 3.4. Al2024-%5K kompozit tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 0.5 saat, (c-d) 1 saat, (e-f) 2 saat.....	64
Şekil 3.5. Al2024-%5K kompozit tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 5 saat, (c-d) 7 saat, (e-f) 10 saat.....	65
Şekil 3.6. Al2024-%10Kkompozit tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 0.5 saat, (c-d) 1 saat, (e-f) 2 saat.....	67
Şekil 3.7. Al2024-%10K kompozit tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 5 saat, (c-d) 7 saat, (e-f) 10 saat.....	68
Şekil 3.8. Al2024-%20K kompozit tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 0.5 saat, (c-d) 1 saat, (e-f) 2 saat.....	69
Şekil 3.9. Al2024-%20K kompozit tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 5 saat, (c-d) 7 saat, (e-f) 10 saa.....	70
Şekil 3.10. Al2024-%5İ kompozit tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 0.5 saat, (c-d) 1 saat, (e-f) 2saat.....	71
Şekil 3.11. Al2024-%5İ kompozit tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 5 saat, (c-d) 7 saat, (e-f) 10 saat.....	72
Şekil 3.12. Al2024-%10İ kompozit tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 0.5 saat, (c-d) 1 saat, (e-f) 2 saat.....	73
Şekil 3.13. Al2024-%10İ kompozit tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 5 saat, (c-d) 7 saat, (e-f) 10 saat.....	74
Şekil 3.14. Al2024-%10 kompozit tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 0,5 saat, (c-d) 1 saat, (e-f) 2 saat.....	75
Şekil 3.15. Al2024-%20İ kompozit tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 5 saat, (c-d) 7 saat, (e-f) 10 saat.....	76
Şekil 3.16. Al2024-%5K kompozit tozlarında takviye parçacıklarının dağılımı, a) 0.5, b) 1 ve c) 2 saat.....	78
Şekil 3.17. Al2024-%10K kompozit tozlarında takviye parçacıklarının dağılımı, a) 0.5, b) 1 ve c) 2 saat.....	79

Şekil 3.18. Al ₂ O ₃ -%20K kompozit tozlarında takviye parçacıklarının dağılımı, a) 0.5, b) 1 ve c) 2 saat	80
Şekil 3.19. Al ₂ O ₃ -%5İ kompozit tozlarında takviye parçacıklarının dağılımı, a) 0.5, b) 1 ve c) 2 saa	81
Şekil 3.20. Al ₂ O ₃ -%10İ kompozit tozlarında takviye parçacıklarının dağılımı, a) 0.5, b) 1 ve c) 2 saa	82
Şekil 3.21. Al ₂ O ₃ -%20İ kompozit tozlarında takviye parçacıklarının dağılımı, a) 0.5, b) 1 ve c) 2 saat.....	83
Şekil 3.22. Kaba takviye boyutuna sahip kompozit toz boyutlarının öğütme zamanı ile değişim	85
Şekil 3.23. İnce takviye boyutuna sahip kompozit toz boyutlarının öğütme zamanı ile değişimi.....	85
Şekil 3.24. Kaba takviye boyutuna sahip kompozit toz sertliklerinin öğütme zamanı ile değişimi.....	86
Şekil 3.25. İnce takviye boyutuna sahip kompozit toz sertliklerinin öğütme zamanı ile değişimi.....	87
Şekil 3.26. Al 2024 tozlarının XRD pikleri.....	87
Şekil 3.27. Al 2024-%5K tozlarının XRD pikleri.....	88
Şekil 3.28. Al 2024-%10K tozlarının XRD pikleri.....	88
Şekil 3.29. Al 2024-%20K tozlarının XRD pikleri.....	89
Şekil 3.30. Al 2024-%5İ tozlarının XRD pikleri.....	89
Şekil 3.31. Al 2024-%10İ tozlarının XRD pikleri.....	89
Şekil 3.32. Al 2024-%20İ tozlarının XRD pikleri.....	90
Şekil 3.33. Takviyesiz Al ₂ O ₃ alaşımının MA süresiyle oluşan içyapı görüntüleri a) 0 saat (TM), b) 0.5saat, c) 2saat, d) 10saat.....	91
Şekil 3.34. Al ₂ O ₃ -%5K kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat.....	92

Şekil 3.35. Al2024-%10K kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat.....	94
Şekil 3.36. Al2024-%20K kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat.....	97
Şekil 3.37. Al2024-%5İ kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat.....	100
Şekil 3.38. Al2024-%10İ kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat.....	102
Şekil 3.39. Al2024-%20İ kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat.....	105
Şekil 3.40. Al 2024 ve kaba takviye parçacıklı kompozitlerin yoğunluklarının öğütme zamanı ile değişimi.....	108
Şekil 3.41. Al 2024 ve kaba takviye parçacıklı kompozitlerin sertlik değerlerinin öğütme zamanı ile değişimi.....	109
Şekil 3.42. Al 2024 ve kaba takviye parçacıklı kompozitlerin çekme mukavemeti değerlerinin öğütme zamanı ile değişimi.....	110
Şekil 3.43. Al 2024 ve ince takviye parçacıklı kompozitlerin yoğunluklarının öğütme zamanı ile değişimi.....	110
Şekil 3.44. Al 2024 ve ince takviye parçacıklı kompozitlerin sertlik değerlerini öğütme zamanı ile değişimi.....	111
Şekil 3.45. Al 2024 ve ince takviye parçacıklı kompozitlerin çekme mukavemeti değerlerinin öğütme zamanı ile değişimi.....	111
Şekil 3.46. Al2024-%5K kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat.....	112
Şekil 3.47. Al2024-%10K kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat.....	114

Şekil 3.48. Al2024-%20K kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat.....	117
Şekil 3.49. Al2024-%5İ kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat.....	119
Şekil 3.50. Al2024-%10İ kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat.....	121
Şekil 3.51. Al2024-%20İ kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat.....	124
Şekil 3.52. Al 2024 ve kaba takviye parçacıklı (a) kompozitlerin yoğunluğu ve (b) bağıl yoğunluğunun öğütme zamanı ile değişimi.....	126
Şekil 3.53. Al 2024 ve kaba takviye parçacıklı kompozitlerin sertlik değerlerinin öğütme zamanı ile değişimi.....	127
Şekil 3.54. Al 2024 ve kaba takviye parçacıklı kompozitlerin çekme mukavemeti değerlerinin öğütme zamanı ile değişimi.....	127
Şekil 3.55. Al 2024 ve ince takviye parçacıklı (a) kompozitlerin yoğunluğu ve (b) bağıl yoğunluğunun öğütme zamanı ile değişimi.....	128
Şekil 3.56. Al 2024 ve ince takviye parçacıklı kompozitlerin sertlik değerlerinin öğütme zamanı ile değişimi.....	128
Şekil 3.57. Al 2024 ve ince takviye parçacıklı kompozitlerin çekme mukavemeti değerlerinin öğütme zamanı ile değişimi.....	129
Şekil 3.58. Al2024-%5K kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat.....	130
Şekil 3.59. Al2024-%10K kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat.....	132
Şekil 3.60. Al2024-%20K kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat.....	135

Şekil 3.61. Al2024-%5İ kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 10 saat.....	137
Şekil 3.62. Al2024-%10İ kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat.....	139
Şekil 3.63. Al2024-%20İ kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat.....	142
Şekil 3.64. Al 2024 ve kaba takviye parçacıklı (a) kompozitlerin yoğunluğu ve (b) bağıl yoğunluğunun öğütme zamanı ile değişimi.....	144
Şekil 3.65. Al 2024 ve kaba takviye parçacıklı (a) kompozitlerin sertlik değerlerinin öğütme zamanı ile değişimi.....	145
Şekil 3.66. Al 2024 ve kaba takviye parçacıklı kompozitlerin çekme mukavemeti değerlerinin öğütme zamanı ile değişimi.....	145
Şekil 3.67. Al 2024 ve İnce takviye parçacıklı (a) kompozitlerin yoğunluğu ve (b) bağıl yoğunluğunun öğütme zamanı ile değişimi.....	146
Şekil 3.68. Al 2024 ve ince takviye parçacıklı kompozitlerin sertlik değerlerinin öğütme zamanı ile değişimi.....	146
Şekil 3.69. Al 2024 ve ince takviye parçacıklı kompozitlerin çekme mukavemeti değerlerinin öğütme zamanı ile değişimi.....	147
Şekil 3.70. Sıkıştırma basıncı ile yoğunluk değerlerinin değişimi, (a) Al 2024, (b) Al2024- %5K, (c) Al2024-%10K, (d) Al2024-%20K.....	148
Şekil 3.71. Sıkıştırma basıncı ile yoğunluk değerlerinin değişimi, (a) Al2024-%5İ, (b) Al2024-%10İ, (c) Al2024-%20İ.....	149
Şekil 3.72. Şekil. 3.72. Sıkıştırma basıncı ile sertlik değerlerinin değişimi, (a) Al 2024, (b) Al2024-%5K, (c) Al2024-%10K, (d) Al2024-%20K.....	150
Şekil 3.73. Sıkıştırma basıncı ile sertlik değerlerinin değişimi, (a) Al2024-%5İ, (b) Al2024-%10İ, (c) Al2024-%20İ.....	151
Şekil 3.74. Sıkıştırma basıncı ile çekme mukavemeti değerlerinin değişimi, (a) Al 2024, (b) Al2024-%5K, (c) Al2024-%10K, (d) Al2024-%20K.....	152
Şekil 3.75. Sıkıştırma basıncı ile çekme mukavemeti değerlerinin değişimi, a) Al2024-%5İ, (c) Al2024-%10İ, (d) Al2024-%20.....	153

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Bazı MMK'lerin mekanik özellikleri.....	9
Tablo 1.2. Saf Alüminyumun bazı fiziksel özellikleri.....	11
Tablo 1.3. Bazı magnezyum alaşımlarının bileşimi ve mekanik özellikleri.....	12
Tablo 1.4. MMK'lerde kullanılan takviye malzemelerinin özellikleri.....	14
Tablo 1.5. Süreksiz Takviye Metal Matrisli Kompozitlerin üretiminde kullanılan yöntemlerin karşılaştırmalı analizi.....	15
Tablo 2.1. Al2024 alaşımının ağırlıkça bileşimi (%)......	53
Tablo 2.2. Al 2024 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri.....	53
Tablo 2.3. Üretilen malzemelerin gruplandırılması.....	54

SEMBOLLER DİZİNİ

MA	: Mekanik alaşımlama
TM	: Toz metalurjisi
İKK	: İşlem kontrol katkısı
PCA	: Process control agent
BTO	: Bilye toz ağırlık oranı
BPR	: Ball to powder ratio
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
MMK	: Metal matrisli kompozit
PVD	: Fiziksel Buhar Çökeltme
HIP	: Sıcak izostatik sıkıştırma
ODS	: Oksit dağılımı ile güçlendirilmiş
XRD	: X-ışınları difraktometresi
d ₅₀	: Ortalama toz boyutu
BSD	: Brinell sertlik değeri
HB	: Brinell sertlik
HV	: Vickers sertlik değeri
µm	: Mikrometre
MPa	: Mega paskal
Al	: Alüminyum

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Günümüzde kullanılan mühendislik uygulamaları sonucunda ortaya çıkan yeni malzeme gereksinimi bütün dünyadaki malzeme bilimi ve mühendisliği alanındaki gelişmelerle karşılanır ve bu gelişmeler endüstriyel yatırım, ulusal yâda bireysel araştırma ve geliştirme programlarınca uygulanır. En büyük tasarım sınırlamalarından birinin, malzemenin kullanım sırasında gerekli yeterliliği göstermesi olduğu çok iyi bilinmektedir. Gerçekten de birçok gelişme malzemenin daha iyi özelliklere sahip başka bir malzemeyle yer değiştirmesi sonucu ortaya çıkar. Sürekli olarak mükemmel malzemelerin aranması, nihayet “kompozit” olarak bilinen heyecan verici yeni bir sınıfın geliştirilmesi ile sonuçlanmıştır [1, 2].

Kompozit malzemeler, ileri bilimsel ve teknik gelişmelerin yaşandığı mühendislik malzemelerinin bir türünü temsil etmektedir. Bu malzemeler insanoğlunun kendisini dış etkilerden korumak için geliştirdiği ilk malzemelerdir ve hayatımızın bütün alanlarına girmeye başladıkları bu yüzyılda kullanım alanları giderek artmaktadır. Maliyet performans karakteristikleri, hafiflik, mükemmel mekanik ve termal özelliklerinden dolayı kompozit malzemelere olan ilgi ve bu malzemeler üzerine yapılan araştırmalar giderek artmaktadır [3].

Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla sayıdaki aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni veya tek bir malzeme toplamak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşan malzemelerdir. Bir kompozit malzeme bünyesinde; çekirdek olarak adlandırılan takviye elemanı ve bunun etrafını çevreleyen matris malzemesi bulunmaktadır. Takviye elemanı olarak değişik morfolojiye sahip kısa ve uzun elyaflar, wiskerler ve parçacıklı seramikler kullanılmaktadır. Bunların temel fonksiyonu gelen yükü taşımak, matrisin rijitlik ve dayanımını artırmaktır. Buna ilaveten takviye elemanından istenen ve aranan özellikler; kompozitin yoğunluğunu düşürmek ve matrisin yüksek sıcaklık özelliklerini iyileştirmektir [4]. Kompozit malzemeler yüksek rijitlik/yoğunluk ve mukavemet/yoğunluk oranlarına sahip ileri malzemelerin tasarımı ve üretimi açısından modern endüstride önemli bir yere sahiptirler. Sahip olduğu bu avantajlar, ağırlık ve mukavemetin çok önemli olduğu uzay ve havacılık gibi

endüstrilerinde bu malzemelere geniş bir uygulama alanı oluşturmuştur. Bu malzemeler kullanıldıkları yapıların etkinliğini ve performansını önemli oranda artırmaktadır [5]. Kompozit malzemeler kullanılan matris ve takviye malzemesine göre sınıflandırılmakla birlikte en önemli kompozit çeşitlerinden biri Metal Matrisli Kompozitler (MMK)'dir.

Son otuz yıl içerisinde alüminyum esaslı metal matrisli kompozitlerin (MMK) kullanımına olan ilgi giderek artmıştır. Seramik parçacıkların matris içersine dağıtılmasıyla geleneksel malzemelere göre daha iyi spesifik mukavemet, rijitlik, aşınma, yorulma ve sürünme özellikleri elde edilmektedir. Bu malzemeler başlangıçta askeri ve uzay uygulamaları için üretilirken son yıllarda otomotiv ve havacılık alanlarında da kullanılmaya başlanılmışlardır [6]. Al_2O_3 ve SiC parçacıkları ile güçlendirilmiş Al, Ti ve Ni alaşımları gibi Metal Matrisli Kompozitler (MMK) yüksek spesifik rijitlik, yüksek mukavemet, iyi sürünme direnci, iyi oksidasyon ve korozyon direnci gibi özellikleri sağlayabilecek bir potansiyele sahiptirler [7].

Metal Matrisli Kompozitlerin yukarıda bahsedilen üstün özelliklerine ulaşabilmek için matris-takviye elemanı uyumu ve üretim yöntemi büyük önem taşımaktadır. Yükün, matristen takviye elemanına iletilmesi, ara yüzey bağı vasıtasıyla olmaktadır. Bu nedenle matris ile takviye elemanı arasındaki ara yüzey bağının güçlü olması gerekmektedir. Ara yüzey bağının güçlü olması da çiftlerin uyumuna ve matrisin ıslatabilirlik özelliğine bağlıdır [4]. Metal Matrisli Kompozitlerin üretiminde birçok farklı yöntem kullanılmakla birlikte bu yöntemler temelde katı ve sıvı faz yöntemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Her iki yöntemde kendine has üstünlükleri olmakla birlikte takviye elemanının matris içersine homojen dağılımını sağlayan mekanik alaşımlama yöntemi MMK'lerin üretiminde katı faz yöntemini bir adım öne çıkarmıştır.

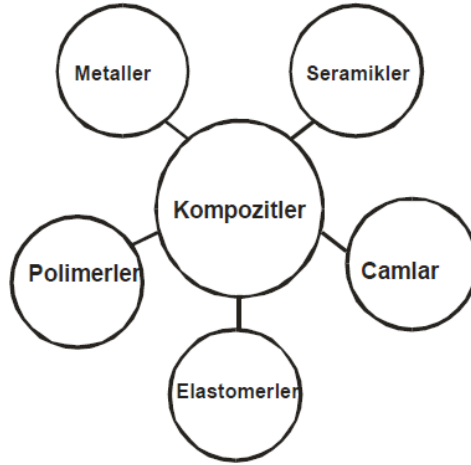
Mekanik alaşımlama işlemi bilyeli değirmen içerisinde tozların sürekli olarak kırılma ve soğuk kaynak işlemlerinin tekrarlanmasını içeren bir katı faz işlemidir. Bu işlem, tane boyutunun küçültülmesine, takviye malzemelerinin matris içersinde homojen dağıtılmasına, katı çözünürlüğünün artırılmasına, yarı kararlı ve amorf fazların oluşmasına imkân sağlar [8, 9]. Mekanik alaşımlama yönteminin en önemli özelliklerinden biri nano-yapılı tozların bu yöntemle üretilmesidir [10, 11].

Bu çalışmada AA2024 matrisli B_4C parçacık takviyeli kompozitler mekanik alaşımlama yöntemiyle üretilmiştir. Farklı parçacık boyutunun, farklı takviye oranlarının ve farklı üretim parametrelerinin mekanik alaşımlama işlemi, toz özellikleri ve kompozit

malzeme özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Toz özellikleri olarak toz morfolojisi, toz boyutu ve toz sertliği araştırılmıştır. Kompozit özellikleri olarak ise mikro-yapı, yoğunluk, porozite, sertlik ve çekme mukavemeti değerleri araştırılmıştır.

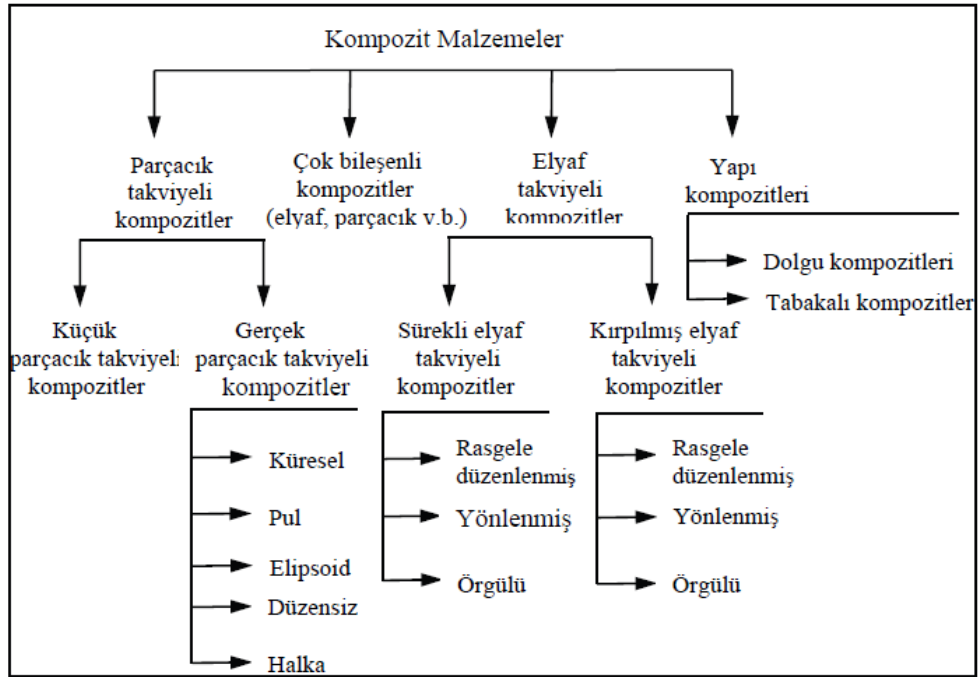
1.2. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme, birbirinden biçimleri ve kimyasal bileşimleriyle ayrılmış ve esas olarak birbiri içersinde çözünmeyen, iki veya daha çok mikro veya makro bileşenin karışımı veya birleşimiyle oluşan malzemedir [12]. Diğer bir deyişle iki malzeme, orijinal malzemelerde elde edilemeyen özellikleri elde etmek için birleştirildiğinde kompozitler üretilir [13]. Bugün istenilen özellikleri sağlamada ileri teknoloji malzemelerine duyulan ihtiyaç giderek artmakta ve tek bileşenli malzemeler ileri mühendislik uygulamalarının ihtiyaçlarını karşılamamaktadır. Bu nedenle üstün özelliklere sahip kompozit malzemelere duyulan ihtiyaç günden güne artmaktadır [14]. Kompozit malzemeler şekil 1.1’de görüldüğü gibi farklı malzemelerin birleştirilmesiyle oluşmaktadır.



Şekil 1.1. Matris Malzemeleri [15].

Kompozit malzemeler değişik kriterler esas alınarak sınıflandırılabilir. Doğal veya yapay olmasına göre doğal kompozitler (kemik, kas, deri, ağaç) ve yapay kompozitler (cam elyaf takviyeli, karbon-karbon, kevlar-epoksi v.b.) olarak sınıflandırılır. Kompozitin ana dokusunu oluşturan matris malzemesine göre yapılan sınıflandırma ise plastik (polimer), metal ve seramik matrisli kompozit malzemeler olarak yapılır. Ancak uygulamada en yaygın olarak kullanılan sınıflandırma kompozite mukavemet kazandıran takviye malzemesine göre yapılır [16]. Bu sınıflandırma Şekil 1.2’de verilmiştir.



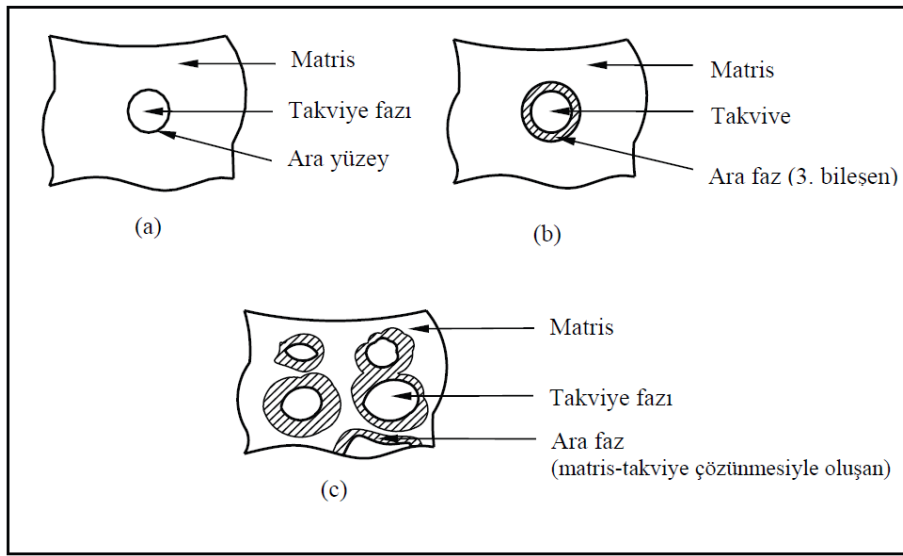
Şekil 1.2. Kompozit malzemelerin takviye malzemesine göre sınıflandırılması [16].

1.3. Kompozitlerin Yapısı

Kompozit malzemeler genellikle; matris ve takviye malzemesi olmak üzere iki kısımdan meydana gelir. Kompozit içinde genellikle daha sert ve daha yüksek dayanıma sahip bileşen kısım takviye olarak adlandırılır. Kompozitin ana yapı malzemesi olarak da tanımlanan, nispeten daha düşük dayanıma sahip olan fakat genellikle sünekliği yüksek olan kısım matris olarak adlandırılır. Matris malzemesinin kompozit sisteminde kompozit malzemeye gelen yükleri takviye malzemelerine iletmek, kompozit malzemenin tokluğunu artırmak, kırılan elyaflardan çatlağın yayılmasını önlemek, kompozit malzemenin mukavemetine katkıda bulunmak, takviye elemanlarını bir arada tutmak (bağlayıcı faz

görevi yapmak), takviye malzemelerini ortamın etkilerinden ve darbelerden korumak gibi görevleri vardır. Kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerinde kompoziti oluşturan matris ve takviye malzemelerinin özellikleri, matris ve takviye malzemelerinin hacim oranları, matris takviye arasındaki bağın özellikleri, takviye malzemesinin şekli, yapısı ve kompozit içerisindeki yönelmesi etkili olmaktadır.

Kompozitin tarifine göre matris ve takviye fazı birbiri içinde çözünmemelidir. Ancak çok az miktarda çözünürlük matris-takviye arasında güçlü bir bağın oluşumunu olumlu yönde etkiler (Şekil 3c).



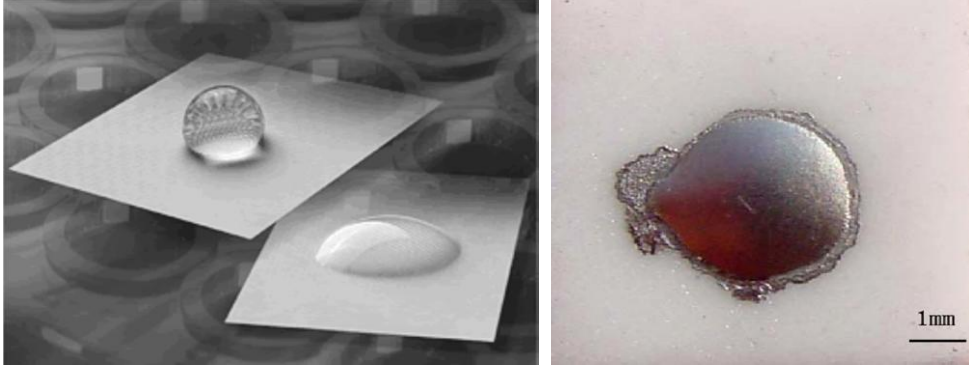
Şekil 1.3. Kompozit malzemede matris-takviye bağı oluşumunda ara yüzey ve ara fazlar [16], a) Doğrudan (ara fazsız) birleşme, b) Kaplanmış takviye kullanımı c) Karşılıklı sınırlı oranda çözünmeyle ara faz oluşumu

Matris-takviye ara yüzeyinin yapısı ve özellikleri kompozit malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Çünkü matris üzerine etki eden gerilmelerin takviye elemanına aktarılması ara yüzey aracılığı ile olur [16, 17].

1.3.1. Islatılabilirlik

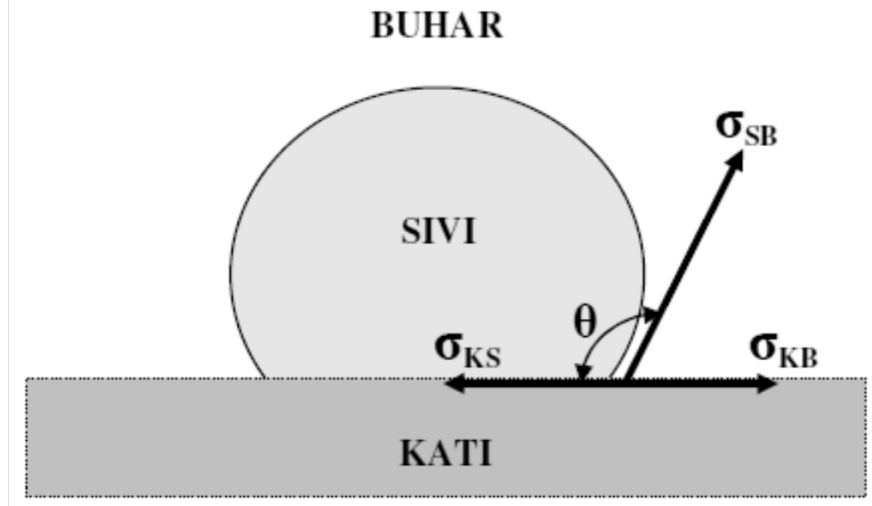
Aristotle, ince altın sac veya maun ağacından küçük bir tahta parçasının su yüzeyinde batmadan yüzdüğünü keşfettikten yüzyıl sonra, Archimedes özgül ağırlık kavramını keşfetmiştir. Altın ve maun ağacının özgül ağırlıkları suyunkinden daha büyük olduğundan

suyun üzerinde yüzen bu katıların içinde buldukları şartlar aynı olamazdı. Aristotle ve Archimedes arasındaki bu tezatlık uzun süren bir tartışmaya neden olmuştur. Bu tezatlık 1612 yılında Galileo'nun, düz ve ince bir katı cismin suda yüzerken katı cismin üst yüzeyinin su yüzeyinin altında kaldığını fark etmesiyle son bulmuştur. Galileo, yüzey gerilmesi ile ilgili kavramı bilmediğinden ve ayrıca katı ve sıvı arasındaki temas açısını ölçemediğinden savunması yetersizdi ancak, yayılma ve ıslanabilirlik ile ilgili fikirleri doğrudur. Galileo'nun o tarihte keşfettiği kavram bugün bildiğimiz “kapiler çekme” (batma) idi. Galileo'dan yaklaşık 200 yıl sonra temas açısı üzerine yapılan bilimsel araştırmalar, Young'ın da adını aldığı denklem ile bugüne kadar gelinmiştir [18, 19].



Sekil 1.4. Islatılabilirlik, a) Bir sıvı damlasının katı altık üzerinde yayılmasını gösteren temsili bir resim [18], b) Metal matris üzerindeki seramik damlacığın yayılımını gösteren bir resim [20].

Islatılabilirlik, genel anlamda, sıvının katı yüzeyinde yayılabilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Sekil 1.5'de görüldüğü üzere, katı altık üzerinde duran bir sıvı damlasının katı yüzeyi ile yaptığı temas açısı (Θ) ıslanabilirliğin fiziksel bir ölçüsüdür [21].



Şekil 1.5. Katı yüzey üzerindeki sıvı damlası, ıslatmanın iyi olmadığı sistemde ıslatma açısı ve yüzey enerjilerinin şematik gösterimi [18].

Şekil 1.5’de görüldüğü gibi, ıslanabilirliğin bir ölçüsü olan Θ değeri;

- $\Theta = 0^0$ ise mükemmel ıslatılabilirlik
- $\Theta = 0^0 < \Theta < 180^0$ ise kısmen ıslatılabilirlik
- $\Theta = 180^0$ ise ıslatılabilirliğin olmadığını göstermektedir.

Şekil 1.5’da, Θ : temas açısını, σ_{KB} : katı-buhar arayüzey enerjisi, σ_{KS} : katı-sıvı arayüzey enerjisini ve σ_{SB} : sıvı-buhar arayüzey enerjisini göstermektedir. Young-Dupré denkleminde göre [22,23] bu ifadeler arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlik ile verilmiştir:

$$\sigma_{KB} = \sigma_{KS} + \sigma_{SB} \cdot \cos \Theta \quad (3.1)$$

Yukarıda verilen her üç ara-yüzey enerjisi, birim alandaki Helmholtz serbest enerjisi veya yüzey gerilmesidir. Bir sıvı, katı altlık üzerine damlatıldığında, katı-buhar ara-yüzey enerjisinin bir kısmı sıvı-katı ve sıvı-buhar ara-yüzey enerjileri ile yer değiştirir. Sıvının yayılması ancak sistemin serbest enerjisinde bir azalma ile sonuçlanırsa mümkündür. Unutulmaması gereken en önemli şey ise bu fazların dengede olduğu kabulüdür. Ancak bu denklem hiçbir zaman deneysel olarak ispatlanamamıştır. Çünkü katı-sıvı arasında mevcut olan ara-yüzey gerilmesi nedeniyle, katının yüzey gerilmelerini ölçmek çok zordur. Daha da önemlisi, katı yüzeyinde var olabilecek herhangi bir çekme gerilmesi sistemin denge konumunda olmasına engel olacaktır. Katı-buhar ara-yüzey gerilmesi (σ_{KB}) ile katının vakum altındaki yüzey gerilmesi (σ_k) arasında aşağıdaki gibi bir ilişki mevcuttur:

$$\sigma_{KB} = \sigma_k - \pi_e \quad (3.2)$$

Bu denklemde, π_e yayılma basıncını ifade etmektedir. Sonuç olarak Young-Dupré denklemini buna göre yeniden aşağıdaki gibi yazmak mümkündür.

$$\sigma_{KB} = \sigma_{KS} + \sigma_{SB} \cdot \cos\Theta + \pi_e \quad (3.3)$$

Çoğu katılarda π_e ihmal edilebilir ve eğer $\Theta > 10^0$ ise bu denklem 3.1 numaralı denklem halini alır. Temas açısındaki azalma, sıvı damlasının yüzey alanının artmasına ve dolayısıyla da sıvının toplam yüzey serbest enerjisinin artmasına neden olur. Buna bağlı olarak katının toplam yüzey serbest enerjisinde bir azalma meydana gelir. Bunların dengede bulunması halinde, temas açısının küçük olduğu kararlı-hal şartları meydana gelir. Matematiksel olarak, bu denge durumu Young's denklemini (3.1) ile ifade edilir. Bu durumda, ıslanabilirlik için gerekli itici güç ($\sigma_{KB} - \sigma_{KS}$) ile ifade edilir. Herhangi bir dış kuvvet olmaksızın bir katı ile sıvı temas ettiğinde aşağıdaki denklemlere göre karşımıza dört termodinamiksel büyüklük çıkmaktadır. Bunlar;

$$\text{Kohezyon tarafından yapılan iş: } W_c = 2 \cdot \sigma_{SB} \quad (3.4)$$

$$\text{Adhezyon tarafından yapılan iş: } W_a = \sigma_{KB} \cdot \sigma_{KS} + \sigma_{SB} = \sigma_{SB} \cdot (\cos\Theta + 1) \quad (3.5)$$

$$\text{Yayılma katsayısı: } S_c = \sigma_{KB} \cdot \sigma_{KS} - \sigma_{SB} = \sigma_{SB} \cdot (\cos\Theta - 1) \quad (3.6)$$

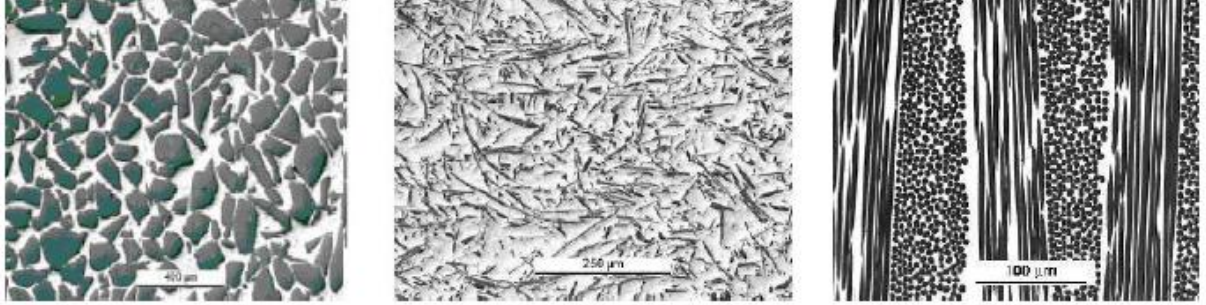
$$\text{Islatma enerjisi: } W_e = \sigma_{KB} \cdot \sigma_{KS} = \sigma_{SB} \cdot \cos\Theta \quad (3.7)$$

Kohezyon, bir birim sıvı fazın ayrılarak sıvı-buhar olmak üzere iki birim alanın meydana gelmesidir. Benzer şekilde, adhezyon tarafından yapılan iş, moleküler veya atomik olarak birleşmiş iki ayrı fazın ikiye ayrılması şeklindedir. Islatma enerjisi ise, ıslatma gerilmesi, adhezyon gerilmesi veya batmanın özgül serbest enerjisi gibi farklı isimler altında karşımıza çıkmaktadır. Yayılma ıslatmadan oldukça farklı olup, bu oluşum sırasında yeni katı-sıvı ve sıvı-buhar ara-yüzeyleri meydana gelmektedir [18].

1.4. Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler ve özellikle de süreksiz (parçacık, kısa fiber, wisker) parçacık takviyeli MMK'in, havacılık ve otomotiv uygulamalarındaki kullanım alanları giderek artmaktadır. Son yıllarda yapısal kompozit alanında alüminyum esaslı süreksiz parçacık takviyeli MMK'lere ait pratik uygulamalar ve araştırmalar üzerinde durulmaktadır. Araştırmaların büyük çoğunluğu bu ileri malzemelerin üretim işlemi ve özelliklerinin tahmini üzerine olmakla birlikte ikincil üretim teknolojileri olan talaşlı

işleme, birleştirme, plastik şekil verme üzerine de araştırmaların yapılması gerekmektedir [24].



Şekil 1.6. Takviye malzemesinin geometrisine göre metal matrisli kompozitler, a) Parçacık Takviyeli b) Kısa Fiber Takviyeli c) Sürekli Fiber Takviyeli

Tablo 1.1. Bazı MMK'lerin mekanik özellikleri

Metal Matrisli Kompozit	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastikli Modülü (GPa)	Kopma Uzaması (%)
Sürekli Fiberli			
Al 2024-T6 (%45 Bor)	1458	220	0.810
Al 6061-T6 (%51 Bor)	1417	231	0.735
Al 6061-T6 (%47 SiC)	1462	204	0.89
Süreksiz Fiberli			
Al 2124-T6 (%20 SiC)	650	127	2.4
Al 6061-T6 (%20 SiC)	480	115	5
Partikül Takviyeli			
Al 2124-F (%20 SiC)	552	103	7.0
Al 6061-F (%20 SiC)	496	103	5.5
Güçlendirilmemiş			
Al 2124-F	455	71	9
Al 6061-F	310	68.9	12

Metal Matrisli Kompozitlerin metallere göre üstün olan özelliklerini şöyle sıralayabiliriz:

- 1-Yüksek mukavemet/yoğunluk oranı, diğer bir deyişle spesifik mukavemet
- 2-Yüksek elastislik modülü/yoğunluk oranı, başka bir deyişle spesifik modül
- 3-Daha İyi yorulma Direnci

4-Yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruyabilme ve düşük sürünme oranı gibi daha iyi yüksek sıcaklık özellikleri

5-Düşük termal genleşme katsayısı

6-Daha iyi aşınma direnci

Metal Matrisli kompozitlerin dezavantajları olarak ise şu maddeler sayılabilir:

1-Sürekli fiber takviyesinin söz konusu olduğu durumlarda zor ve karmaşık üretim işlemleri (döküm yöntemi hariç)

2-Metallere göre sünekliğin belli oranda azalması. Yüksek maliyetli üretim sistemi ve teçhizat

3-Yeni gelişen bir teknoloji olması nedeniyle firmaların ve üreticilerin deneyimsiz oluşu [25].

1.4.1. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Matris Malzemeleri

Metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak genellikle hafif metaller kullanılmaktadır. Matris malzemesi olarak Al, Ti, Mg, Ni, Cu, Zn gibi metaller ve alaşımları kullanılmakla birlikte alüminyum ve alaşımları ilk sırada yer almaktadır. Bu alaşımların tercih edilmesinin sebebi düşük yoğunluk, düşük ergime sıcaklığına sahip olmaları ve birçok seramik takviye elemanını kolayca ıslatabilmeleridir. Alüminyum saf olarak kullanıldığı gibi alaşım olarak da kullanılabilir. Yüksek aşınma dayanımı ve düşük sürtünme değerleri için Al-Si alaşımları, düşük yoğunluk ve yüksek termal iletkenlik için Al-Mg ve Al-Cu alaşımları matris alaşımı olarak kullanılabilir. Kompozit malzemedan istenilen özellikleri elde etmek için matris malzemesi, takviye fiberleri veya parçacıkları iyi ıslatabilmeli, iyi bir arayüzey bağı oluşturmalı, mümkün olan en düşük basınç ve sıcaklıkta hızlı bir şekilde katılmalıdır. Ayrıca üretim esnasında ve daha sonraki ikincil işlemler esnasında matris ve takviye malzemesi arasında herhangi bir kimyasal etkileşim olmamalı ve matris kararlı olmalıdır.

1.4.1.1. Alüminyum ve Alaşımları

Metal malzemeler içerisinde Al ve alaşımları gerek saf gerekse alaşım halinde en çok kullanılan matris malzemeleridir. Saf alüminyumun oksijene olan ilgisinden dolayı döküm

kabiliyetinin kötü oluşu ve mekanik özelliklerinin düşük olmasından dolayı alaşımlama yaparak özellikleri geliştirilmeye çalışılmaktadır.

Al alaşımlarının yaygın olarak kullanılma sebepleri olarak aşağıdakileri sayabiliriz,

- 1-Dayanım/Özgül ağırlık oranının yüksek olması
- 2-Elektrik İletkenliği/Özgül ağırlık oranının yüksek olması
- 3-Korozyon dirençlerinin yüksek olması
- 4-Plastik deformasyon kabiliyetinin iyi olması

Tablo 1.2. Saf Alüminyumun bazı fiziksel özellikleri

Özgül ağırlığı (gr/cm ³)	2.78
Ergime sıcaklığı (°C)	660
Ergime ısısı (KJ/kg)	-390
Elastik modülü (GPa)	66
Isıl genleşme katsayısı (1/K)	24.10 ⁻⁶
Isı iletim katsayısı (W/mK)	230
Elektrik iletim kts. (m/Ωmm ²)	40

1.4.1.2. Magnezyum ve Alaşımları

Hafif metal alaşımlarından olan magnezyum alaşımlarının endüstriyel uygulamalardaki kullanım alanlarının gelecekte oldukça yaygınlaşacağı ve buna bağlı olarak da magnezyum esaslı kompozit malzemelerin kullanımının da artacağı beklenmektedir. Magnezyumun yoğunluğu 1.74gr/cm³ olup, yapısal uygulamalarda kullanılan en hafif metaldir. Düşük ergime sıcaklığı (650°C) ve iyi kaynak kabiliyetine sahip olan magnezyumun ağırlığı alüminyumun üçte ikisi demirin dörtte biri bakır ve nikelin ise beşte biridir. Magnezyum alaşımları, yüksek özgül dayanıma iyi dökülebilirlik özelliğine ve yüksek sönümlenme kapasitesine sahiptirler. Bununla birlikte oksijene olan ilgisinin fazla olması, düşük elastik modülü ve düşük yorulma direncine sahip olması ve yüksek sıcaklıklarda sürünme dayanımının düşük olması gibi nedenler kullanım alanlarını sınırlandırmıştır. Alaşım elementi olarak Alüminyum (%2.5-8) ve çinko (%0.5-4) katılarak dayanımları arttırılabilmektedir [25].

Tablo 1.3. Bazı magnezyum alaşımlarının bileşimi ve mekanik özellikleri

Alaşım Kodu	Bileşim Yüzdeleri					Çekme Muk. (MPa)	Uzama (%)
	Mg	Al	Mn	Zn	Diğer		
AZ10A	98	1.3	0.2	0.4	-	240	10
AZ80A	91	8.5	-	0.5	-	330	11
HM31A	96	-	1.2	-	-	283	10
AZ63A	91	6.0	-	3.0	-	200	6
ZK21A	97.1	-	-	2.3	0.6Zr	260	4

1.4.1.3. Titanyum ve Alaşımları

Ti ve alaşımları metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu malzemeler yüzeylerinde ince bir TiO₂ tabakası oluşturduğundan korozyon dirençleri çok iyidir. Titanyum ve alaşımları biyouyum özelliğine sahip olduğundan biyomalzeme olarak da kullanılmaktadır (Ni-Ti alaşımları). Çok pahalı bir malzeme olmakla birlikte ısıl genleşme katsayısı çok düşük olduğundan yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilmektedir. Özellikle çok iyi mukavemet/Özgül ağırlık oranına sahip olduğundan dolayı uzay ve uçak sanayinde kullanılmaktadırlar.

1.4.1.4. Bakır ve Alaşımları

Metal matrisli kompozit malzemelerde bakır ve alaşımlarının kullanımı genellikle elektrik devre elemanları gibi elektronik sistemlerde görülmektedir. Genellikle bakır matris içersine grafit parçacıklar ilave edilerek düşük termal genleşme katsayısına sahip iletkenliği iyi olan malzemeler elde edilebilir. Ayrıca katı yağlayıcı olarak grafitin kullanıldığı metal matrisli kompozit malzemelerin yatak malzemesi olarak kullanımı kurşun kullanımından kaynaklanan zehirleyici etkiyi ortadan kaldırmaktadır.

1.4.2. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Malzemeleri

MMK malzemelerin üretiminde, temin edilebilmelerindeki kolaylık, matris malzemesi ile uyumluluk, elastiklik modülü, çekme dayanımı, yoğunluk, ergime sıcaklığı, ısıl kararlılık, ısıl genleşme katsayısı, boyut ve şekil, kimyasal bileşim, kristal yapı gibi özellikler göz önünde tutularak, kimyasal yapılarına göre a) oksitler, b) karbürler, c)

nitrürler ve d) diğer (paslanmaz çelik, karbon vs.) olmak üzere dört ana grupta incelenebilecek takviye malzemeleri kullanılmaktadır [26]. Metal matrisli kompozitlerde ana hedef, düşük yoğunluklu ve yüksek dayanımlı malzemeler elde etmektir. Bu özellikler yapı içersine katılan ve yukarıda adı geçen seramik fazlarla sağlanır.

1.4.2.1. Alümina (Al_2O_3)

Alüminanın takviye malzemesi olarak en yaygın kullanıldığı matris malzemesi alüminyum ve alaşımlarıdır. Metal matrisli kompozit üretimi ile ilgili literatür araştırması yapıldığında bu durum net bir şekilde görülmektedir [27-30]. Alüminanın sahip olduğu yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek modül ve rijitlik, takviye elemanı olarak kullanılmasının en önemli nedenlerindedir.

1.4.2.2. Silisyum Karbür (SiC)

Metal matrisli kompozitlerde kullanılan önemli takviye elemanlarından biri de SiC 'dür [31, 32]. Parçacık ve whisker tipinde SiC takviyeleriyle üretilen metal matrisli kompozit malzemelere ekstrüzyon, haddeleme vb. plastik şekil verme işlemleri uygulanabilmektedir. SiC 'ün en önemli avantajı maruz kaldığı yüksek sıcaklık şartlarında özelliklerini koruyabilmesidir.

1.4.2.3. Bor Karbür (B_4C)

Sahip olduğu yüksek sertlik, mukavemet ve düşük yoğunluk özelliklerine rağmen yüksek maliyeti sebebiyle kompozit malzemelerdeki kullanımı henüz istenene seviyeye gelmemiştir. Çok az malzemedeki bulunan, sıcaklıkla çekme mukavemetinin artması da Bor Karbür'ü diğer takviye malzemelerine göre ön plana çıkarmaktadır. B_4C takviyeli kompozitin işleme problemleri ve mekanik özelliklerdeki sınırlamalar alüminyumun matris malzemesi olarak kullanımıyla önemli ölçüde azaltılabilmektedir [33].

Tablo 1.4. MMK'lerde kullanılan takviye malzemelerinin özellikleri [26].

Takviye Malzemesi	Yoğunluk ($\times 10^3 \text{kgm}^{-3}$)	Isıl Genleşme Katsayısı (10^{-6}C^{-1})	Ergime Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Mukavemet (Mpa)	Elastiklik Modülü (GPa)
Al_2O_3	3.98	7.92	2100	221 (1090 $^{\circ}\text{C}$)	379 (1090 $^{\circ}\text{C}$)
SiC	3.21	5.40	2750	-	324 (1090 $^{\circ}\text{C}$)
C	2.18	-1.44		-	690
SiO_2	2.66	<1.08	1710	-	73
AlN	3.26	4.84	2375	2069 (24 $^{\circ}\text{C}$)	310 (1090 $^{\circ}\text{C}$)
B_4C	2.52	6.08	2420	2759 (24 $^{\circ}\text{C}$)	448 (24 $^{\circ}\text{C}$)

1.5. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Farklı matris ve takviye malzemelerinin kullanılıyor olması MMK'lerin üretiminde farklı tekniklerin geliştirilmesine sebep olmuştur. Üretim sırasında matrisin sıvı, katı veya buhar fazında olmasına göre MMK'lerin üretim yöntemleri şekilde gösterildiği gibi sınıflandırmak mümkündür. Bu yöntemler:

1-Katı-Faz Üretim Yöntemleri

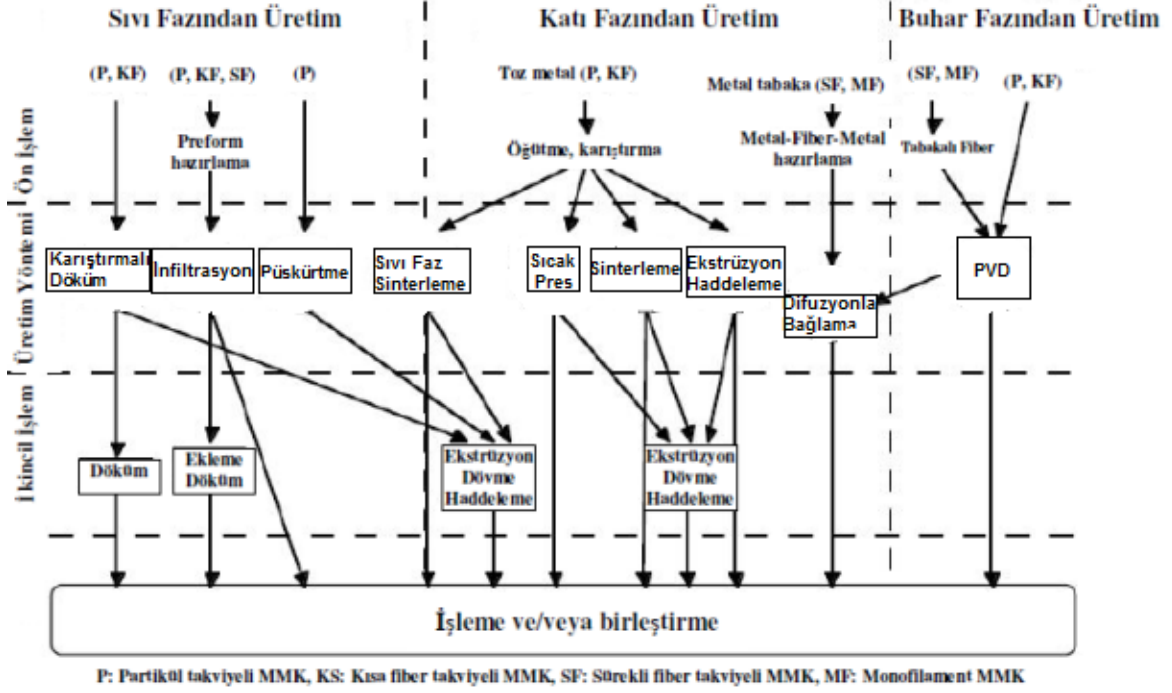
- a) Difüzyonla Bağlama
- b) Toz Metalurjisi (TM)

2-Sıvı-Faz Üretim Yöntemleri

- a) Sıvı-Metal infiltrasyon
- b) Püskürtme
- c) Karıştırmalı döküm
- d) Kompo döküm
- e) Reaktif (In-situ) yöntemi
- f) Sıkıştırılmalı döküm

3-Buhar-Faz üretim yöntemleri

- a) Fiziksel Buhar çökeltme (PVD)



Şekil 1.7. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri [18].

Tablo 1.5. Süreksiz Takviye Metal Matrisli Kompozitlerin üretiminde kullanılan yöntemlerin karşılaştırmalı analizi [34].

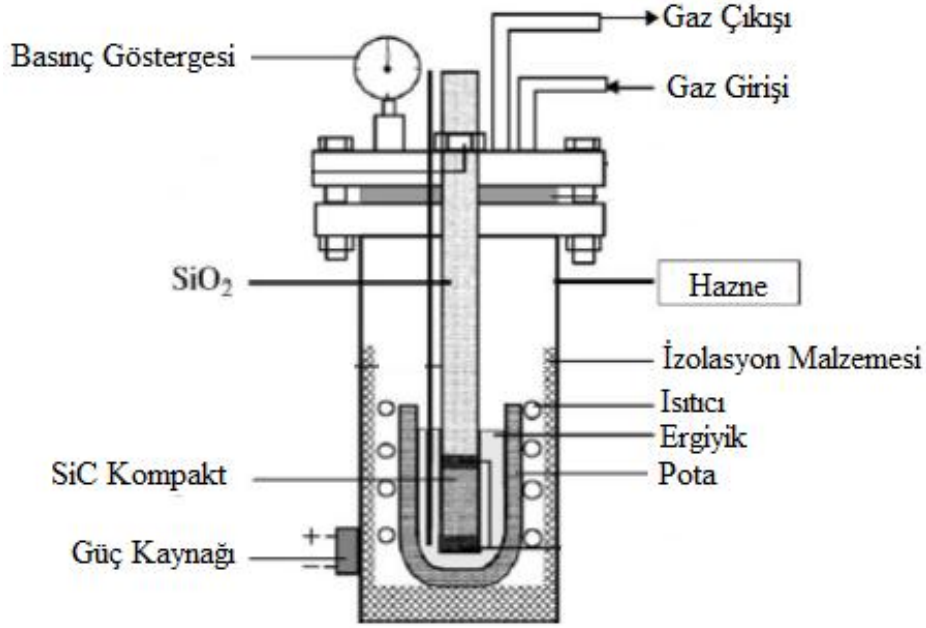
Yöntem	Şekil ve Boyut aralığı	Verim	Takviye Oranı	Takviye deformasyonu	Maliyet
Sıvı Yöntem (Karıştırılmalı Döküm)	Geniş şekil ve boyut aralığı (500kg'a kadar)	Çok Yüksek (verim>%90)	%30'a kadar	Yok	Düşük
Sıkıştırılmalı Döküm	Preform nedeniyle sınırlı şekil ve boyut aralığı	Düşük	%45'e kadar	Var	Orta
Toz Metalurjisi	Geniş şekil sınırlı boyut aralığı	Yüksek	-	Kırılma	Yüksek
Püskürtmeli Döküm	Sınırlı Şekil geniş boyut aralığı	Orta	0.3-0.7	-	Yüksek
Yöntem	Şekil ve Boyut aralığı	Verim	Takviye Oranı	Takviye deformasyonu	Maliyet

1.5.1. Sıvı Faz Üretim Yöntemleri

1.5.1.1. Sıvı Metal Emdirme

Sıvı metal emdirme tekniği, hem kısa elyaf, kılcal kristalli hem de sürekli elyaf takviyeli metal matrisli kompozitlerin (MMK) üretilmesinde yaygın olarak kullanılan bir

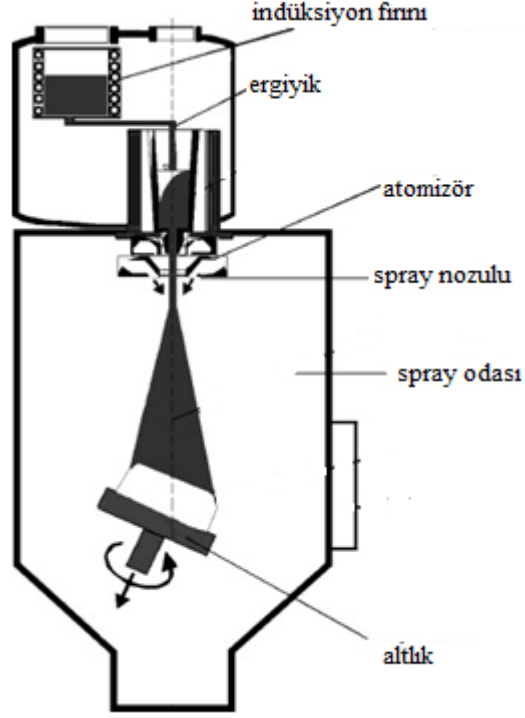
yöntemdir. Bu yöntemde ilk olarak istenilen şekilde uygun bağlayıcı kullanılarak preform (önşekil) hazırlanır. Kompozitte tasarlanan elyaf hacim içeriği ve doğrultuları bu aşamada yapılır. Hazırlanan bu model kalıp içersine yerleştirilir ve ergimiş metal enjekte edilerek bu mastarın ıslatılması sıvı metal emdirilerek sağlanır bu sırada preform'un şeklini koruyabilmesi için kullanılan bağlayıcılar yanar ve işlem katılaşmaya bırakılır. Sıvı metal emdirme işlemi basınçlı ve basınçsız olarak gerçekleştirilebilir [35].



Şekil 1.8. Basınçlı İnfiltrasyon deney düzeneğinin şematik resmi [36].

1.5.1.2. Sprey Yöntemi

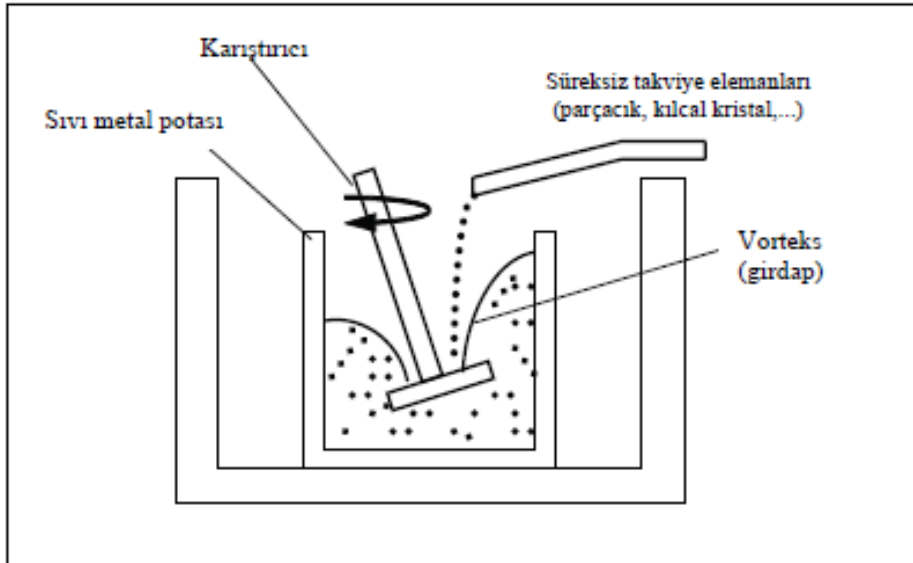
Bu yöntemde, sıvı metal takviye malzemesi ile birlikte bir altlık üzerine püskürtülür ve metalin katılaşması sağlanır. Ticari açıdan çok başarılı olunmasa da, seramik tozların spray içersine enjekte edilmesiyle parçacık takviyeli MMK'lerin üretiminde bu yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemle üretilen MMK'lerde seramik takviye fazlarının homojen olarak dağılmadığı gözlemlenmiştir. Yöntemin en büyük avantajı ince taneli bir yapının elde edilmesi dezavantajları ise yöntemin sadece süreksiz takviye fazları için uygulanabilir olması, maliyetinin yüksek olması ve sadece basit şekilli malzemelerin üretiminde kullanılabilir olmasıdır [18].



Şekil 1.9. Sprey Çökeltme Düzenegi [37].

1.5.1.3. Karıştırmalı Döküm

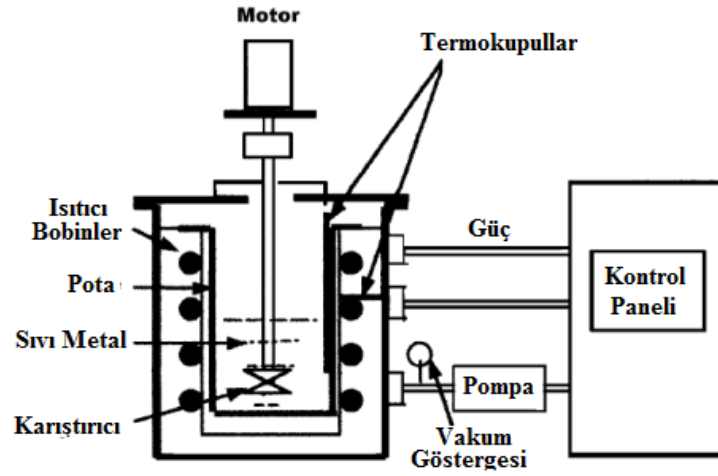
MMK'lerin üretiminde kullanılan ekonomik yöntemlerden biri olan bu yöntem takviye parçacıklarının sıvı metal içerisinde karıştırılması ve daha sonra katılaşmaya bırakılması ile gerçekleşmektedir. Karıştırmalı döküm yönteminin en basit şekli vortex (girdap) şeklindedir. Vortex yönteminde kullanılan deney düzenegi şekilde verilmiştir.



Şekil 1.10. Vortex yöntemini şematik gösterimi

Parçacık takviyeli metal matrisli kompozitlerin karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilmesi esnasında karşılaşılan problemler şunlardır:

- 1-Takviye malzemesinin içyapıya homojen bir şekilde dağılımını sağlamanın zorluğu.
- 2-Matris malzemesinin seramik esaslı takviye malzemesini ıslatmasının kötü olması.
- 3- Katılma sırasında gaz hapsolmesi ile içyapıda gözenek (porozite) oluşumu.
- 4-Karıştırma vakum ve soygaz ortamında yapılmaz ise içyapıda oksit inklüzyonlarının oluşumu.
- 5-Sıvı metalle takviye parçacıklarının uzun süre temas etmesi nedeniyle istenmeyen kimyasal reaksiyonların oluşması.
- 6-Karıştırma sırasında veya karıştırma sonrası yerel parçacık topaklanmalarının (kümelenme) oluşması, uzun elyafların kullanılamaması ve takviye yönlenmesinin yapılamaması [16]. Şekil 1.11’de vakumlu karıştırmalı döküm deney düzeneği görülmektedir.



Şekil 1.11. Karıştırmalı döküm düzeneği ve kullanılan donanım [38]

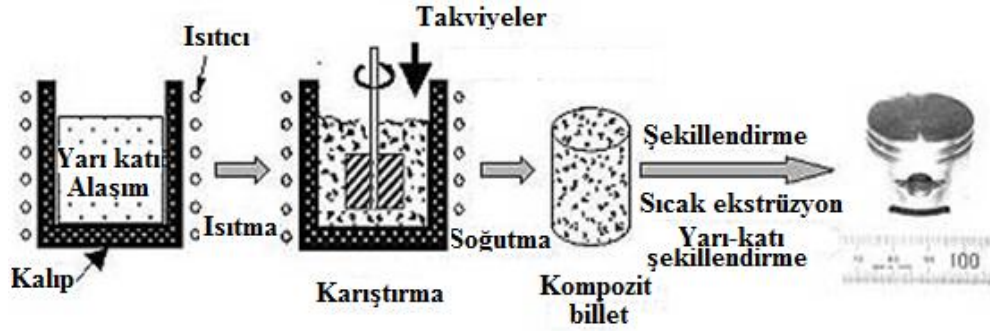
1.5.1.4. Fiziksel Buhar Çökeltme

Fiziksel Buhar Çökeltme yöntemi en basit haliyle katı haldeki bir malzemenin buharlaştırılıp veya sıçratılıp başka bir kütle üzerinde biriktirilmesi olarak tanımlanabilir. Faraday’ın 1857 yılında bir metal teli vakum altında buharlaştırarak yaptığı ilk kaplama PVD’nin ilk uygulaması olarak kabul edilir [39]. FBB yöntemiyle yapılan filmlerin

kalınlığı birkaç nanometreye birkaç mikron arası olmakla birlikte çok katlı yâda tabaka içinde değişen kompozisyonlarda da olabilir. Genelde FBB işleminde biriktirme hızı 1-10nm/sn'dir [40].

1.5.1.5. Kompozit Döküm

Bu yöntem kuvvetli bir karıştırma uygulanırken katılaşmaya başlayan ergiyik içersine takviye parçacıklarının eklendiği sıvı faz işlemidir. Yarı katı bulamaç içersinde katılaşmaya (biçimlenmeye) başlayan matris tanecikleri takviye parçacıklarını mekanik olarak kendi bünyelerine hapsederler. Böylece takviye parçacıkları hem matris malzemesinden ayrılmaz hem de bir araya toplanarak aglomerasyon (topaklanma) oluşturmaz. Bu şekilde takviye parçacıklarının matris içersinde daha homojen dağılımı sağlanabilir. Kompo-döküm özellikle düşük maliyet ve kolay üretim bakımından magnezyum matrisli kompozitlerin üretimi için idealdir [41, 42].



Şekil 1.12. Kompo-Döküm İşlem Akış Şeması

1.5.1.6. In-situ Yöntemi

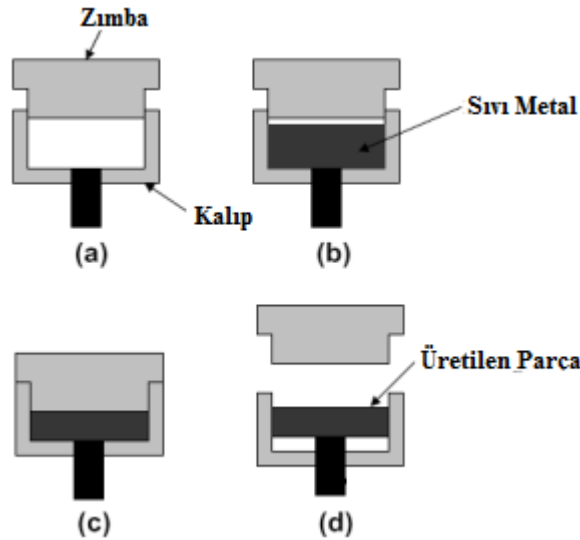
Günümüzde yaygın olarak kullanılmakta olan ve kuvvetlendirici parçacıkların dışarıdan matris içersine katılması (ex-Situ) ilkesine dayanan metal matrisli kompozitlerin üretiminde ki en büyük problem, kuvvetlendirici fazın sıvı metal tarafından tam olarak ıslatılmaması sonucu ortaya çıkan ara yüzey problemleridir. Metalurjik olarak; arayüzeyde oluşabilecek eksik ıslanmalar bir takım kimyasal reaksiyonlara ve porozitelere sebep olabilmekte katılaşma esnasında ise matris dentritleri bu parçacıkları dışarı doğru itip matris fazı içersinde topaklanmalarına (cluster effect) böylece heterojen bir mikroyapı

oluşturmasına sebep olabilmektedir. Yapılan deneysel ve teorik çalışmalar bu problemlerin, MMK'lerin mekanik, tribolojik ve korozif özelliklerini olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir. MMK'lerin arayüzey özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılan en etkili yöntem, kuvvetlendirici parçacıkların sıvıya sonradan ilavesi yerine, sıvı eriyik içerisinde yerinde (in-situ) reaksiyonlarla oluşturulmasıdır [43, 44]. In-Situ reaksiyonlarla oluşturulan seramik parçacıklara örnek olarak Al_4C_3 , Fe_3C , Al_2O_3 gibi parçacıklarını örnek verebiliriz [45, 46].

Reaktif işlem yöntemindeki en önemli sınırlama, verilen bir sistemde oluşabilecek takviye fazının yapısı ve bileşimi ile ilgili termodinamiksel sınırlamalardır [18].

1.5.1.7. Sıkıştırılmalı Döküm Yöntemi

Sıkıştırılmalı döküm yöntemi, herhangi bir metalin basınç altında katılaşmasıdır. Bu yöntemle hemen hemen her tipte takviye malzemesi kullanarak MMK malzeme üretilmesi mümkündür. Takviye malzemesi kalıp içersine yerleştirilir ve daha sonra döküm sıcaklığına çıkarılmış sıvı metal belirli bir sıcaklığa ısıtılan takviye malzemesi üzerine dökülür. Katılaşma tamamlanıncaya kadar sıvı metal üzerine yüksek miktarda basınç uygulanır. Basınç altında katılaştırma ile takviye malzemesi ve matris metali arasındaki arayüzey bağ mukavemeti oldukça iyileşmektedir [47, 48, 49].



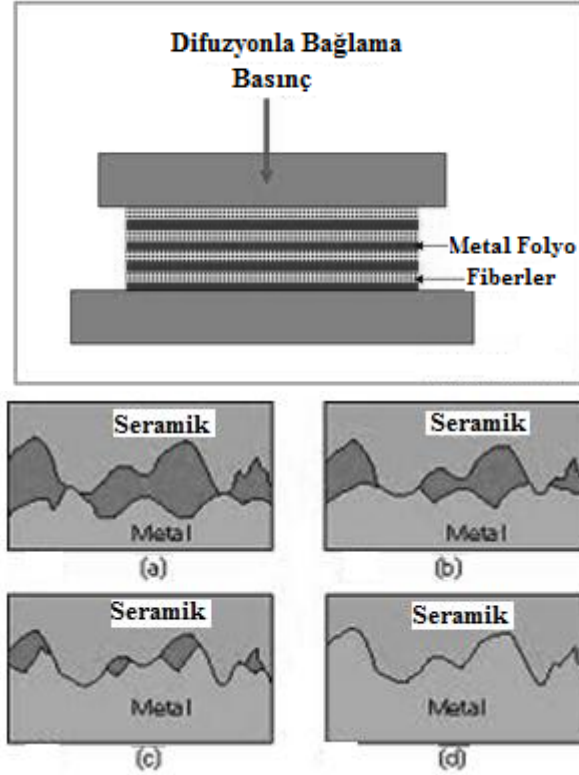
Şekil 1.13. Sıkıştırılmalı Döküm Yöntemini aşamalarını gösteren sistematik diyagram [50].

Bu yöntemin dezavantajı olarak, büyük boyuttaki parçalar için yüksek basınç gerektirdiğinden üretilcek parça boyutundaki sınırlamalar, ince kesitli parçaların üretimindeki zorlukları ve dökülebilecek parçaların şeklini sayabiliriz [51].

1.5.2. Katı Faz Üretim Yöntemleri

1.5.2.1. Difüzyonla Bağlama

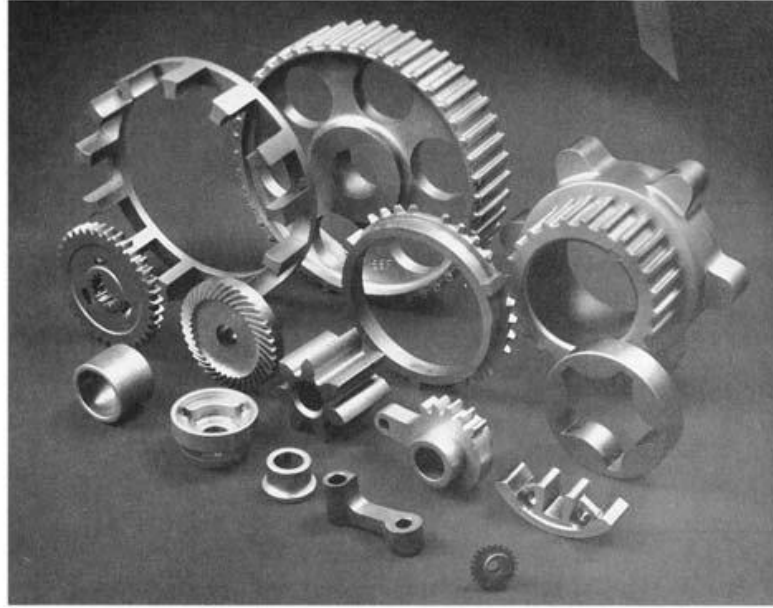
Bu yöntemle genelde ince sac ve yaprak formunda metal matrisli fiber takviyeli MMK'ler üretilmektedir. Difüzyonla bağlama için matris ve takviye fazı kimyasal yüzey işlemleri aktif hale getirilir. Fiberler metal sac üzerine yerleştirilir ve sıkıştırma (presleme) uygulanarak bağlanma sağlanır. Uygulanan basınç, sıcaklık ve bekleme süresi kompozit sistemine göre değişiklik göstermektedir. Yöntemin en büyük sakıncası ara yüzeyde çok sayıda kimyasal reaksiyonun gerçekleşmesidir [18]. Difüzyonla bağlama yöntemi aynı zamanda metal matrisli kompozitlerin kullanım yerine göre diğer malzemelerle birleştirilmesinde de kullanılan bir yöntemdir [52].



Şekil 1.14. Difüzyonla Bağlama

1.5.2.2. Toz Metalurjisi

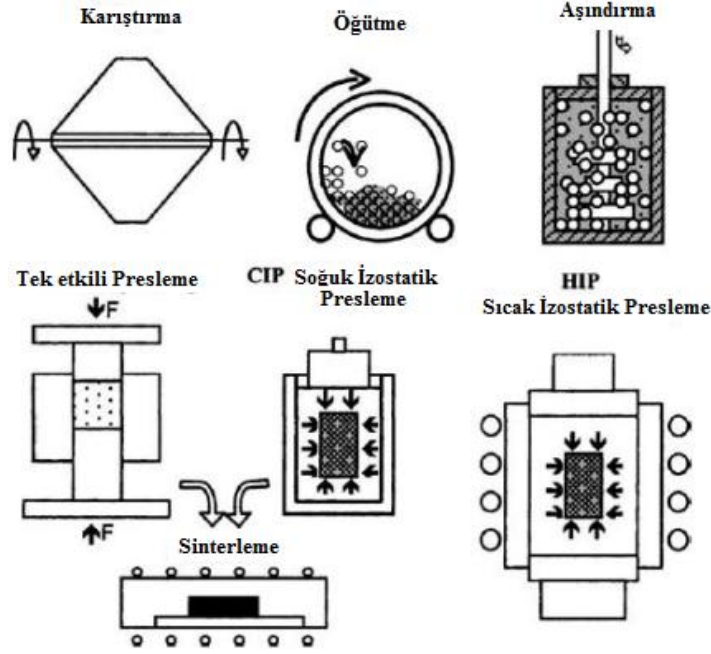
Toz metalurjisi çok küçük parçacıkları birbirine bağlayarak parça haline getirme işlemidir. Daha geniş bir ifadeyle toz metalurjisi toz şeklindeki malzemelerin preslenmesi ve takiben yüksek sıcaklıkta sinterlenmesi ile parça imalatını kapsamaktadır. İnce parçacık şeklindeki saf metaller, alaşımlar, karbon, seramik ve polimer malzemeler birbirleriyle karıştırılarak basınç altında şekillendirilebilirler. Daha sonra bu parçalar ana bileşenin (matris malzemesi) ergime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta sinterlenerek parçacıkların temas yüzeyleri arasında kuvvetli bir bağ oluşturulur ve böylece istenilen özellikler elde edilir. Toz metalurjisi küçük, karmaşık ve boyutsal hassasiyeti yüksek parçaların seri imalatına son derece uygundur. Malzeme kaybı az olmakla birlikte belirli derecede gözenek (porozite) ve geçirgenlik elde edilir [53].



Şekil 1.15. Toz metalurjisi parçalara örnekler

Toz metalurjisi (TM), süreksiz takviyeli MMK'lerin üretiminde kullanılan en yaygın yöntemdir. Yöntemin uygulanmasına ilişkin şematik gösterim şekil 1.16'da verilmiştir. Buna göre, matris ve takviye fazı tozları karıştırılarak istenilen şekildeki kalıba dökülür. Daha sonra tozların bağlanması için sıkıştırma kuvveti uygulanır. Tozların bağlanmasını kolaylaştırmak amacıyla, sıkıştırılmış tozlara ergime sıcaklığının altında ancak katı-faz

difüzyonunun gerçekleşmesi için yeterli yüksek sıcaklıkta ısıl işlem uygulanır. Diğer bir seçenek, tozların karıştırılmasından sonra doğrudan sıcak pres uygulanmasıdır (HIP). Matris fazı olarak, bakır, nikel, alüminyum, kobalt, titanyum ve molibden alaşımları ile çelik yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Takviye fazı olarak ise SiC, grafit, Ni, Ti ve Mo parçacık veya kısa fiber şeklinde kullanılmaktadır. Ergitme ve döküm işlemleri olmadığından diğer üretim yöntemlerine göre daha ucuz bir yöntemdir [18].

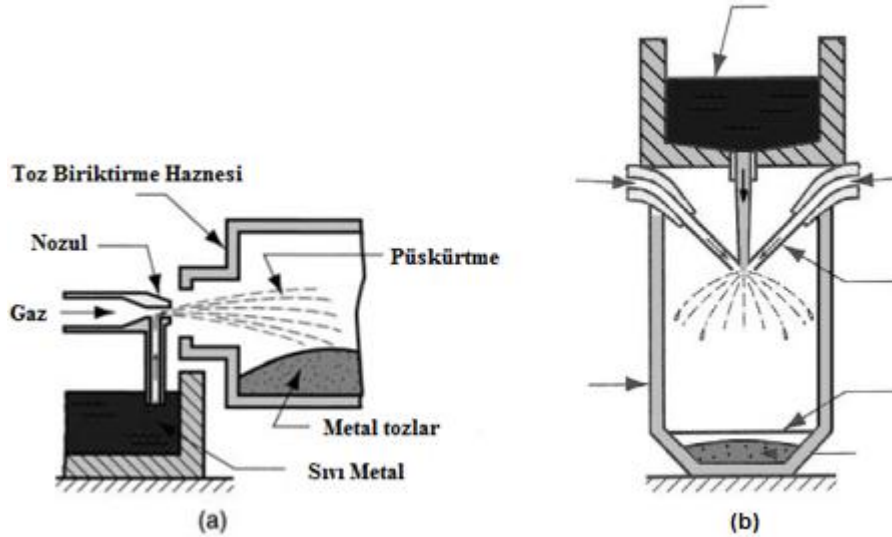


Şekil 1.16. Geleneksel toz metalurjisi işlemleri aşamaları [54].

1.5.2.2.1. Toz Üretimi

Toz metalurjisinde başarılı bir son ürün elde edebilmek için başlangıç malzemeleri çok önemlidir. Tozların kimyasal bileşimi ve saflığının yanında parçacık boyutu, parçacık boyut dağılımı, parçacık şekli ve tozların yüzey yapısında dikkat edilmesi gereken konulardır. Tüm toz metalurjisi yöntemleri hangi tip parça üretilecek olursa olsun ham madde olarak toz formunda malzemedan başlamaktadır. Toz ince olarak parçalanmış katılardır. Bu boyut genel olarak 1 mm'den daha küçük boyutludur. Metal tozlarının üretiminde 4 temel yöntem vardır. Bunlar mekanik küçültme, kimyasal indirgeme, elektrolitik biriktirme ve sıvı metal atomizasyonudur. Metal tozları üretim yöntemine göre şekilleri küreselden karmaşık yapıya kadar değişebilir. Parçacık toz yüzeyi, tozun akış özelliklerini, yüzey alanını ve presleme sonrası yoğunluğunu etkileyen bir parametredir. Kimyasal bileşim ve saflıkta tozların preslenmesini etkileyen faktörlerdir. Temelde her

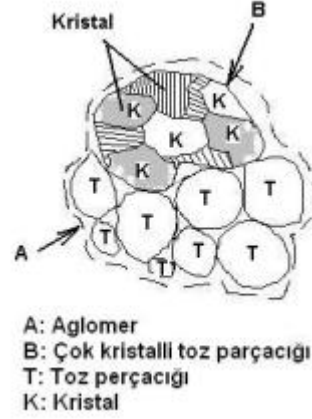
türlü malzeme toz haline getirilebilir. Bu işlem üç farklı yol ile gerçekleştirilir: atomizasyon, kimyasal ve elektrolitik yöntem. Bunların içinde en genel olarak kullanılanı atomizasyon yöntemidir. Atomizasyon ergimiş metalin sprej ile aniden soğutulmasıyla toz haline getirilmesidir. Bunun için çeşitli yöntemler vardır. Birisi ergimiş metal akarken su püskürtülerek ani soğutma ile küçük parçacıklar elde edilmesidir. Su atomizasyonu metali çok hızlı soğutur bu sebeple daha düzensiz şekilli parçalar elde edilir. Su aynı zamanda bazı metalleri oksitler. Daha uygun bir atomizasyon yöntemi ergimiş metale inert bir gaz püskürtülmesidir. Bu yöntemle malzeme daha yavaş soğutulur böylece daha yuvarlak şekilli tozlar elde edilebilir. Bir başka yöntem de ergimiş metali dönen bir disk üzerine dökülmesi ile yapılır. Bu şekilde malzeme dönen diskten fırlayarak kabın duvarlarına çarpar ve toz elde edilir. Kimyasal indirgeme metal tozları üretimi için bir başka yöntemdir. Farklı kimyasal reaksiyonlar içeren bu yöntem metali elementel toz haline indirgenmesidir. Elektroliz de bir başka toz üretim tekniğidir. Bu yöntem elektriği kullanarak metali çözüp çok ince toz haline getirme işlemidir. Bu yöntemle oldukça saf tozlar elde edilebilir. Sistemde anot, toz elde edilmek istenen malzemeden üretilir. Elektrik malzemeyi anottan katoda taşır ve kolayca yıkanabilen bir film üstüne yapıştırır. Bu filmler temizlenip kurutularak istenilen toz elde edilmiş olur [55].



Şekil 1.17. Atomizasyon yöntemleri, a) gaz atomizasyon yöntemi, b) su atomizasyon yöntemi

1.5.2.2.2. Toz Özellikleri ve Karakterizasyonu

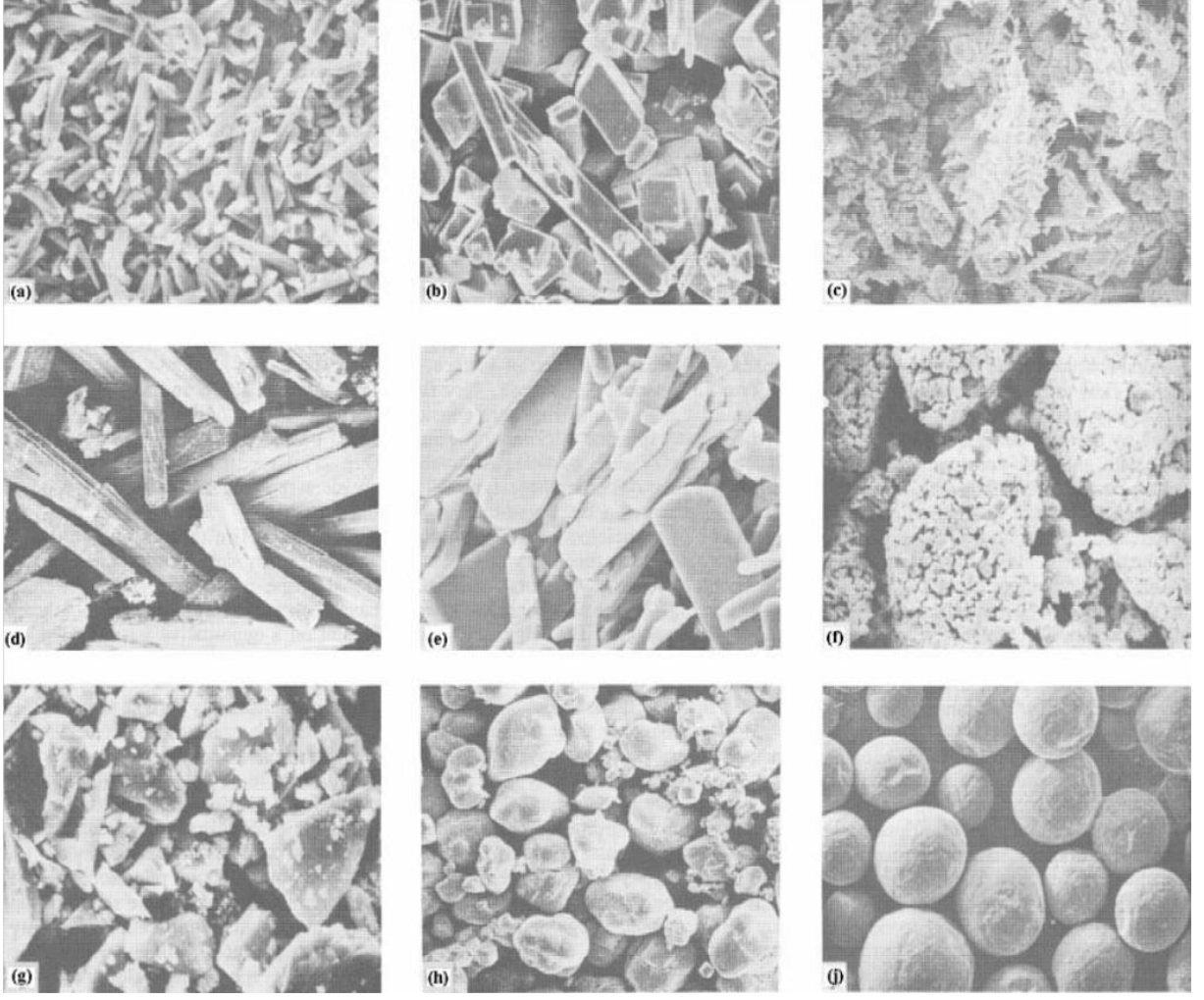
Toz parçacıkları tek bir taneden oluşur. Taneler düzenli kristal yapıda olabilecekleri gibi amorf yapıda da olabilirler. Ayrıca taneler tek kristalli tek bir tane yapısında olabileceği gibi çok kristalli (polikristal) tane yapısına da sahip olabilirler. Toz taneleri bazen ikincil taneler oluşturabilirler. Bu ikincil tane oluşumuna aglomerasyon denir ve daha çok kontrol edilemeyen toz üretim süreçlerinde istem dışı olarak oluşur. Aglomerasyon, birden çok parçacığın katı halde tek yapıda bir arada bulunmasıdır. Parçacıklar bir birlerine zayıf bağlanmış ise *aglomere*, güçlü bir şekilde bağlanmışlarsa *sert-aglomere* yani *agreget* denir.



Şekil 1.18. T/M kapsamı içerisinde toz bileşenleri

Tozların karakterizasyonunda önemli bir özellikte toz boyutudur. Toz boyutu daima uzunluk birimi olarak belirtilir. Birçok metal ve seramik tozları bir mikrondan bir kaç yüz mikrona kadar değişen ebatlarda bulunur. Kırk mikron altı ($-40 \mu\text{m}$) tozlar elek altı tozlar olarak nitelendirilir ve tozların kuru olarak elenebilen minimum boyutudur. Tozun boyutla ilgili özellikleri iki faktör ile belirlenir: birincisi geometrik olarak şekli ve ikincisi ise bu faktörün statiksel dağılımı yani toz boyutu dağılımıdır. Şayet boyutla bağlantılı fiziksel bir tanımlama yapılacaksa toz şekli tanımlanabilir.

Tozları oluşturan parçacıkların şekli önemli bir özellik olup uluslararası standartlarda basit niceleyici karakterizasyonla dentritik, çubuksu, yassı-tabakamsı, lifsi, küresel, açılı, düzensiz şekilli ve granül olarak nitelendirilmiştir.



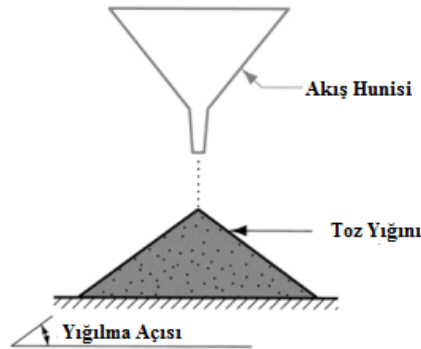
Şekil 1.19. En yaygın toz parçacık şekilleri, (a) İğne şekilli toz parçacık (b) Köşeli toz parçacık (c) Dentritik toz parçacık (d) Lifli toz parçacık (e) Pul toz parçacık (f) Taneli toz parçacık (g) Düzensiz toz parçacık (h) Yumru toz parçacık (j) Küresel toz parçacık [56].

Toz parçacıklarının şekli tozların akış davranışları ile görünür ve basma yoğunlukları ile paketlenabilirliklerini etkiler [57]. Ayrıca, Tozların görünür yoğunluğu, yani preslenmemiş ve yerleşmemiş tozların verilen hacminin kütlesi, önemli bir parametredir. Görünür yoğunluk tozlardaki boşluk derecesi ve toz şeklinin bir fonksiyonudur. Toz şeklinin karmaşılaşması ve gözenekliliğinin artması görünür yoğunluğu düşürür. Görünür yoğunluğun düşmesi ise presleme aşamasında hacim azalmasını artırır ve böylece soğuk kaynak miktarını artırır. Neticede daha yüksek ham mukavemetli parça elde edilmiş olur. Parçanın sinterleme verimi de soğuk kaynak miktarının artmasından dolayı artacaktır [33].



Şekil 1.20. Görünür yoğunluk ölçüm cihazı,
Hall akış ölçer

Kalıp içindeki tozların paketlenme verimliliği toz boyut dağılımına geniş ölçüde bağlıdır. Büyük tozlar arasında oluşan boşluklar küçük boyuttaki tozlar ile doldurulabilir. Tozların fiziksel özelliklerinden olan toz şekli, toz boyut dağılımı ve spesifik yüzey alanı tozların, ham yoğunluğuna, sıkıştırılma işlemi sırasında kalıba akış davranışlarına, sıkıştırılabilirliğine ve sinterleme sonrası davranışlarına, örneğin dayanımlarına (green strength) doğrudan etki etmektedir. Tozların saflığı da çok önemlidir. Müsaade edilebilecek yabancı madde seviyesi büyük oranda maddelerin tamamının yapı ve durumuna bağlıdır. Pek çok metal tozunun ince bir oksit tabakası ile kaplı olması presleme işlemine fazla etkili olmaz. Çünkü tozlar arası sürtünme ile bu tabaka kolayca yırtılır ve açığa çıkan metal yüzeyler hemen soğuk kaynak olurlar [33].



Şekil 1.21. Dar bir huniden dökülen toz kümesinin yığılıma açısıyla gösterilen parçacıklar arası sürtünme. Büyük açılar büyük parçacıklar arası sürtünmeyi gösterir.

1.5.2.2.3. Tozların Preslenmesi

Toz metalurjisi (T/M) imalat sürecinde parça imal süresi ve hızı önemli bir faktördür. Bu nedenle tek eksenli kalıpta basma (sıkıştırma) önemli bir parça şekil verme işlemidir. Tozların sıkıştırılmasındaki ana amaç ham yoğunluk ve dayanımın elde edilmesidir. Sıkıştırma bir yük altında serbest yapıdaki toz parçacıklarının istenilen şekle ve forma dönüştürülmesi için yoğunluk kazandırma işlemi olarak tanımlanabilir. Değişik sıkıştırma teknikleri olmakla beraber en yaygın kullanılanı tek eksenli bir kalıp ile basma işlemidir. Tek eksenli kalıp ile sıkıştırma tekniği kesintisiz üretim, otomasyon sistemleri, yüksek miktarlarda metal ve seramik parçalar ile ilaç ve patlayıcı endüstrisinde yaygın kullanım alanına sahiptir. Bu nedenlerden dolayı endüstriyel uygulamalardaki çoğu T/M parçaları bu teknik kullanılarak üretilirler. T/M üretim yöntemi ile elde edilen malzemenin dayanımı basma ve sinterleme sonrası yoğunluğu ile doğrudan ilgilidir. Sinterleme de esas olan istenilen yoğunluğun (çoğu zaman tam yoğunluk) ve dolayısıyla fiziksel dayanımın elde edilmesidir. İdeal yoğunluk % 100 teorik yoğunluğa erişmektir. Sıkıştırma işlemi üç aşamada ele alınabilir:

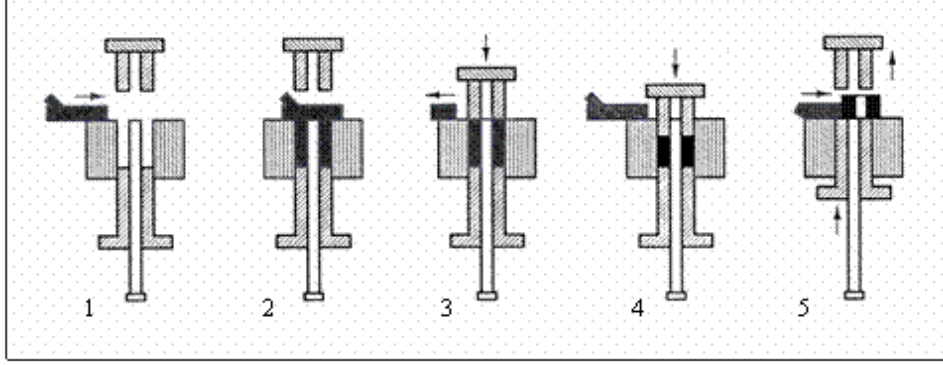
1. Sıkıştırma basıncının ilk uygulanmasına müteakip parçacıkların yer değiştirmesi ve yeniden pozisyon belirlemesi gerçekleşir. Plastik şekil değiştirme yoktur. Kısmi olarak bazı parçacıklarda mekaniksel kırılmalar olabilir. Bu aşamada parçacık boyutu, toz boyut dağılımı, parçacık şekli ve yüzey özellikleri ile parçacıklar arası sürtünme önemli rol oynar.

2. Toz sıkıştırmanın ikinci aşamasında elastik ve plastik deformasyon faktörleri baskındır. Bu aşamada parçacıklar arası soğuk şekillendirmeye bağlı bağlar oluşabilir. Ayrıca parçacıkların mekaniksel kilitlemeleri ile parçacık-parçacık etkileşimleri bu aşamada önem kazanan durumlardır.

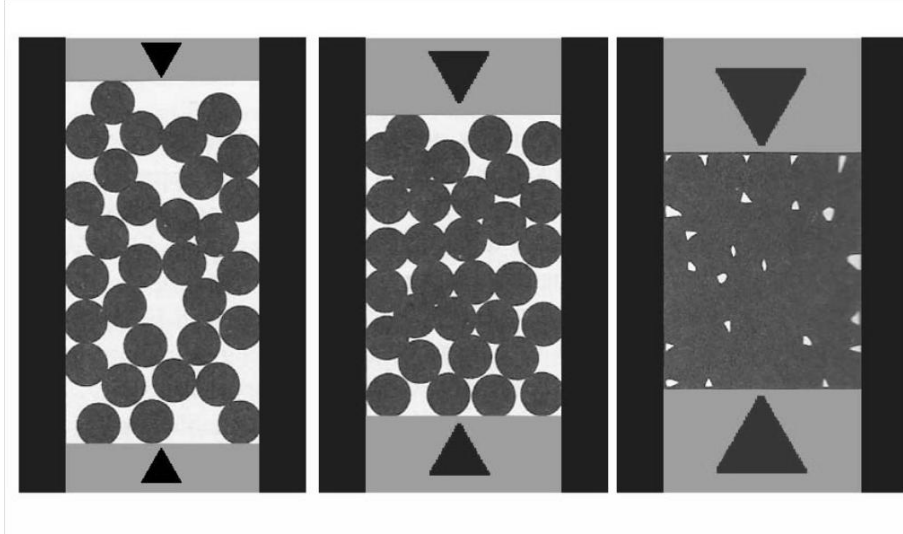
3. Presleme basıncının arttığı sıkıştırmanın son aşamasında toz parçacıklarının kırılması ve plastik deformasyon ile boşlukların doldurulması sağlanmış olur. Bu aşamada toz parçacıkları arasında soğuk kaynak olabilir [58].

Kalıp içerisindeki tozun başlangıç yüksekliği (ki bu tozun şekli ve tane boyutu dağılımı ile ilgilidir) sıkıştırılabilirliğinde belirleyici rol oynar. Tozun kalıp içerisine sorunsuz ve hızlı akması da önemlidir. Toz boyutu ve şekli tozun kalıba akış hızına da önemli derecede etki eder. Örneğin toz tanelerinin çok ince oluşu toz akış hızının ve basma

yoğunluğun düşük olmasına neden olur. Toz dağılımı ise kalıpta basılan tozun yoğunluk dağılımının homojen olup olmamasına etki eder. Bununla birlikte ortalama tane boyutu küçük olan toz malzemelerin sıkıştırılabilirliği yüksektir.



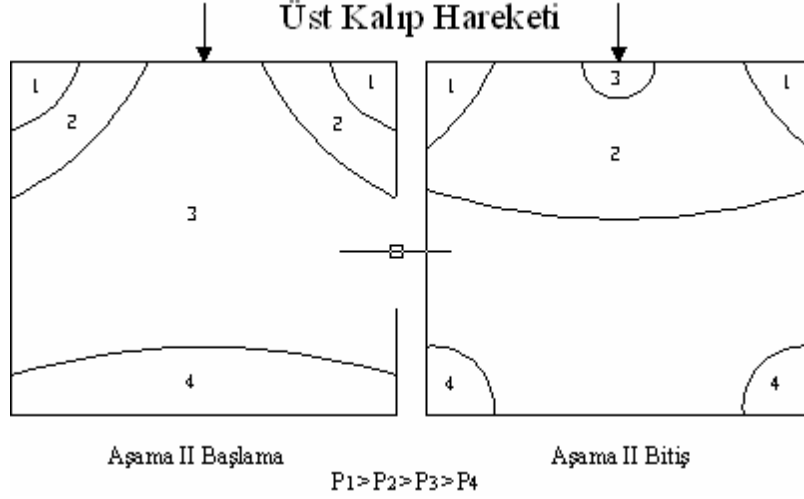
Şekil 1.22. Presleme işleminin basamakları; 1. İşlem başlangıcı, 2. Toz doldurma, 3. Presleme başlangıcı, 4. Preslemenin bitişi, 5. Preslenmiş parçanın çıkarılması.



Şekil 1.23. Presleme işleminde aşamalar [55].

Tozlar bir metal kalıba dolduruldukları zaman belirli bir yoğunluk alırlar. Bu görünür yoğunluk toz şekline, tane büyüklüğüne ve dağılımına, katkı maddelerine ve kısmen de kalıp şekline bağlıdır. Basınç arttıkça, kompakt yoğunluğu da artar veya alternatif olarak gözeneklilik azalır. Sonuç olarak tozlarda, uygulanan yükten dolayı deformasyonla birlikte ham yoğunluk meydana gelir. Pişirme öncesi ham yoğunluğun, kompaktın elle

taşınabilmesi (dağılmaması) yeterli olmaktadır. Şekil 1.24’de tek eksenli kalıpta preslenen kompaktta meydana gelen yoğunluk dağılımı görülmektedir [33].



Şekil 1.24. Tek etkili presle imal edilmiş parçada yoğunluk dağılımı [33].

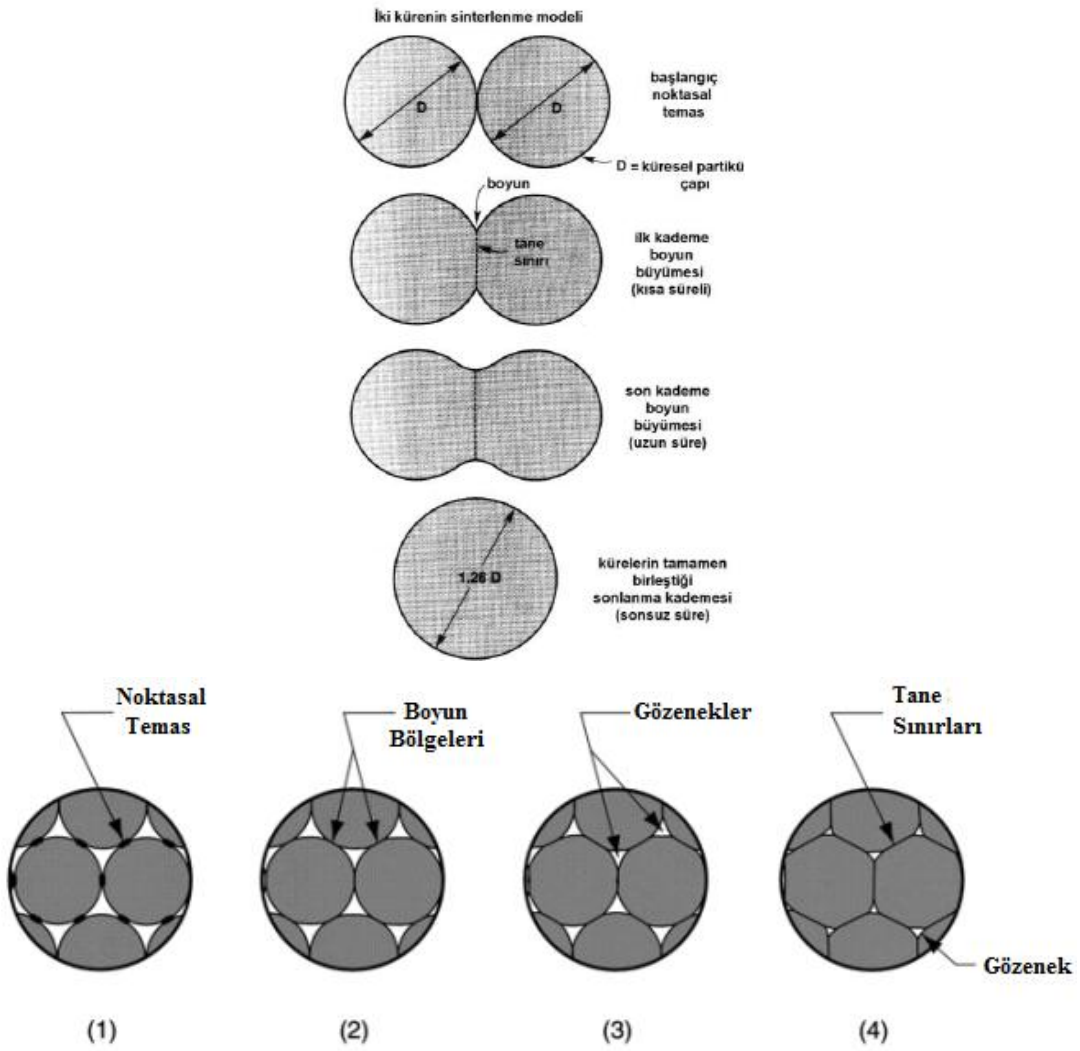
Tozlar basınç uygulandığında; önce parçacıklar birbiri üzerinde kayarak ve daha sonra da yüksek basınçlarda parçacığın şekil değiştirmesiyle yoğunlaştırılırlar. Şekil 1.24’de görüldüğü gibi, yoğunluk artışı düşük basınçlarda önce hızlıdır, fakat gözenekler kapandıkça toz, yoğunlaşmaya karşı artarak direnç gösterir. Çok tabidir ki parçacık sertliği sıkıştırma için önemli bir parametredir [59].

1.5.2.2.4. Sinterleme

Sinterleme, preslenmiş malzemelere uygulanan ısı bir operasyon olarak tanımlanacağı gibi, presleme esnasında şekillendirilen parçaya uygulanan bir işlem olarak tanımlanabilmektedir. Sinterlemede amaç; difüzyon, basınç ve ısının tesiriyle, cismin bünyesinde mevcut olan boşluğun ortadan kaldırılmasıdır. Sinterlenen malzemenin üstün özelliklere sahip olabilmesi için, bünyesinde bulunan boşluğun, olabildiğince sıfıra yaklaşması gerekmektedir. Sinterleme mekanizması, tamamen ısı ve kütle taşınım olayına dayanmaktadır. Kütle taşınımını kolaylaştırmak için mümkün olduğu kadar yüksek sıcaklıklarda çalışılmalıdır. Sinterlenmeyi sağlayan itici güç; yüksek sıcaklıklarda yüzey enerjisinde meydana gelen azalmadır. Yüzey enerjisinde azalma meydana geldikçe difüzyon hızı artar ve özellikle karşılıklı atomların difüzyonu şeklinde olmak üzere,

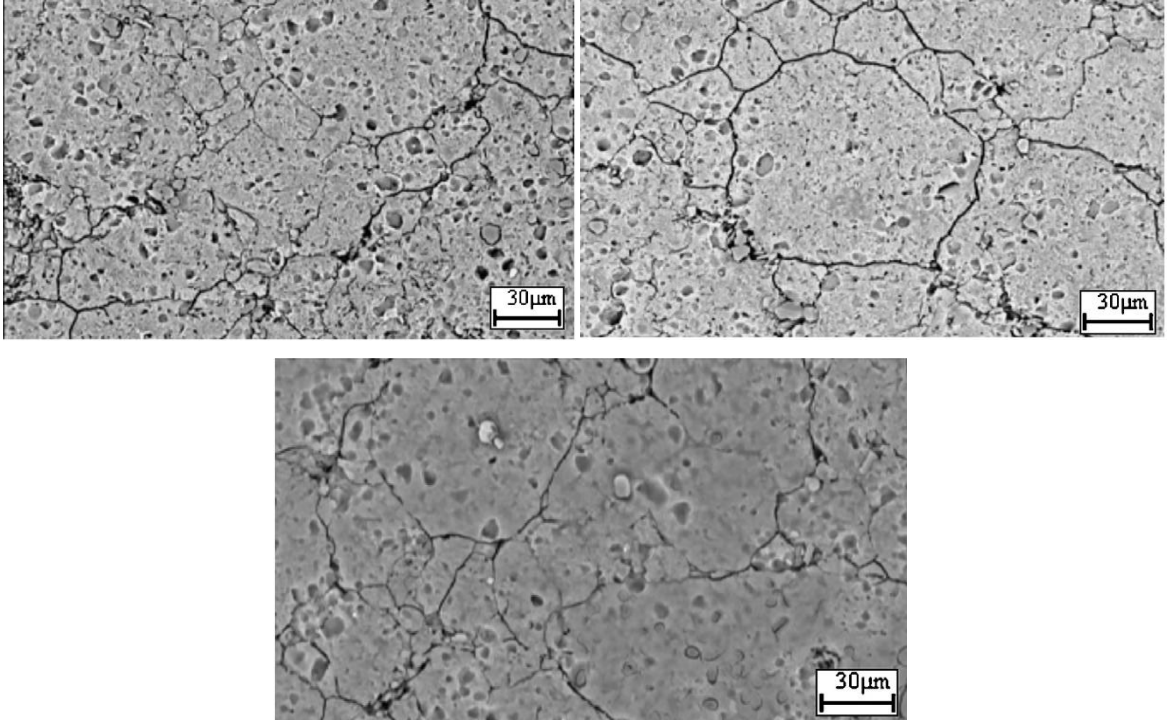
birbirleriyle temas halinde olan tozlar arasında bir boyun bölgesi oluşur ve tozlar birbirine nüfuz eder [60].

Şekil 1.25’de görüldüğü gibi başlangıç durumunda sıkıştırılmış tozlar arasında temas noktaları mevcuttur. Sıkıştırılmış her parçacıkta buna benzer birçok temas noktası vardır. Sinterleme işlemi ile birlikte parçacıklar arasındaki bağlar genişler ve boyun oluşumu başlar. Her bir temas noktasında katı-buhar ara yüzeyi yerine bir tane sınırı büyür. Sinterleme işleminin son aşamasında ise iki parçacık tamamen birleşerek tek bir tanenin oluşumu sağlanır. Aşağıdaki şekil 1.25 bu oluşumu çok iyi bir şekilde açıklamaktadır [59].



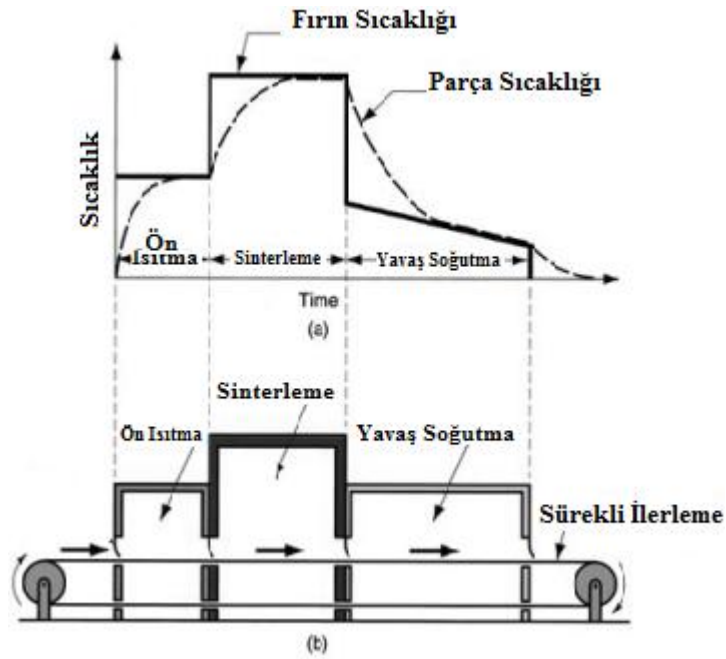
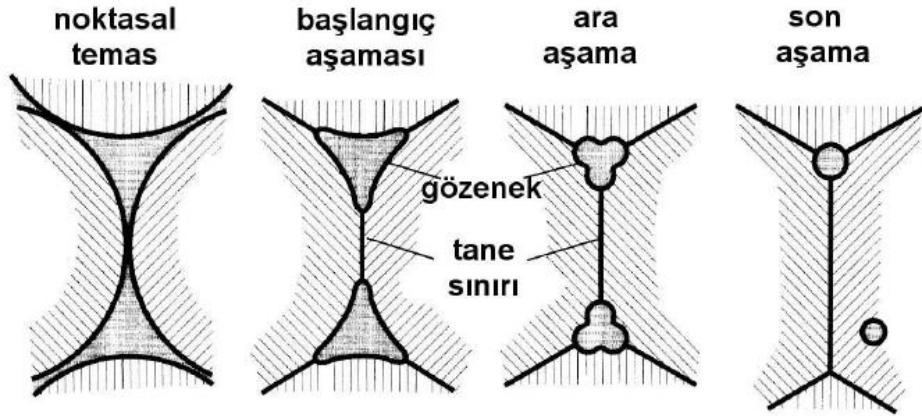
Şekil 1.25. Mikroskopik ölçekte sinterleme: (1) parçacık bağları, temas noktalarında başlar; (2) temas noktaları “boyun” halinde büyür; (3) parçacıklar arasındaki gözenekler, boyut olarak küçülür; ve (4) boyun oluşan bölgelerde tane sınırları oluşur

Sinterleme, malzemenin cinsine, numunenin şekline ve büyüklüğüne bağlı olarak değişik metodlarla gerçekleştirilebilir. Sinterleme metodları, genel olarak; katı, sıvı ve reaksiyon sinterlemesi olarak üç grupta toplanmıştır. Ayrıca sinterleme sıcaklığı, sinterleme atmosferi, sinterleme süresi gibi sinterleme parametreleri de sinterleme sonucunu etkileyen önemli faktörlerdendir.



Şekil 1.26. Farklı sinterleme sürelerinin kompozit mikroyapısına etkisi [61].

Sinterlemenin temel amacı kompakt malzemedeki porozitelerin azaltılmasıdır. Sinterleme, genel olarak $T > 0,5T_m$ (ergime sıcaklığı) olacak sıcaklıklarda toz kompaktlara ısı işlem uygulanmasına denir. Uygulanan sıcaklıklarda difüzyon kontrollü kütle taşınımının meydana gelmesidir. Ancak sinterleme bölgesel olarak sadece tanelerin temas eden yüzeylerinde meydana gelmektedir [55].



Şekil 1.27. a) Sinterlemede tipik ısıl işlem çevrimi, (b) bir sürekli sinterleme fırınının şematik enine kesit [59].

1.6. Mekanik Alaşımlama

Mekanik alaşımlama yöntemi, karıştırılmış yâda ön alaşımlanmış başlangıç tozlarından kararlı yâda yarı kararlı fazların sentezlenebildiği, nano-kristalli ve amorf yapıların üretilebildiği katı-faz toz üretim tekniğidir [62-66]. Yüksek enerjili öğütme işleminin kullanıldığı mekanik alaşımlama işlemi oksit indirgeme ve son zamanlarda da kaplama işlemi olarak da kullanılmaktadır [67-69]. Klasik alaşımlama işlemleri sırasında karşılaşılan ergime problemleri, istenmeyen reaksiyonların oluşumu, takviye elamanı ve

matris arasındaki ıslatma problemleri ve takviye elemanının heterojen dağılımı gibi problemler mekanik alaşımlama yöntemi ile ortadan kaldırılabılır [70-72]. Aynı zamanda ekonomik ve uygulama alanının geniş olması büyük avantajlar sağlar. Bunların başında birbiri ile karışmayan elementlerin karıştırılabilmesi gelir. Bunu başka tekniklerle gerçekleştirmek mümkün değildir. MA sistemi sırasında meydana gelen karışım katı-katı bir karışım olduğu için denge diyagramlarının belirlediği şartların dışına çıkılabilir. Mekanik Alaşımlamanın tarihçesi gözden geçirildiğinde, ihtiyaçların karşılanmasında teknolojinin paralel bir gelişim gösterdiği tespit edilebilir. 1966 yılında John Benjamin ve arkadaşları (P.D. Merica Res. Lab. of the Nichel Comp Inco) tarafından geliştirilen bir yöntemdir. MA sayesinde yüksek sıcaklık dayanımlı oksit parçacıklarıyla takviye edilmiş Ni bazlı süper alaşımlar üretilmiştir. Uygulama sonrası elde edilen malzemelerle gaz türbinleri için arzu edilen özelliklerin sağlanması amaçlanmıştır. Aynı ekip, 1970'lerde farklı denemeler sonucunda bilyalı öğütme tekniği ilke en uygun sonuçları almıştır. Çünkü bu metod sayesinde parçacıkların yüksek deformasyonundan dolayı kırılması ve tekrar soğuk kaynaklanması işleminin ardışıklığı, ince parçacıkların üretilmesine imkan vermektedir. Oksit dağılımıyla güçlendirilmiş (ODS) süper alaşımlarda sürünme dayanımı oldukça iyidir. ODS ile üretilen ilk nikel bazlı alaşım 1977 yılında bir motorda kullanılmıştır. MA yönteminin gelişmesiyle birlikte kullanım alanları yaygınlaşmıştır. En başta bu gelişmenin öncü sektörleri havacılık sanayi ve otomobil endüstrisi olmuştur.

Mekanik alaşımlama yöntemi ile ihtiyaç duyulan hafif, mukavemetli, korozyon direnci yüksek ve yüksek sıcaklık performansı artırılmış malzeme üretimi mümkündür. Bu sektörel ihtiyaç artışı 1970'lerin sonu ve 80'lerin başında özellikle Al gibi hafif malzemeler üzerinde yapılan çalışmalara ağırlık verilmesine neden olmuştur. 1980'lerin başlarında, amorf yapılı intermetaliklerin öğütülmesi, Ni-Nb gibi tozların karıştırılması ve daha sonra yarı kararlı sistemlerin geliştirilmesi sağlanmıştır. 1980'lerin sonlarına doğru yapılan araştırmalarda, amorf yapılı malzemelere, farklı alaşımların sentezlenmesi, aşırı doymuş katı çözeltilere, ikincil ara fazların üretimi gibi konulara ağırlık verilmiştir. 1990'ların başlarında Al-Ti alaşımlarının geliştirilmesinden sonra genellikle farklı alaşımların geliştirilmesi yerine, işlem basamaklarının ve MA sonrası uygulanan işlemlerle yapısal değişiklikler sağlayan çalışmalara hız verilmiştir [73]. Günümüzde ise mekanik alaşımlama yöntemi nano parçacıklar, kompozit ve nanokompozit malzemeler gibi ileri mühendislik uygulamalarının vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir [74, 75, 76, 77].

1.6.1. Mekanik Alaşımrama İşlemi

Mekanik alaşımrama yâda yüksek enerjili öğütme işlemi bilyeli değirmen içerisinde tozların sürekli olarak kırılma ve soğuk kaynak işlemlerinin tekrarlanmasını içeren bir katı faz işlemidir. Bu işlem, tane boyutunun küçültülmesine, takviye malzemelerinin matris içerisinde homojen dağıtılmasına, katı çözünürlüğünün artırılmasına, yarı kararlı ve amorf fazların oluşmasına imkân sağlar. Yüksek enerjili öğütme de dışarıdan hiçbir etki olmaksızın yeni fazlar oluşabilir. Öğütme sırasında oluşan iki önemli olay toz karakterizasyonunu önemli ölçüde etkiler, birincisi; ortalama toz boyutunu artıran soğuk kaynak işlemi diğeri ise tozların küçülmesini sağlayan kırılma işlemidir. Yüksek enerjili öğütmede bilyeler birbirlerine veya öğütme potası yüzeylerine çarparlar. Bu çarpışmalar esnasında bilye-bilye veya bilye-öğütme potası arasında kalan tozlar plastik deformasyona uğrayarak ya birbirlerine kaynak olurlar yâda kırılırlar.

Yüksek enerjili öğütmeyi etkileyen birçok değişken vardır. Bunların en önemlileri; öğütme hızı, toz-bilye ağırlık oranı, işlem kontrol katkısı oranıdır. Bunlardan başka öğütme ortamının büyüklüğü, bilye çapı, öğütme ortamı sıcaklığı ve öğütme ortamı gibi değişkenler de vardır.

Yüksek enerjili öğütme de soğuk kaynak ve kırılma olaylarının dengede olması işlemin başarılı olmasını sağlar. Birçok malzeme sistemlerinde kırılma ve soğuk kaynak işlemleri arasında denge oluşturulması çok zordur. Bu nedenle bu tür sistemlere yağlayıcı bir malzeme olan işlem kontrol katkısı (İKK) katılır. İşlem kontrol katkısı hem tozların birbirine aşırı soğuk kaynağını engeller hem de tozların öğütme potası ve bilye yüzeylerine yapışmasını önleyerek öğütme veriminin düşmesini engeller [10-12]. Alüminyum gibi sünek malzemelerin İKK olmaksızın öğütülmeleri imkânsızdır. Metanol, stearik asit, ve etanol en çok kullanılan işlem kontrol katkısı malzemeleridir [66].

1.6.2. Mekanik Alaşımramanın Avantajları

Mekanik alaşımrama yöntemi, deneysel ve üretim süreçleri olarak tüm ikili, üçlü ve çoklu sistemlere kolaylıkla uygulanabilmektedir. Bu yüzden MA tekniği üretim ve ticari anlamda çeşitli avantajlar sunmaktadır [4]. Bu avantajlar şu şekilde sıralanabilir;

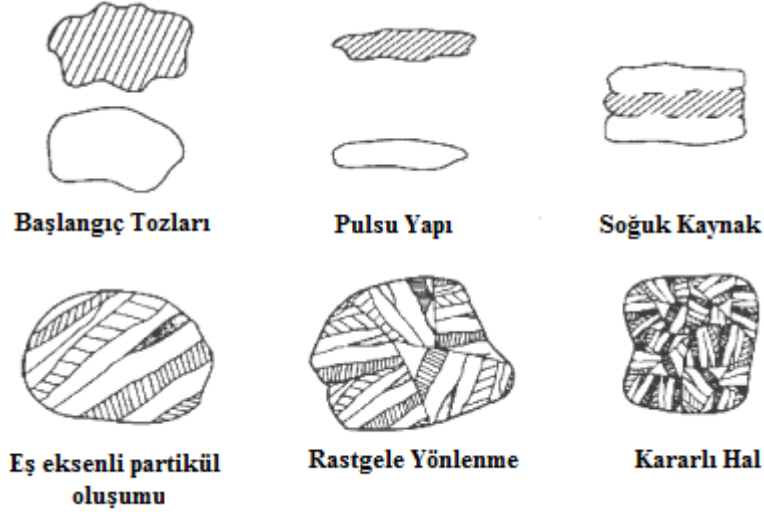
- 1-MA işlemleri, bir katı hal işlemleri olmasından dolayı, normal ergitme teknikleriyle üretilmesi zor ve/veya olanaksız olan elementlerin (WC-Co gibi) üretilmesi,
- 2-Birbiri içinde sıvı fazda (Cu-Pb) veya katı fazda (Fe-Cu) çözünmeyen elementlerin alaşımlanması,
- 3-Oldukça farklı ergime sıcaklığına sahip malzemelerden intermetaliklerin üretilmesi,
- 4-Katı-sıvı-gaz şeklinde alaşımlama sırasında oksit, nitrür ve karbürlerin takviye edilebilmesi,
- 5-MA ile elde edilen tozların yapısında tamamen homojenlik sağlanabilmesi,
- 6-Korozyon ve aşınma direnci yüksek, termal kararlılığı gelişmiş uygun malzeme üretilmesi,
- 7-Bir seferde oldukça fazla miktarda tozun üretilmesi ve alaşımlanması,
- 8-Sinterleme ile birlikte kritik sıcaklıklarda ısıl işlem imkanı sağlanması,
- 9-Nano kristalli malzemelerin üretimine elverişlilik
- 10-İstenilen reaksiyonları oluşturması veya hızlandırması,
- 11-Presleme ve sinterleme işlemleriyle %100'e yakın yoğunlukta parça üretilmesi.

1.6.3. Öğütme Sistemi

Mekanik alaşımlama işleminde üç tür öğütme sistemi mevcuttur; Sünek-Sünek sistem, Sünek-Gevrek sistem ve Gevrek-Gevrek sistem.

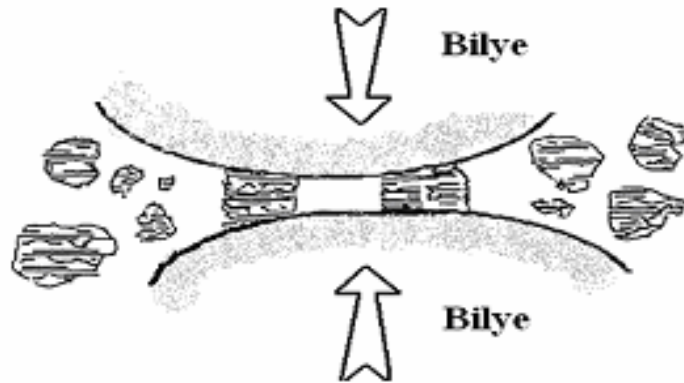
1.6.3.1. Sünek-Sünek sistem

Mekanik alaşımlama işleminde kullanılan tozlardan en az bir tanesi kaynaklaşmayı kolaylaştırmak amacıyla yumuşak olmalıdır. Mekanik alaşımlanan başlangıç tozları ve bu tozların alaşımlama boyunca deformasyon karakteristikleri şekil 1. 28'de gösterilmiştir.



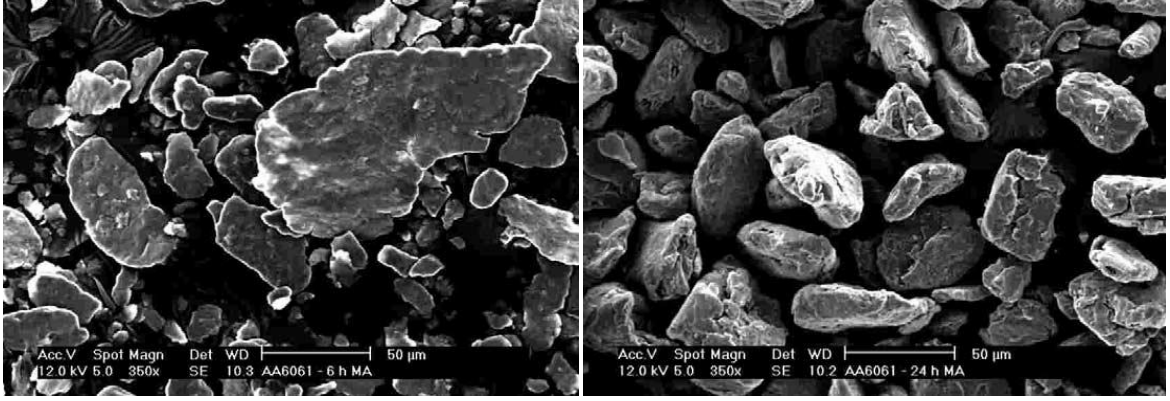
Şekil 1.28. Sünek-Sünek sistemde mekanik alaşımlama safhalarının gelişimi [78].

Öğütme işlemi sırasında bilyelerin birbirleriyle çarpışması sırasında bilyelerin merkezleri doğrultusunda arada kalan tozlar, darbe etkisiyle plastik deformasyona maruz kalırlar. Bunun sonucunda tozlarda ezilme olur ve tozlar lamelleşirler. Bu durum şekil 1.29'da gösterilmiştir. Bu çarpışmalar esnasında arada kalan toza bir miktar darbe enerjisi yüklenir. Yüklenen darbe enerjisi sebebiyle toz parçacıkları levhalaşır, birbiriyle kaynaklaşır, kırılır ve tekrar kaynaklaşır. Bu darbe kuvveti toz parçacıklarını deformasyona uğratarak sertleşmelerine ve kırılmalarına sebep olur.



Şekil 1.29. Mekanik alaşımlama esnasında bilye-toz-bilye çarpışması [79].

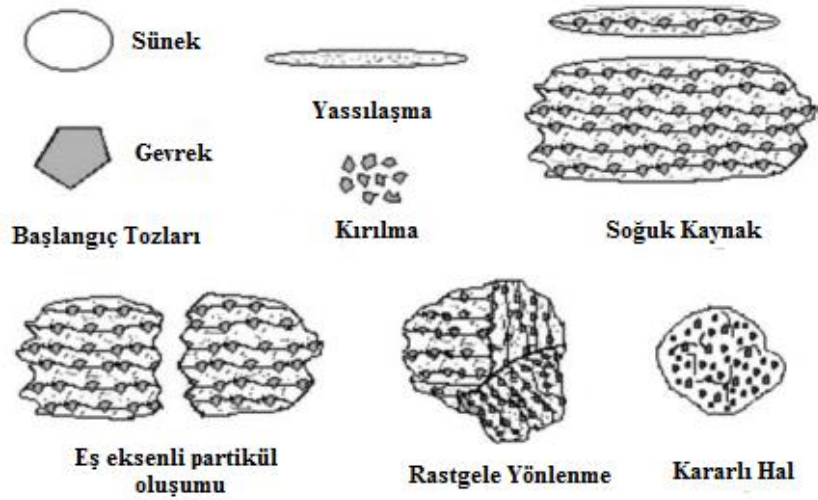
Öğütmenin ilk aşamalarında toz parçacıkları yumuşaktır (eğer sünek-sünek veya sünek- gevrek toz kombinasyonları kullanılıyorsa) ve birbirleriyle kaynaklaşarak büyük toz parçacıkları oluşturma eğilimleri yüksektir. Bu aşamada parçacık boyutu büyüyerek başlangıç parçacık boyutunun üç katına kadar ulaşabilir. Bu durumu kontrol etmek amacıyla bileşime işlem kontrol elemanları (Process Control Agent-PCA) ilave edilir. Öğütmenin bu aşamasında kompozit parçacıklar başlangıç toz karışımlarının çeşitli kombinasyonlarını içeren tabakalaşmış bir yapıya sahiptir. Devam eden deformasyonlarla birlikte, bir yorulma mekanizmasıyla ve/veya kırılma levhalaşmış toz parçacıklarının tekrar kırılmasıyla sertleşme devam eder. Güçlü aglomerasyon kuvvetlerinin olmaması durumunda bu mekanizmanın oluşturduğu toz parçacıklarının boyutu azalmaya devam eder. Öğütücü bilyelerin devam eden darbe etkisinden dolayı, parçacıkların yapısı kararlı ve başlangıç kompozisyonu açısından homojen bir hale dönüşür. Fakat parçacık boyutu aynı kalmaya devam eder. Neticede, her bir toz parçacığı içerisinde bulunan alaşım tabakaları arasındaki boşluklar azalırken, aynı zamanda bu alaşım tabakalarının sayısı artar. Belirli bir süre öğütmenin ardından, ortalama parçacık boyutunu arttıran kaynaklaşma ve ortalama kompozit parçacık boyutunu azaltan kırılma miktarları arasında bir dengeye varıldığında kararlı hal durumuna ulaşılır. Kararlı asamaya gelinceye kadar mekanik alaşımlama sırasında toz parçacıkları ağır bir deformasyona maruz kalırlar. Toz parçacıklarındaki dislokasyonlar, boşluklar ve tane sınırlarındaki artma gibi pek çok kristal hatalarının varlığı bu durumu açıklamaktadır. Bu kusurların varlığı bir katı hal çözeltisini oluşturacak olan element veya elementlerin matris içerisine difüzyonunu arttırır. Devam eden mekanik alaşımlamayla birlikte, homojen ve incelen mikro yapı sebebiyle difüzyon mesafeleri azalır. Bununla beraber, öğütme sırasındaki çok az sıcaklık artışı difüzyona yardımcı olur ve sonuçta bileşenler arasında gerçek alaşımlama ortaya çıkar [80]. Şekil 1.30'da Al6061 alaşımının farklı öğütme sürelerindeki toz morfolojisi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi 6 saat sonunda pulsu bir morfoloji oluşurken 24 saat sonunda eş eksenli bir morfoloji mevcuttur.



Şekil 1.30. Al 6061 alaşım tozlarının 6 ve 24 saatlik öğütme sonundaki morfolojileri [81]

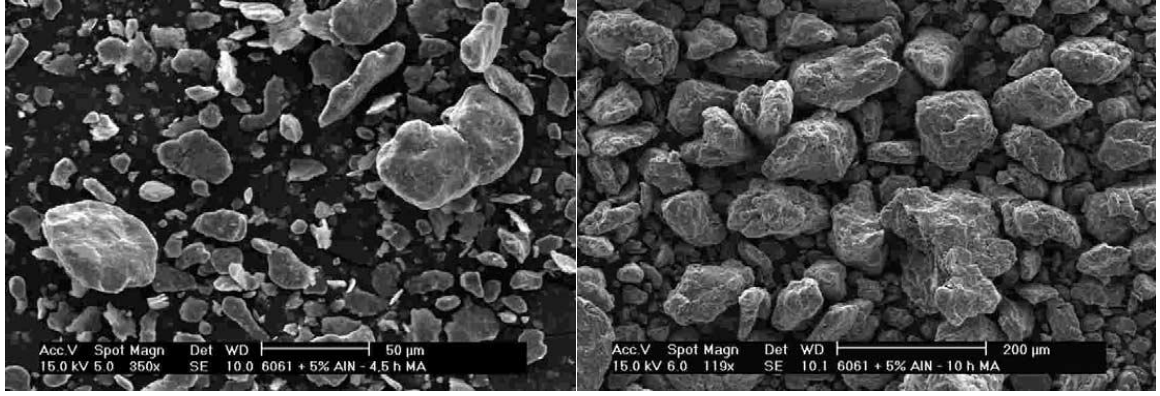
1.6.3.2. Sünek-Gevrek Sistem

Sünek-Gevrek sistemde ilk olarak sünek metal tozları bilye-toz-bilye çarpışmaları ile pulsu hale gelirken gevrek parçacıklar ise kırılırlar. Kırılan gevrek parçacıklar sünek bileşen içersine gömülürler. Gevrek bileşenler tabakalar arası boşluk boyunca yerleşirler. İlerleyen öğütme süreleri sonucunda tozlar deformasyon sertleşmesine uğrar tabakalar çoğalır ve daha küçük boyutlara inerler. Devam eden öğütme ile tabakalar daha da küçülür tabakalar arası boşluk artar ve gevrek parçacıklar eğer çözünemezse düzenli olarak sünek matrise dağılırlar [2].



Şekil 1. 31. Sünek-Gevrek sistemde mekanik alaşımlama safhalarının gelişimi [81, 82].

Şekilde görüldüğü gibi gevrek parçacıkları içeren sistemlerde kırılma etkinliği daha fazla olmakta ve sistem eş eksenli morfolojiye daha erken saatlerde ulaşmaktadır.



Şekil 1. 32. Al6061-%5AlN karışım tozlarının 4.5 ve 10 saatlik öğütme sonundaki morfolojileri [81].

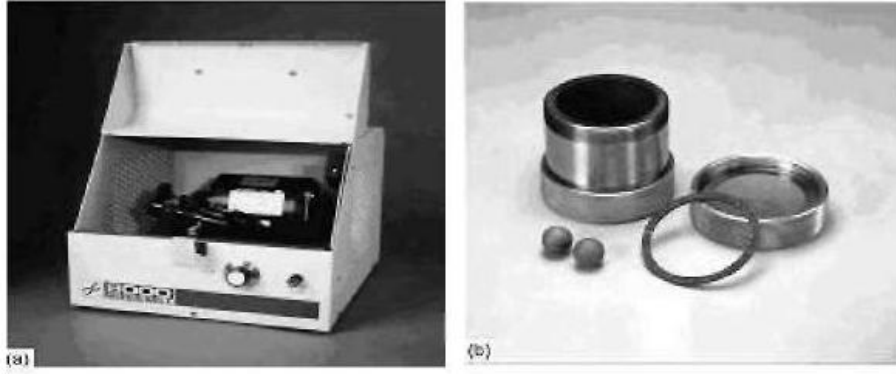
1.6.3.3. Gevrek-Gevrek Sistem

İki veya daha fazla gevrek malzemeden oluşan bir sistemde alaşımlamanın olması beklenmeyebilir. Çünkü sünek bileşenin olmaması herhangi bir kaynaklanmayı engeller ve bunun olmadığı durumda da alaşımlamanın olması beklenmez. Bununla beraber, Si-Ge ve Mn-Bi gibi bazı gevrek-gevrek sistemlerde alaşımlamanın olduğu da belirlenmiştir. Gevrek tozlar, öğütme sırasında parçalanır ve parçacık boyutları sürekli azalır. Bununla beraber çok küçük boyutlardaki toz parçacıklar sünek bir davranış gösterir ve daha sonra boyut azalması mümkün değildir. Bu ufalanma sınırı olarak adlandırılır. Gevrek malzemelerin öğütülmesi sırasında, malzeme transferine katkıda bulunan muhtemel mekanizmalar; sıcaklık artışı, hatasız yapıda mikro deformasyon, yüzey deformasyonu ve/veya öğütme sırasında tozlarda hidrostatik gerilim durumuyla oluşabilen plastik deformasyonu içerir [83].

1.6.4. Öğütücü Türleri

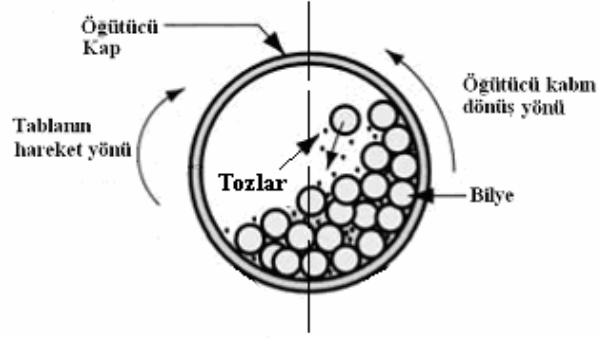
MA'nın önemli bir kısmını teşkil eden öğütme işlemi, tane boyutunu küçültme, harmanlama ve alaşımlama gibi evreleri kapsar. Bu aşamalarda amaca yönelik çok çeşitli öğütücüler kullanılır. Öğütücüler ve/veya değirmenler kapasiteleriyle, öğütme

etkinlikleriyle, soğutma ve ısıtma gibi ek üniteleriyle farklılık gösterirler. SPEX tipi değirmenler bir kerde yaklaşık 10-20 gr arasında toz öğütebilen ve laboratuvar çalışmaları için kullanılan öğütücü türüdür. Sahip oldukları hazne, tozu ve öğütme bilyelerini tutar ve dakikada birkaç bin defa ileri-geri ve sağa-sola hareket ile çalışır. Haznenin her salınımıyla bilyeler tozlara çarpar ve haznedeki tozu hem öğütür hem de karıştırır. Bilyelerin çarpma kuvveti oldukça büyüktür. Bu yüzden bu değirmenler yüksek enerjili değirmen olarak düşünülebilir. En son tasarlanan değirmenler, öğütülen miktarı artırmak için tozu eş zamanlı olarak iki haznede öğütme imkânına sahiptirler. Yüksek enerjiden kaynaklanan sıcaklık artışı ve koruyucu atmosfer karşılaşılan temel problemlerdir [84]. Şekil 2.34'de SPEX değirmen ve öğütme kabı, kapak, conta ve bilyelerden oluşan öğütme seti görünmektedir.



Şekil 1.33. SPEX tipi karıştırıcı, (a) SPEX bilyeli değirmen, (b) SPEX 8000 tipi karıştırıcıya ait öğütme kabı, kapak, conta ve bilyeler

Mekanik alaşımlama için kullanılan bir diğer öğütücü tipi ise planet (gezegen) tip bilyeli öğütücülerdir. Bu öğütücüler bir defada birkaç yüz gram tozu öğütebilmektedirler. Bu öğütücülerin kapları gezegen benzeri hareket yaptıklarından dolayı adlarını da buradan almışlardır. Bu kaplar dönen bir taşıyıcı disk üzerine yerleştirilmiş ve özel bir mekanizma tarafından döndürülen bu disk üzerinde ve kendi merkezlerinde dönmektedirler. Hem taşıyıcı diskin oluşturduğu hem de kendi merkezinde dönmekte olan öğütücü kabın oluşturduğu merkez kaç kuvveti sebebiyle öğütme kabının içerisindeki ana malzeme ve öğütücü bilyeler hareketlenmektedir [80]. Planet (gezegen) tip bilyeli öğütücülerde öğütme kabının hareketi şekil 1.34'de verilmiştir. Şekil 1.35'de ise gezegen tip bilyeli öğütücü ve alaşımlama kapları görülmektedir.

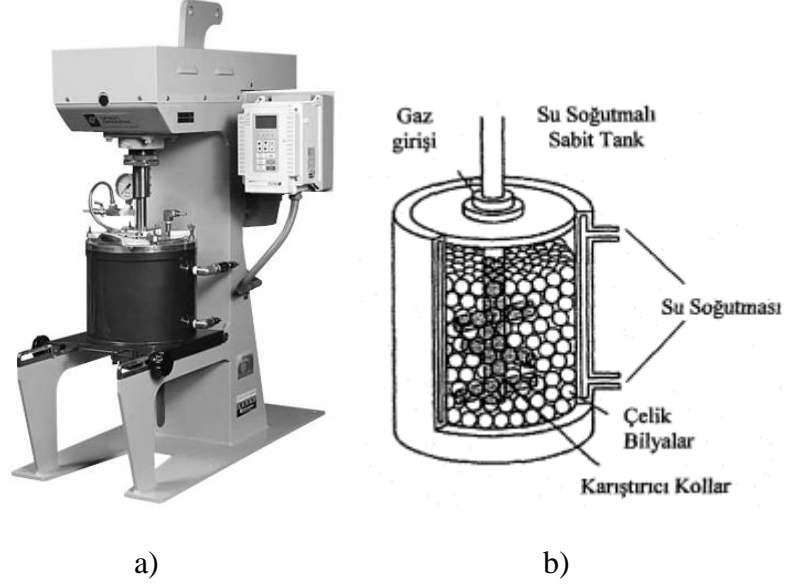


Şekil 1. 34. Planetary tip bilyeli öğütücülerde bilye-toz etkileşimi



Şekil 1.35. Planeter tip (Fritsch marka) bilyeli öğütücü ve öğütme kabı ve bilyeler.

Yukarıda bahsedilen öğütücü tiplerinden farklı olarak 0,5 kg ‘dan 40 kg kadar toz öğülebilen atritör öğütücüler mekanik alaşımlama işleminde kullanılan öğütücü tiplerinden biridir. Tipik bir atritör haznesi yarıya kadar küçük bilyelerle dolu, karıştırıcı kolları kendi eksenini etrafında dönen ve haznesinde atmosfer kontrolü sağlanabilen bir yapıya sahiptir. Karıştırıcı kolların bulunduğu mil döndükçe bilyeler metal tozlarına ve alaşımlama haznesinin iç cidarına çarparlar [80]. Şekil 1.36’da Unionprocess firmasının üretimi olan bir atritör görülmektedir.



Şekil 1.36. a) Atritör cihazı b) çalışma prensibini gösteren şematik resim

1.6.5. İşlem Parametreleri

Mekanik alaşımlama işleminde istenilen sonuca ulaşmak için işlem parametrelerini en iyi şekilde seçmek gereklidir. Bununla birlikte çok sayıda işlem parametresinin olması mekanik alaşımlama işlemi hakkında iyi bir bilgi birikimi ve tecrübe gerektirir. Bu parametreleri sıralayacak olursak

- 1-Değirmen Tipi
- 2- Öğütücü Kap
- 3- Öğütme Hızı
- 4- Öğütme Zamanı
- 5- Bilye-toz ağırlık oranı (BPR)
- 6- Öğütücü kap doluluk oranı
- 7- İşlem Kontrol Katkısı (PCA)
- 8- Öğütücü bilyelerin cinsi ve boyutu

9- Öğütme atmosferi

10- Öğütme sıcaklığı

Bu değişkenler az yâda çok birbiri ile ilgilidir ve mekanik alaşımlama sisteminde kararlı hale ulaşmada bütün parametreler düşünülerek işleme başlanmalıdır. Örneğin ulaşılmak istenen parçacık boyutu için bilye çapı optimum değerinde alınmamışsa ne kadar öğütme yapılırsa yapılsın istenilen boyuta ulaşılamayacaktır. Yine işlem kontrol katkısı miktarı optimum miktarda ayarlanmamışsa sistem ya boşta çalışacak yada en kısa sürede kırılan parçacık yüzeyleri tarafından emilerek etkisini kaybedecek ve soğuk kaynak işleme hakim olacaktır. Öğütme hızı açısından düşünecek olursak diğer parametreler en iyi şekilde ayarlanıp öğütme hızı düşük seçilecek olursa bu seferde uzun öğütme süreleri sonunda istenilen toz özelliklerine ulaşılabilecektir. Sonuç olarak mekanik alaşımlama işleminin sahip olduğu değişkenlerin çokluğu elde edilecek bilimsel veri sayısını artırabileceği gibi verimsiz çalışmalara da neden olabilir.

1.6.5.1. Değirmen Tipi

Mekanik alaşımlama yapmak için çeşitli türde değirmenler kullanılmaktadır. Bu değirmenler; kapasitelerini, işlem hızlarını ve öğütme sıcaklığını değiştirerek işlemi kontrol etme ve tozların kirlenmesini azaltma kabiliyetlerine göre farklılık gösterir. Toz çeşidine, tozun miktarına ve gerekli olan son içeriğine bağlı olarak, uygun bir değirmen seçilebilir. Özellikle, üretilecek tozun oksitlenme karakteristiğine bağlı olarak kullanılacak olan atmosferin seçimi çok önemlidir. Genellikle, SPEX türü karıştırıcı değirmenler fazla miktarda alaşımlanmış toz üretiminde kullanılırlar [83]. Bundan başka, önceki bölümde anlatıldığı gibi ticari ve farklı amaçlara yönelik değişik tasarımlı değirmenlerde bulunmaktadır.

1.6.5.2. Öğütücü Kap

Öğütülecek malzemelerin öğütme kabının iç duvarlarını aşındırması durumunda malzeme kirliliği oluşabilir. Bu durumu engellemek için öğütücü kap malzemesi çok önemlidir. Öğütücü kap aşınması tozu kirletebilir yada kimyasını değiştirebilir. Örneğin;

bakır kap içersinde Cu-In-Ga-Se toz karışımının öğütülmesi boyunca, üretilen tozun içindeki bakır miktarı, başlangıçtaki miktardan daha yüksektir. Bu durum öğütücü kap ve aşındırıcı bilyelerden dolayı tozun içersine bakır tozlarının karışmasından dolayıdır. Öğütücü kap malzemelerine bakacak olursak sertleştirilmiş çelik, takım çeliği, temperlenmiş çelik, paslanmaz çelik, WC-Co gibi malzemeler yaygın olarak kullanılan malzemelerdir [84].

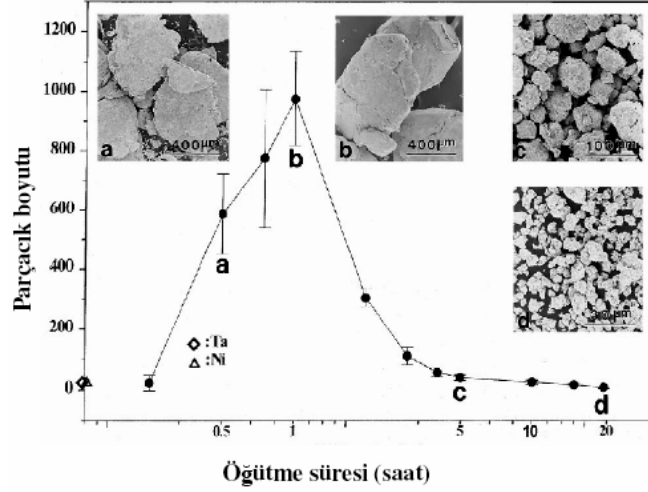
1.6.5.3. Öğütme Hızı

Mekanik alaşımlama işleminde en önemli etkenlerden biri öğütme hızıdır. Bilye çarpışmaları ile parçacıkların maruz kaldığı aşırı plastik deformasyon parçacıkların birbiri ile soğuk kaynak olması ve kırılmasını sağlamaktadır [85]. Bu da ancak optimum bir öğütme hızı ile sağlanabilir. Değirmen dönme hızı arttıkça toza aktarılan enerjinin daha fazla olacağı açıktır. Ancak, değirmen tasarımına bağlı olarak ulaşılabilecek maksimum hızda, belirli sınırlamalar vardır. Örneğin, geleneksel bilyeli değirmenlerde artan dönme hızına paralel olarak bilyeler haznenin iç duvarına yapışır ve darbe kuvveti oluşturmak için aşağı düşmezler. Bu yüzden, kullanılan maksimum hız kritik hızdan biraz az olmalıdır ki, bilyeler etkin biçimde çarpışma enerjisi oluşturmak için tepe yükseklikten aşağıya düşebilsinler veya çarpışma süreci etkin olabilsin. Maksimum hız için sınırlama yüksek hızlarda (veya öğütme yoğunluğunda) olmaktadır. Kabın sıcaklığı yüksek değerlere ulaşabilir. Difüzyon tozlardaki alaşımlama ve homojenizasyonu ilerletmek için gereklidir. Bu bazı durumlarda avantaj olabilir. Çünkü artan sıcaklık, öğütme sırasında şekillenen diğer yarı kararlı fazların veya aşırı doymuş katı çözeltilerin ayrışması ve dönüşüm işlemleriyle hızlanır. Sonradan oluşan sıcaklıklarda da tozlar kirlenebilir.

Maksimum hıza diğer bir sınırlama da yüksek hızlarda haznenin sıcaklığının yüksek değerlere ulaşmasıdır. Ayrıca, oluşan yüksek sıcaklık tozu kirletebilir. Farklı tür değirmenlerde erişilen maksimum sıcaklıklar birbirinden çok farklıdır. Isının olumsuz yönde etkilediği sistemlerde soğutma sıvısı olarak sistemin türüne bağlı olarak gaz veya sıvı kullanılabilir.

1.6.5.4. Öğütme Zamanı

Öğütülen tozlarda öğütme zamanı en önemli parametrelerden biridir. Öğütme zamanı, kullanılan değirmen tipine, öğütme şiddetine, bilye/toz oranı gibi faktörlere bağlıdır. Seçilecek öğütme süresi kararlı hale ulaşma süresine eşit olmalıdır. Gerekli zamandan daha az öğütme yapılırsa istenilen toz özelliklerine ulaşılamazken gereğinden fazla süreyle öğütme yapılırsa bu seferde istenmeyen özelliklere ulaşılabilir (istenmeyen fazlar, amorf yapı). Zaman parametresi genel olarak yüksek enerjili öğütmelerde kararlı hal şartını sağlamak amacıyla kısa tutulurken, düşük enerjili öğütmelerde süre daha uzundur [84].



Şekil 1.37. Artan öğütme süresi ile parçacık morfolojisi ve parçacık boyutunun değişimi

1.6.5.5. Bilye-toz Ağırlık Oranı (BPR)

Bilyelerin ağırlığının toz ağırlığına oranı (BTO), bazen dolum oranı olarak da adlandırılır. Bu parametre, öğütme işleminde önemli bir değişkendir. Bu birçok araştırmacı tarafından 1:1 gibi küçük değerlerden 220:1 gibi büyük değerlere kadar çeşitli oranlar kullanılmıştır. Genelde, (BTO) 10:1 oranı SPEX değirmen gibi küçük kapasiteli değirmenlerde tozun öğütülmesinde en çok kullanılan orandır. Fakat öğütme büyük kapasiteli, atritör benzeri bir değirmende gerçekleştirilirse, yüksek bir bilye-toz oranı olan 50:1 ya da daha yüksek 100:1 oranı da kullanılabilir. Bu oranın artması elde edilen toplam

enerjiye bağlı olarak alaşımlama zamanını azaltırken, tozların kirlenmesi gibi olumsuz etkileri de hızlandırabilir. Bilye-toz oranı ne kadar yüksek olursa gerekli zaman da o kadar kısa olur. Yüksek bilye-toz oranında, bilyelerin ağırlık oranındaki artıştan dolayı, birim zamandaki çarpışma sayısı artar ve sonuç olarak toz parçacıklara daha çok enerji iletilir. Bu yüzden alaşımlama daha çabuk gerçekteşir. Örneğin, bir toz karışımını SPEX değirmende 10:1 oranında 7 saat, 50:1 oranında 2 saat ve 100:1 oranında 1 saat öğütüldüğünde elde edilmektedir. Yüksek bilye toz oranı, her birim zamanda çarpışmaların miktarını artırır ve sonuçta daha fazla enerjiyi toz parçacıklarına transfer eder. Böylece alaşımlama daha hızlı olur [4].

1.6.5.6. Öğütücü Kap Doluluk Oranı

Bilye-toz-bilye ve bilye-toz-değirmen yüzeyi arasındaki çarpışmaların etkin olabilmesi için öğütücü kabın gereğinden fazla doldurulmasından kaçınarak bilye ve tozların değirmen içersinde serbestçe hareketi sağlanmalıdır. Öğütücü kap gereğinden az doldurulursa üretim verimi düşer fazla doldurulduğunda ise alaşımlama oluşmaz. Genel kabul öğütücü kabın %50 yada daha fazlasının boş bırakılmasıdır.

1.6.5.7. İşlem Kontrol Katkısı (PCA)

MA işleminde, deformasyona bağlı kaynaklanma ve kırılma şeklinde gerçekteşir. Özellikle sünek tozların kaynaklanma ve sıvanma eğilimi yüksektir. Bu tozların kırılmaya olan direnci, incelmeyi geciktirir. MA sırasında ilave edilen kimyasallar sayesinde kaynaklanmanın yanı sıra kırılma da etkin hale gelir. Kullanılan bu kimyasallar; gaz, sıvı ve katı halde olabilirler. İlave edilen kimyasallar genellikle kırılmayı hızlandırırken, yağ türevleri tozlar tarafından emilebilir. Genelde, ilave edilen miktar % 1,5 civarındadır. İlave edilen kimyasal, yapı içersinde sürekli olarak kalabildiği gibi, işlem sonrası sinterleme gibi ilave işlemler sırasında bünyeden atılabilir.

Kullanılan işlem kontrol katkısı (İKK), MA sonrası elde edilecek tozun saflık derecesini doğrudan etkiler. Bu etki olumsuz sonuçlara neden olmuyorsa kimyasalın kullanımı işlem süresini kısaltırken, toz boyutunun küçülmesini hızlandırabilir. Aslında,

kullanılan işlem kontrol katkısı, kompozisyonun bileşimini her ne kadar değiştiriyorsa da işlem süresini kısaltması kirlenme miktarını azaltmaktadır.

Öğütülen tozların tipi; kullanılan İKK'nın miktarı ve yapısına, toz parçacıklarının son ebadına, şekline ve saflığına göre belirlenir. İKK'nın büyük miktarlarda kullanımı normal olarak parçacık büyüklüklerini 2-3 katı kadar düşürür. Gerçekte İKK kullanımı gevrek malzemelerin öğütülmesinde istenmemektedir. Eğer toz-İKK ağırlık oranı kritik değer altında ise parçacık boyutunu artırma, üzerinde ise parçacık boyutunu düşürme eğilimindedir [83].

1.6.5.8. Öğütücü Bilyelerin Cinsi ve Boyutu

Öğütücü malzemelerin cinsi ve boyutu, öğütülecek malzemenin cinsi ve boyutu düşünülerek seçilmelidir. Öğütücü kap kısmında da anlatıldığı gibi öğütücü bilyeler öğütücü kabı aşındırarak öğütülen malzemenin kimyasal bileşimini bozmamalıdır. Öğütücü malzemelerin boyutu da öğütmeye etki eder. Tozların son durumlarının kullanılan öğütme malzemelerinin boyutlarına bağlı olduğu bazı çalışmalarda belirtilmektedir. Örneğin; 15 mm çaplı bilyeler, harmanlanmış Ti-Al toz karışımını öğütmek için kullanıldığında, titanyumdaki alüminyumun bir katı çözeltisi oluşur. Diğer bir ifade ile, 20 mm ve 25 mm çaplı bilyelerin kullanılması, uzun öğütme sırasında sadece titanyum ve alüminyum fazlarının bir karışımı sonucudur. Ayrıca bazı çalışmalar öğütme için 12 mm çaplı bilyeler kullanıldığı zaman amorf faz oluşmadığını, sadece Ti-Al toz karışımı ya 5 mm ya da 8 mm çaplı bilyeler kullanılarak öğütüldüğünde amorf fazın oluştuğunu belirtmektedir.

Yapılan çalışmaların çoğunda, sadece tek bir öğütücü bilye boyutu kullanılmasına rağmen, aynı çalışmalarda farklı boyutlarda kullanılan bilyelerle ilgili örneklerde vardır. Eğer bilyeler farklı çaplarda kullanılırsa en yüksek çarpışma enerjisinin elde edileceği tahmin edilebilir. Öğütmenin ilk aşamasında öğütülmüş olan tozlar öğütücü malzemelerin yüzeyini kaplar ve soğuk kaynak olur. Bu bir avantaj olarak kabul edilir. Çünkü öğütücü malzemelerin aşınması sırasında tozun kirlenme sakıncası ve öğütme malzemelerinin aşırı aşınması da engellenir. Bununla beraber bu seviyenin kalınlığı heterojen bir son ürünün şeklini muhafaza etmek için minimum da tutulmalıdır. Fakat bu toz kaplamanın dezavantajı tozu ayırmanın oldukça zor olmasıdır ve bu yüzden toz verimi düşüktür. Geniş

ve küçük boyutlu bilyelerin bir kombinasyonu, öğütme sırasında bilyelerin yüzeyinde kaplanmış toz miktarı ve soğuk kaynak miktarını minimize eder. Bu şartlar altında akmayı iyileştirmek için bilimsel bir açıklama olmamasına rağmen, farklı boyutlardaki bilyelerin kesme kuvvetleri üretmesini, bilyelerin yüzeyinden tozların ayrılmasına yardım edebileceği düşünülmektedir [83].

1.6.5.9. Öğütme Atmosferi

MA işlemi, öğütülen tozların kirlenmesini engellemek yada minimum oksitlenmeyi sağlamak amacıyla vakum yada inert gaz ortamında yapılır. Tozların yapısı ve kirlenmesi üzerine öğütme atmosferinin büyük bir etkisi vardır. Bundan dolayı tozlar; kabın helyum yada argon gibi inert gazlarla doldurulması ile yada temizlenmesi ile üretilirler.

Tozların kap içersine konulması, genelde atmosfer kontrolü altında yapılmaktadır. Bu koruyucu ortamlar, genellikle argon gibi inert gazlarla sağlanır. Öğütme işlemi koruyucu ortamlarda yapılarak tozların kirlenmesi engellenebilir. Diğer bir işlem olarak tozların öğütücü kap içersine doldurulmadan önce inert gazla temizlenmesi ve daha sonra hava ortamında öğütme işleminin yapılmasıdır. Bu yöntem diğer yöntemlere nazaran daha düşük koruma sağlar ve her zaman olumlu sonuçlar vermeyebilir [84].

1.6.5.10. Öğütme Sıcaklığı

Öğütme sıcaklığı, öğütülen tozun içeriğinin kararlaştırılmasında bir diğer önemli parametredir. Üretilen son fazın, bir katı çözelti, intermetalik, nanoyapı veya bir amorf faz olmasında, bağımsız olarak alaşım fazlarının oluşumunda difüzyon işlemi etkin olduğundan, öğütme sıcaklığının alaşım sisteminde önemli bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Genellikle MA işlemleri malzemenin türüne bağlı olarak oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda yapılmaktadır. Genellikle bu sıcaklığın sabit tutulmasında kazan çevresinde soğutucu gaz ya da sıvıların sirkülasyonu sağlanır. Aksi halde sıcaklık artışları hem aşırı miktarda aşınmalara hem de tozun kirlenmesine neden olabilir [4].

1.7. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Yüksek mukavemet, sertlik, kırılma tokluğu, yüksek sıcaklık özellikleri ve düşük üretim maliyeti gibi kriterler ile ifade edilen gelişmiş performans özellikleri şu andaki mevcut malzemeler ile karşılanamamaktadır. Malzeme mühendisleri ve bilim adamları geleneksel malzemelerin geliştirilmesi ve ayrıca yeni malzemelerin üretimi için büyük uğraş vermektedir. Bu malzemeler arasında kompozit malzemeler geliştirilme sürecinde olan en önemli malzeme grubudur [86].

Metal matrisli kompozitler yüksek mukavemet ve rijitlik gerektiren uygulamalarda geleneksel alaşımlara alternatif olarak geliştirilmişlerdir. Modern endüstride maliyet anahtar bir faktördür bununla birlikte hafiflik, uzun kullanım ömrü ve geri dönüştürülebilirliği de dikkate almak gereklidir. Bu özellikler dikkate alındığında metal matrisli kompozitler rakiplerine göre hala çok pahalıdır. Bu maliyet basit üretim yöntemleri, yüksek üretim miktarı ve ucuz takviye malzemeleri kullanılarak düşürülebilmektedir. [87]. Uygulama alanı olarak bakıldığında havacılık, savunma sanayi, elektronik, uzay teknolojileri ve otomotiv sektöründe geniş kullanım alanlarına sahiptirler [88-91].

Metal Matrisli Kompozit malzemelerin üretim yöntemlerini sıvı ve katı yöntem olmak üzere iki ana başlık altında toplamak mümkündür. Sıvı yöntem olarak döküm yöntemi [92-95] katı yöntem olarak da toz metalurjisi yöntemi yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir [96-101].

Döküm yönteminde takviye parçacıklarının matris tarafından iyi islatılamaması ve homojen dağılımının sağlanamaması [102-105] toz metalurjisi yönteminde ise yüksek porozite ve takviye malzemesinin homojen dağılımı [106-110] en önemli problemler olarak karşımıza çıkmaktadır. Mekanik alaşımlama yöntemi ile toz metalurjisinin dezavantajlarından biri olan takviye malzemesinin homojen dağılımı ortadan kaldırılabilmektedir [111-114]. Mekanik alaşımlama yöntemi çeşitli alaşımlar, metal matrisli kompozitler, nano boyutlu parçacıklar, amorf yapılı malzemeler ve metaller arası bileşikler gibi birçok alanda kullanılan çok yönlü ve kendi içerisinde birçok parametreye sahip bir yöntemdir. Bu yöntemin kullanım alanlarının fazla olması ve işlem parametrelerinin çok olması bu konu ile ilgili yapılan araştırmaların sayısını da artırmıştır [115-121]. Mekanik alaşımlama yöntemi ile istenilen bileşim ve dağılım elde edildikten sonraki en önemli aşama üretilen bu tozların preslenmesi ve sinterlenmesidir. Bu işlemler

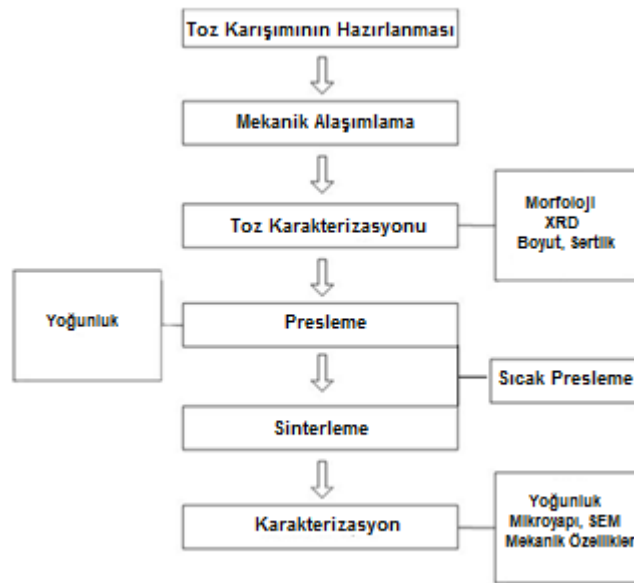
için genel uygulama toz parçacıklarının preslenmesi [122-125] daha sonrada ham numunelerin belirli bir sıcaklıkta sinterlenmesidir [126-129]. Toz metalurjisi ile üretilen kompozit malzemelerdeki porozite (gözenek) oluşumunu minimuma indirmek amacıyla genellikle ikincil bir işlem olarak sıcak presleme kullanılmaktadır [130-135]. Bununla birlikte sıcak presleme ikincil bir işlemde ziyade presleme ve sinterlemenin birlikte yapıldığı ana bir işlem olarak da kullanılmaktadır [136]. Böylelikle hem presleme hem de sinterleme tek bir işlemde bitirilerek hem zaman hemde işlem maliyetleri azaltılabilmektedir.

Bilindiği gibi ülkemiz bor cevheri rezervi bakımından dünya ülkeleri arasında ilk sırada yer almaktadır. Bu nedenle bor ürünlerinin üretimi ve kullanımının yaygınlaştırılması büyük önem taşımaktadır. Bor karbür düşük yoğunluk, yüksek sertlik ve elastisite modülü ile nötron absorblama özelliğine sahip bir malzemedir. Bu nedenle B_4C ile üretilen kompozitler nükleer reaktörlerde, kum veya abrasif püskürtme nozullarında, zırh malzemesi olarak, yüksek sıcaklığa ve aşınmaya dayanıklılık gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır [16].

Bu çalışmada endüstride yaygın uygulama alanı olan, yaşlandırılarak mukavemeti artırılabilen AA2024 alüminyum alaşımı matris malzemesi olarak B_4C ise takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Yapılan literatür araştırmaları sonucunda bu iki malzemedeki mekanik alaşımlama yöntemi ile metal matrisli kompozit üretimine yönelik yeterince çalışma olmadığı görülmüştür. Bu nedenle bu çalışmanın amacı B_4C parçacık takviyeli AA2024 matrisli kompozitlerin mekanik alaşımlama yöntemi ile üretimi ve üretilen kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılmasıdır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada Mekanik Alaşımlama yöntemi kullanılarak Al₂O₃-B₄C kompozitlerinin üretimi ve işlem parametrelerinin kompozit özelliklerine etkisi araştırılmıştır. İlk olarak kompozit tozlar mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilmiş ve bu tozların morfolojisi, boyutu, sertliği ve kristal boyutları ölçülerek toz karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Takviye malzemesi olarak iki farklı boyut (22-59µm ve B₄C<10µm takviye oranı olarak da ağırlıkça üç farklı oran (% 5, % 10 ve % 20) seçilmiştir. MA yöntemi ile üretilen kompozit tozların karakterizasyon çalışmaları, taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışınları difraktometresi (XRD), lazer parçacık boyutu analiz cihazı (Mastersizer 2000e, Malvern Instruments) ve İnstron mikrosertlik ölçüm cihazı ile yürütülmüştür. Toz karakterizasyon işlemleri tamamlandıktan sonra kompozit tozlar farklı basınçlarda preslenmiş ve daha sonrada sıcak presleme yapılarak kompozit numuneler üretilmiştir. Kullanılan basınçlar 200, 400 ve 600 MPA dır. Üretilen bu kompozitlerin, yoğunluk, porozite, makro sertlik değerleri ve iç yapı incelemeleri yapılarak en uygun üretim parametreleri belirlenmiştir. Yapılan çalışma boyunca uygulanan işlem akış şeması şekilde verilmiştir.



Şekil 2.1. Deneysel çalışmalardaki iş akış şeması

2.1. Malzeme

Matris malzemesi olarak Al2024 alaşım tozları ($\rho=2.8$) seçilmiştir. Bu tozlar Gündoğdu Exoterm Sanayinden (GES) temin edilmiştir. Al2024 tozlarının spektral analizi tablo da verilmiştir. Takviye malzemesi olarak kullanılan B₄C tozları (Saflık %99.5, $\rho=2.52$) ise Alfa-Aesar firmasından temin edilmiştir.

Tablo 2.1 Al2024 Tozlarının Ağırlıkça Bileşimi (%)

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Cr	Ti	Al
4.85	1.78	0.312	0.374	0.385	0.138	0.042	0.005	92,114

Tablo 2.2 Al 2024 alaşımının fiziksel ve mekanik zellikleri

Yoğunluk (gr/cm ³)	ekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Sertlik (BSD)
2.80	185	75	20	55

Al2024 alaşım tozları ilk olarak eleme işlemine (şekil 2.2) tabi tutularak D₅₀ değeri 75 μ m olan başlangıç tozları elde edilerek çalışmalarda bu tozlar kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak iki farklı boyut kullanılmıştır. B₄C takviye tozları için birinci boyut 22-59 μ m (D₅₀:49 μ m) ikini boyut ise B₄C<10 (D₅₀:5 μ m) μ m seçilmiştir. İki farklı boyutta takviye malzemesi kullanılmasındaki amaç takviye boyutunun toz ve kompozit özelliklerine etkisini araştırmaktır. Al 2024 alaşım tozları ve B₄C takviye tozlarının başlangıç morfolojileri taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir.



Şekil 2.2. Elek Ünitesi

Çalışmalar kapsamında üretilen numune sayısı oldukça fazla olduğundan Tablo 2.3’de gösterildiği gibi numuneler kodlanmıştır.

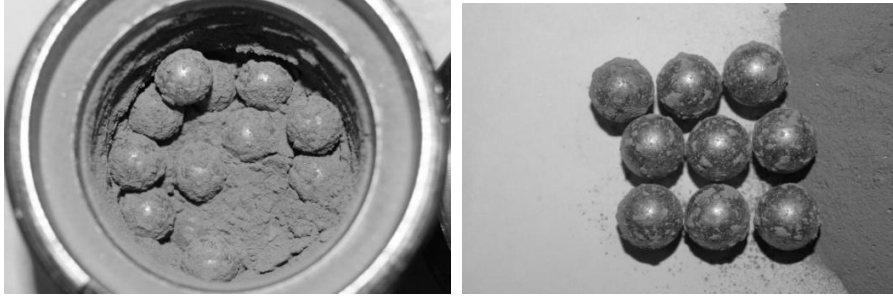
Table 2.3. Üretilen malzemelerin gruplandırılması

İsim	Bileşim (Ağırlıkça)	Matris Boyutu (μm) (D_{50})	Takviye Boyutu (μm) (D_{50})	Teorik Yoğunluk (gr/cm^3)
Al2024	Katkısız	75	-	2.8
Al2024-%5K	%95 Al2024-%5 B ₄ C	75	49	2.786
Al2024-%10K	%90 Al2024-%10 B ₄ C	75	49	2.772
Al2024-%20K	%80 Al2024-%20 B ₄ C	75	49	2.744
Al2024-%5İ	%95 Al2024-%5 B ₄ C	75	5	2.786
Al2024-%10İ	%90 Al2024-%10 B ₄ C	75	5	2.772
Al2024-%20İ	%80 Al2024-%20 B ₄ C	75	5	2.744

2.2. Mekanik Alaşım İlemleri

Bu çalışmada toz karışımları gezegen tip bilyeli öğütücüde (Fritsch Pulveristte Premium 7) (Şekil 2.3) 400 dv/dak öğütme hızında mekanik alaşım işlemine tabi tutulmuşlardır. Öğütme süresi olarak 0.5, 1, 2, 5, 7 ve 10 saat seçilmiştir. Öğütme işlemi tungsten karbür değirmen ve bilyeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Öğütücü kap hacni 80ml ve bilye boyutu ise 10 mm dir. Öğütücü kaba şarz edilen toz miktarı 16gr ve bilye-

toz ağırlık oranı 10:1 olarak seçilmiştir. Öğütme cihazı, öğütücü kap ve bilye resimleri Şekil 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2.3. Öğütme elemanları

2.3. Parçacık Morfolojisi

Başlangıç tozlarının ve MA yöntemi ile üretilen kompozit tozların morfolojileri taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelenmiştir. Yapılan morfolojik incelemelerle mekanik alaşımlama işleminin safhaları araştırılmıştır.



Şekil 2.4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

2.4. Parçacık Boyutu

Başlangıç tozları ve mekanik alaşımlanmış tozların parçacık boyutu dağılım ölçümleri Malvern Instruments™ marka Mastersizer 2000e (şekil 2.5) model lazer parçacık boyut ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçüm işlemleri saf su ortamında yapılmıştır.



Şekil 2.5. Partikül boyutu ölçüm cihazı

2.5. X-Işınları Kırınımı

Mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilen kompozit tozların X ışınları analizi yapılarak farklı öğütme sürelerinin kompozit tozların kristal yapısına etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmalar, X ışınları difraktometreleri (XRD) (Şekil 2.6) kullanımıyla 40kV ve 30mA koşullarında ve $\text{CuK}\alpha$ (1,54059 Å) radyasyonu altında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.6. X ışınları analiz cihazı

2.6. Mikrosertlik

Üretilen kompozit tozların mikrosertlik değerleri Struers marka mikrosertlik ölçüm cihazı (Şekil 2.7) ile 25gr yük altında 10 sn süre ile gerçekleştirilmiş olup en az 5 başarılı ölçümün ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Sertlik ölçüm yöntemi Vickers ve tepe açısı 136 derece olan konik uç kullanılmıştır.



Şekil 2.7. Mikrosertlik ölçüm cihazı

Kompozit sertlikleri ise aşağıda şekli verilen Brinell sertlik ölçüm cihazı yardımıyla ölçülmüştür. Cihazdan alınan iz çapları Brinell sertlik ölçüm formülünde yerine konarak kompozit sertlikleri bulunmuştur.

$$HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \text{ Kg/mm}^2 \quad (2.1)$$

Burada;

HB: Brinell Sertlik

P: Uygulanan Kuvvet

d: İz çapı

D: Bilye çapı (mm)



Şekil 2.8. Brinell Sertlik Ölçüm Cihazı

2.7. Sıcak Presleme

Üretilen kompozit tozlara ilk olarak ön şekil verme uygulanmıştır. Ön şekil verme basıncı 150 MPa dır. Ön şekil verilen numuneler 400 °C sıcaklıkta üç farklı basınç altında (200, 400 ve 600MPa) 100 ton kapasiteli tek eksenli preste (Şekil 2.9) preslenerek numuneler üretilmiştir. Presleme esnasında kalıp yüzeylerine yağlayıcı olarak grafit sürülmüştür.



Şekil 2.9. Sıcak preslemede kullanılan ekipman

Üretilen numunelerin teorik yoğunlukları karışımlar kuralına göre bulunmuş deneysel yoğunlukları ise hem geometrik şekle göre hem de piknometre ile ölçülmüştür. Bulunan deneysel yoğunluk değerleri teorik yoğunluğa bölünerek bağıl yoğunluk bulunmuştur.

$$\delta_t = [(\%W)_1 * \delta_1] + [(\%W)_2 * \delta_2] + \dots + [(\%W)_n * \delta_n] \quad (2.2)$$

Burada;

δ_t : Kompozitin teorik yoğunluğu

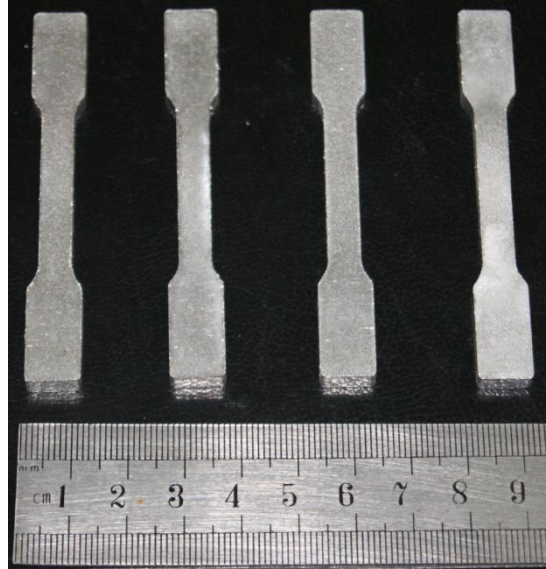
$(\%W)_n$: Her bir takviyenin karışım içindeki ağırlıkça yüzdesi

δ_n : Her bir takviyenin yoğunluğu

$$\text{Bağıl yoğunluk} = [(\delta_t - \delta_d) / \delta_t] * 100$$

Burada;

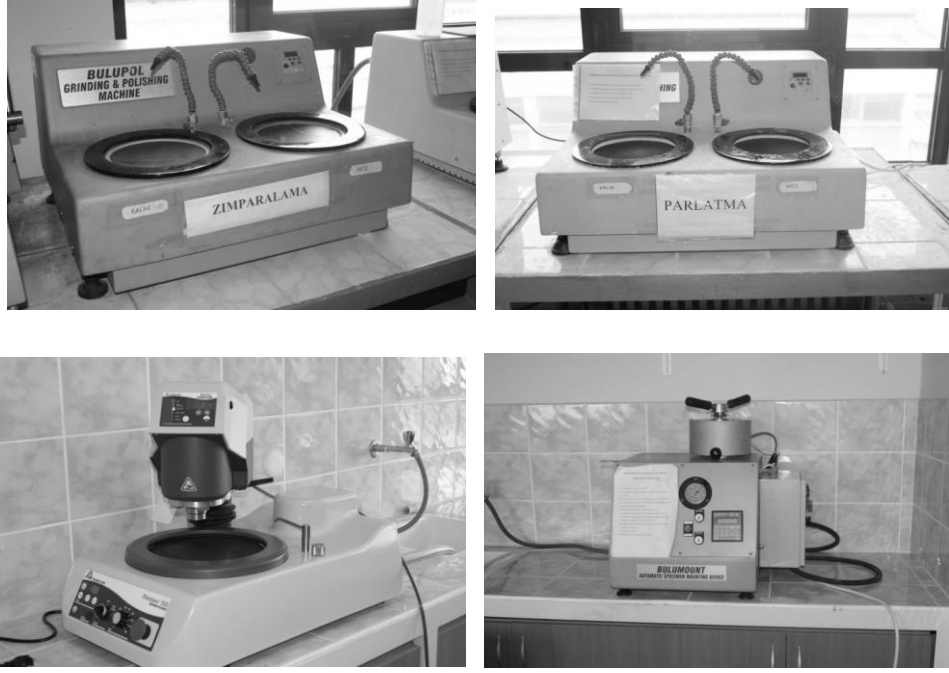
δ_d : deneysel yoğunluk



Şekil 2.10. Üretilen çekme numuneleri

2.9. Metalografi Çalışmaları

MA yöntemi ile üretilen kompozit tozların ve kompozitlerin sertlik ölçümleri ve kompozitlerin içyapı incelemeleri için gerekli metalografik işlemler yarı otomatik (Şekil 2.11) ve tam otomatik zımparalama ve parlatma cihazları ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ihtiyaç duyulan numuneler için bakalite alma işlemi de yapılmıştır.



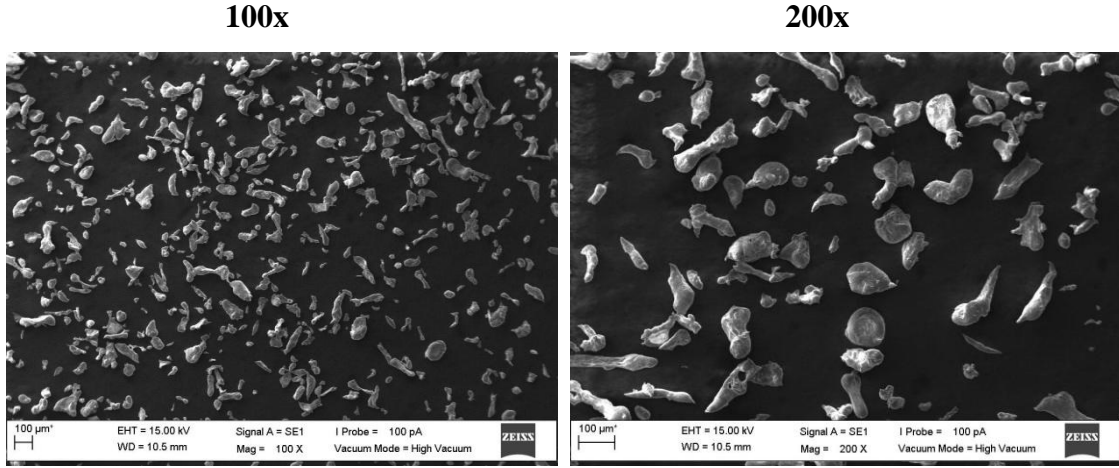
Şekil 2. 11. Metalografi çalışmalarında kullanılan cihazlar

3. BULGULAR

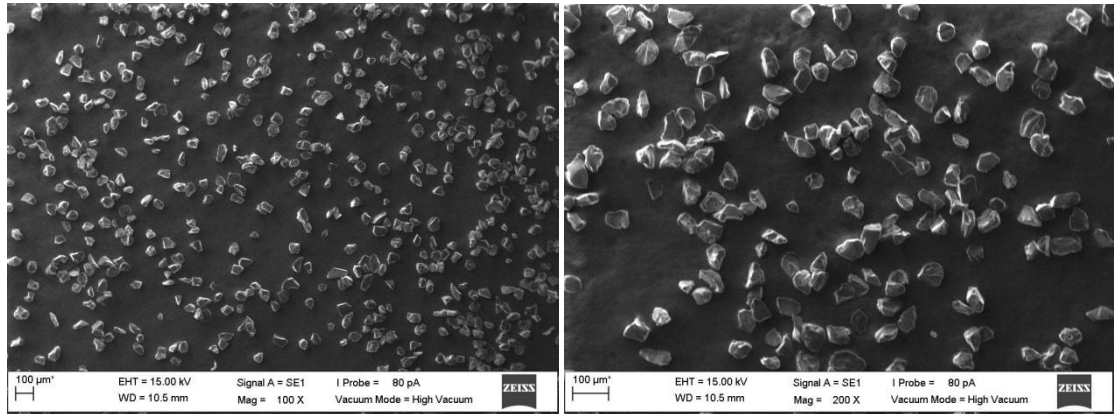
3.1. Toz Karakterizasyonu

3.1.1 Toz Morfolojisi

SEM resimlerinden de görüldüğü gibi Al 2024 tozlarının başlangıç aşamasındaki morfolojisi düzensiz (irregular shape) şekilli iken B₄C tozlarının başlangıç morfolojisi açılı yâda poligonal morfolojidir.



(a)



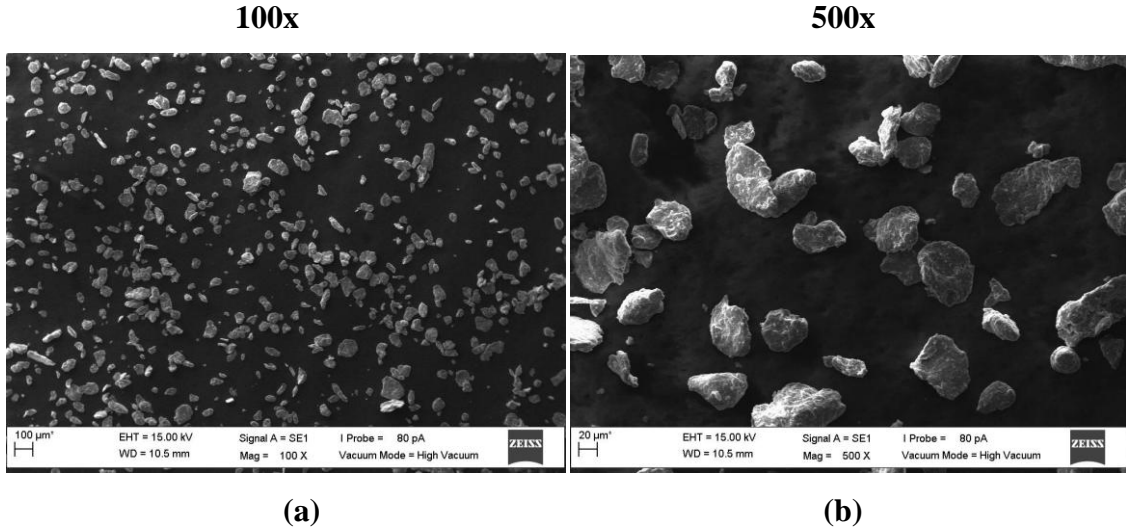
(b)

Şekil 3.1. Başlangıç tozlarının farklı büyütmelerdeki morfolojisi, a) Al 2024, b) B₄C

3.1.2. Öğütme Zamanı ile Toz Morfolojilerinin Değişimi

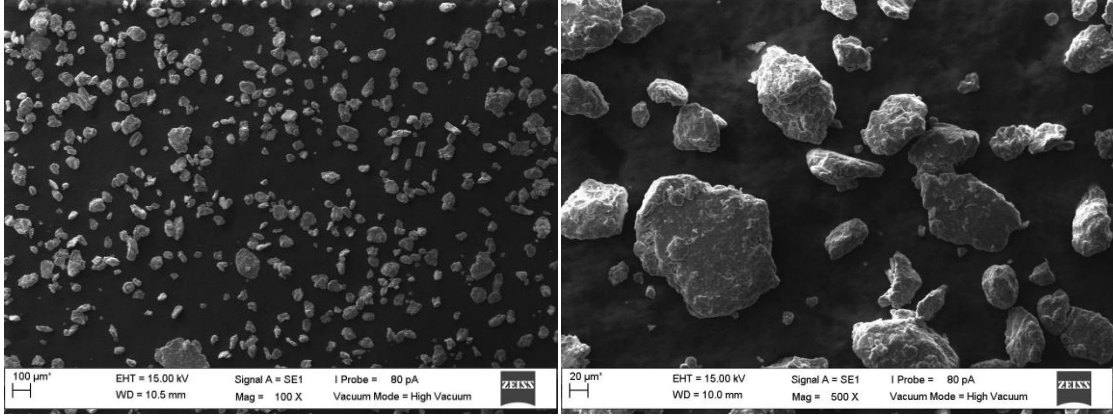
Öğütme işlemine tabi tutulan bütün tozlarda, plastik deformasyonu gösteren pulsu morfoloji, kırılma sonucu oluşan düzensiz morfoloji ve sistemin kararlı hale geldiğini gösteren eş eksenli morfolojiye yani üç temel morfolojiye ulaşılmıştır. Öğütme işleminin başlangıcında (0.5-1h) pulsu yapı oluşmakta daha sonra kırılma ve soğuk kaynak gerçekleşmekte (2-5h) son aşamada ise (7-10h) eş eksenli morfoloji elde edilerek (kırılma ve soğuk kaynak arasında denge) öğütme sistemi kararlı hale ulaşmıştır. 5 saatlik öğütme işleminden sonra azalan parçacık boyutu ile birlikte tozlardaki topaklanma eğiliminin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca artan takviye oranı ve azalan parçacık boyutu kırılma etkinliğini artırmıştır. Bununla birlikte takviye parçacıklarının boyutundan ziyade takviye oranının kırılma etkinliği üzerinde daha etkin olduğu gözlemlenmiştir.

3.1.2.1. Al 2024



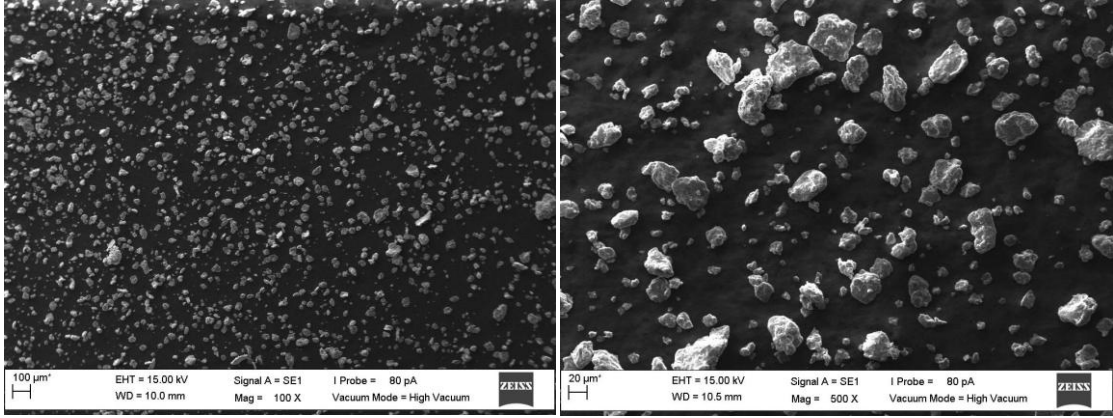
Şekil 3.2. Al2024 alaşım tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 0.5 saat, (c-d) 1 saat, (e-f) 2 saat

Şekil 3.2'nin devamı



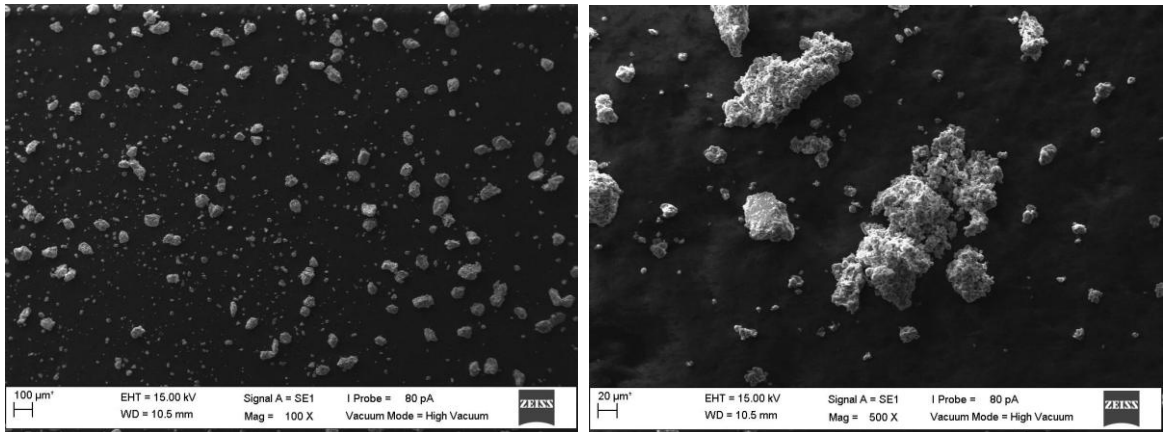
(c)

(d)



(e)

(f)

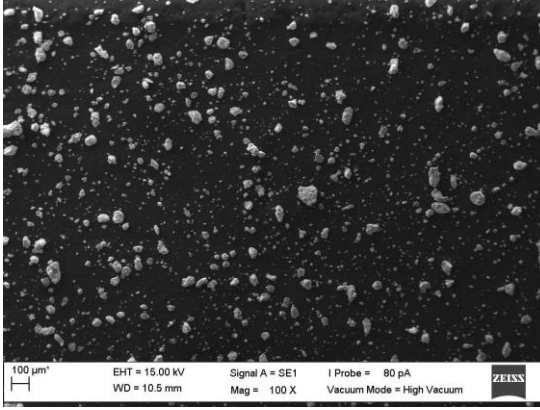
Küçük Büyütme**Büyük Büyütme**

(a)

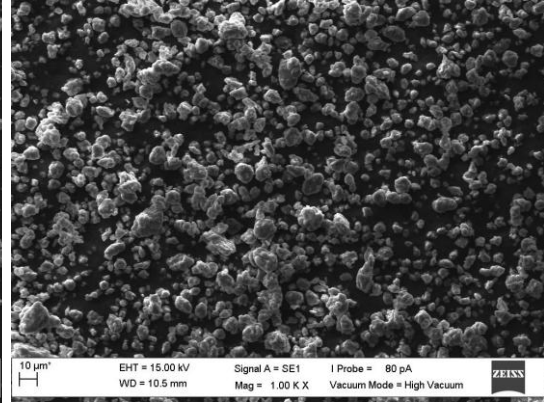
(b)

Şekil 3.3. Al₂₀₂₄ alaşım tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 5 saat, (c-d) 7 saat, (e-f) 10 saat

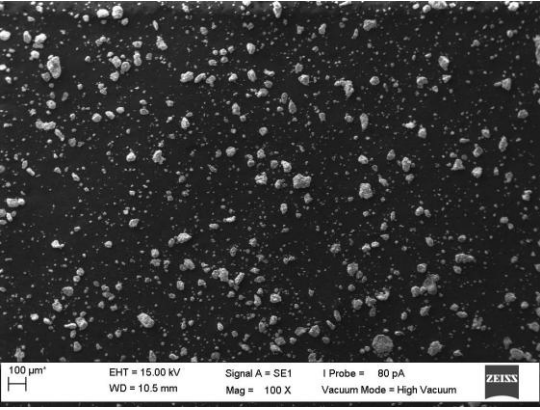
Şekil 3.3'ün devamı



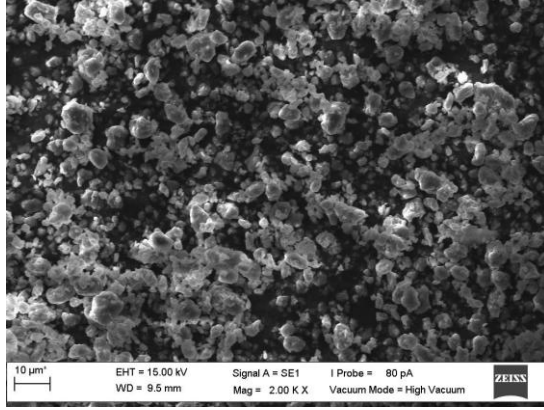
(c)



(d)



(e)

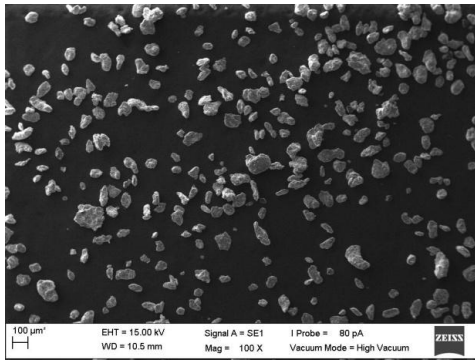


(f)

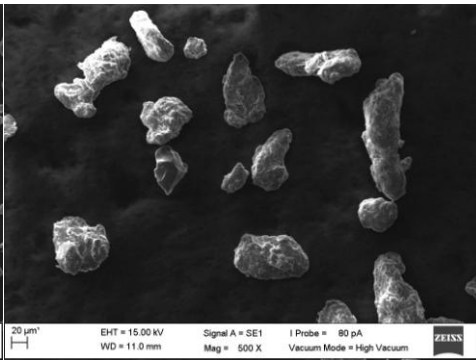
3.1.2.2. Al 2024-%5K

100x

500x



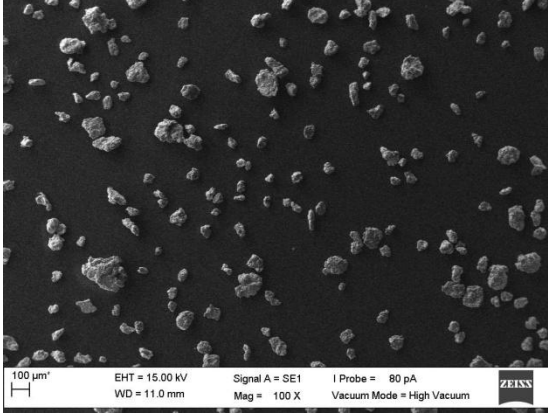
(a)



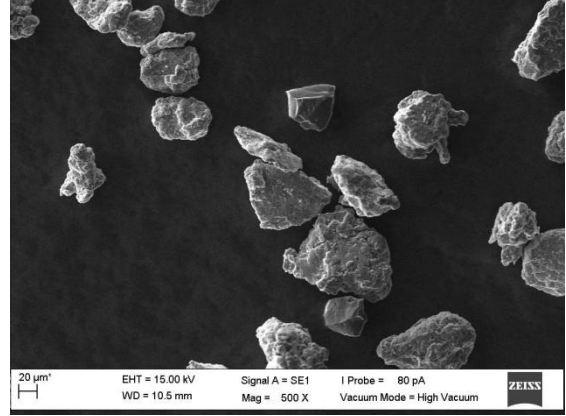
(b)

Şekil 3.4. Al 2024-%5K kompozit tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 0.5 saat, (c-d) 1 saat, (e-f) 2 saat

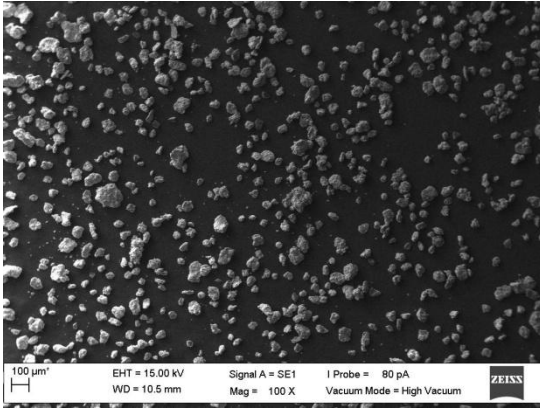
Şekil 3.4'ün devamı



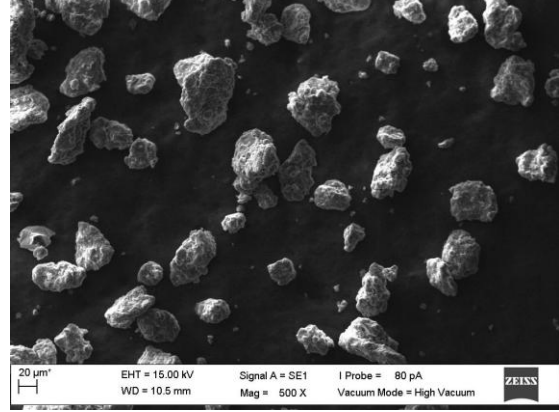
(c)



(d)



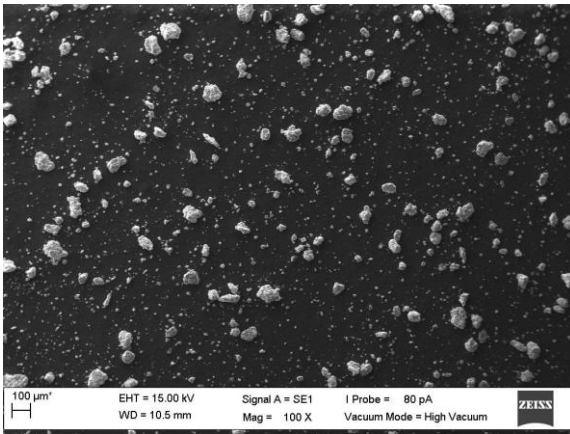
(e)



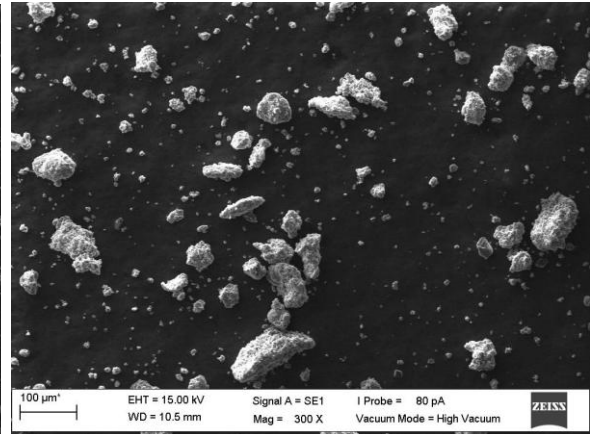
(f)

Küçük Büyütme

Büyük Büyütme



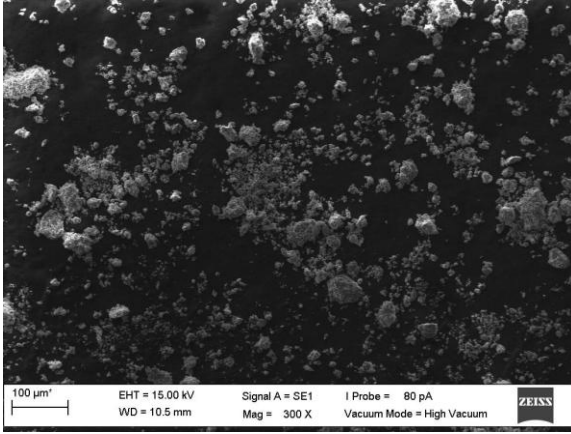
(a)



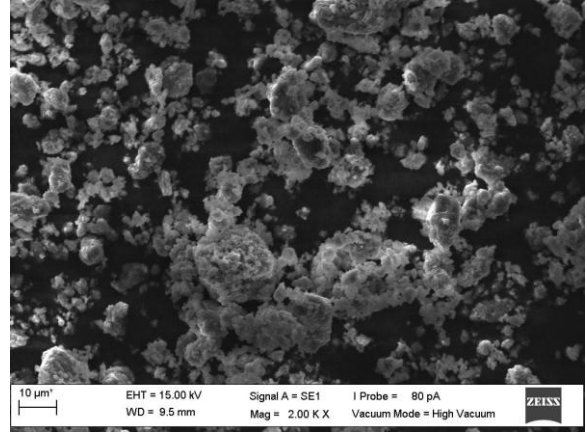
(b)

Şekil 3.5. Al 2024-5K B₄C kompozit tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 5 saat, (c-d) 7 saat, (e-f) 10 saat

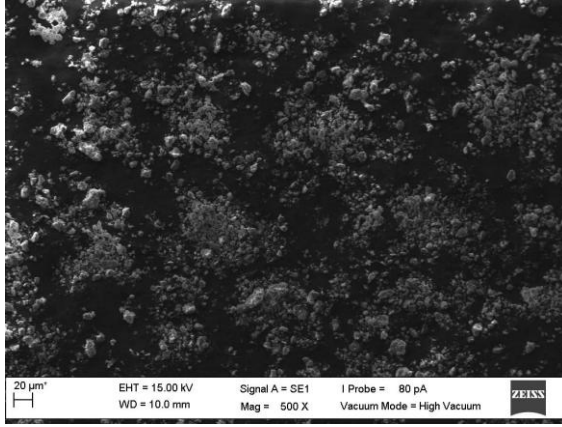
Şekil 3.5'in devamı



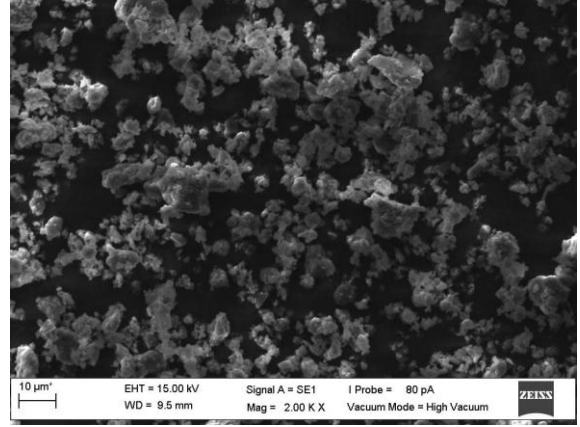
(c)



(d)



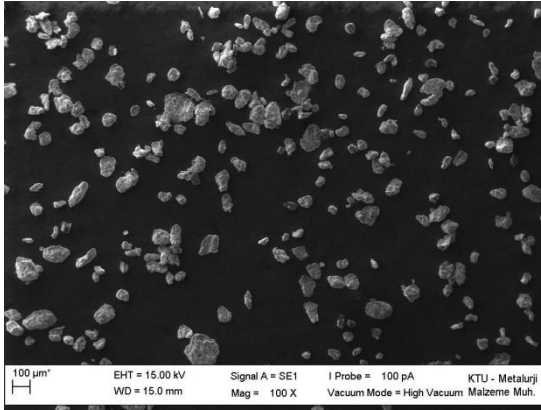
(e)



(f)

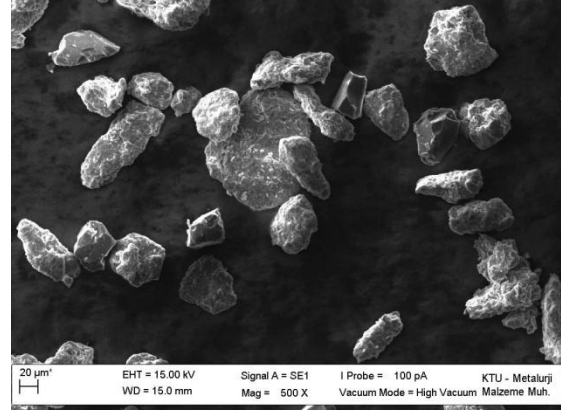
3.1.2.3. Al 2024-%10K

100x

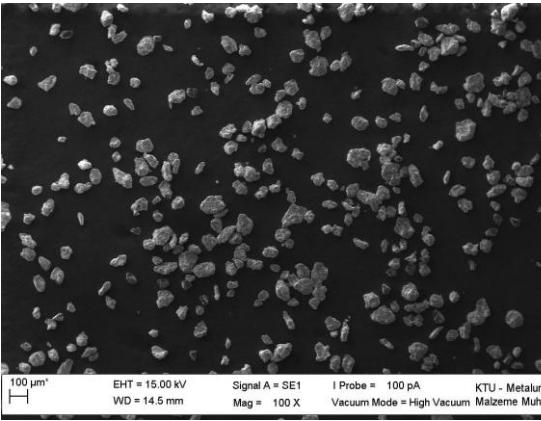


(a)

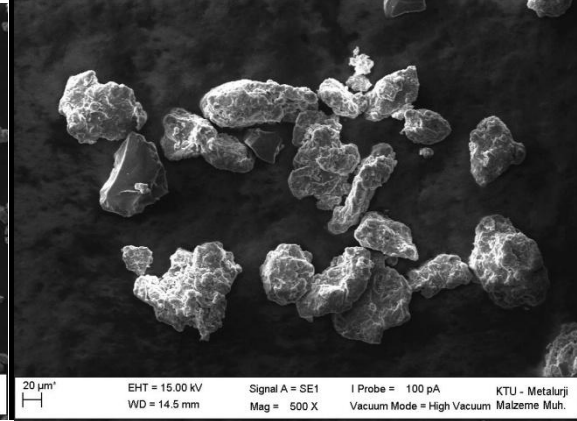
500x



(b)



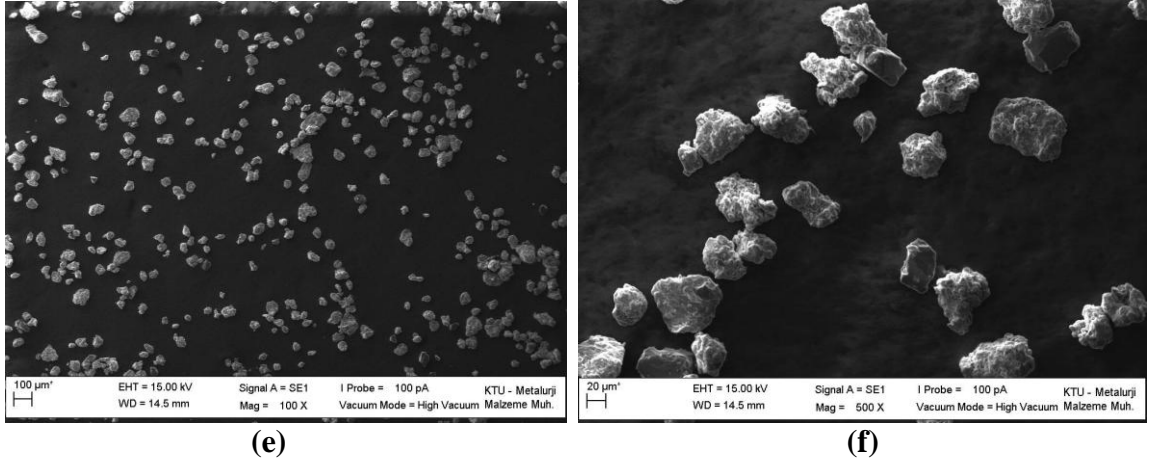
(b)



(d)

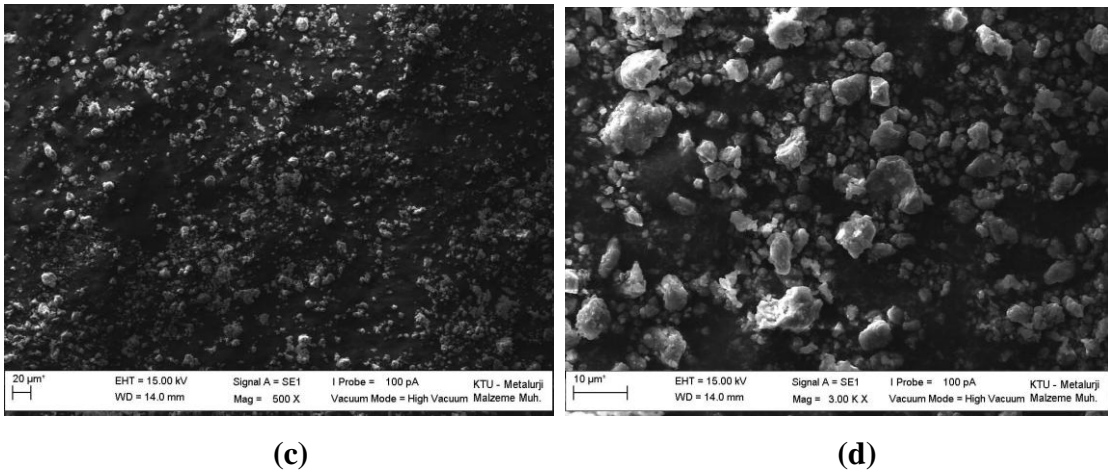
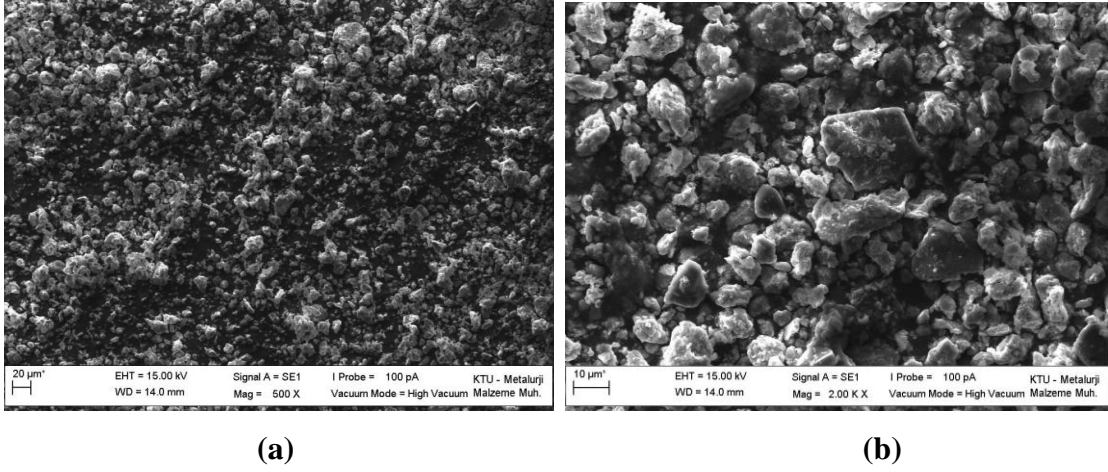
Şekil 3.6. Al 2024-%10K kompozit tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 0.5 saat, (c-d) 1 saat, (e-f) 2 saat

Şekil 3.6'nın devamı

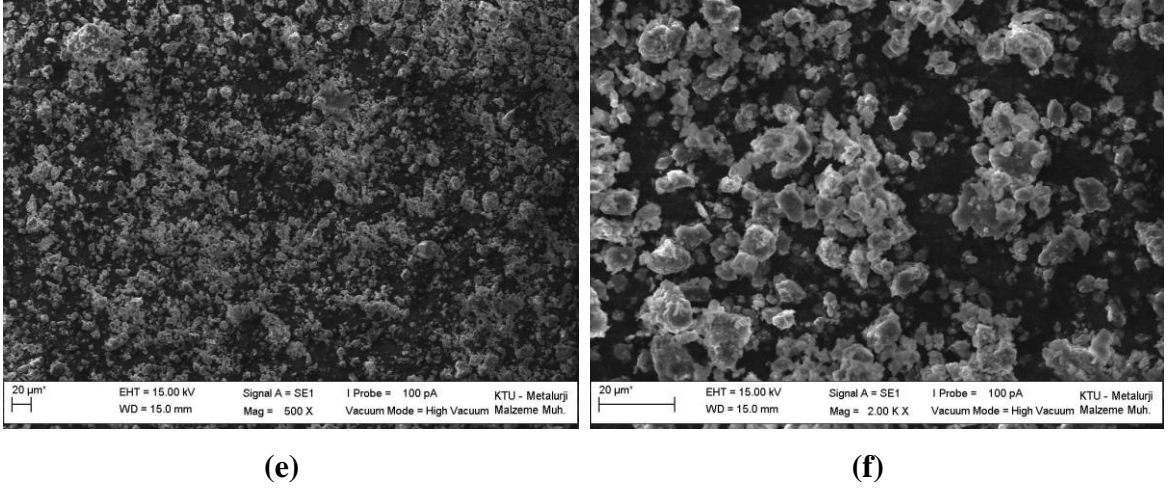


Küçük Büyütme

Büyük Büyütme

Şekil 3.7. Al₂₀₂₄-%10K kompozit tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 5 saat, (c-d) 7 saat, (e-f) 10 saat

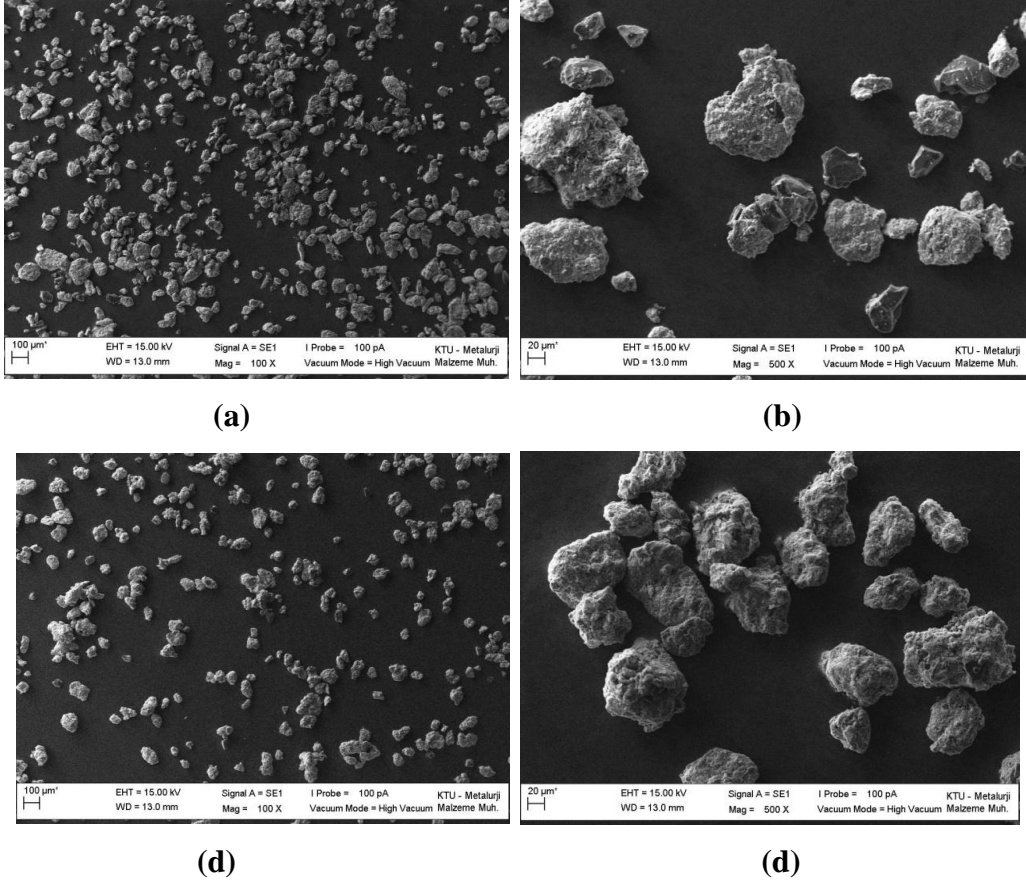
Şekil 3.7'nin devamı



3.1.2.4. Al 2024-%20K

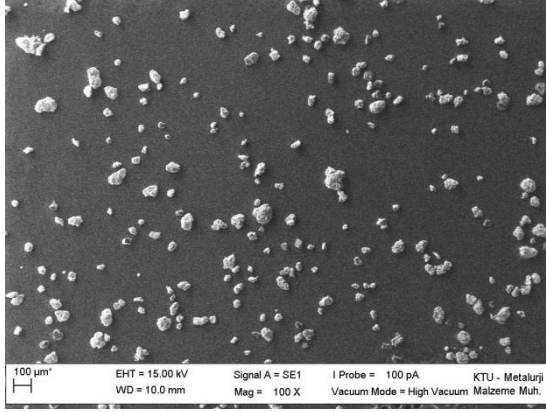
Küçük Büyütme

Büyük Büyütme

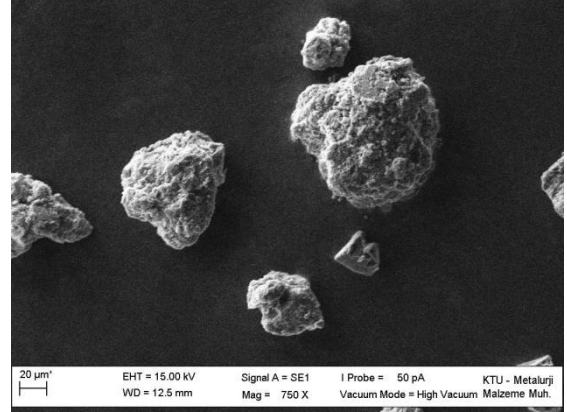


Şekil 3.8. Al 2024-%20K kompozit tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 0.5 saat, (c-d) 1 saat, (e-f) 2 saat

Şekil 3.8'in devamı



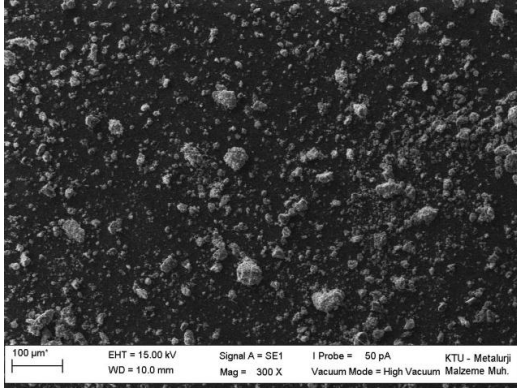
(e)



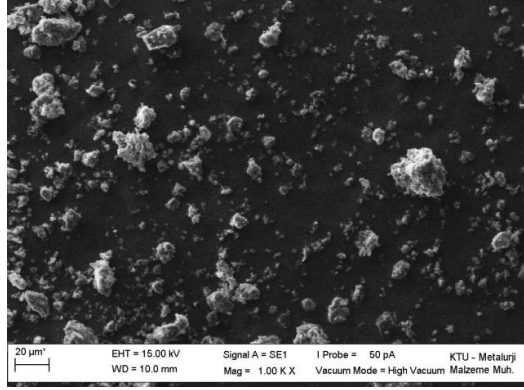
(f)

Küçük Büyütme

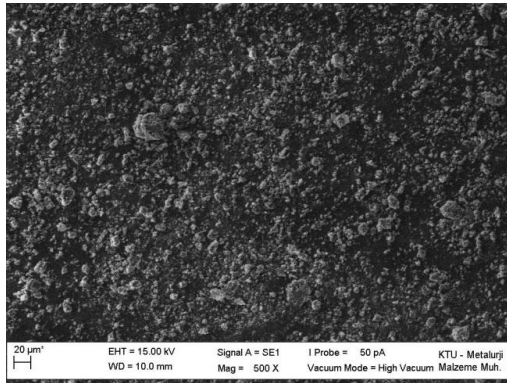
Büyük Büyütme



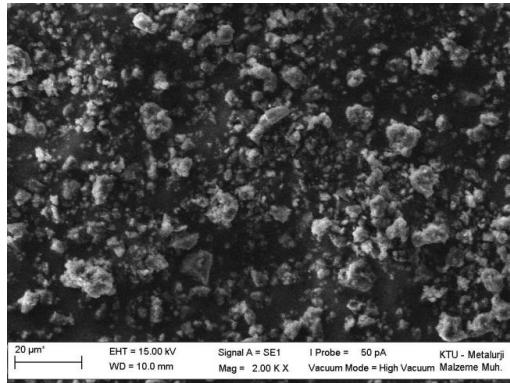
(a)



(b)



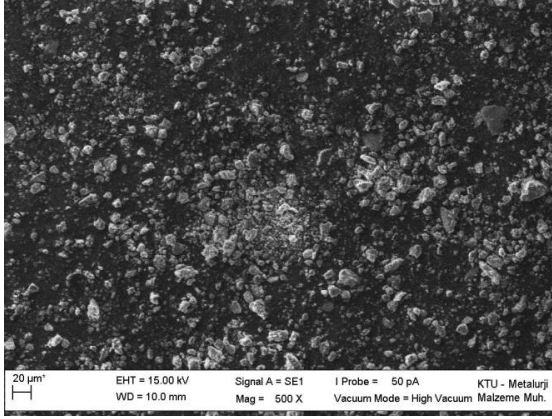
(b)



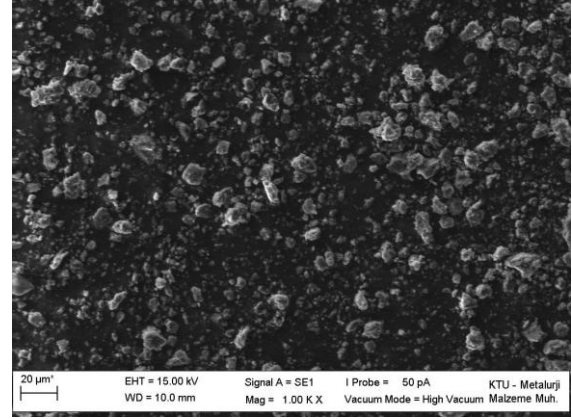
(d)

Şekil 3.9. Al 2024-%20K kompozit tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 5 saat, (c-d) 7 saat, (e-f) 10 saat

Şekil 3.9'un devamı



(e)

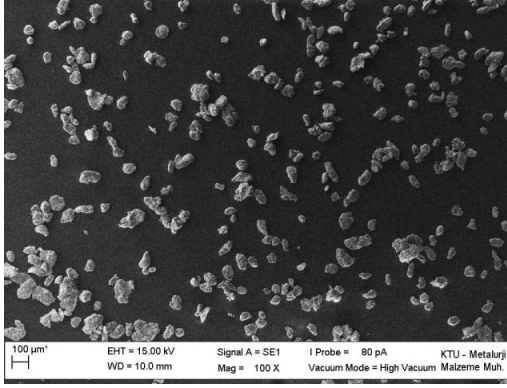


(f)

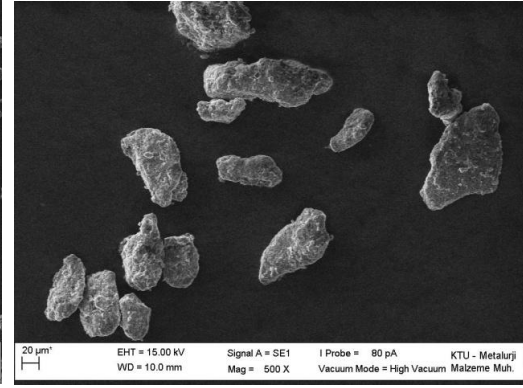
3.1.2.5. Al 2024-%5İ

100x

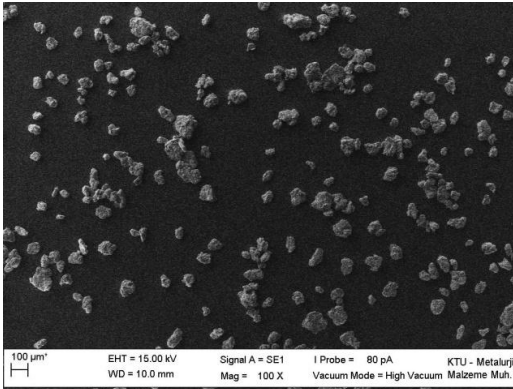
500x



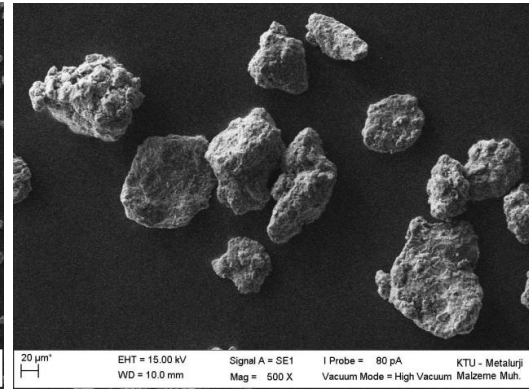
(a)



(b)



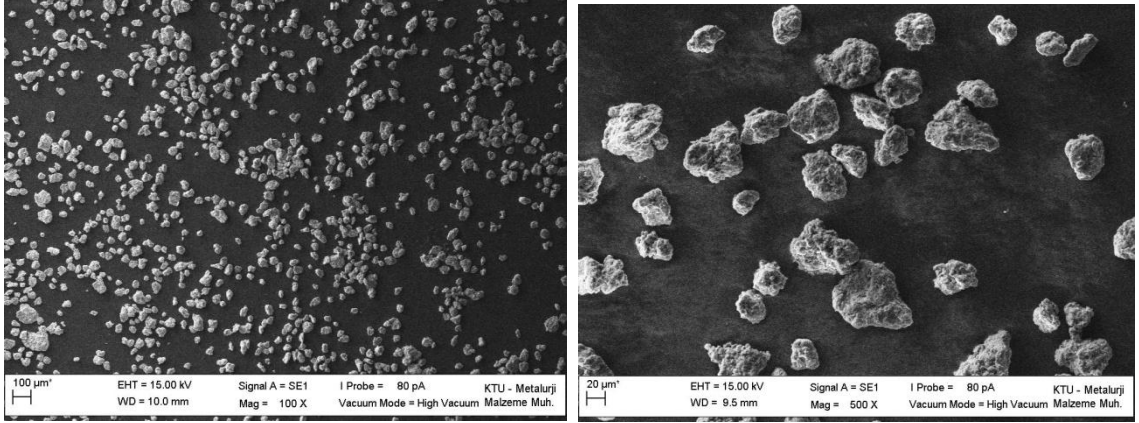
(c)



(d)

Şekil 3.10. Al 2024-%5İ kompozit tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 0.5 saat, (c-d) 1 saat, (e-f) 2 saat

Şekil 3.10'un devamı

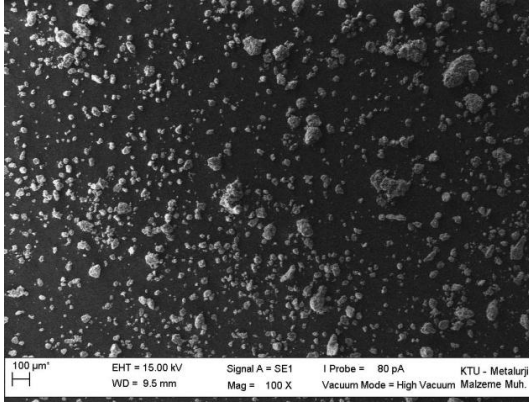


(e)

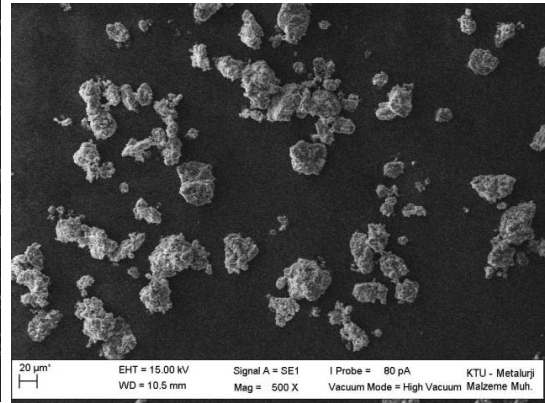
(f)

Küçük Büyütme

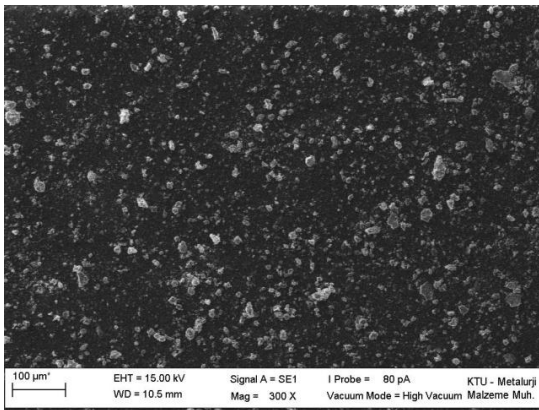
Büyük Büyütme



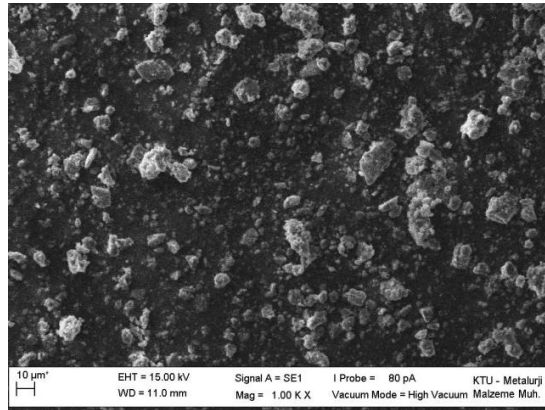
(a)



(b)



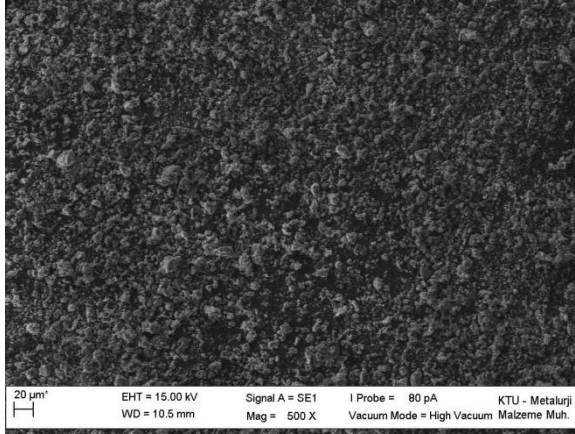
(c)



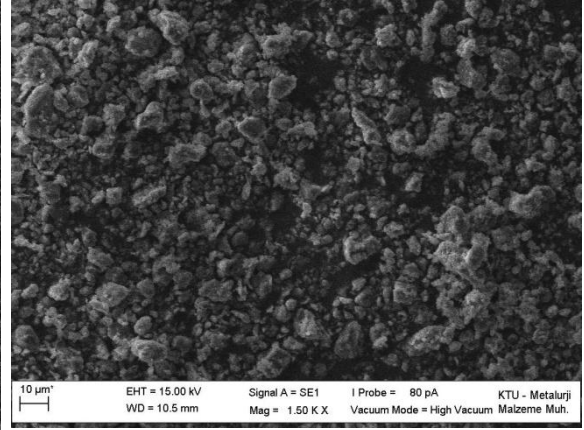
(d)

Şekil 3.11. Al 2024-%5İ kompozit tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 5 saat, (c-d) 7 saat, (e-f) 10 saat

Şekil 3.11'in devamı



(e)

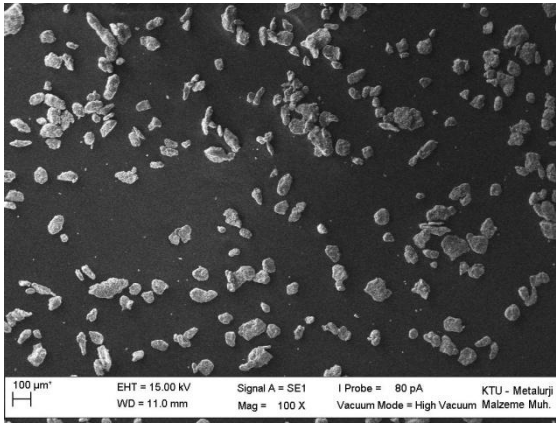


(f)

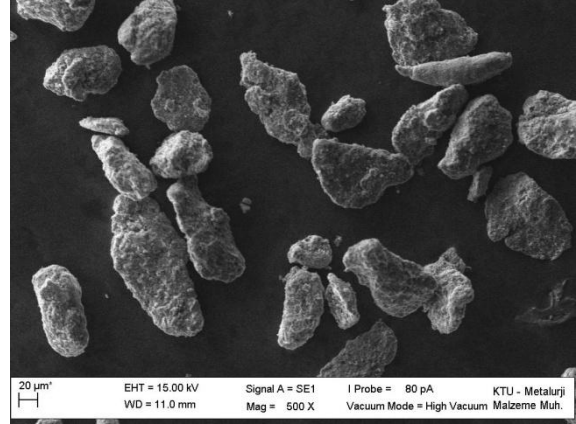
3.1.2.6. Al2024-%10İ

100x

500x



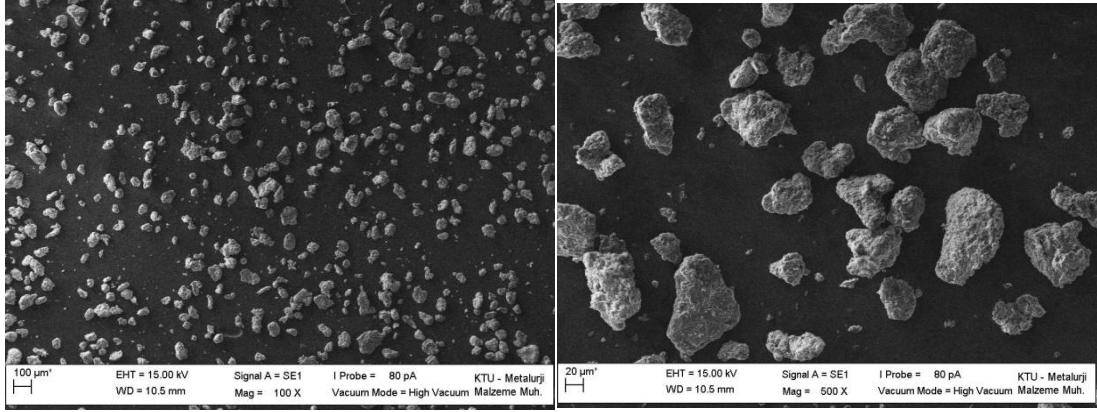
(a)



(b)

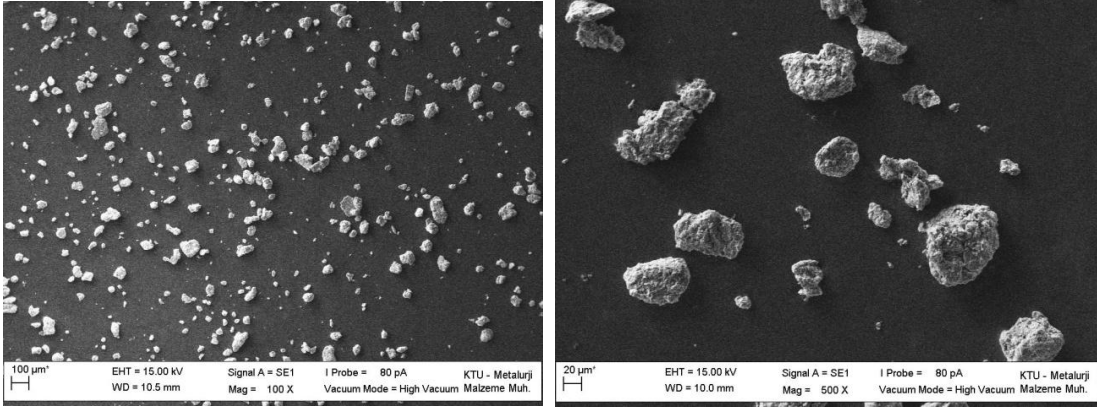
Şekil 3.12. Al 2024-%10İ kompozit tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 0.5 saat, (c-d) 1 saat, (e-f) 2 saat

Şekil 3.12'nin devamı



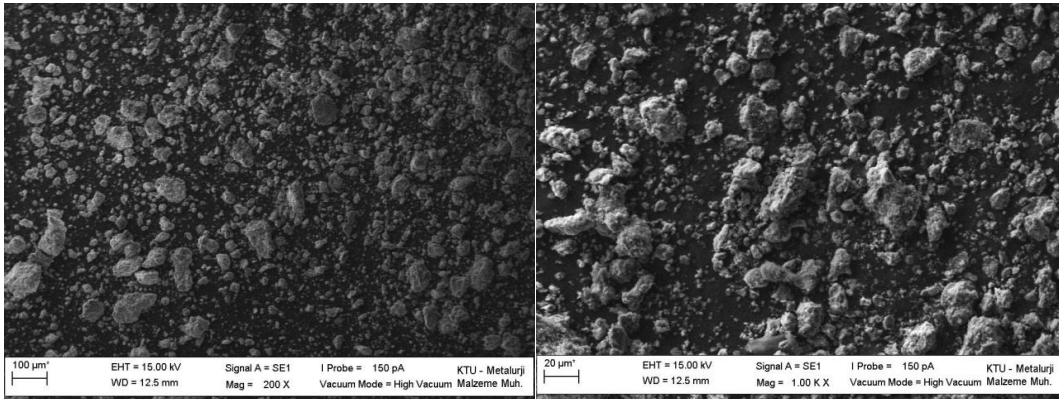
(c)

(d)



(e)

(f)

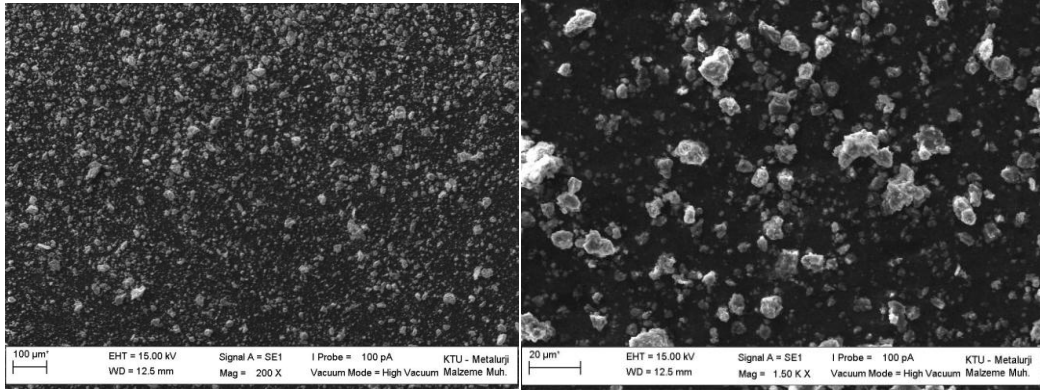
Küçük Büyütme**Büyük Büyütme**

(a)

(b)

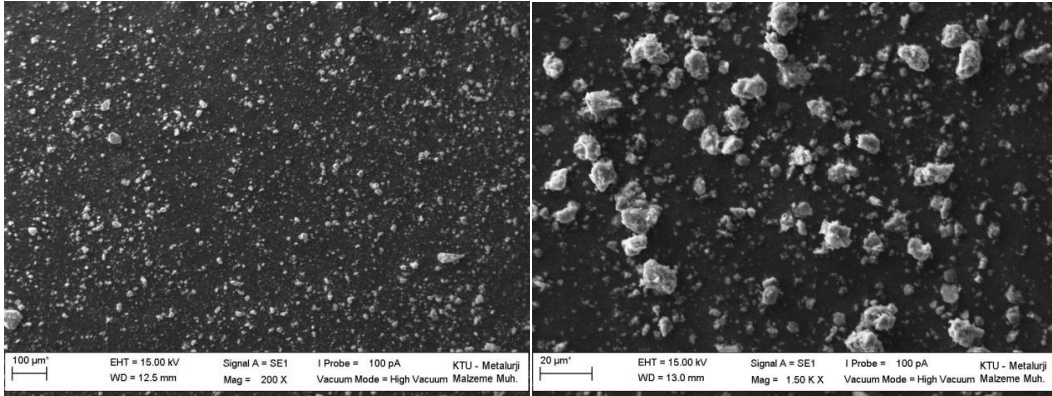
Şekil 3.13. Al 2024-10%Ti kompozit tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 5 saat, (c-d) 7 saat, (e-f) 10 saat

Şekil 3.13'ün devamı



(c)

(d)



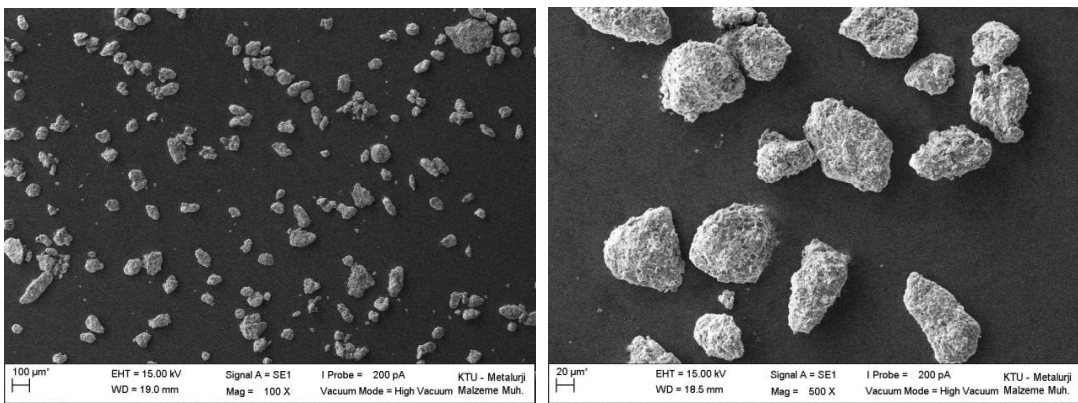
(e)

(f)

3.1.2.7. Al 2024-%20İ

100x

500x

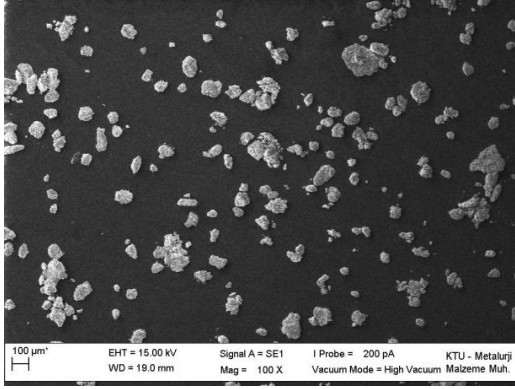


(a)

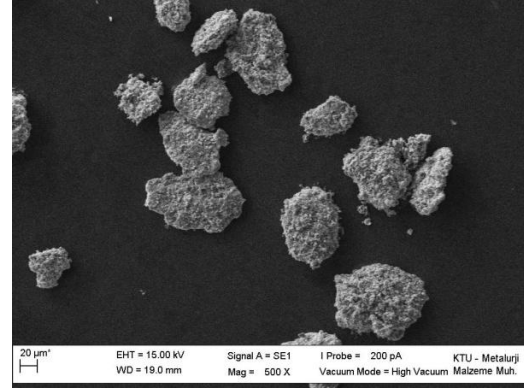
(b)

Şekil 3.14. Al 2024-%20İ kompozit tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 0,5 saat, (c-d) 1 saat, (e-f) 2 saat

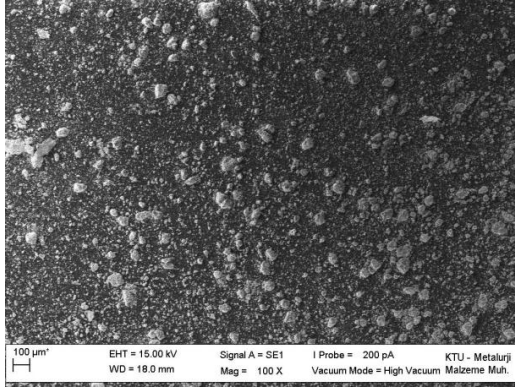
Şekil 3.14'ün devamı



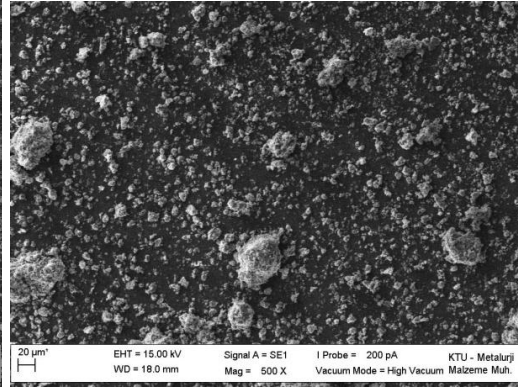
(c)



(d)



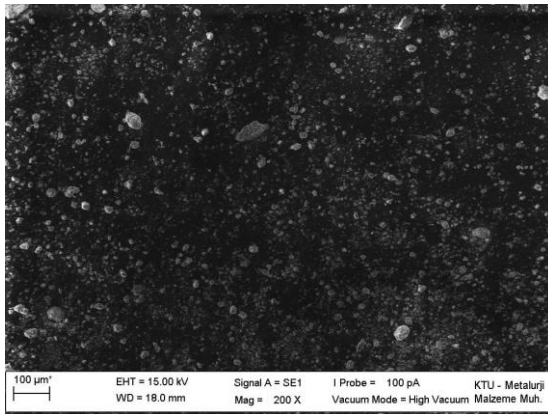
(e)



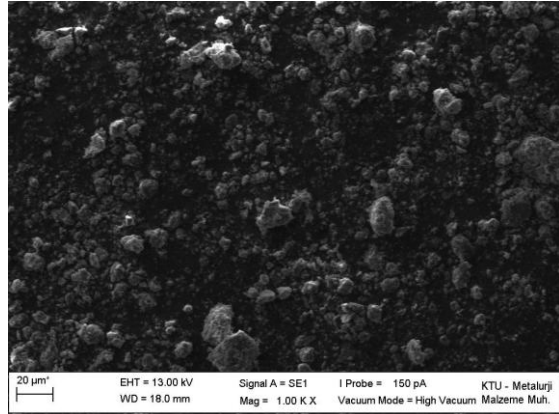
(f)

Küçük Büyütme

Büyük Büyütme



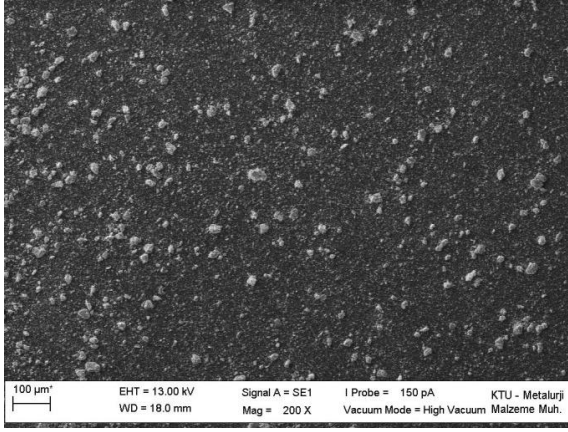
(a)



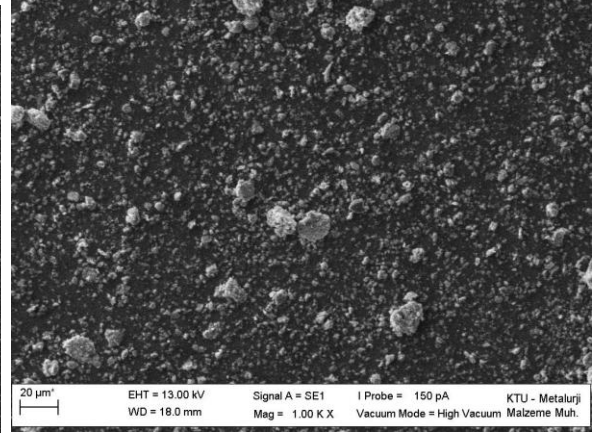
(b)

Şekil 3.15. Al 2024-%20İ kompozit tozlarının morfolojisinin mekanik alaşımlama süresi ile değişimi (a-b) 5 saat, (c-d) 7 saat, (e-f) 10 saat

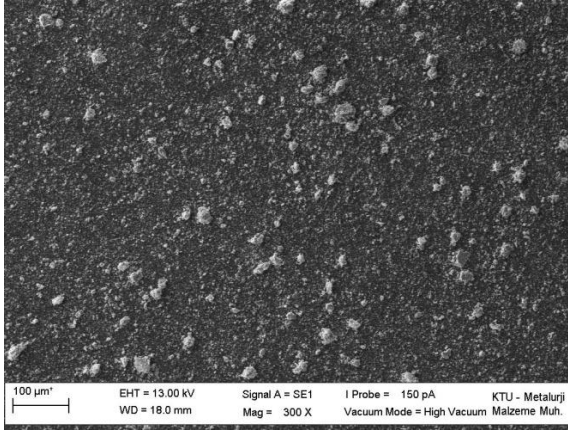
Şekil 3.15'in devamı



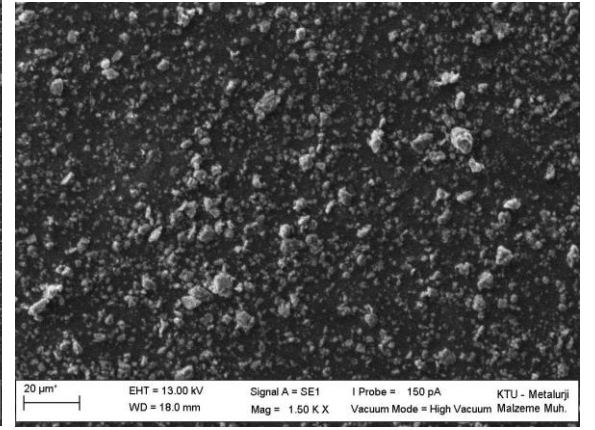
(c)



(d)



(e)



(f)

Toz morfolojisi olarak bütün karışımların aynı karakteristik değişimleri gösterdiği yukarıdaki taramalı elektron mikroskobu görüntülerinden de anlaşılmaktadır. Takviye parçacıklarının boyutu ve miktarı, kırılma ve soğuk kaynak işlemlerini etkileyerek toz morfolojisini değiştirmişlerdir. Bu değişiklik kararlı hal şartlarına daha düşük öğütme saatlerinde ulaşma şeklinde meydana gelmiştir. Bununla birlikte takviye parçacıklarının boyutu ve miktarı toz morfolojisinden ziyade toz boyutu, takviye parçacıklarının matris içersine gömülmesi ve toz sertliğini etkilemektedir.

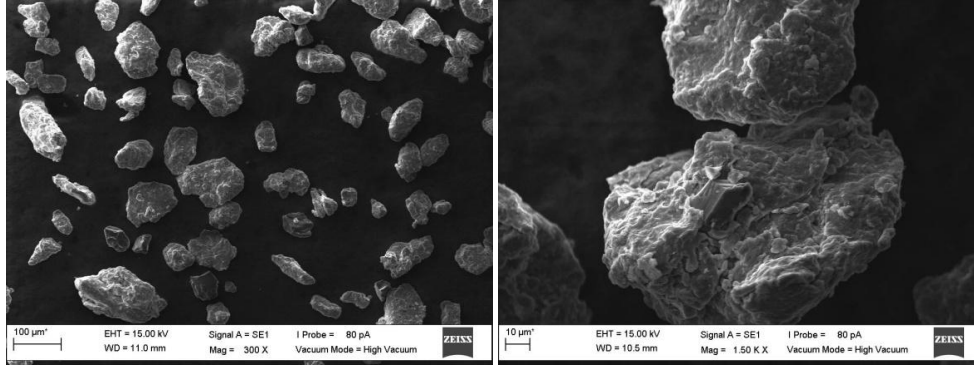
3.1.3. Takviye Parçacıklarının Matris Tozlarına Gömülmesi

Yapılan morfolojik incelemeler sonucunda büyük boyutlu takviye parçacıklarının Al2024 tozları içersine gömülmesinin küçük boyutlu takviye parçacıklarına göre daha zor olduğu görülmüştür. Bunun sebebi olarak matris malzemesinin küçük parçacıklarla daha kolay soğuk kaynak olmasını gösterebiliriz. Ayrıca matris tozlarının başlangıç boyutunun büyük boyutlu parçacıkların boyutlarına yakın olması da matris tozlarının takviye tozlarını sarmasını güçleştirmiştir. Diğer bir deyişle matris tozlarının takviye tozlarını sarabilmesi için takviye boyutunun matris boyutundan oldukça küçük olması gerekmektedir.

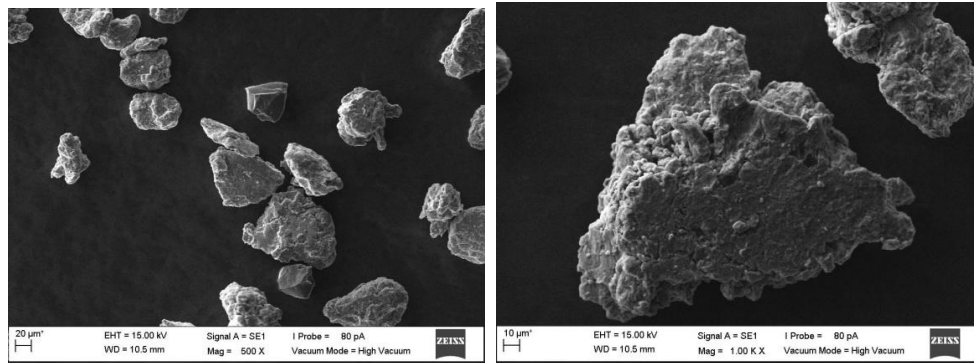
Şekil 3.16' da Al 2024-%5K kompozit tozlarında takviye parçacıklarının 0.5, 1 ve 2 saatlik öğütme sonundaki gömülme kabiliyeti açıkça görülmektedir. 2 saatlik öğütme sonunda hala matris tozundan bağımsız hareket eden takviye parçacıkları mevcuttur.

Küçük Büyütme

Büyük Büyütme



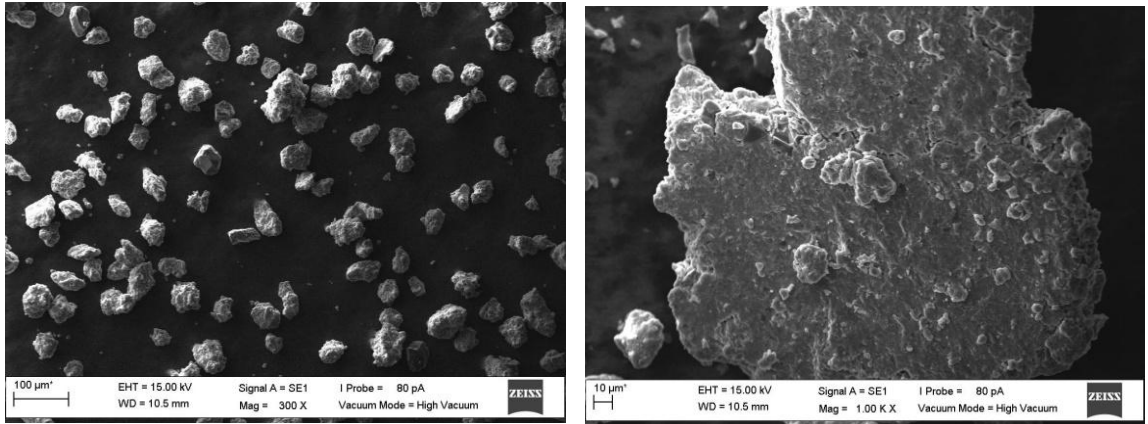
(a)



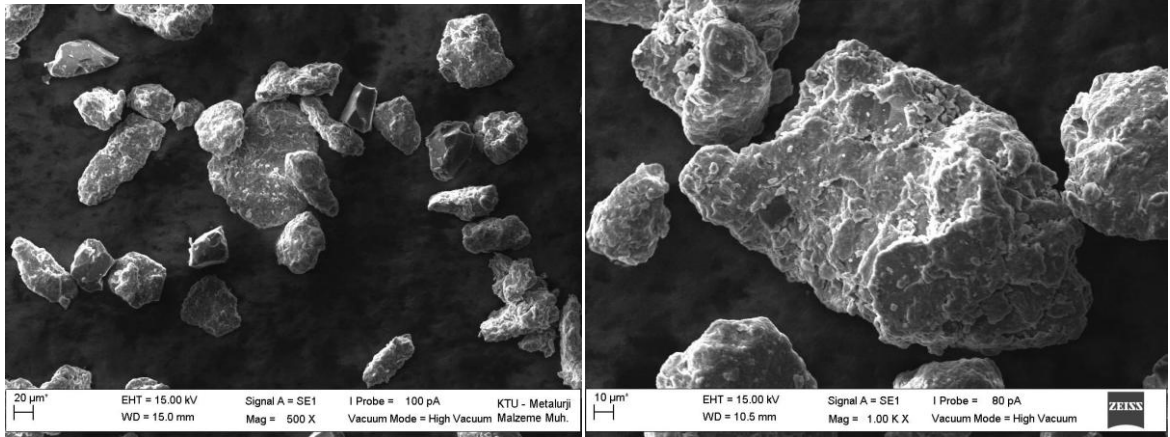
(b)

Şekil 3.16. Al 2024-%5K kompozit tozlarında takviye parçacıklarının dağılımı, a) 0.5 saat, b) 1 saat ve c) 2 saat

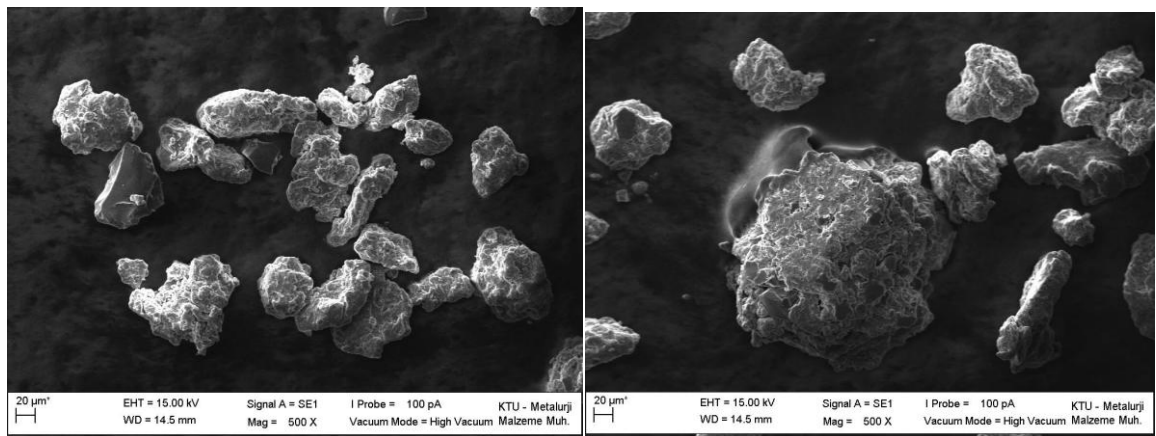
Şekil 3.16'nın devamı



(c)

Küçük Büyütme**Büyük Büyütme**

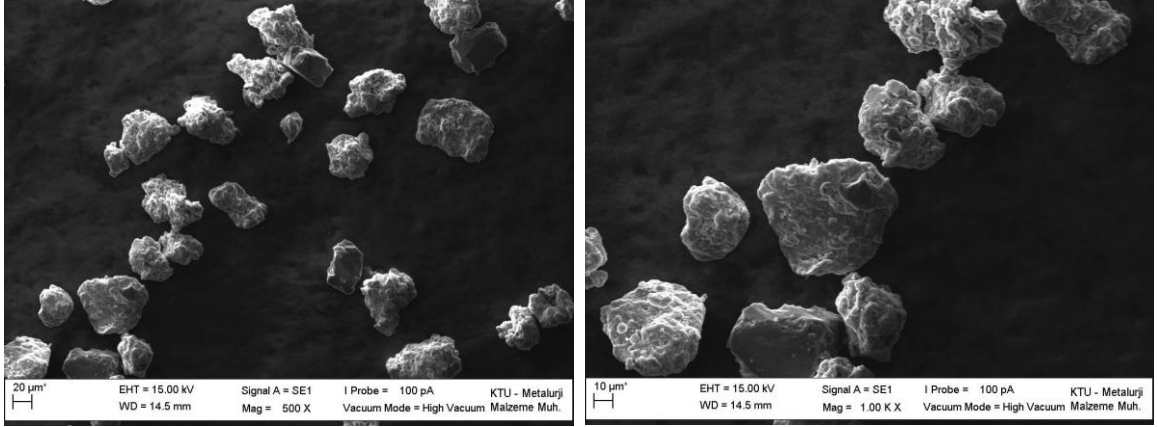
(a)



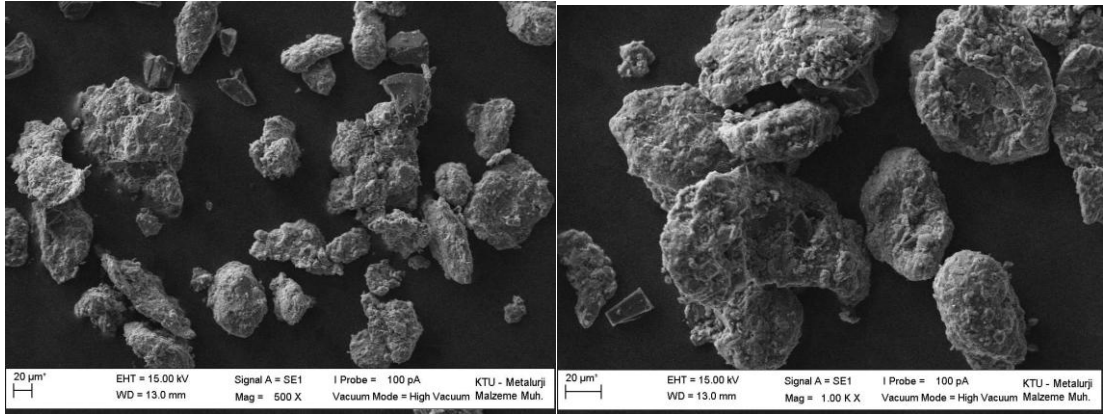
(b)

Şekil 3.17. Al 2024-10K kompozit tozlarında takviye parçacıklarının dağılımı, a) 0.5 saat, b) 1 saat ve c) 2 saat

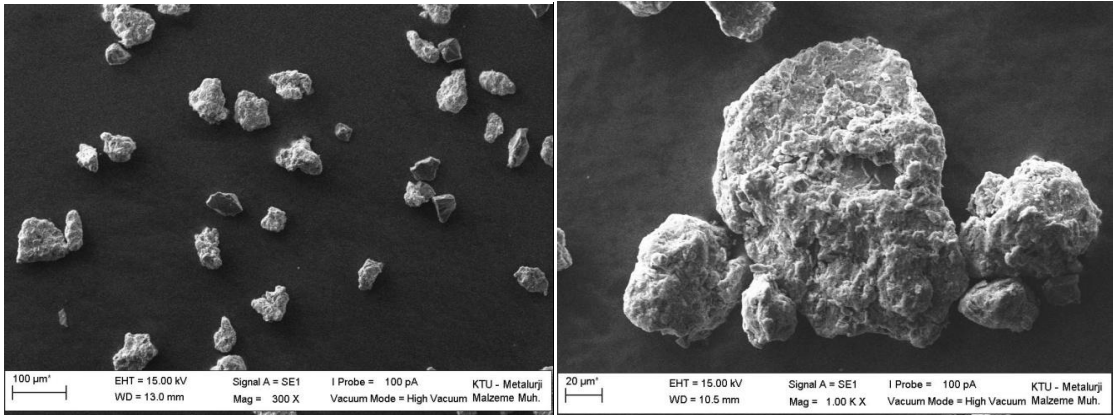
Şekil 3.17'nin devamı



(c)

Küçük Büyütme**Büyük Büyütme**

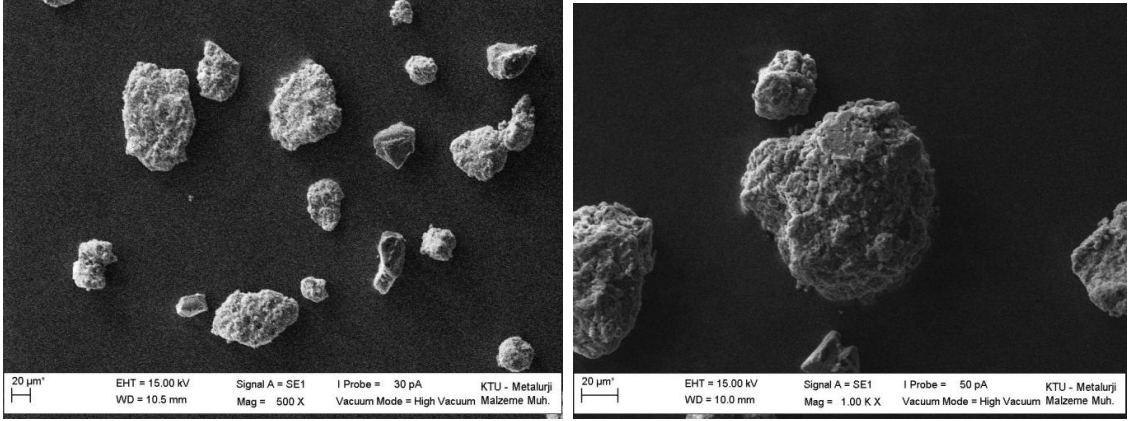
(a)



(b)

Şekil 3.18. Al 2024-%20K kompozit tozlarında takviye parçacıklarının dağılımı, a) 0.5, b) 1 ve c) 2 saat

Şekil 3.18'in devamı

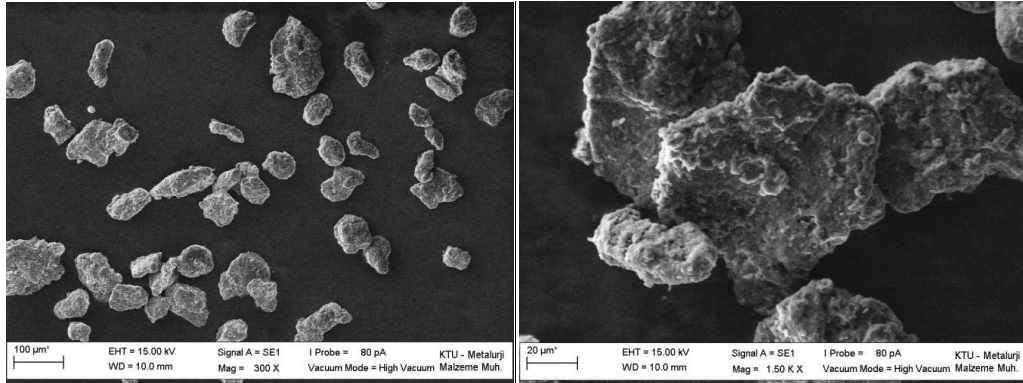


(c)

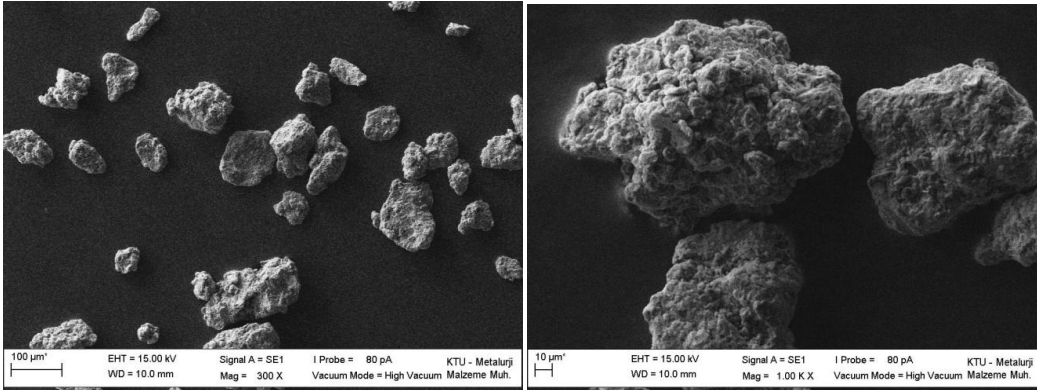
Küçük boyutlu takviye parçacıklarının gömülme kabiliyetinin ne kadar iyi olduğu Şekil 3. 19'da açıkça görülmektedir.

Küçük Büyütme

Büyük Büyütme



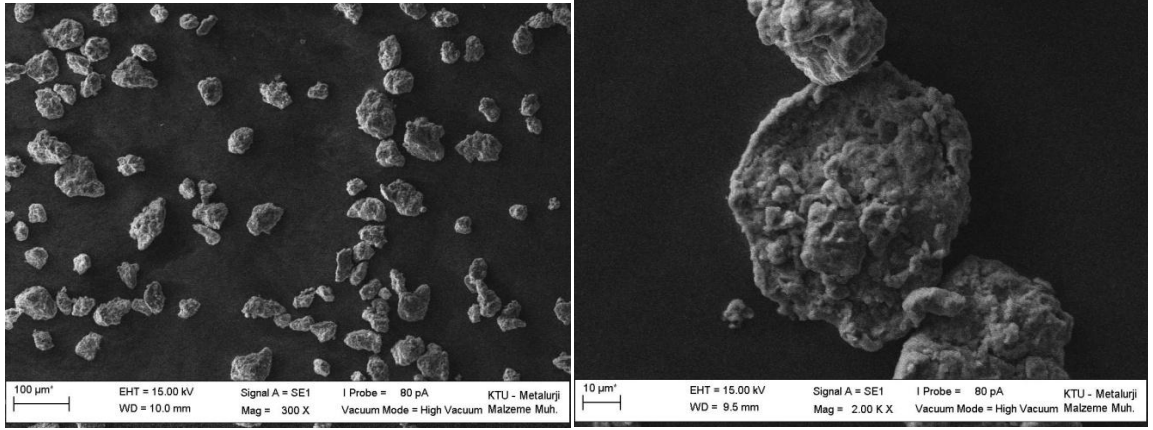
(a)



(b)

Şekil 3.19. Al 2024-5%I kompozit tozlarında takviye parçacıklarının dağılımı, a) 0.5 saat, b) 1 saat ve c) 2 saat

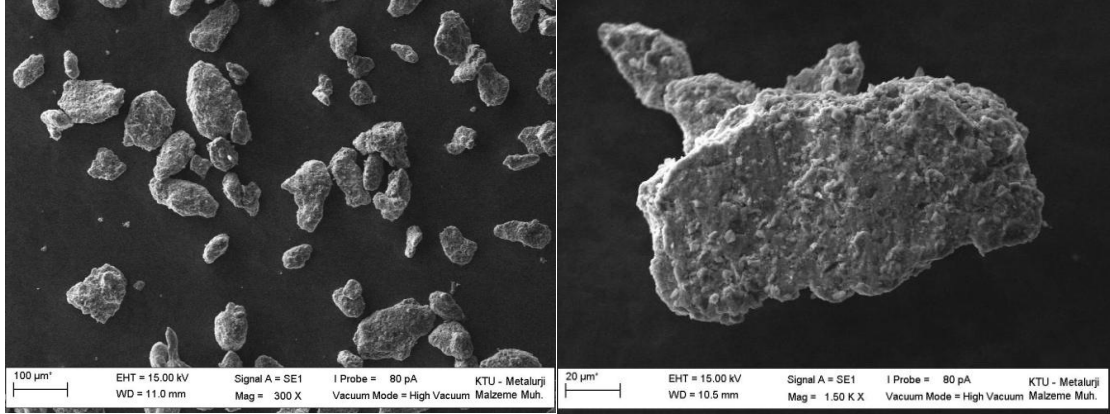
Şekil 3.19'un devamı



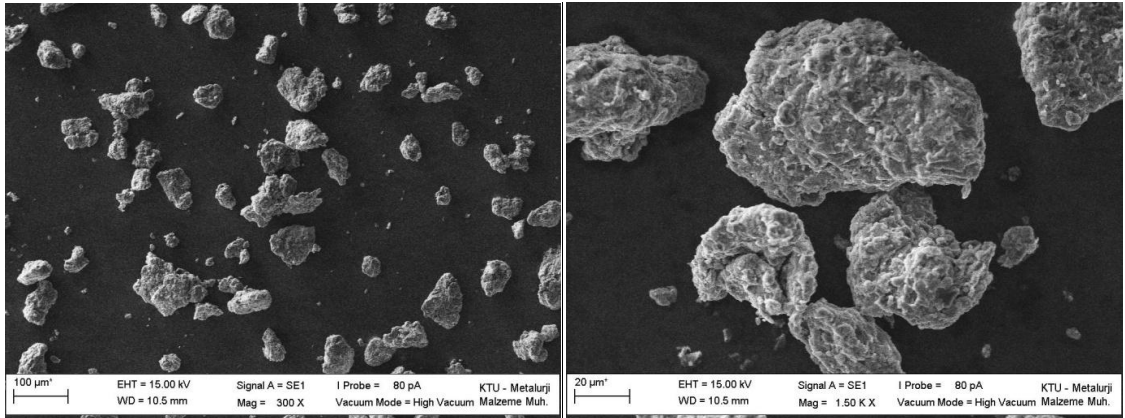
(c)

Küçük Büyütme

Büyük Büyütme



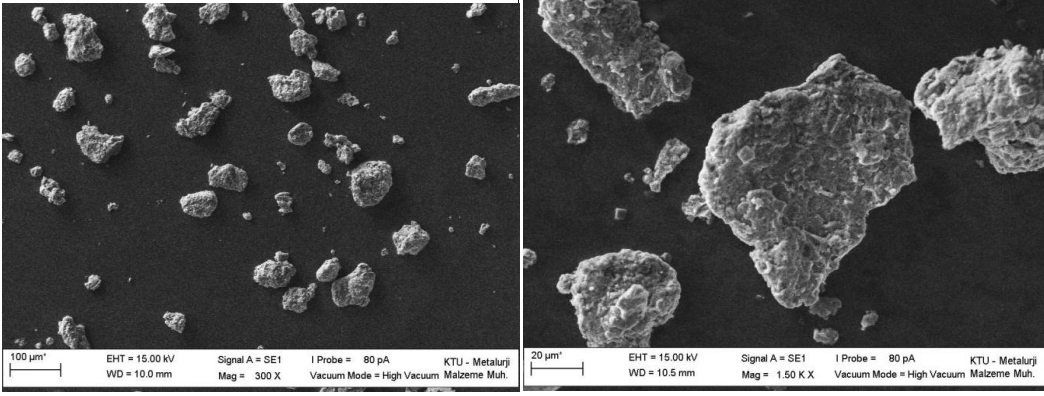
(a)



(b)

Şekil 3.20. Al 2024-%10İ kompozit tozlarında takviye parçacıklarının dağılımı, a) 0.5 saat, b) 1 saat ve c) 2 saat

Şekil 3.20'nin devamı

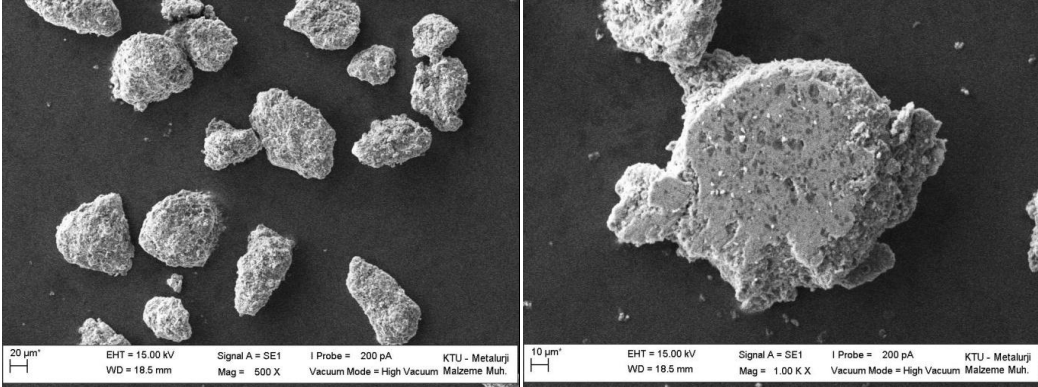


(c)

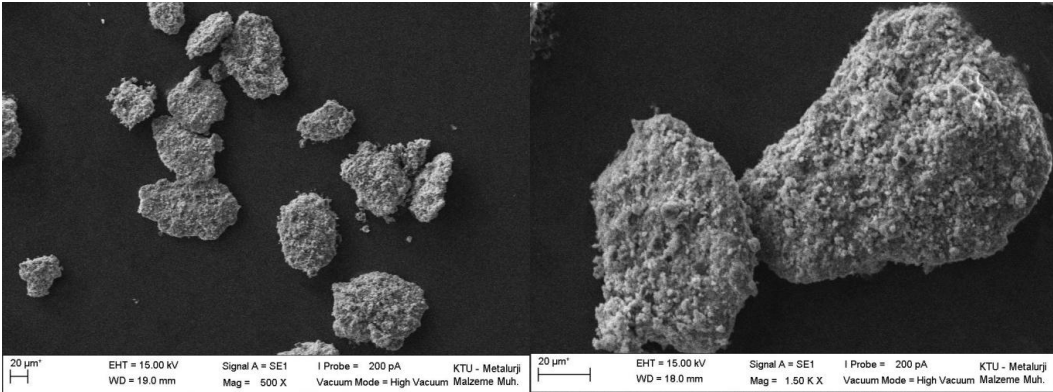
Artan takviye miktarına rağmen parçacıkların matris tarafından sarılması mükemmeldir (Şekil 3.21).

Küçük Büyütme

Büyük Büyütme



(a)

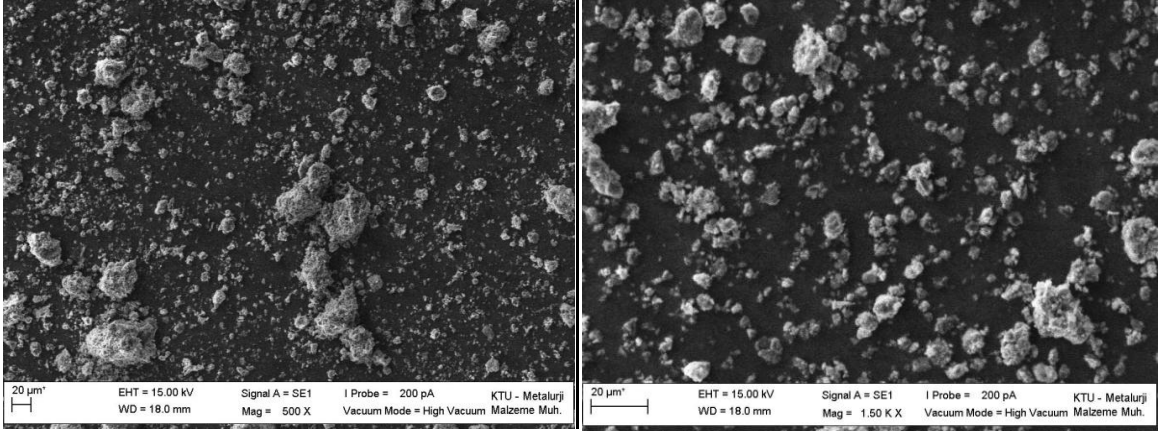


(b)

Şekil 3.21. Al 2024-%20Ti kompozit tozlarında takviye parçacıklarının dağılımı,

a) 0.5 saat, b) 1 saat ve c) 2 saat

Şekil 3.21'in devamı



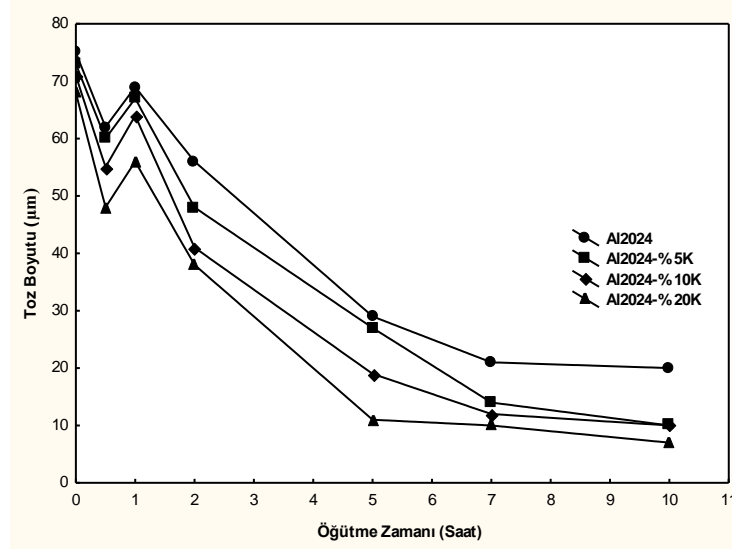
(c)

3.1.4. Toz Boyutu

Mekanik alaşımlama işleminde yüksek enerjili öğütme işlemine maruz kalan toz parçacıkları bilye-toz-bilye, bilye-toz-değirmen yüzeyi çarpışmaları sonucunda hem morfolojik hem de boyutsal anlamda değişim gösterirler. Mekanik alaşımlama ile ilgili yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkan genel görüş öğütmenin ilk aşamalarında toz boyutunun soğuk kaynak sonucunda arttığı ilerleyen öğütme sürelerinde ise azalarak kararlı hale ulaştığıdır [118]. Bununla birlikte bu oluşum başlangıç boyutu, başlangıç tozlarının morfolojisi, işlem kontrol katkısının miktarı ve uygulanma biçimi gibi faktörlere de bağlıdır. Toz boyutu değişimleri incelendiğinde 0.5 saate kadar bir miktar boyut düşüşünün olduğu 0.5 saat ile 1 saat arasında soğuk kaynak nedeni ile boyut artışının olduğu gözlemlenmiştir. 0.5 saate kadar geçen süredeki boyut azalmasının nedeni başlangıç tozlarının düzensiz ve çubuksu morfolojiye sahip olmaları gösterilebilir. Bu tozlar bilye-toz-bilye çarpışmaları sonucunda ince bölgelerinden (boyun bölgesi) koparak öğütmenin başlangıcında toz boyutunun azda olsa düşmesine neden olmaktadır. Öğütme işleminin 1 saatinden 7 saat sonuna kadar toz boyutunda sürekli bir azalma 7 saatten sonra ise bir denge hali görülmüştür. Toz boyutu değerleri incelendiğinde artan takviye oranının kırılma etkinliğini artırdığı ve sistemin daha hızlı kararlı hale ulaştığı görülmektedir. Takviye boyutunun, boyut değişimine etkisi araştırıldığında ise azalan takviye boyutunun toz boyutu değişimi üzerinde kısmi bir etkisi olduğu söylenebilir. Çalışmada kullanılan takviye malzemesinin başlangıç boyutları arasındaki fark 10 kat olmasına rağmen ulaşılan boyutlar arasındaki fark 1.1 civarındadır. Küçük takviye boyutuna sahip parçacıkların

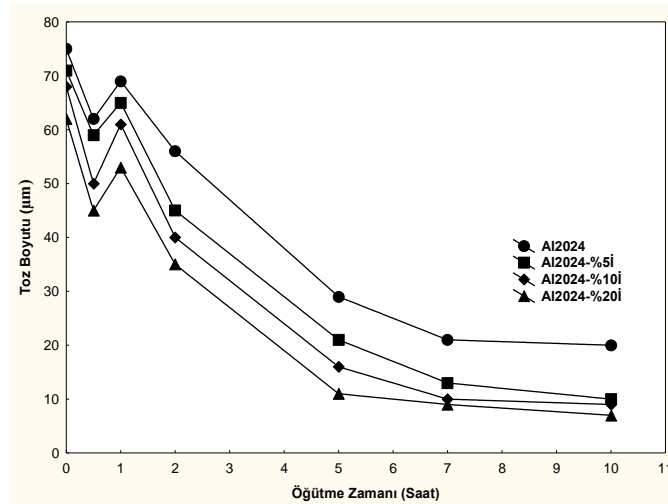
kırılma etkinliğini yeterince artıramamasının sebebi matris içersine gömülerek kırıcı etkilerinin azalmasıdır. Büyük takviye boyutuna sahip parçacıklar matris tozlarını aralarına alarak kırıcı etki yaratabilmekte fakat küçük takviye boyutuna sahip parçacıklar bunu gerçekleştirememektedir.

3.1.4.1. 1. Grup kompozit tozlar



Şekil 3.22. Kaba takviye boyutuna sahip kompozit toz boyutlarının öğütme zamanı ile değişimi

3.1.4.2. 2. Grup kompozit tozlar

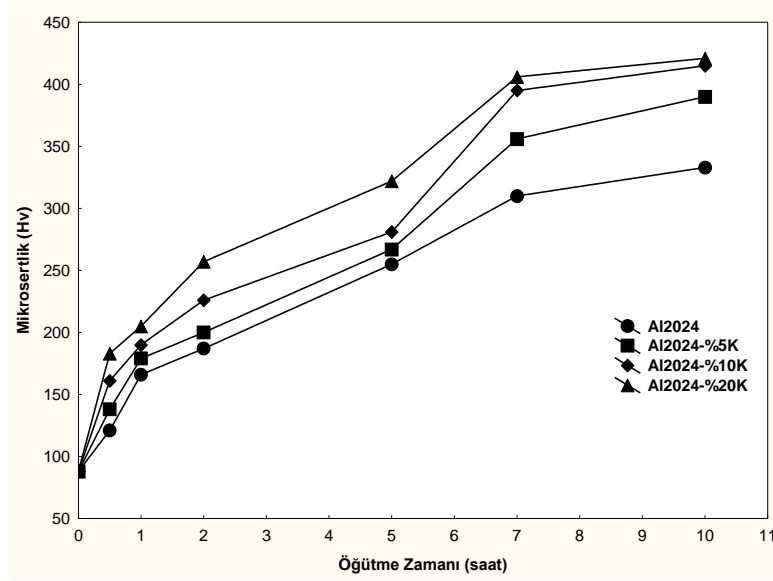


Şekil 3.23. İnce takviye boyutuna sahip kompozit toz boyutlarının öğütme zamanı ile değişimi

3.1.5. Toz Sertliği

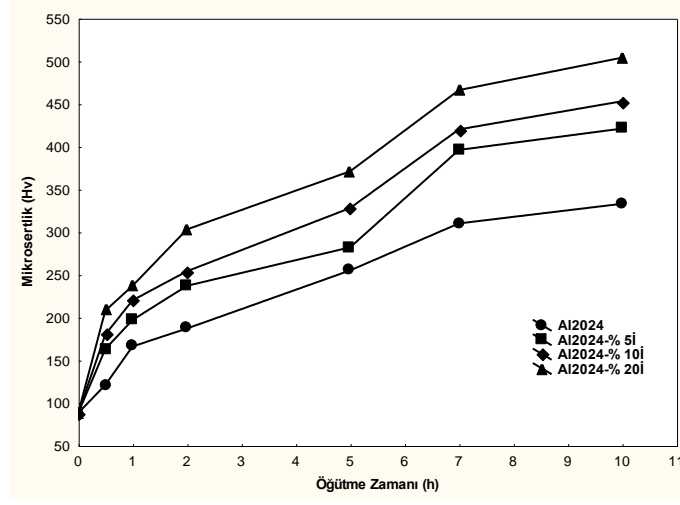
Toz sertlikleri incelendiğinde katkısız tozlarda artan öğütme zamanı ile oluşan deformasyon sertleşmesi sonucunda toz sertliklerinin arttığı, katkılı tozlarda ise hem artan öğütme zamanı hem de artan takviye oranı ile kompozit toz sertliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Takviye malzemesinin toz sertliğine etkisi takviye parçacıklarının matris malzemesine gömülebilmesi ile yakından ilgilidir. Mikrosertlik değerleri incelendiğinde küçük boyutlu takviye parçacıklarının matris içersine gömülme kabiliyetinin iyi olmasından dolayı mikrosertlik değerlerinde önemli ölçüde artış sağlanmıştır.

3.1.5.1. 1. Grup kompozit tozlar



Şekil 3.24. Kaba takviye boyutuna sahip kompozit toz sertliklerinin öğütme zamanı ile değişimi

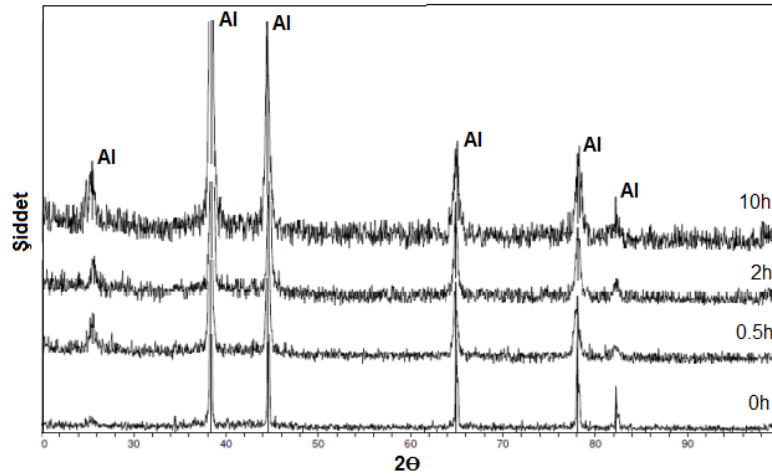
3.1.5.2. 2. Grup kompozit tozlar



Şekil 3.25. İnce takviye boyutuna sahip kompozit toz sertliklerinin öğütme zamanı ile değişim

3.1.6. Faz Karakterizasyonu

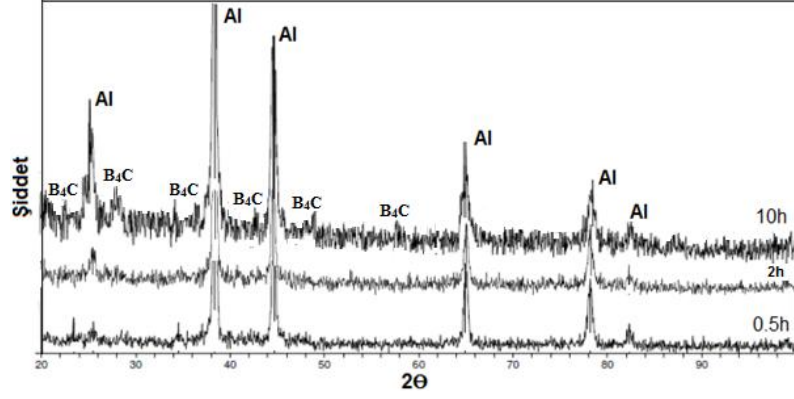
Faz karakterizasyonu için Al 2024 tozları ve kompozit tozlar ayrı ayrı mekanik öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 3.26'da 0, 0.5, 2 ve 10 saatlik öğütme işlemi sonucunda Al 2024 tozları için elde edilen XRD pikleri görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi artan öğütme zamanı sonucunda artan deformasyon sonucu piklerde genişleme mevcuttur.



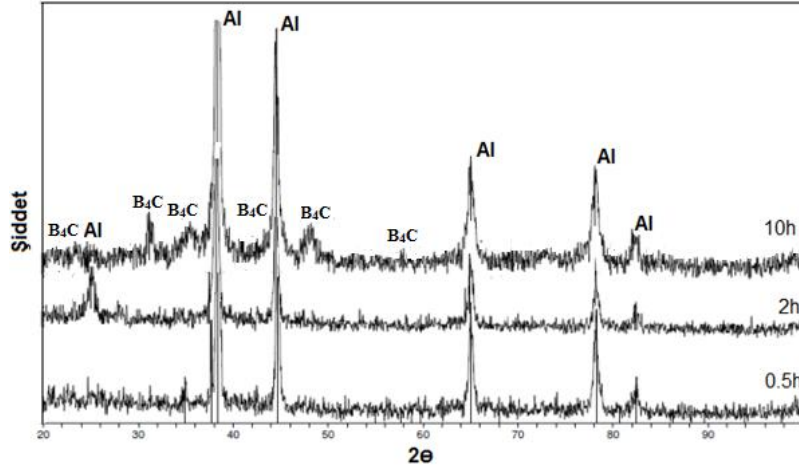
Şekil 3.26. Al 2024 tozlarının XRD pikleri

Al2024-B₄C metal matrisli kompozit tozlarının 0.5, 2 ve 10 saatlik öğütme zamanları sonucunda oluşan X-ışını difraksiyon paternleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

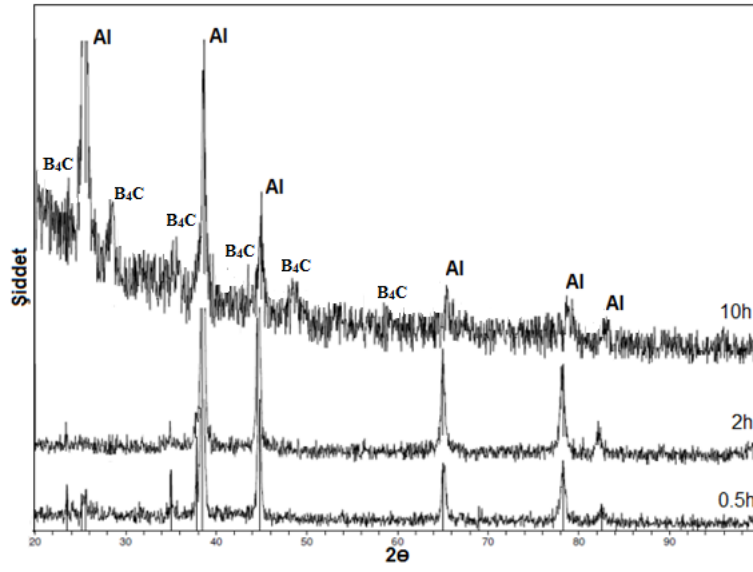
Şekillerdende görüldüğü gibi kompoziti oluşturmak için başlangıç tozları olarak ilave edilen Al 2024 ve B₄C tozları dışında herhangi bir pik görülmemiştir. Bu durum mekanik alaşımlama işlemi esnasında matris ve takviye tozları arasında herhangi bir kimyasal reaksiyon gerçekleşmediğini göstermektedir.



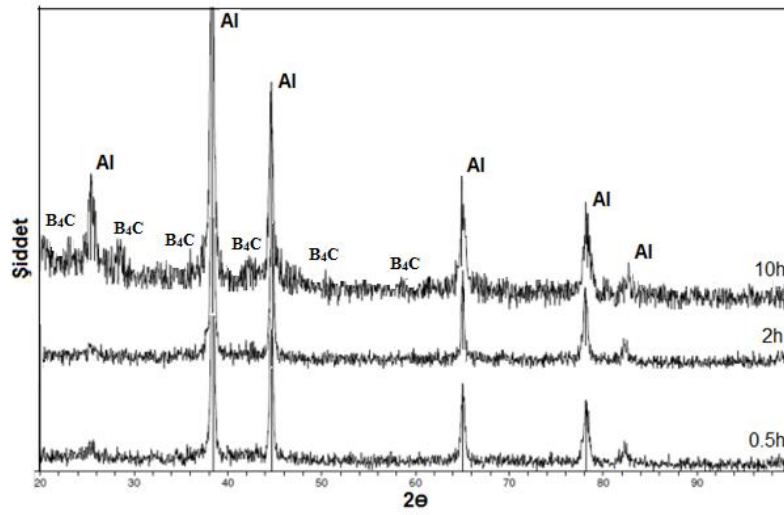
Şekil 3.27. Al 2024-%5K tozlarının XRD pikleri



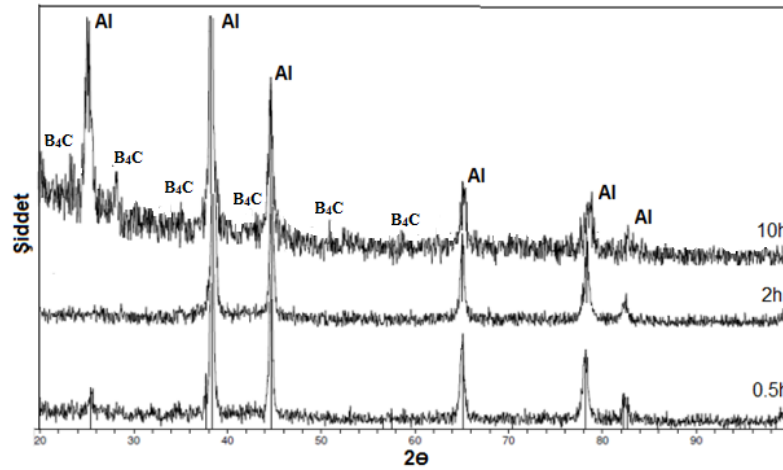
Şekil 3.28. Al 2024-%10K tozlarının XRD pikleri



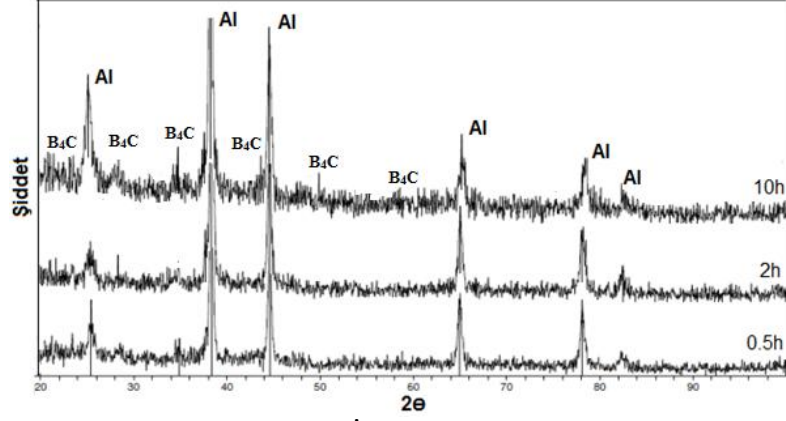
Şekil 3.29. Al 2024-%20K tozlarının XRD pikleri



Şekil 3.30. Al 2024-%5İ tozlarının XRD pikleri



Şekil 3.31. Al 2024-%10İ tozlarının XRD pikleri



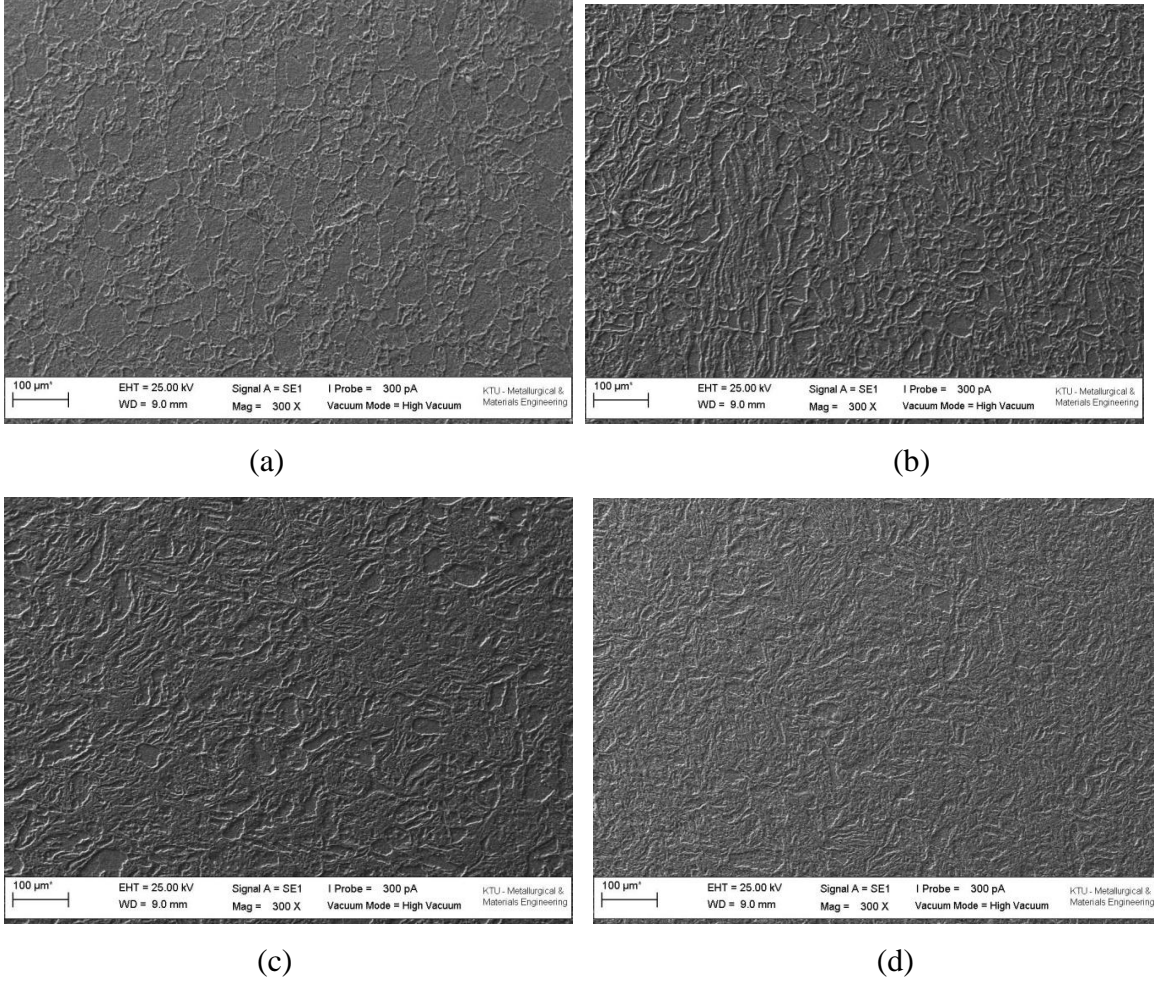
Şekil 3.32. Al 204-20% B₄C tozlarının XRD pikleri

3.2. Kompozit Malzeme Özelliklerinin İncelenmesi

3.2.1. 200 MPa Basınçla Preslenen Numunelerin İyçyapı İncelemeleri

Artan öğütme zamanı ile toz parçacıklarının yönelmesi (takviyesiz ürünler için) ve takviye elemanlarının dağılımı taramalı elektron mikroskopunda incelenerek elde edilen SEM resimleri aşağıda verilmiştir. Toz morfolojisinin öğütme süresi ile değişimi net bir şekilde görülmektedir.

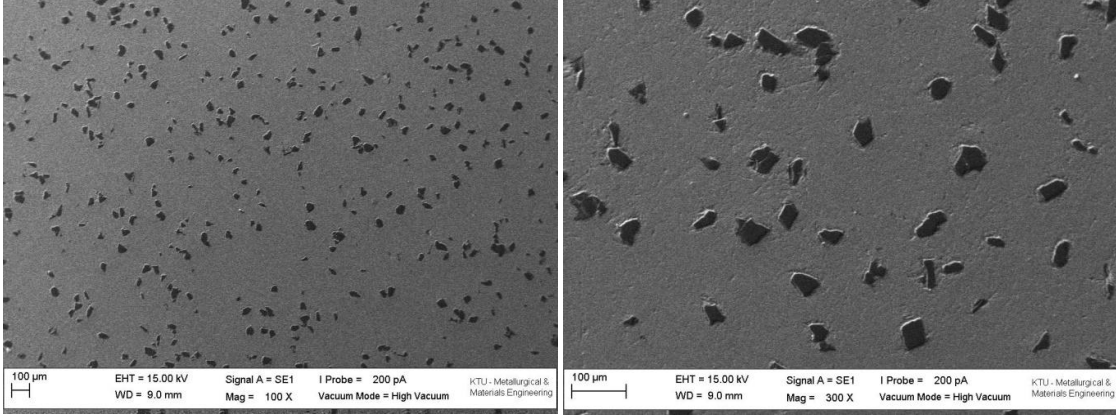
3.2.1.1. Al2024



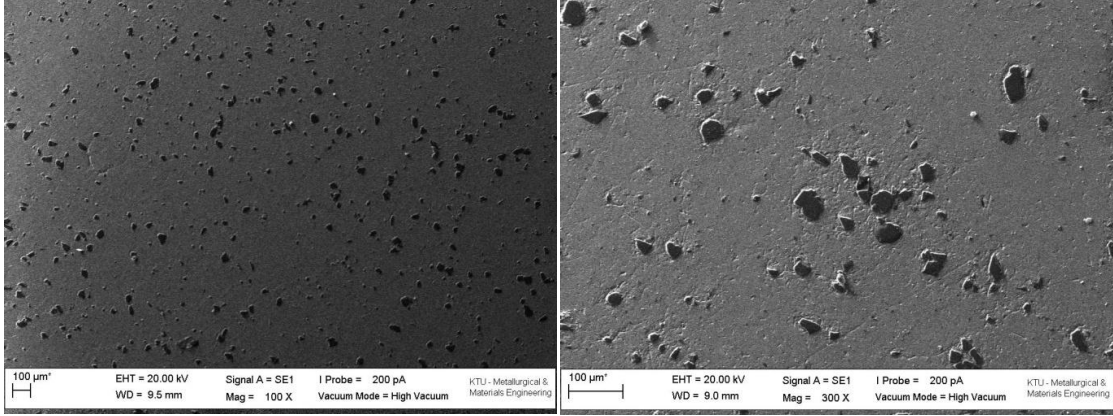
Şekil 3.33. Takviyesiz Al2024 alaşımının MA süresiyle oluşan içyapı görüntüleri (Dağlanmış), a) 0 saat (TM), b) 0.5saat, c) 2saat, d) 10saat

3.2.1.2. Al2024-%5K

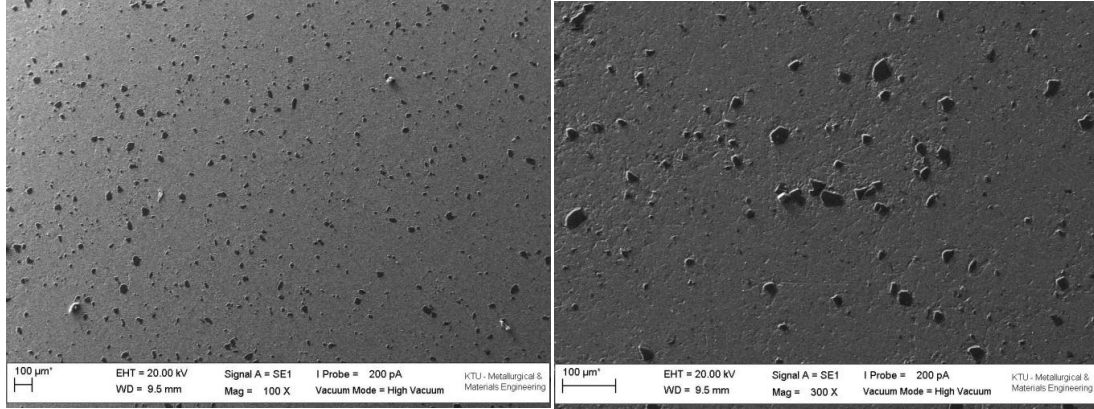
Aşağıdaki şekiller incelendiğinde takviye malzemesi olan B_4C parçacıklarının artan öğütme süresi ile matris malzemesi içerisinde daha homojen olarak dağıldığı görülmüştür. Bununla birlikte 0 saat de elde edilen morfoloji incelendiğinde topaklanmanın aşırı olmadığı görülmüştür. Bunun sebebi takviye parçacık boyutunun büyük ve oranının az olmasıdır. Artan öğütme süresi ile ortaya çıkan olaylardan biride gevrek takviye parçacıklarının da kırılmasıdır. Parçacıkların kırılması ile matris içerisindeki parçacık sayısı artmakta buna rağmen topaklanma görülmemektedir. Bu topaklanmanın oluşmaması mekanik alaşımlama yönteminin avantajlarından biridir.

Küçük Büyütme**Büyük Büyütme**

(a)



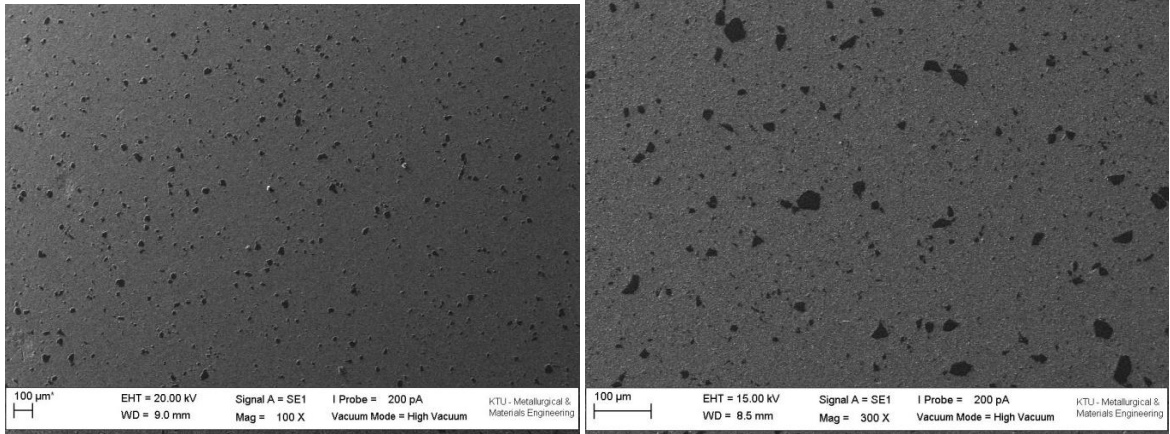
(b)



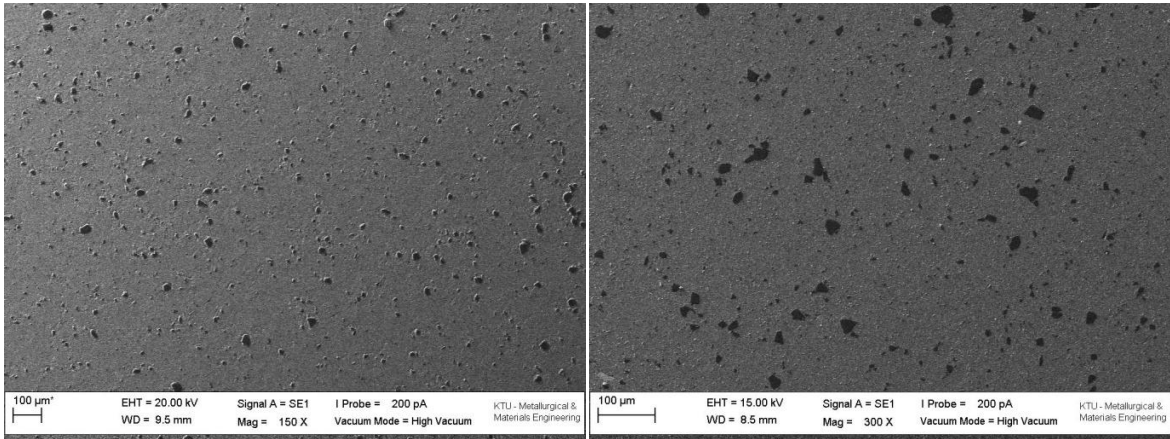
(c)

Şekil 3.34. Al2024-%5K kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat

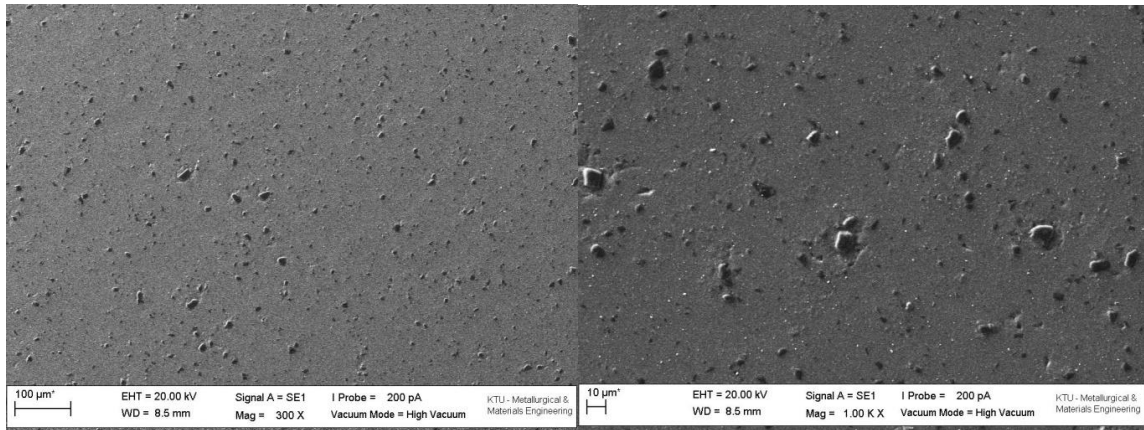
Şekil 3.34'ün devamı



(d)

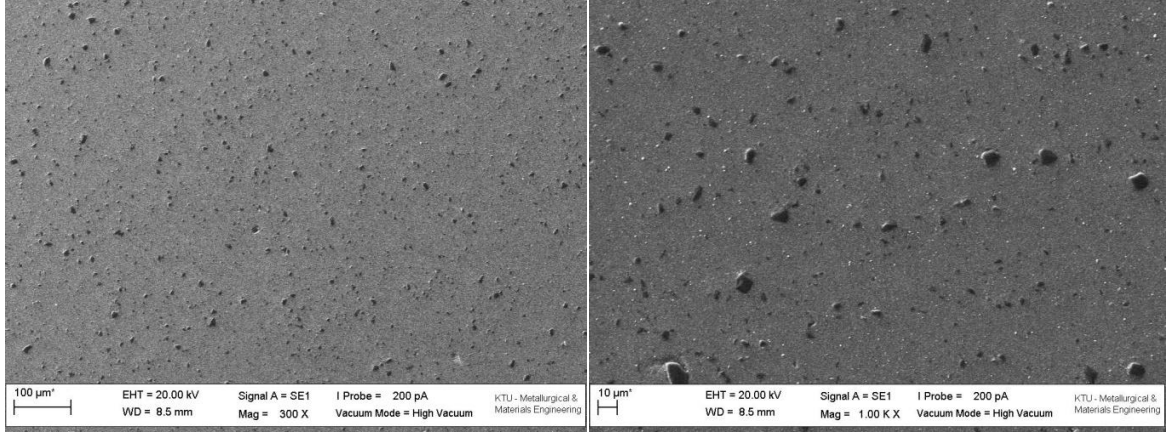


(e)



(f)

Şekil 3.34'ün devamı



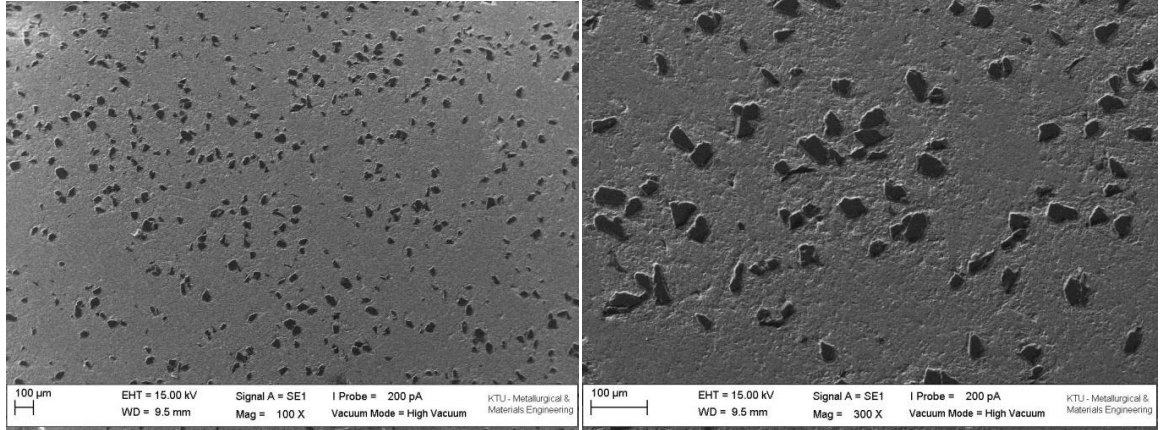
(g)

3.2.1.3. Al2024-%10K

Şekillerden de anlaşıldığı üzere artan takviye parçacık oranı ile parçacık sayısı artmış ve parçacıklar birbirine daha da yakınlaşmıştır. Bununla birlikte 5 saatlik öğütmeden sonra takviye parçacıklarının homojen olarak dağılmaya başladığı görülmüştür. Morfolojik olarak da takviye parçacıklarının boyutlarındaki azalış açık bir şekilde görülmektedir.

Küçük Büyütme

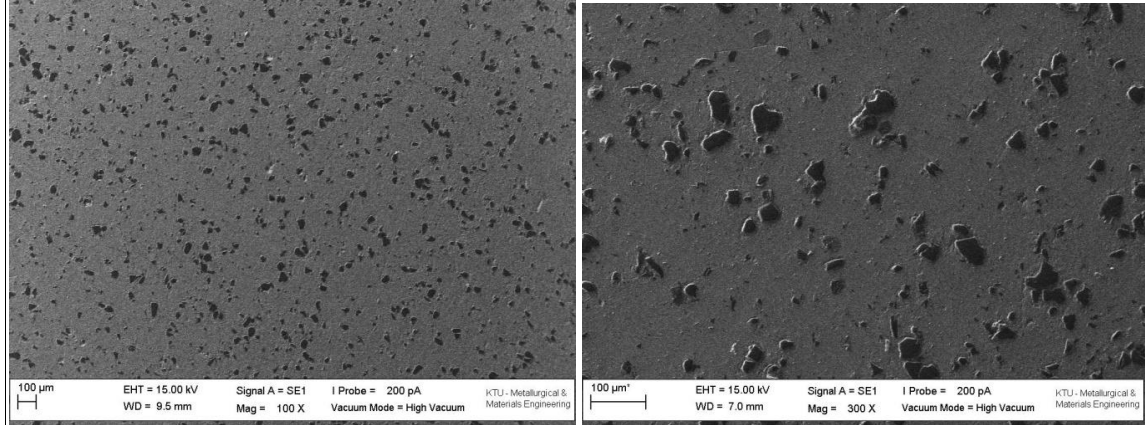
Büyük Büyütme



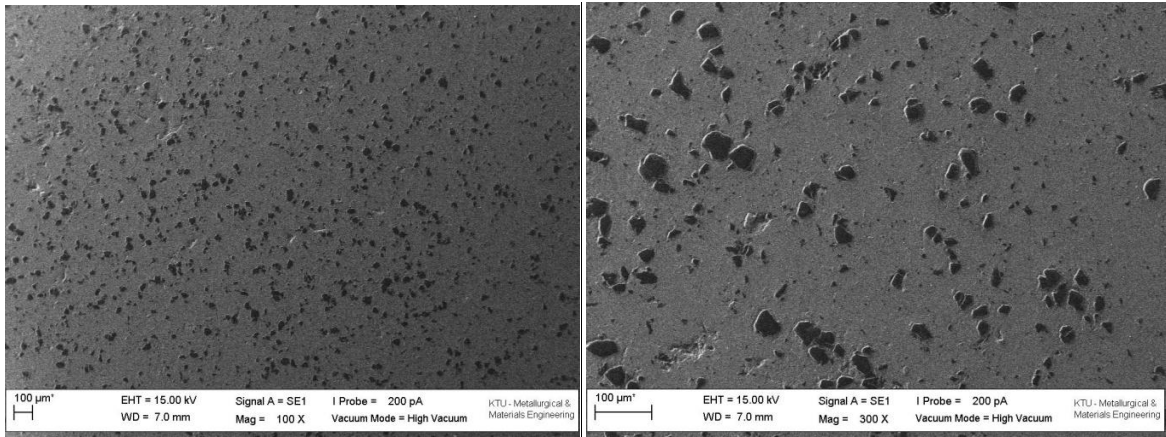
(a)

Şekil 3.35. Al2024-%10K kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat

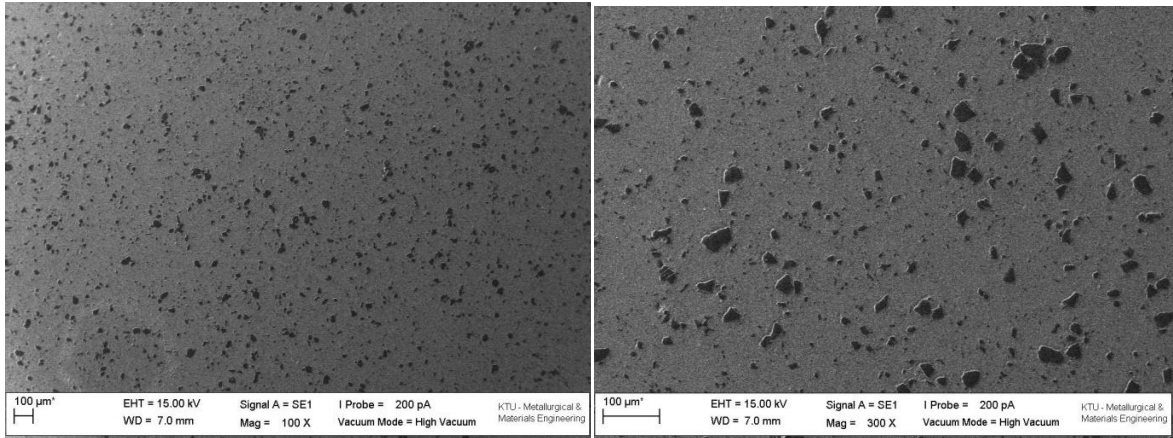
Şekil 3.35'in devamı



(b)

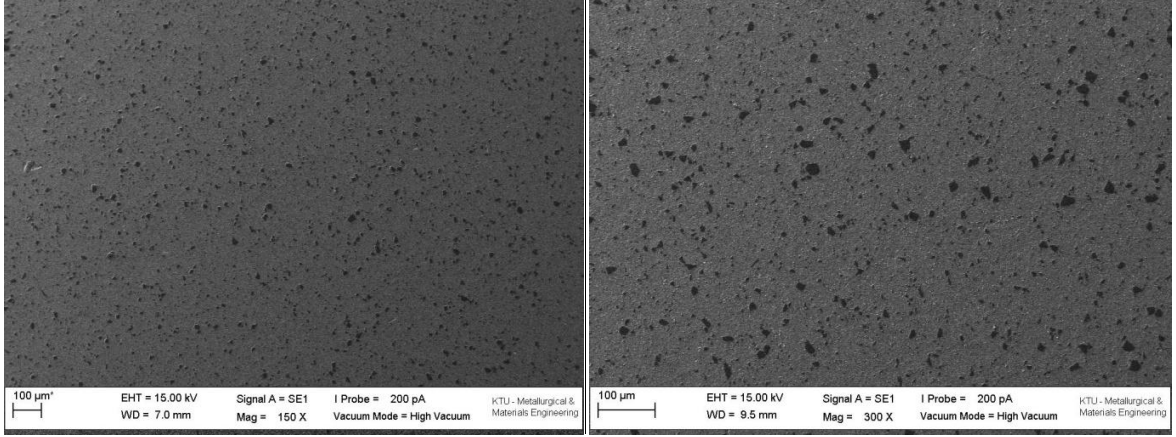


(c)

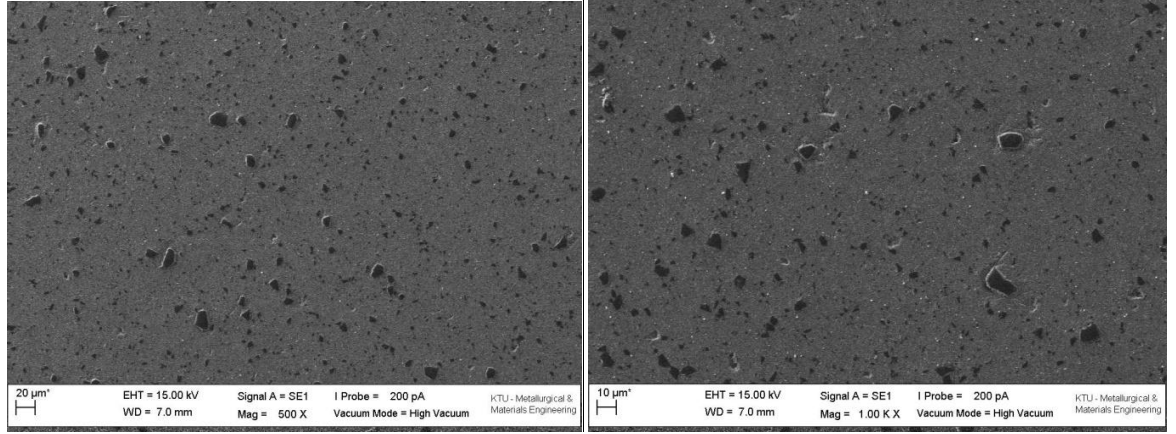


(d)

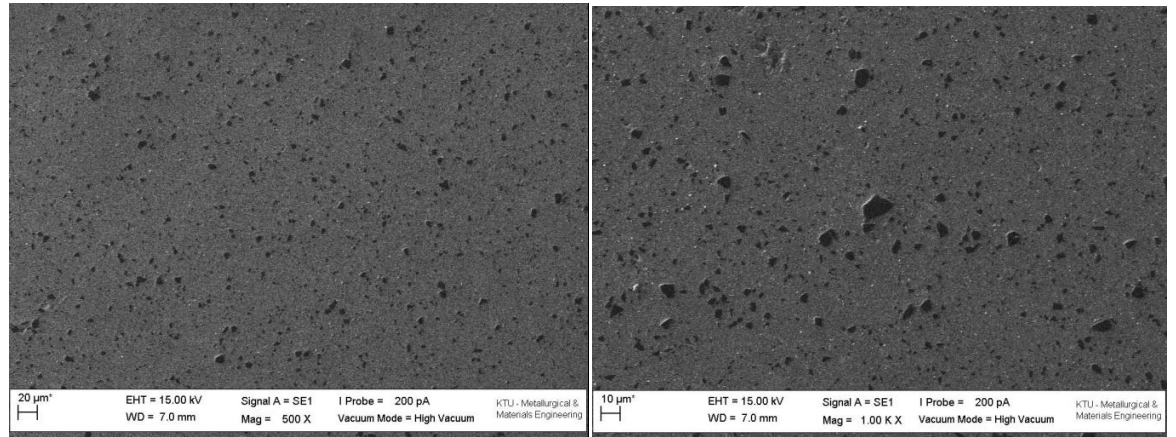
Şekil 3.35'in devamı



(e)



(f)



(g)

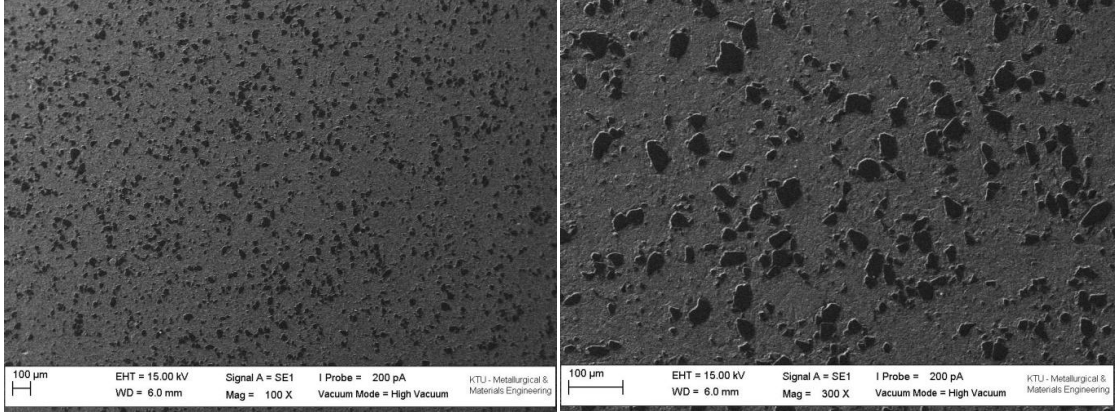
3.2.1.4. Al2024-%20K

0 saatlik içyapı resmi incelendiğinde artan takviye oranı nedeni ile topaklanmaların iyice arttığı görülmektedir. Takviye parçacıklarının büyük çoğunluğu birbiri ile temas

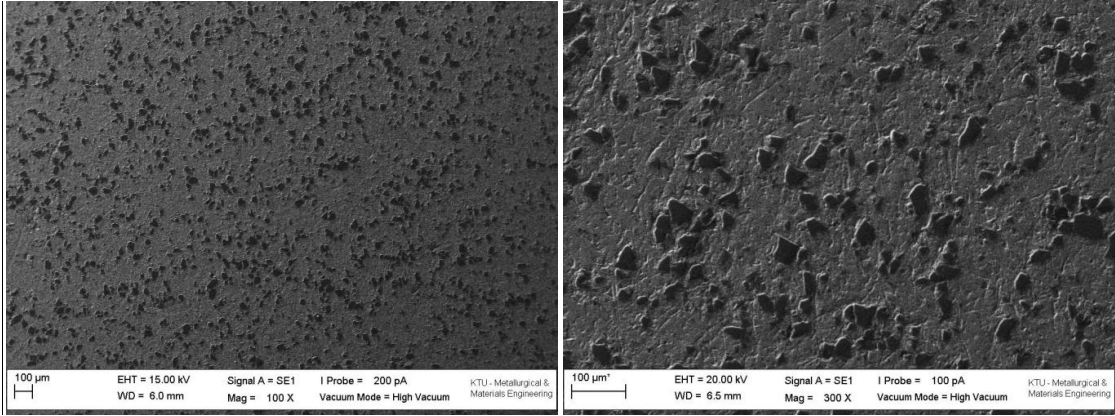
halindedir. Artan öğütme süresi ile hem B4C parçacıkları kırılmakta hem de aralarındaki mesafe artarak topaklanma önlenmektedir.

Küçük Büyütme

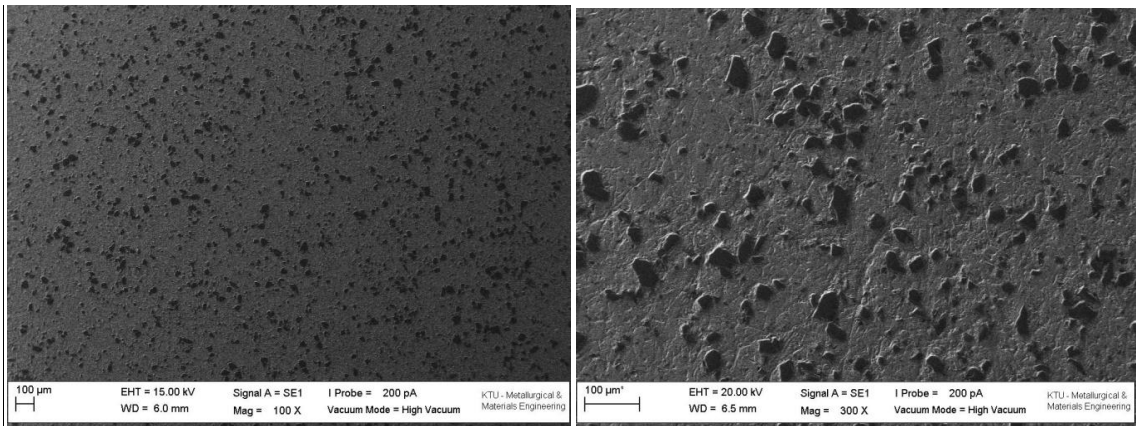
Büyük Büyütme



(a)



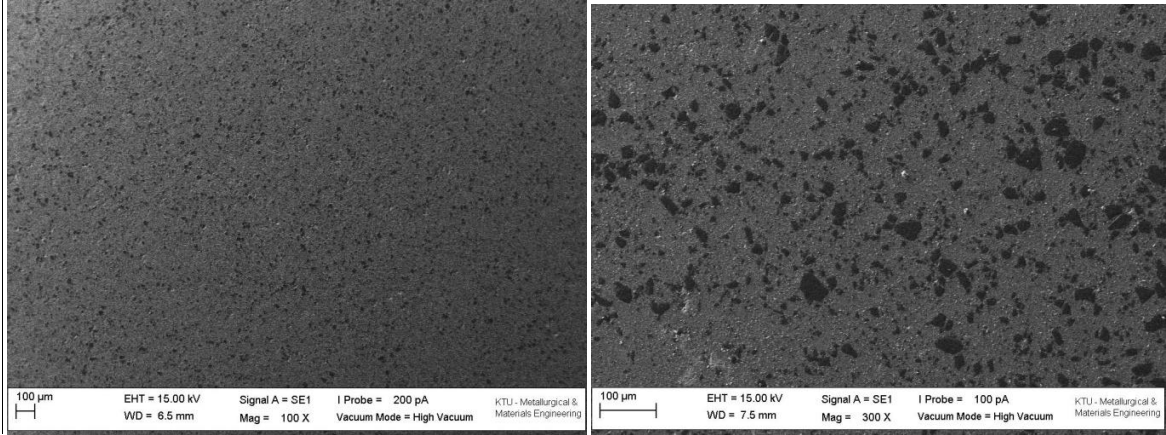
(b)



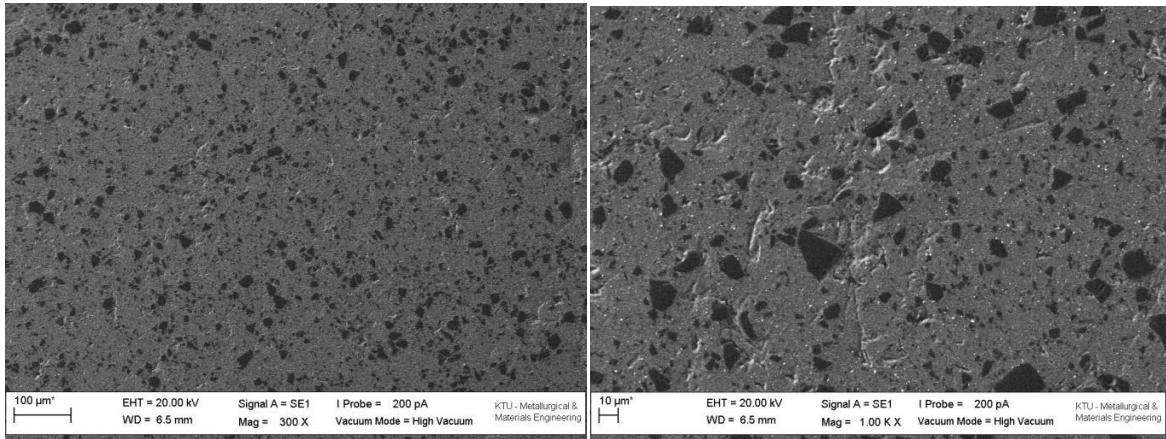
(c)

Şekil 3.36. Al2024-%20K kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat

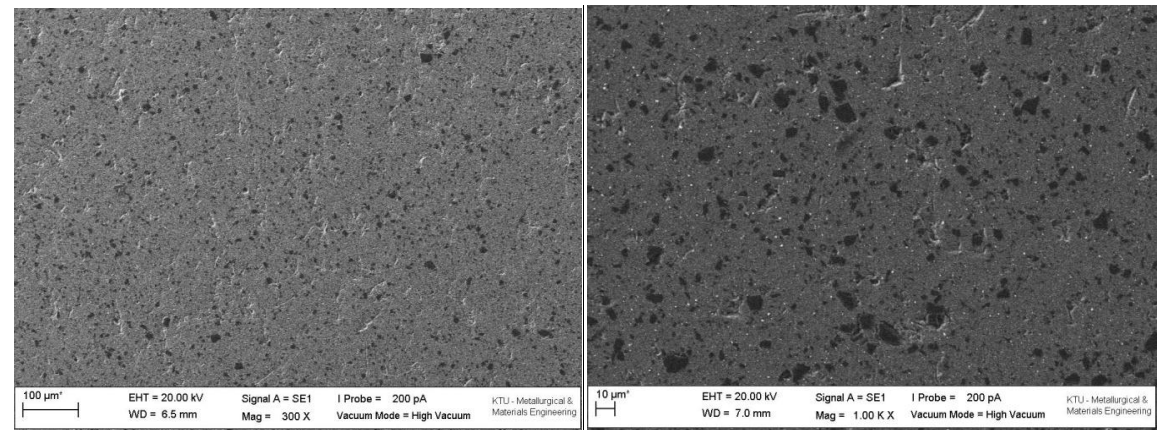
Şekil 3.36'nın devamı



(d)

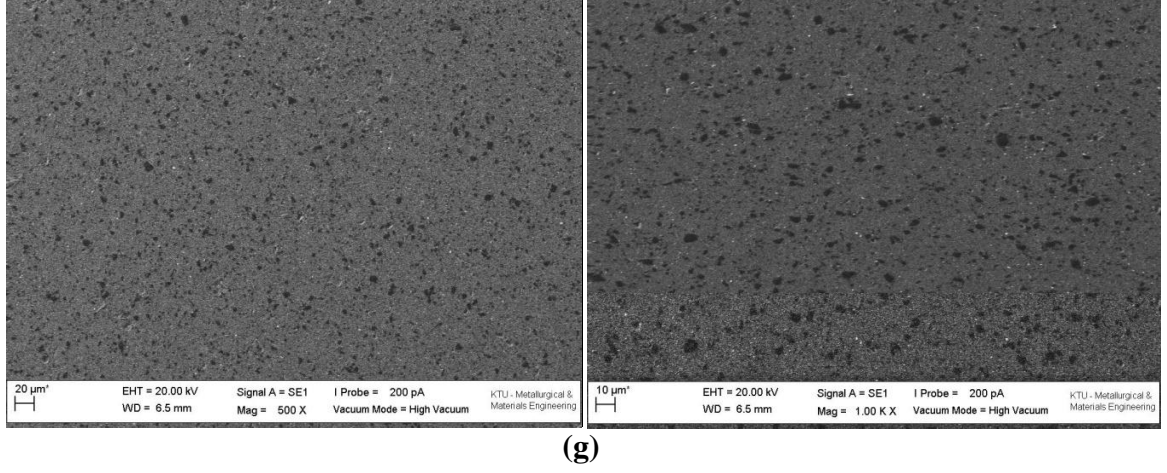


(e)



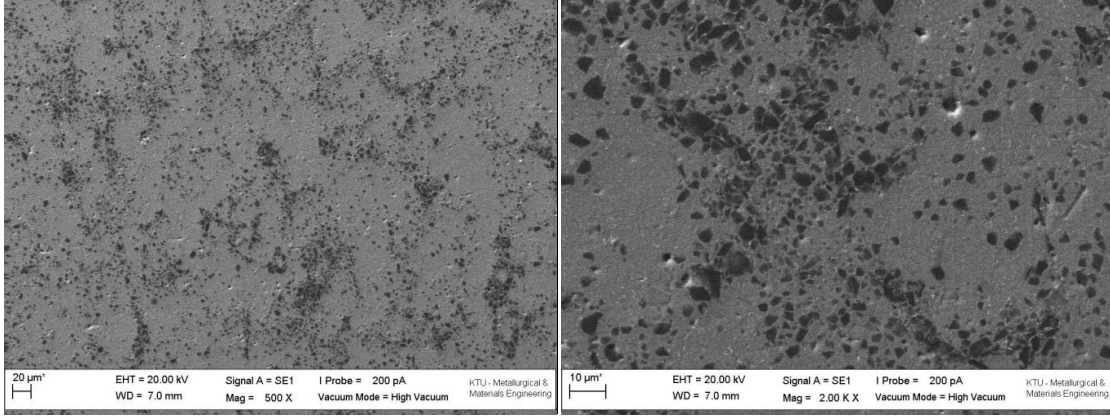
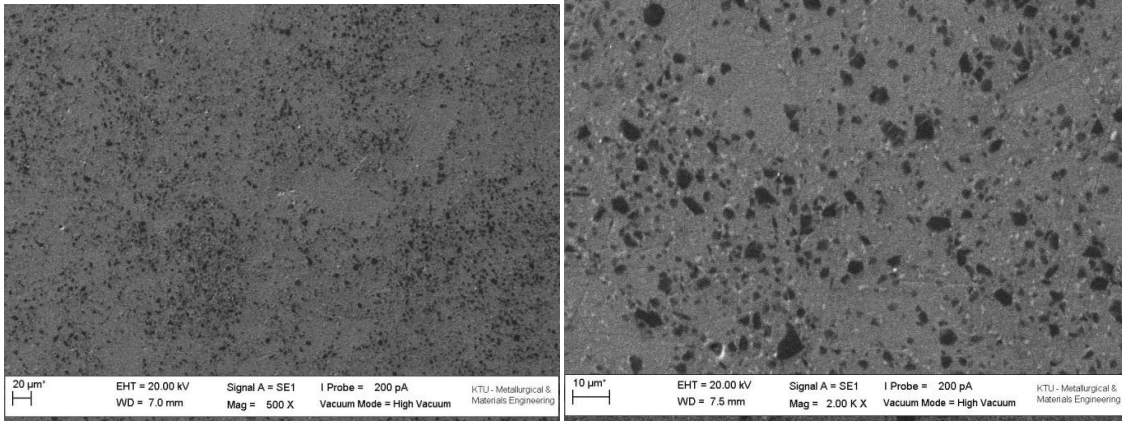
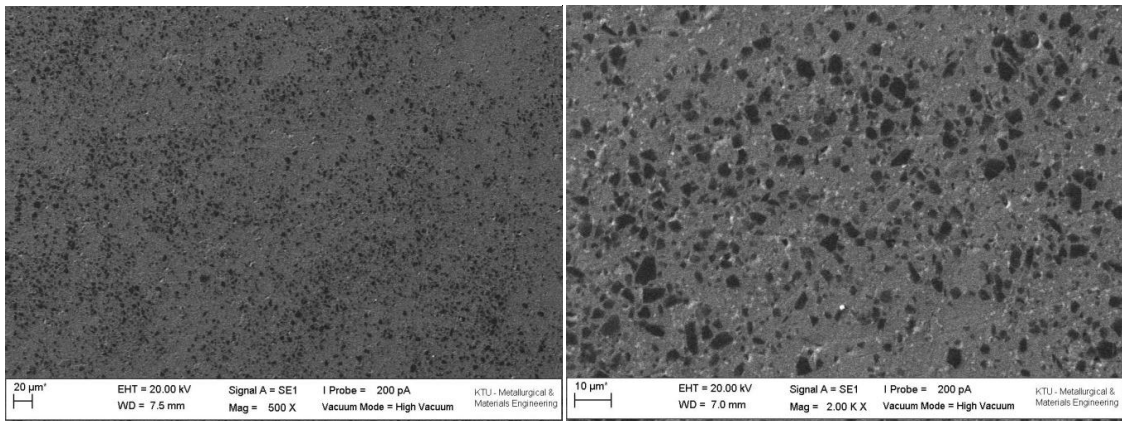
(f)

Şekil 3.36'nın devamı



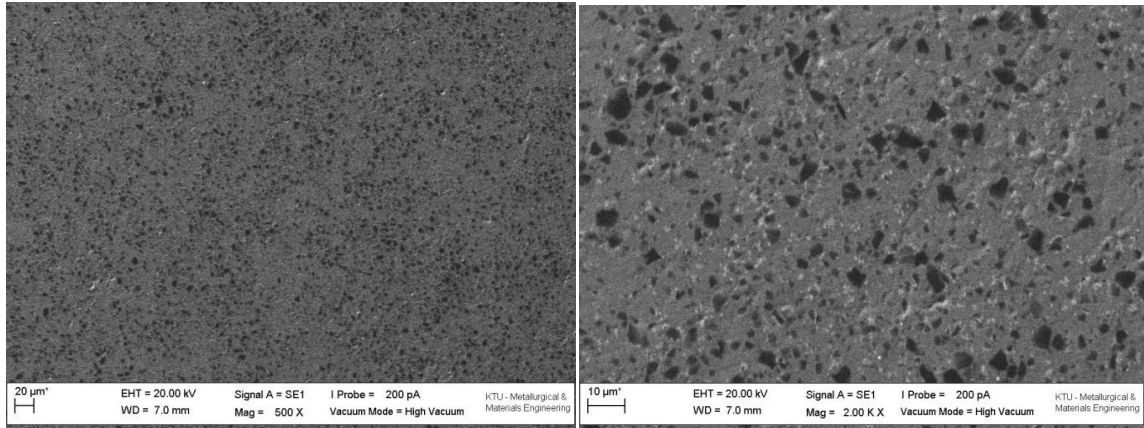
3.2.1.5. Al₂O₃-%5İ

Küçük takviye boyutu ile büyük takviye boyutu arasında içyapı bakımından temel farklar takviye parçacıklarının matris içersinde gösterdiği dağılım ve parçacık sayısıdır. 0 saatlik içyapı resmi incelendiğinde kaba boyutta belirgin olarak görülmeyen bir durum söz konusudur. Bu durum takviye parçacıklarının tane sınırları çevresinde yoğunlaşmasıdır. Bunun sebebi olarak matris tozlarının takviye boyutu küçüldükçe takviye malzemesini daha iyi sarabilmesini gösterebiliriz. Presleme esnasında matris tozları küçük boyutlu takviye parçacıklarının arasına girebilmekte ve onları tane sınırlarında birikmeye zorlamaktadır. Büyük boyutlu takviye parçacıklarında ise bu durum oldukça zordur. Artan öğütme süresi ile takviye parçacıkları yapı içersinde homojen bir şekilde dağılmıştır.

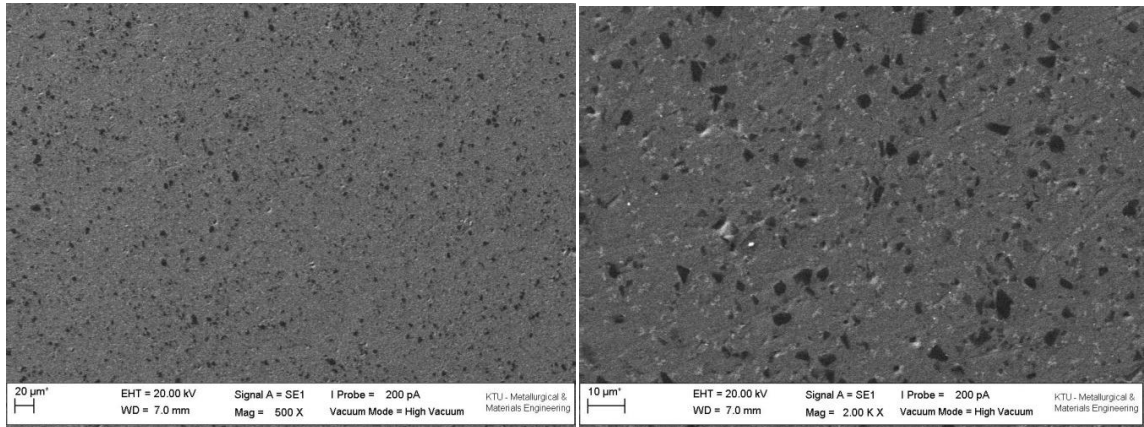
Küçük Büyütme**Büyük Büyütme****(a)****(b)****(c)**

Şekil 3.37. Al2024-%5İ kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat

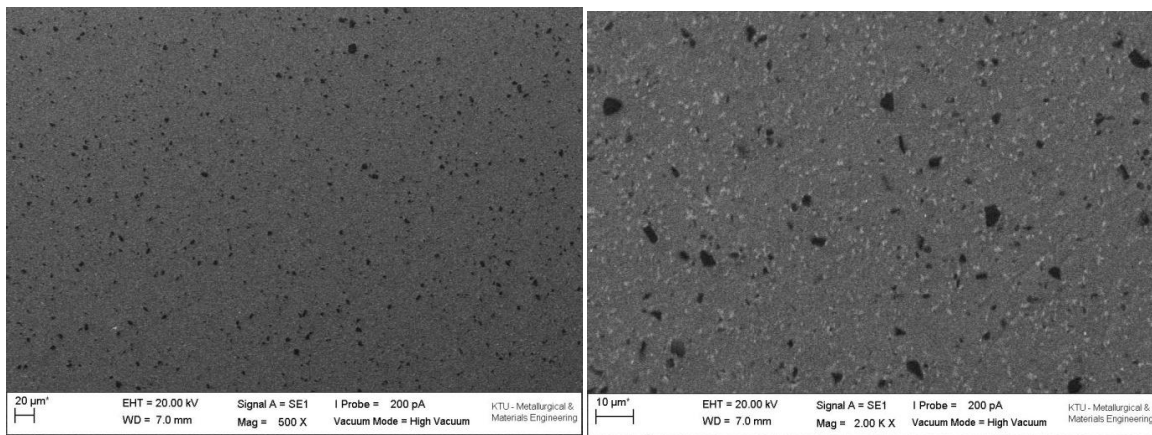
Şekil 3.37'nin devamı



(d)

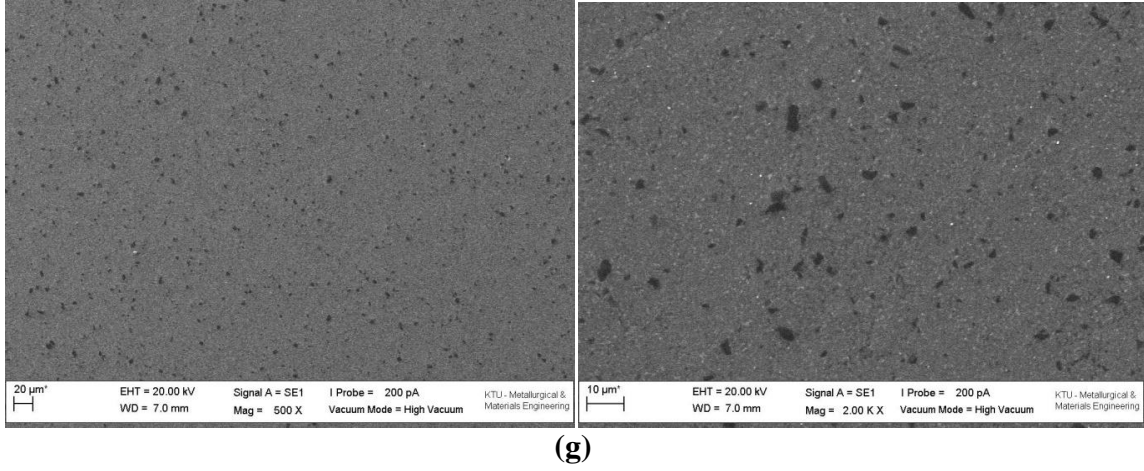


(e)



(f)

Şekil 3.37'nin devamı

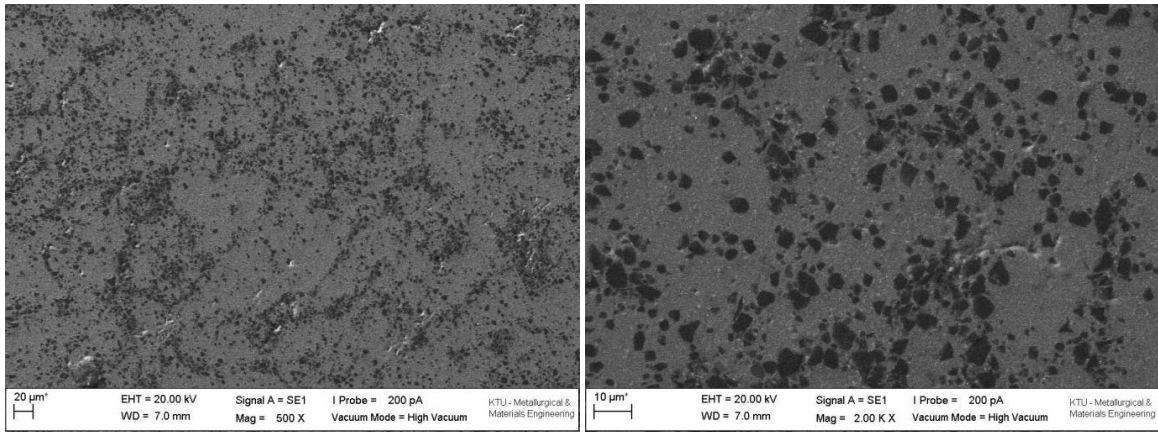


3.2.1.6. Al2024-%10İ

Artan takviye miktarı ile tane sınırlarında biriken takviye parçacık sayısı da artmıştır. Öğütmenin başlangıcında topaklanmaların oldukça fazla olduğu görülmektedir. Bununla birlikte 10 saatlik öğütme sonunda homojen dağılım sağlanmıştır.

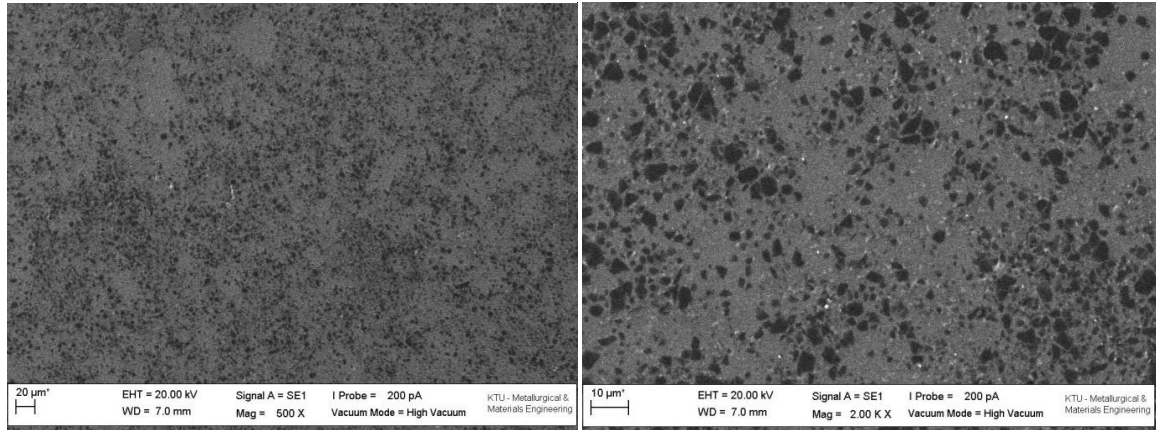
Küçük Büyütme

Büyük Büyütme

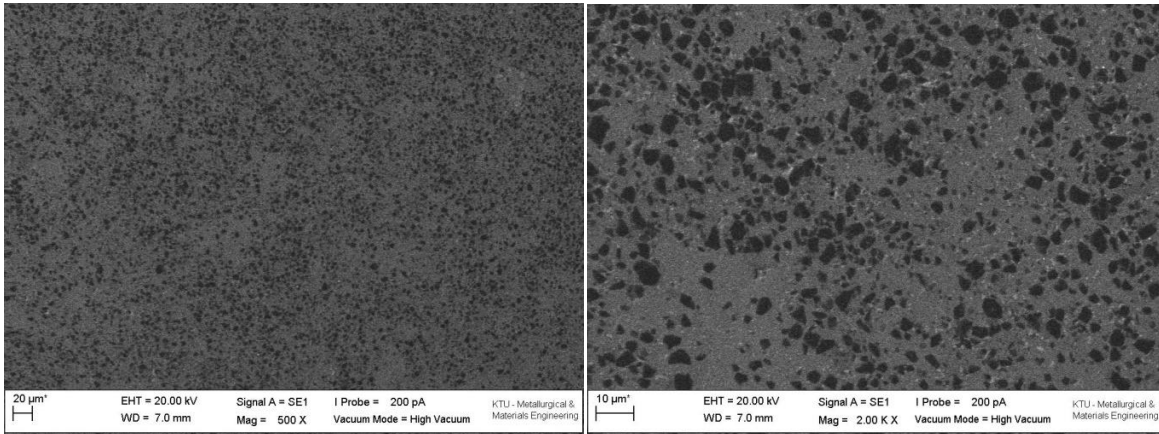


Şekil 3.38. Al2024-%10İ kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat

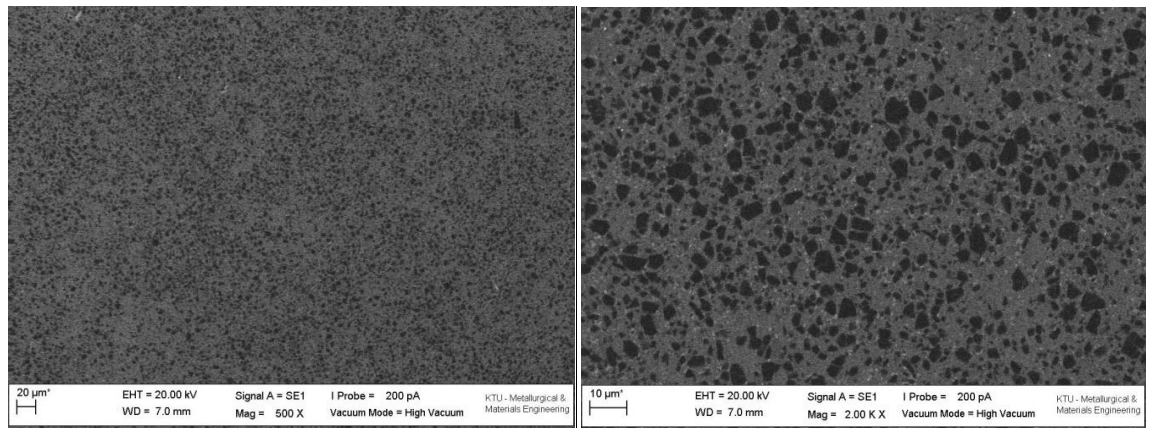
Şekil 3.38'in devamı



(b)

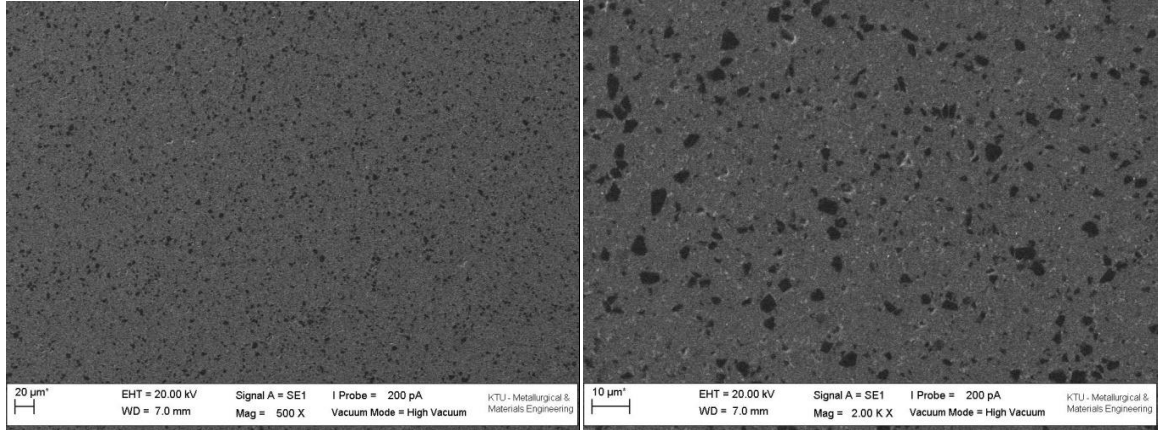


(c)

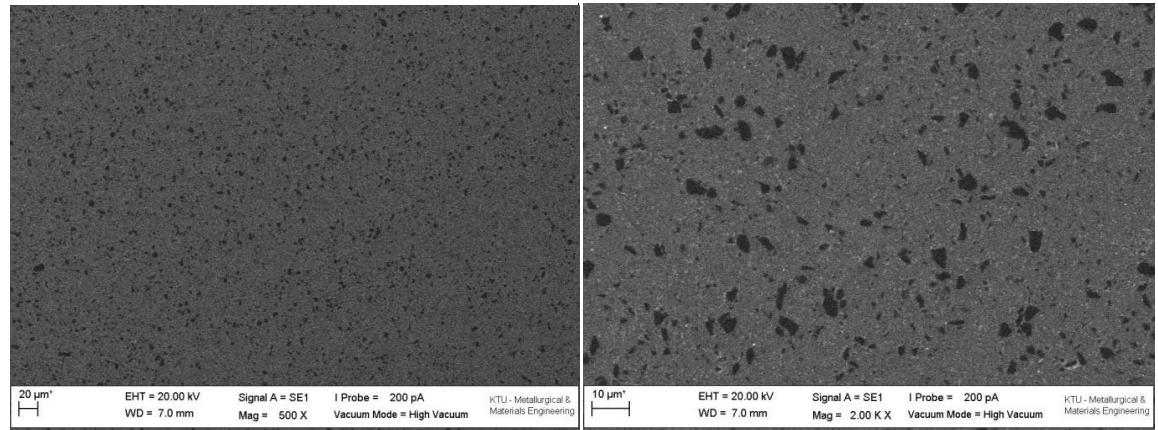


(d)

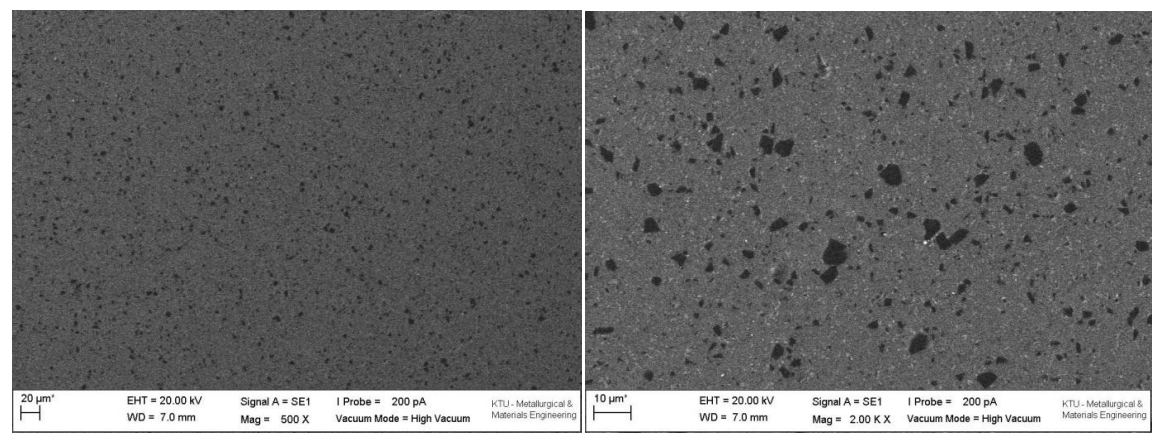
Şekil 3.38'in devamı



(e)



(f)



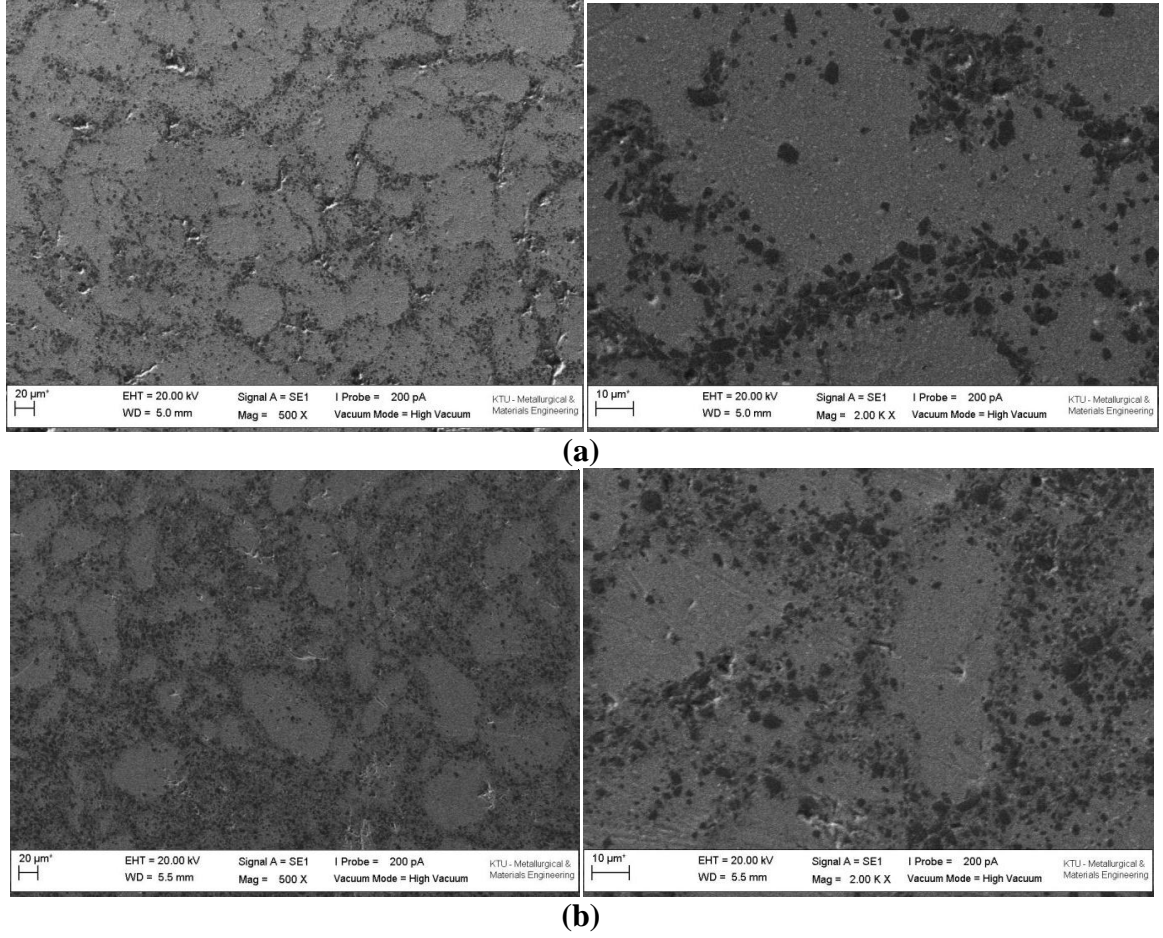
(g)

3.2.1.7. Al₂O₃-%20İ

Takviye parçacıklarının sayısı diğer grup malzemelere göre çok fazla olduğundan homojen dağılım elde edilmesi biraz daha fazla zaman almıştır. Topak bölgelerindeki parçacık sayısı oldukça fazladır. Porozite miktarı daha da artmıştır.

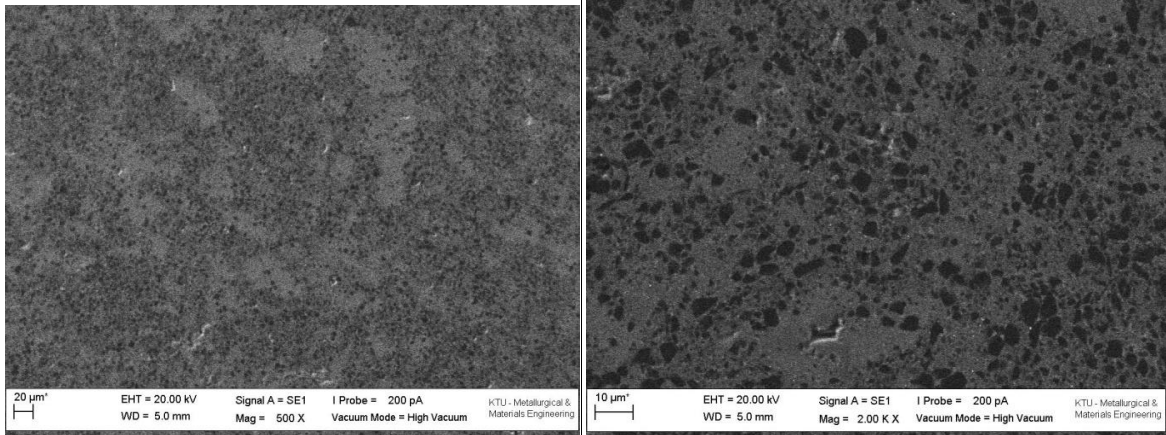
Küçük Büyütme

Büyük Büyütme

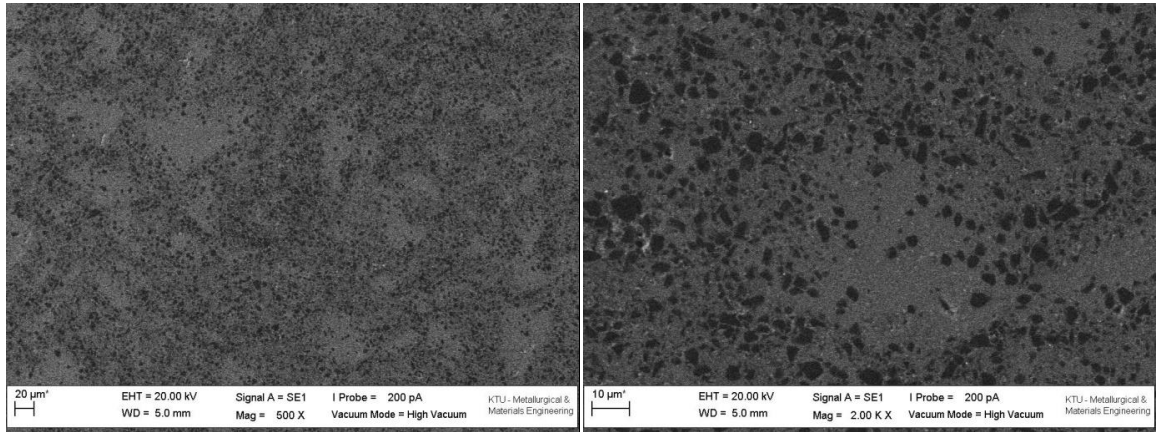


Şekil 3.39. Al₂O₃-%20İ kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat

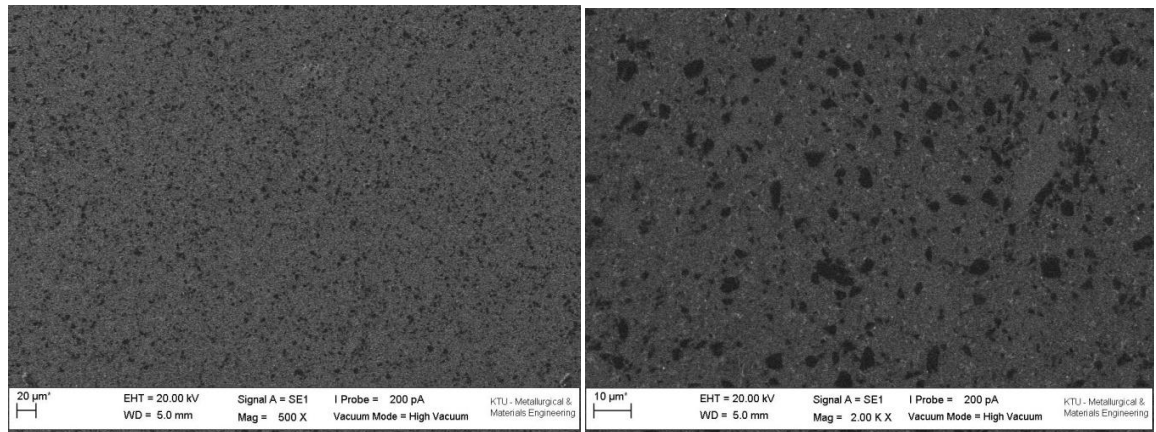
Şekil 3.39'un devamı



(c)

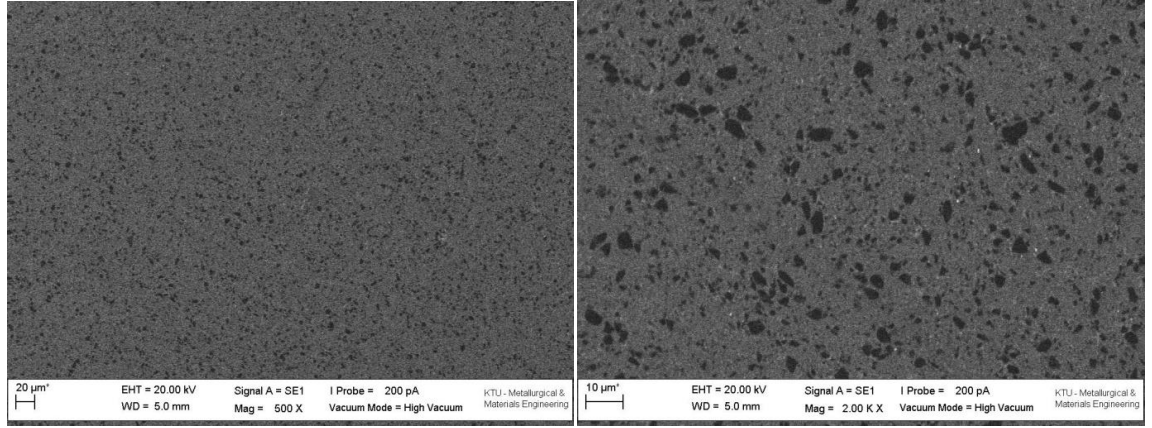


(d)

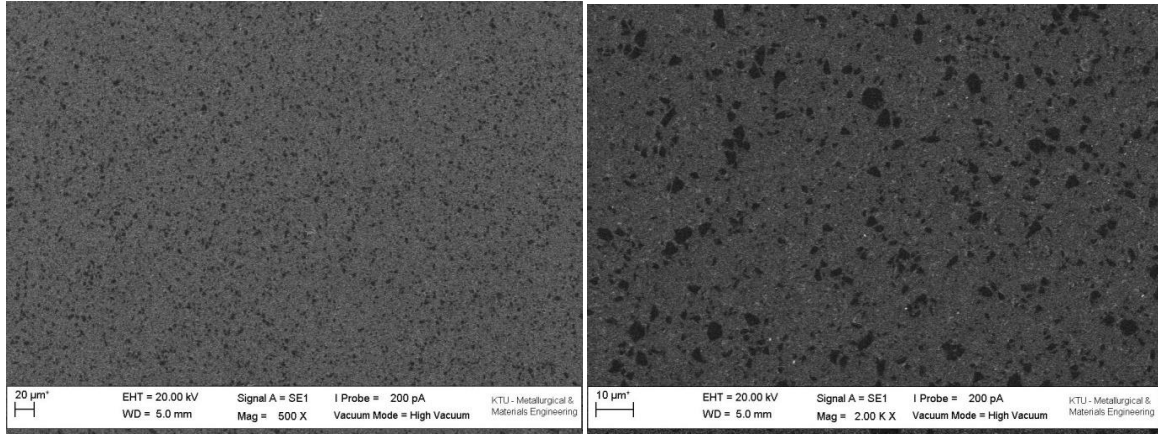


(e)

Şekil 3.39'un devamı



(f)



(g)

3.2.2. 200 MPa Basınçla Preslenen Numunelerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

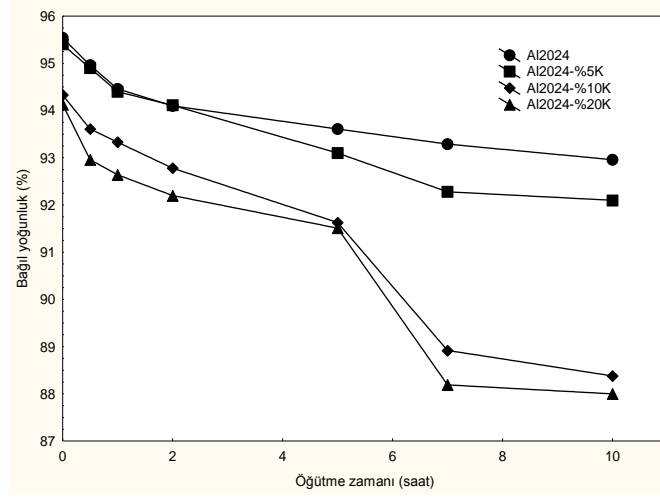
3.2.2.1. 1. Grup Kompozitlerin Yoğunluk Değerleri

Tozların sıkıştırılma mekanizmasını kısaca açıklayacak olursak, sıkıştırmanın ilk aşamasında toz parçacıkları birbiri içerisinde hareket ederek yer değiştirirler. Bu aşamada toz morfolojisi, parçacık boyutu ve parçacıklar arası sürtünme önemli rol oynamaktadır. Tozların sıkıştırılmasında ikinci aşama ise elastik ve plastik deformasyon mekanizmaları etkindir. Bu aşamada parçacıklar arası mekanik bağlanma gerçekleşmektedir. Sıkıştırma işleminin son aşamasında ise tozların kırılması ve plastik deformasyon ile poroziteler azalmakta ve toz parçacıkları birbirine soğuk kaynak olmaktadır.

Artan öğütme zamanı ile deformasyon sertleşmesine maruz kalan toz parçacıklarının sıkıştırılması (preslenmesi) zorlaşır. Buna bağlı olarak yoğunluk değeri artan öğütme

zamanı ile azalır. Tozun şekillendirilmesini engelleyen bir diğer faktörde artan takviye oranı ile gevrek parçacıkların sayıca artışıdır. Şekil 3.40'da görüldüğü gibi artan takviye oranı ile yoğunluk değerleri azalmıştır.

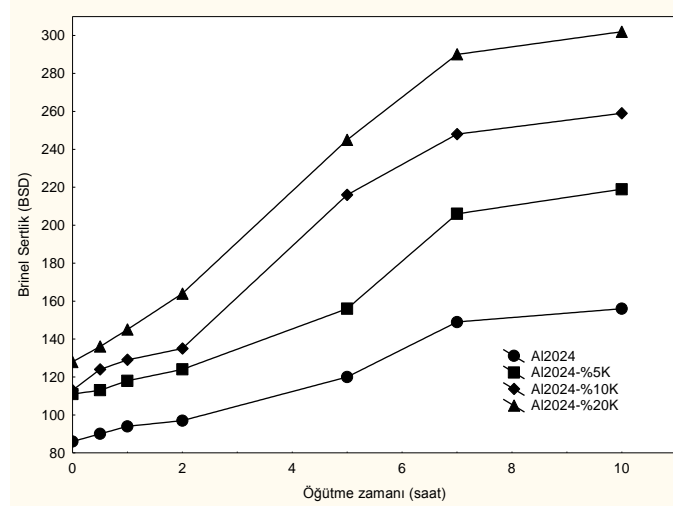
Teorik yoğunlukla karşılaştırmalı olarak verilen yoğunluk değeri olan bağıl yoğunluk değişimi şekil 3.41'de verilmiştir.



Şekil 3.40. Al 2024 ve kaba takviye parçacıklı kompozitlerin yoğunluklarının öğütme zamanı ile değişimi

3.2.2.2. 1. Grup Kompozitlerin Sertlik Değerleri

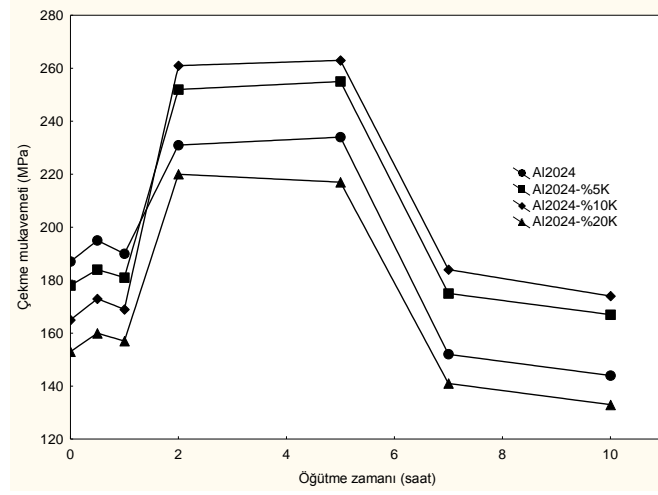
Yoğunluk değerlerinin tersine artan öğütme zamanı ve takviye miktarı ile sertlik değerleri artmıştır. Buna neden olan birinci faktör deformasyon sertleşmesi ikinci faktör ise takviye parçacıklarının dağılım ve sayısıdır. Şekil 3.42'de görüldüğü gibi artan öğütme zamanı ve artan takviye miktarı sertlik değerini artırmıştır.



Şekil 3.41. Al 2024 ve kaba takviye parçacıklı kompozitlerin sertlik değerlerinin öğütme zamanı ile değişimi

3.2.2.3. 1. Grup Kompozitlerin Çekme Mukavemeti Değerleri

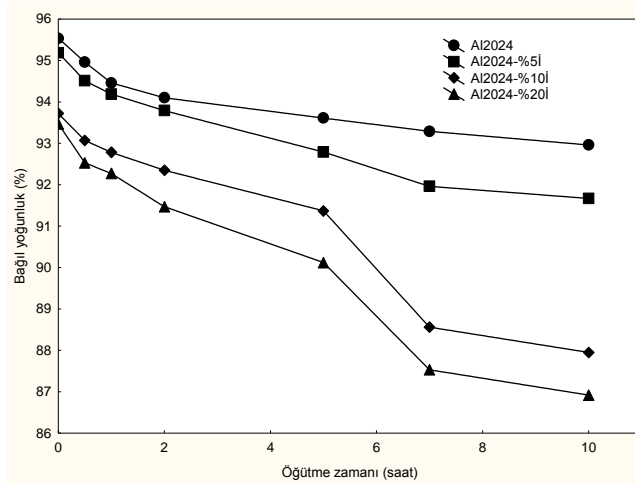
5 saatlik öğütme işleminin sonuna kadar elde edilen porozite değerleri birbirine yakın olmakla birlikte 0.5 saat sonunda elde edilen tozlarda oluşan kırılma sonucu düzensiz morfolojiden biraz düzenli hale gelmesi ile oluşan iyi paketlenme ile çekme mukavemeti değerleri bir miktar artmış 1 saatlik öğütme sonucu oluşan pulsu yapı ise çekme mukavemeti değerlerini bir miktar düşürmüştür. Bu durum pulsu morfolojiye sahip tozların kötü paketlenme (tabakalı paketlenme) özelliğinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte hem 0.5 saat hemde 1 saat sonundaki düşük çekme değerlerinin sebebi takviye partiküllerinin homojen olmayan dağılımıdır. 2 saat sonunda takviye parçacıklarının matris içersinde homojen dağılmaya başlaması çekme değerlerini oldukça yükseltmiştir. 5 saatlik öğütme işlemi sonucunda çekme mukavemeti değerlerinde çok az bir artış olmuştur. Bunun nedeni toz sertliğindeki aşırı yükseliş ve bunun sonucundada porozite değerinin kritik değere yaklaşmasıdır. Şekil 3.42’de görüldüğü gibi 7 saatlik öğütme işlemi sonucunda çekme mukavemeti değerleri hızlı bir düşüş göstermiştir. Bu azalmanın sebebi porozite değerlerinin kritik değeri aşması ve aşırı deformasyon sertleşmesidir.



Şekil 3.42. Al 2024 ve kaba takviye parçacıklı kompozitlerin çekme mukavemeti değerlerinin öğütme zamanı ile değişimi

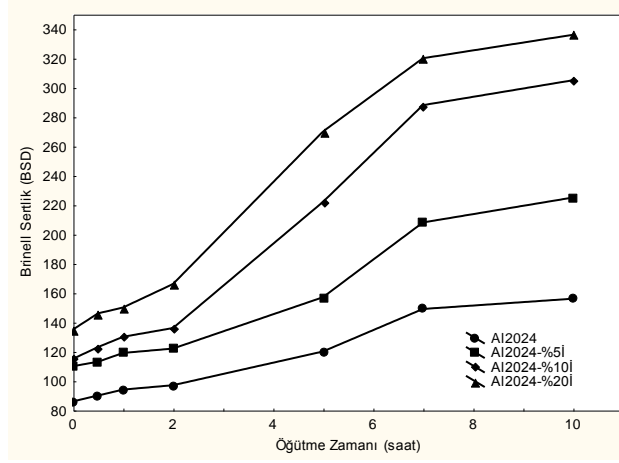
3.2.2.4 2. Grup Kompozitlerin Yoğunluk Değerleri

Büyük takviye boyutu ile karşılaştırıldığında yoğunluk değerlerinin küçük takviye boyutuna sahip kompozitlerde bir miktar azaldığı görülmüştür. Küçük takviye boyutuna sahip takviye elemanlarının matris içerside sayı olarak çok daha fazla olması içyapı resimlerinden de görüldüğü gibi tane sınırlarında aşırı topaklanmalara sebep olmakta ve topaklanma sonucu artan porozite nedeniyle yoğunluk bir miktar düşmektedir. Tane sınırlarında biriken takviye parçacıkları hem iç bölgelerde matris tozlarının yoğunlaşmasını engellemekte hem de kendi aralarına matris tozlarının girmesini engellediğinden porozite oluşumunu artırmaktadır.



Şekil 3. 43. Al 2024 ve ince takviye parçacıklı kompozitlerin yoğunluklarının öğütme zamanı ile değişimi

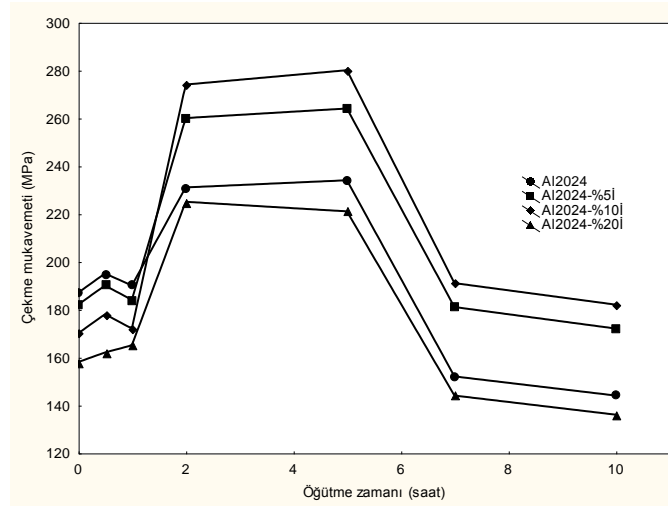
3.2.2.5 2. Grup kompozitlerin Sertlik Değerleri



Şekil 3.44. Al 2024 ve ince takviye parçacıklı kompozitlerin sertlik değerlerinin öğütme zamanı ile değişimi

3.2.2.6 2. Grup Kompozitlerin Çekme Mukavemeti Değerleri

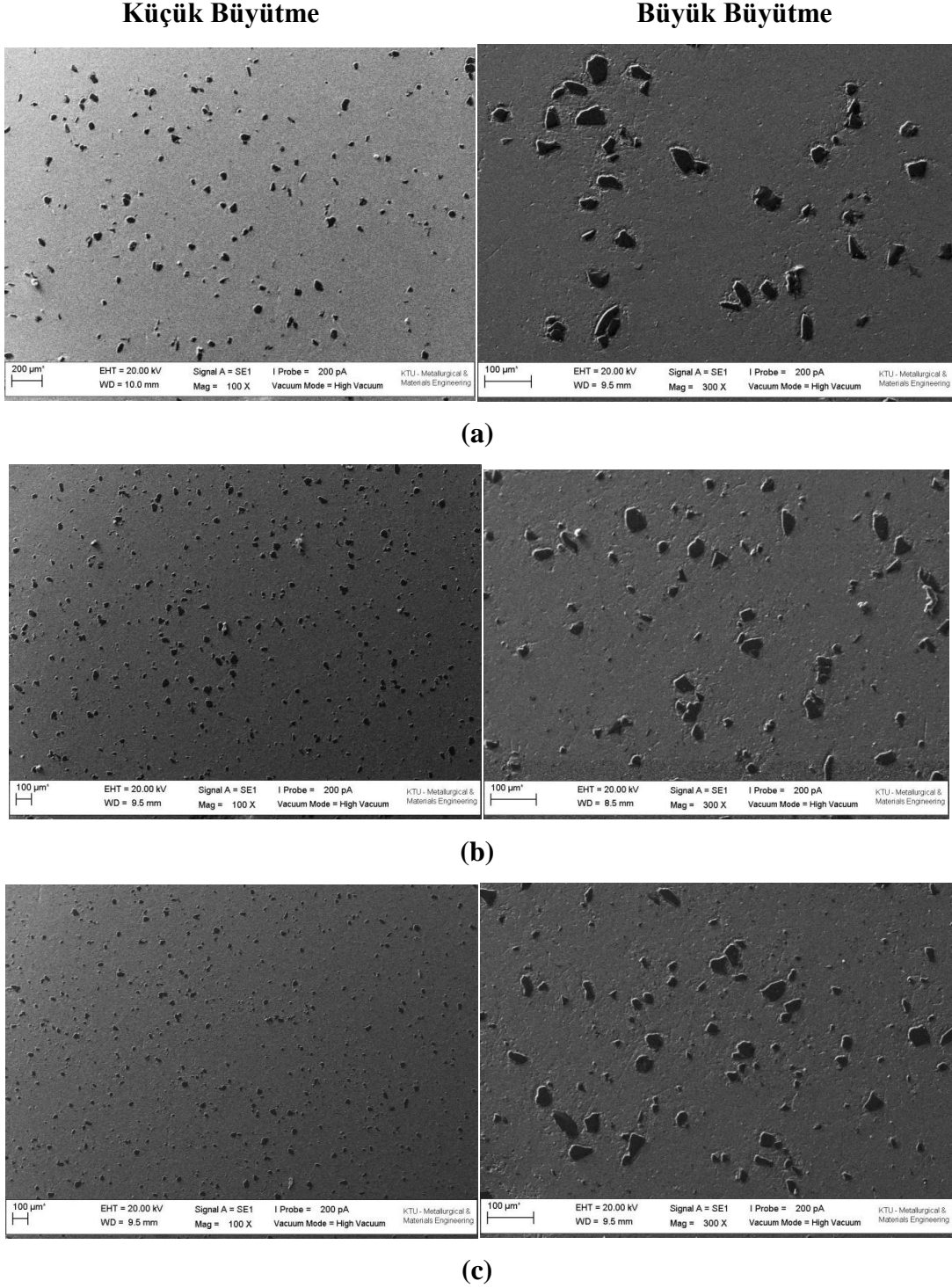
İnce takviye parçacıkları ile takviye edilmiş kompozitlerin çekme mukavemeti artan porozite değerleri nedeniyle düşüş göstermiştir.



Şekil 3.45. Al 2024 ve ince takviye parçacıklı kompozitlerin çekme mukavemeti değerlerinin öğütme zamanı ile değişimi

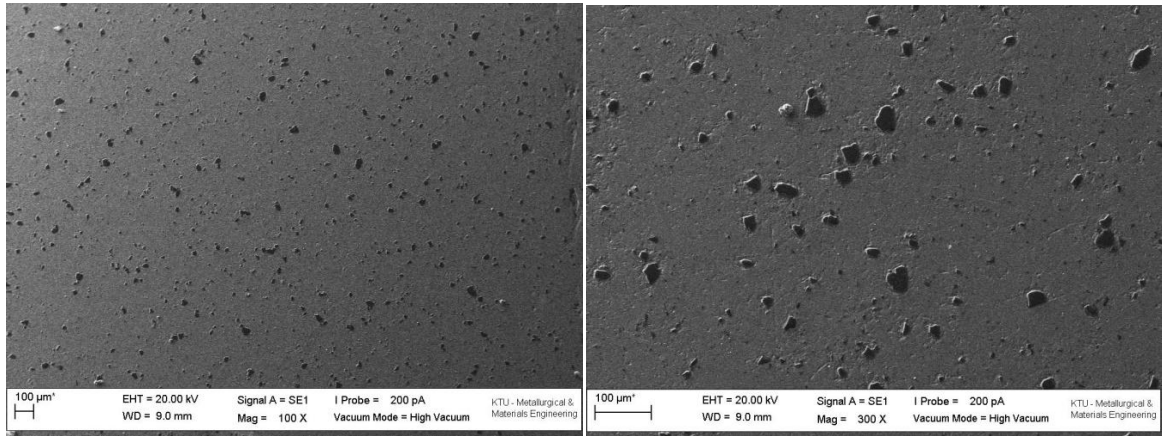
3.2.3. 400 MPa Basınçla Preslenen Numunelerin İyapı İncelemeleri

3.2.3.1. Al2024-%5K

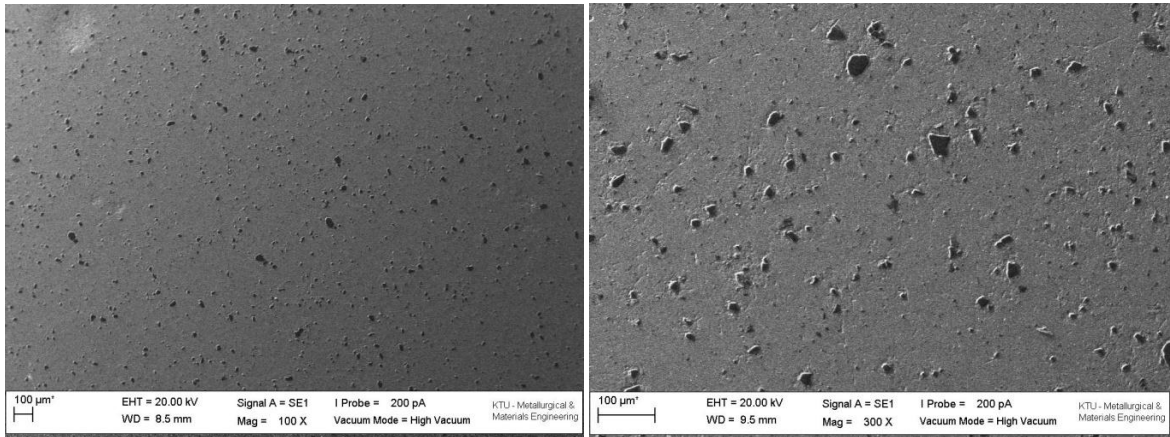


Şekil 3.46. Al2024-%5K kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat

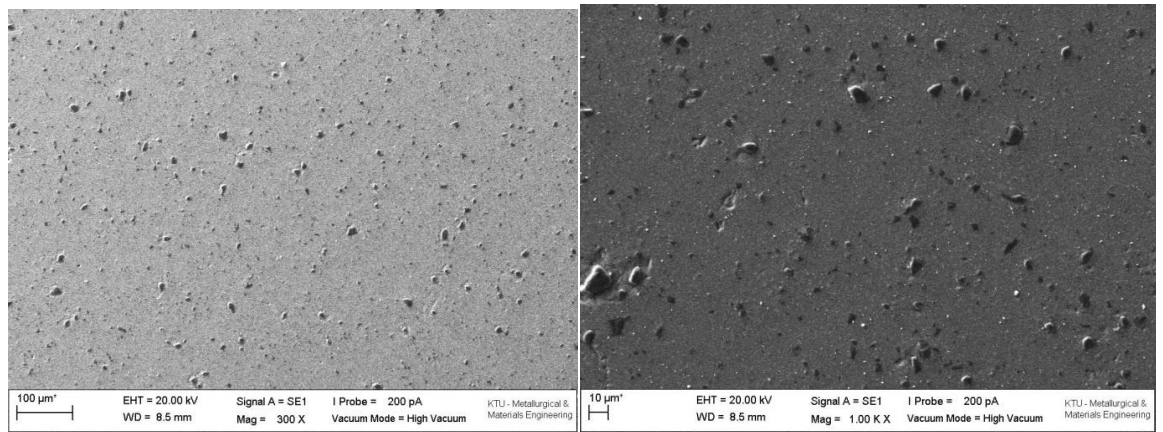
Şekil 3.46'nın devamı



(d)

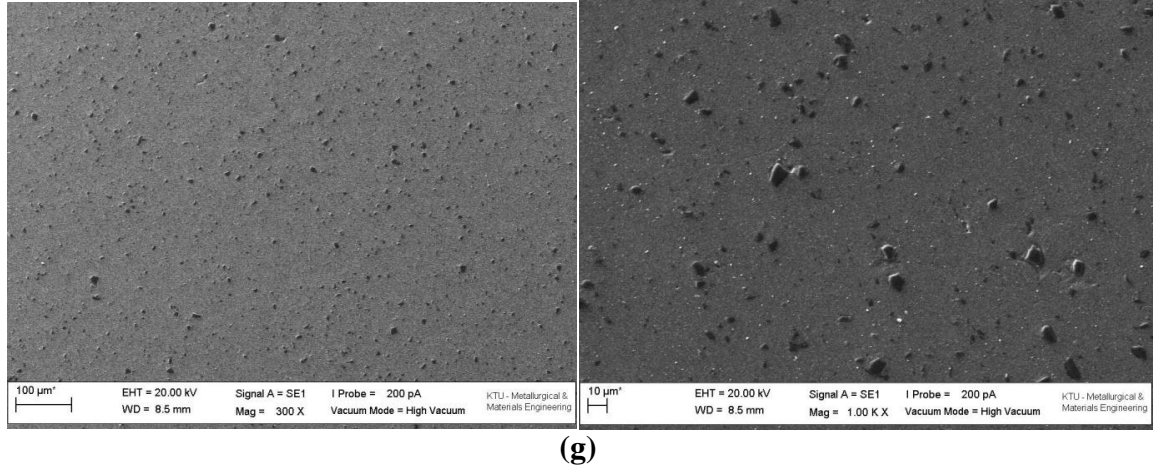


(e)



(f)

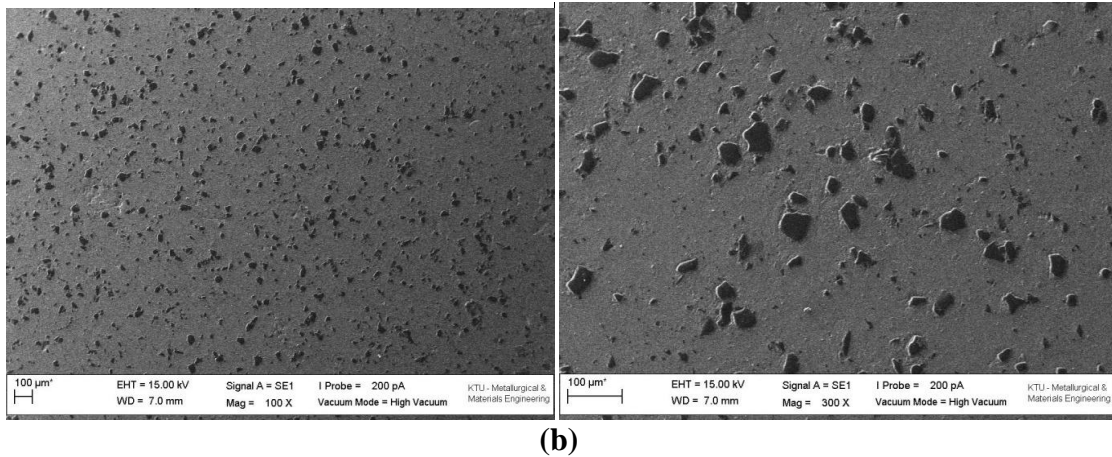
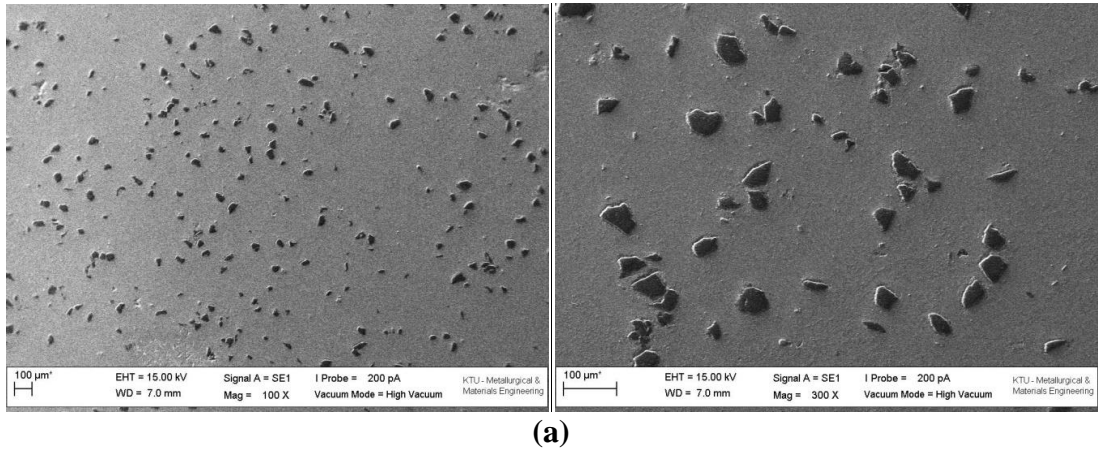
Şekil 3.46'nın devamı



3.2.3.2. Al2024-%10K

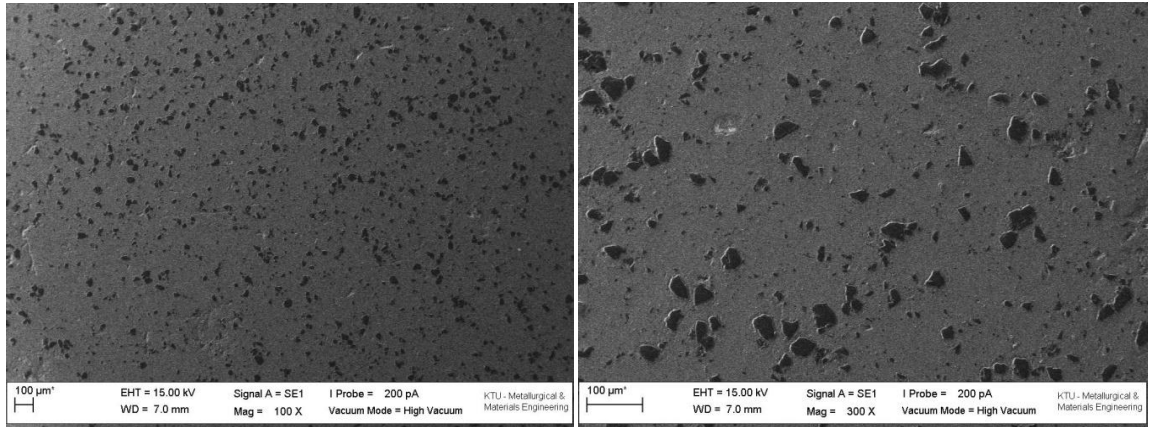
Küçük Büyütme

Büyük Büyütme

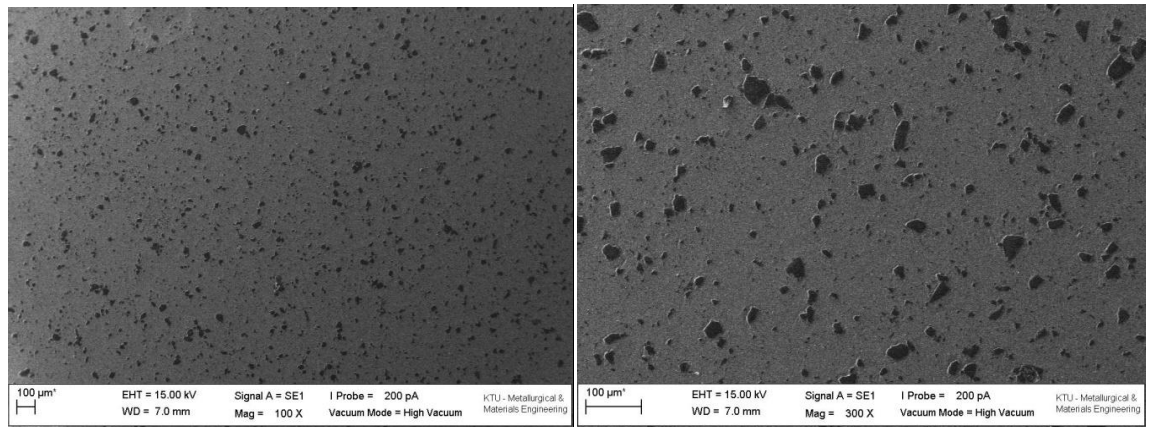


Şekil 3.47. Al2024-%10K kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 saat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat

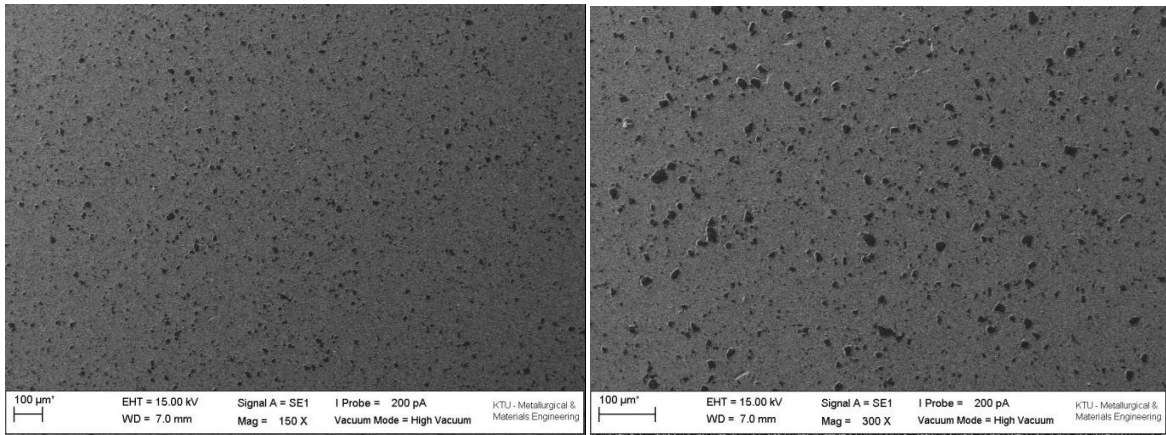
Şekil 3.47'nin devamı



(c)

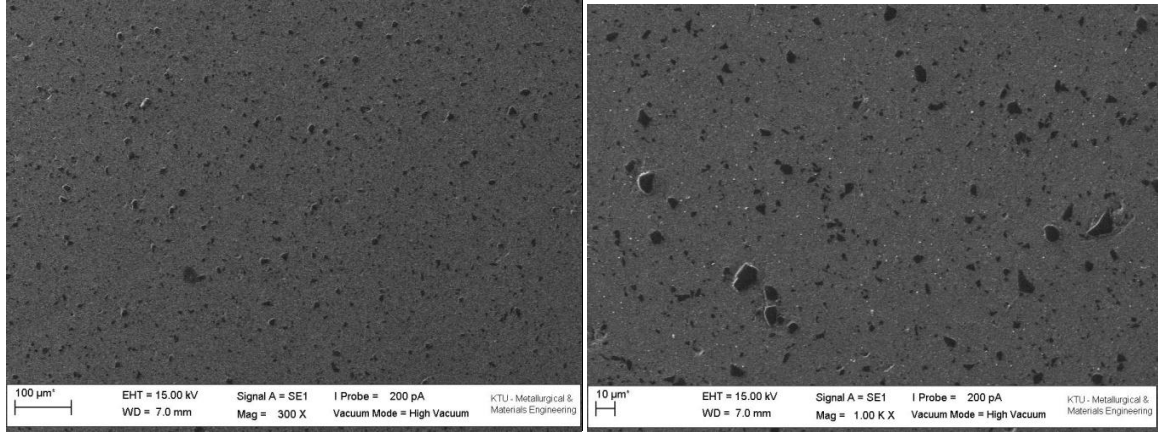


(d)

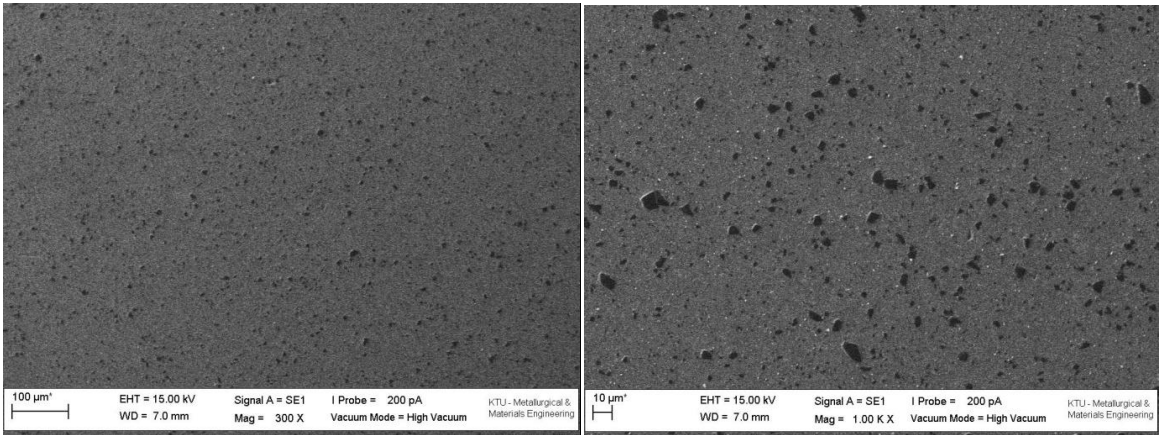


(e)

Şekil 3.47'nin devamı



(f)

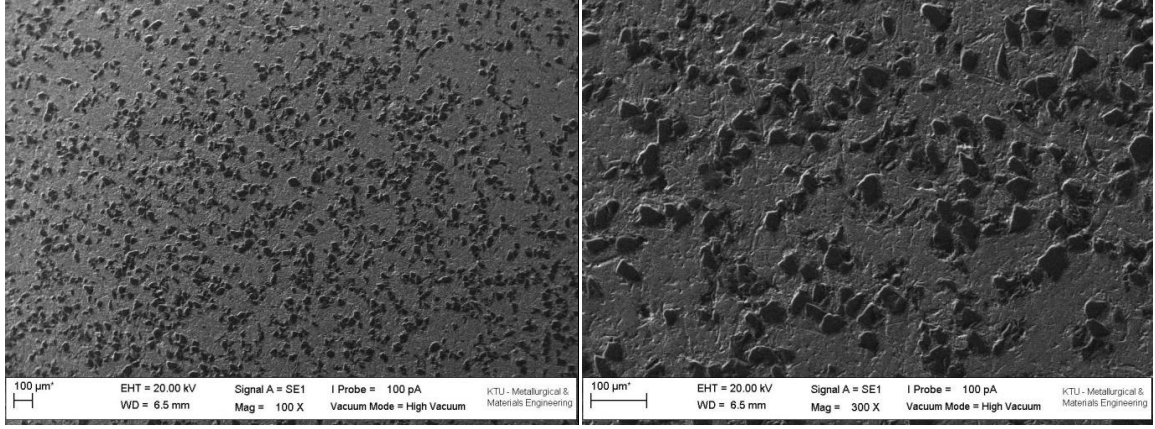


(g)

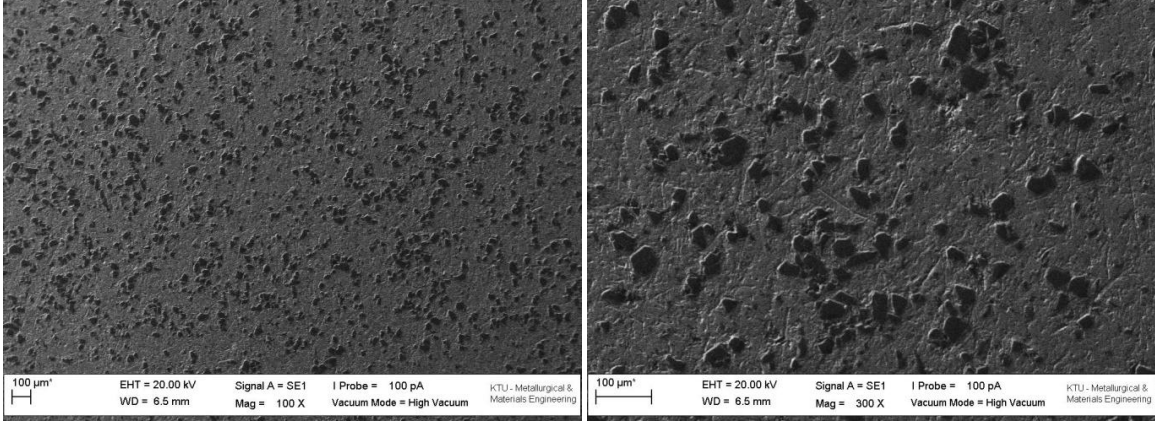
3.2.3.3. Al2024-%20K

Küçük Büyütme

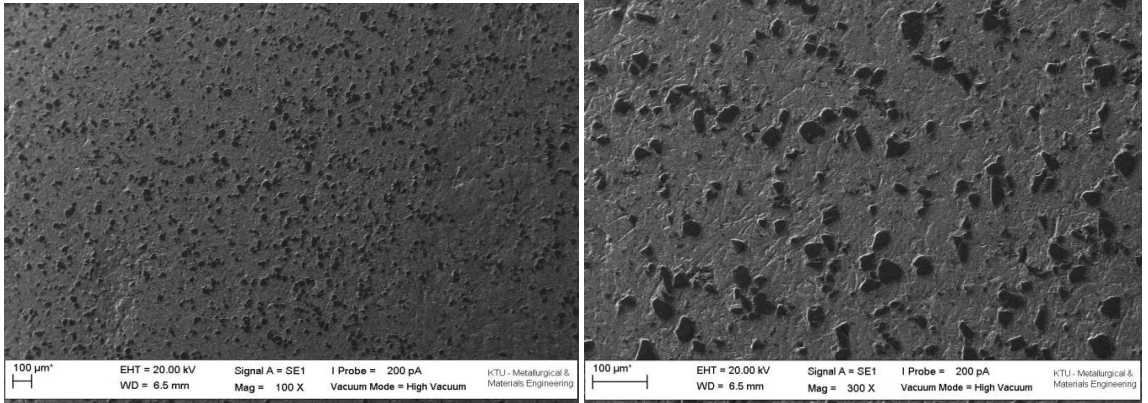
Büyük Büyütme



(a)



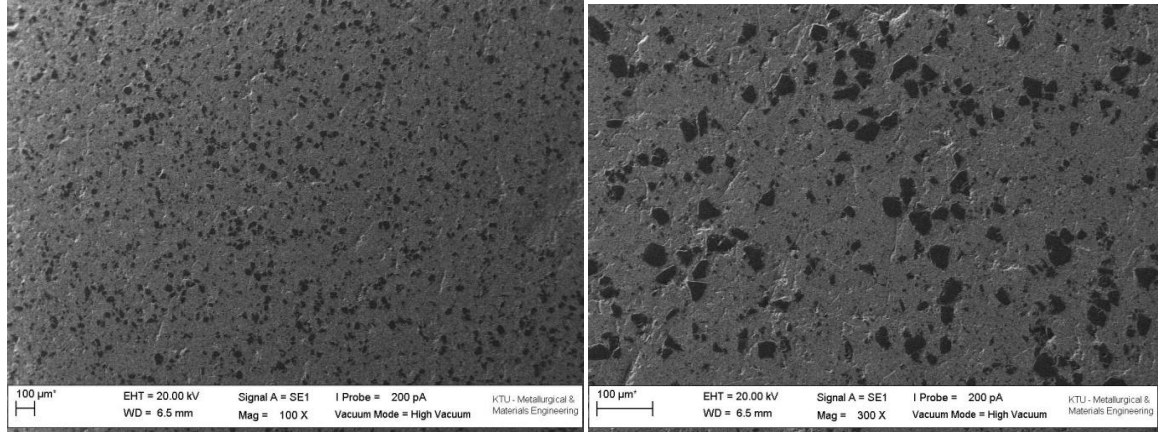
(b)



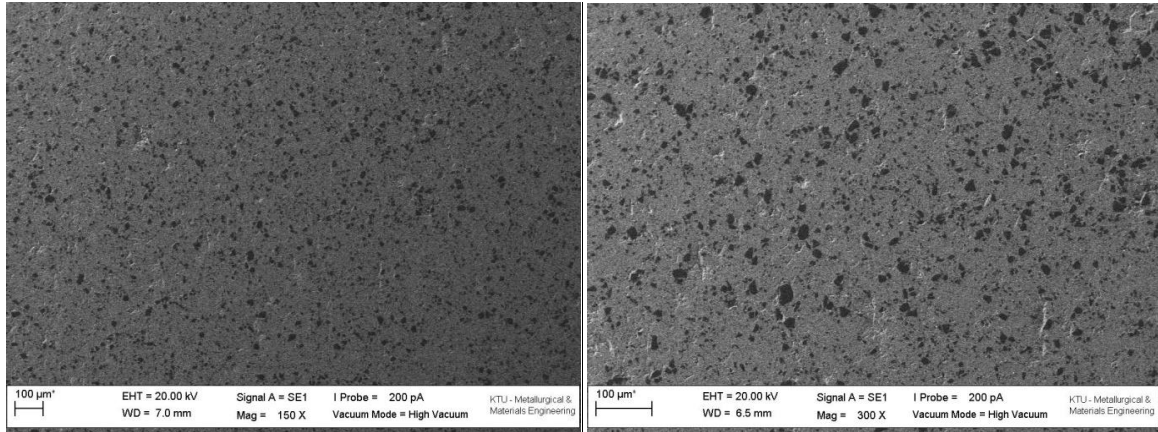
(c)

Şekil 3.48. Al2024-%20K kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat

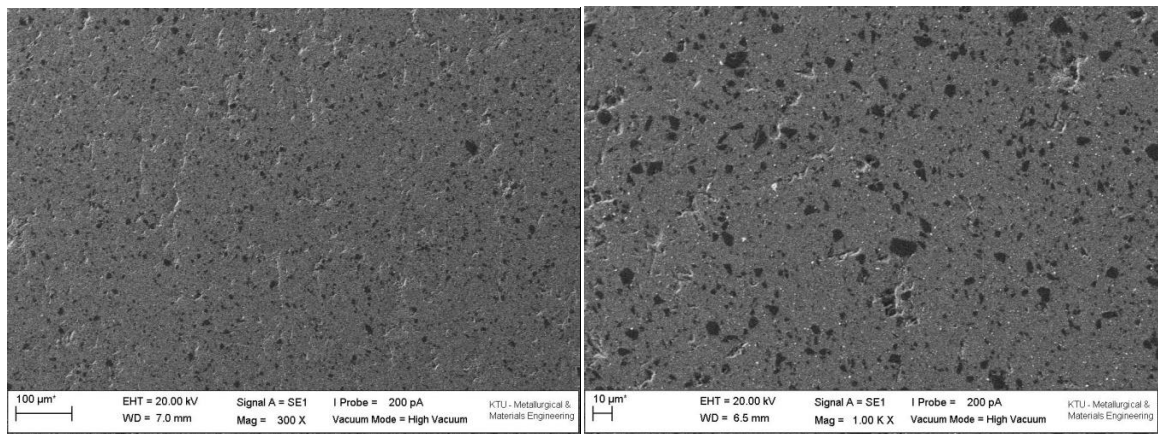
Şekil 3.48'in devamı



(d)

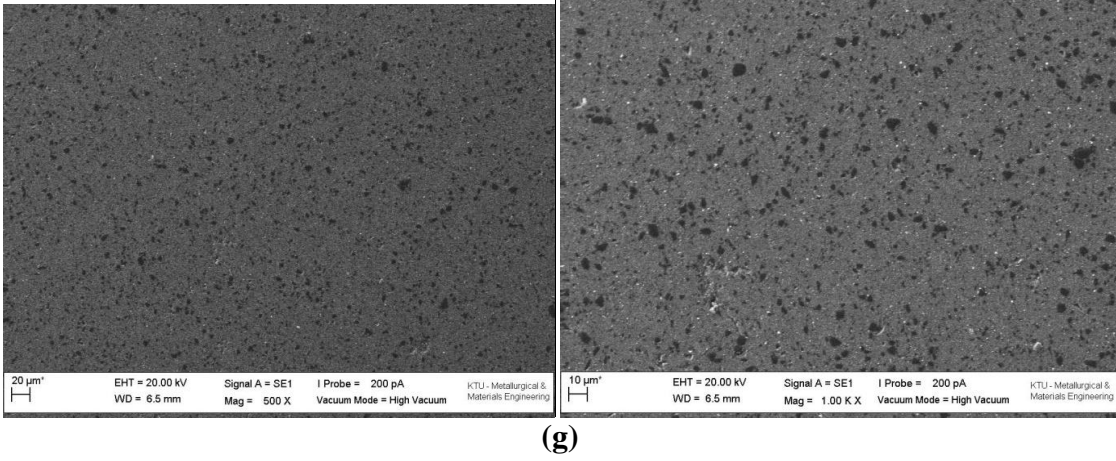


(e)



(f)

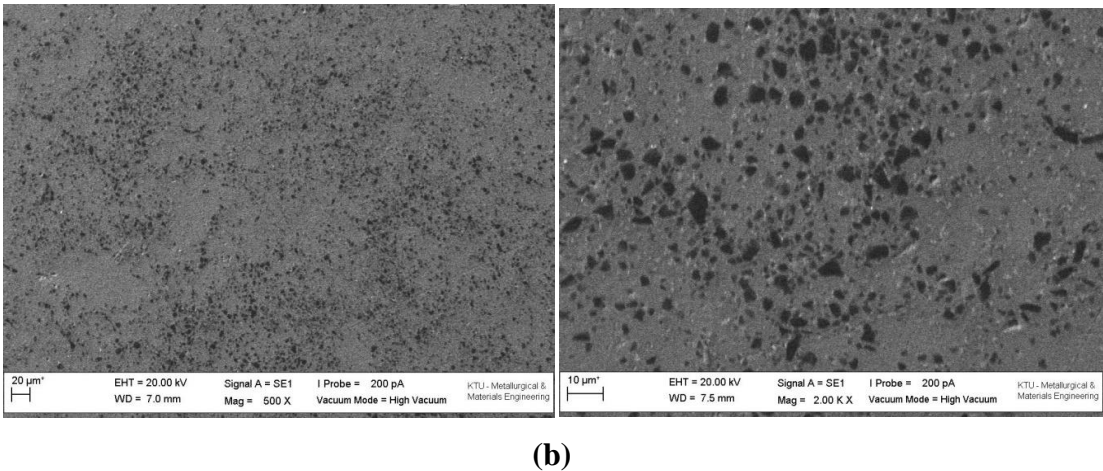
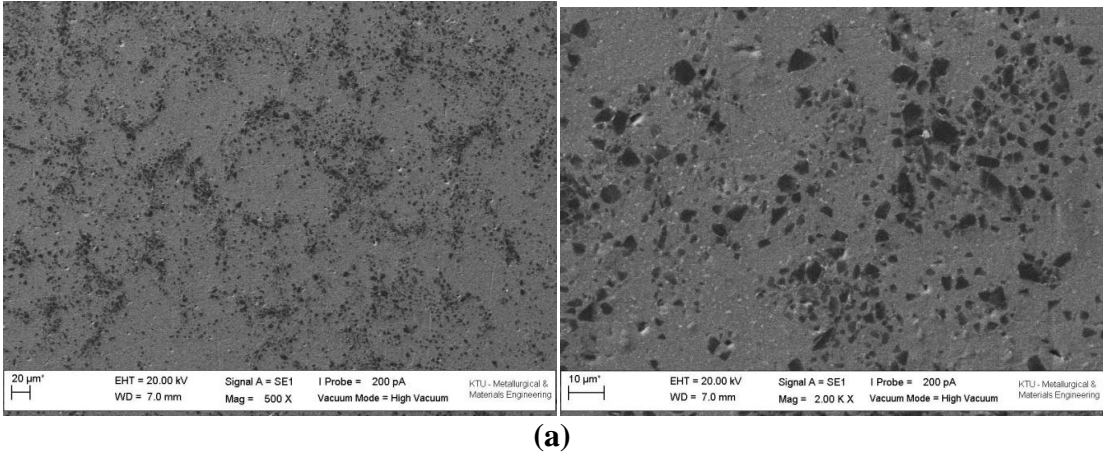
Şekil 3.48'in devamı



3.2.3.4. Al2024-%5İ

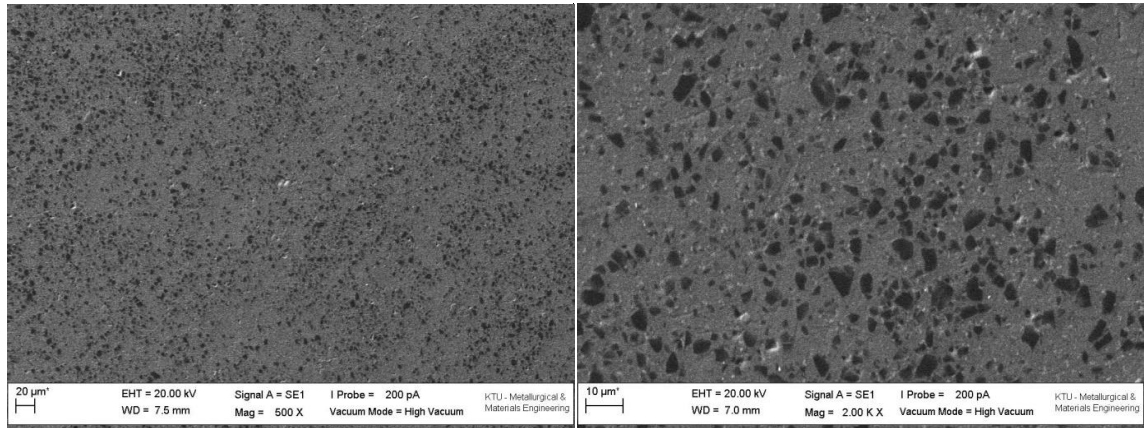
Küçük Büyütme

Büyük Büyütme

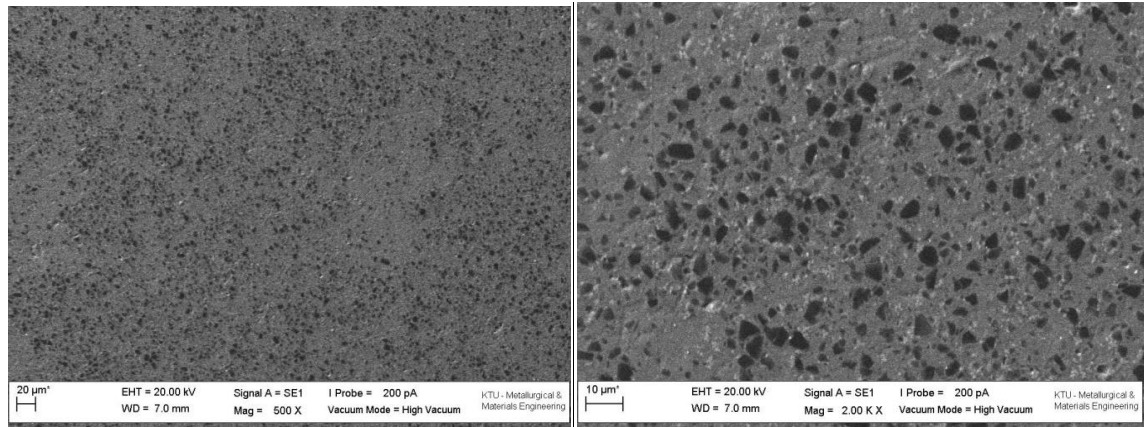


Şekil 3.49. Al2024-%5İ kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat

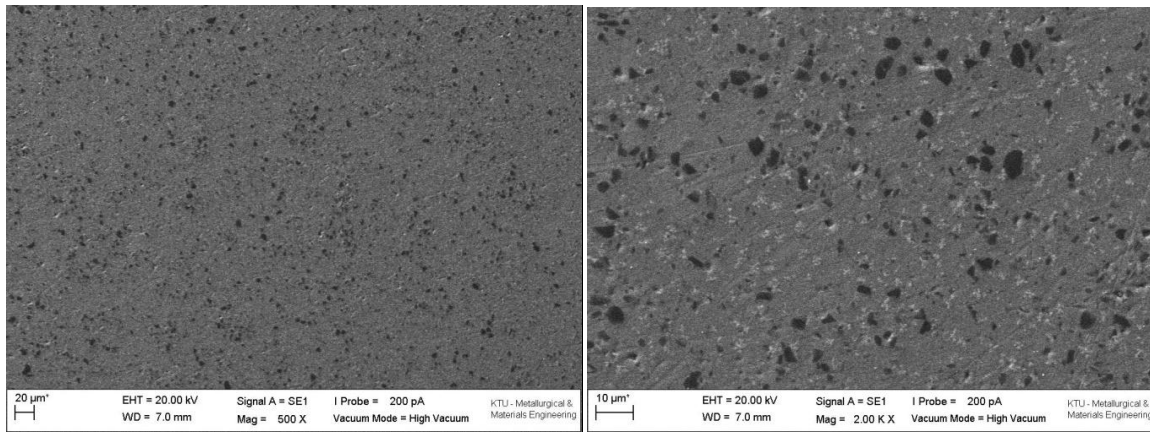
Şekil 3.49'un devamı



(c)

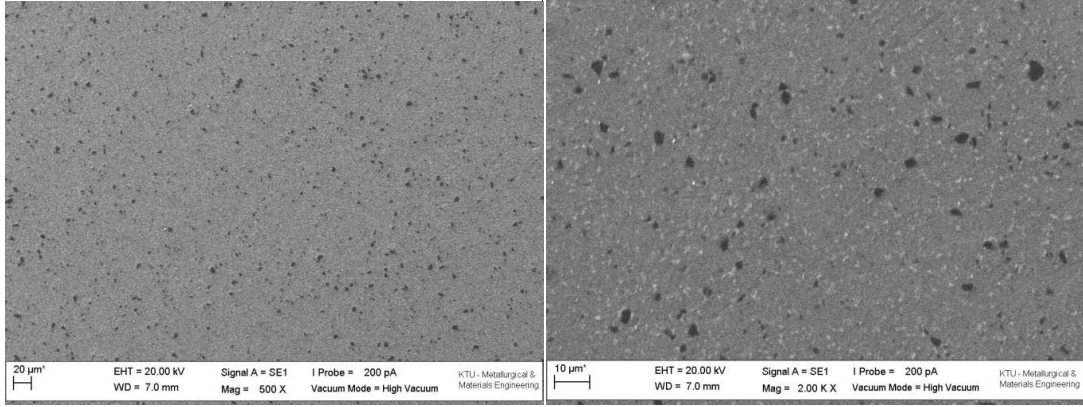


(d)

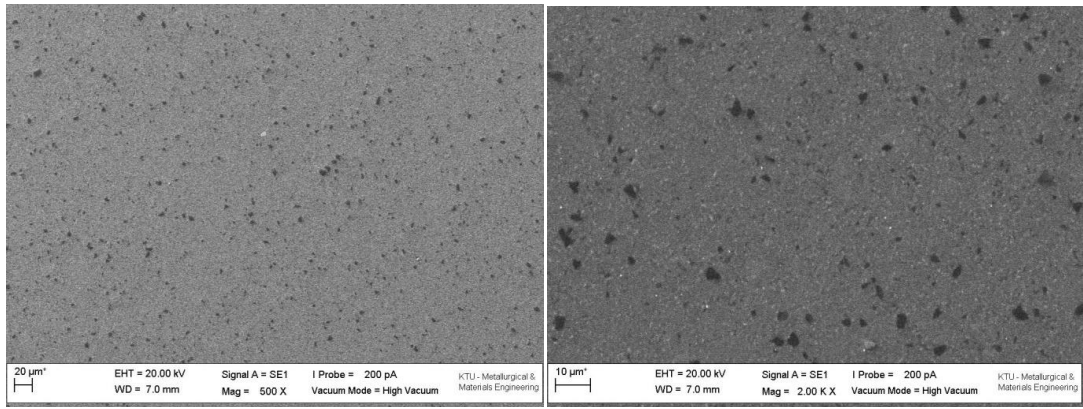


(e)

Şekil 3.49'un devamı



(f)

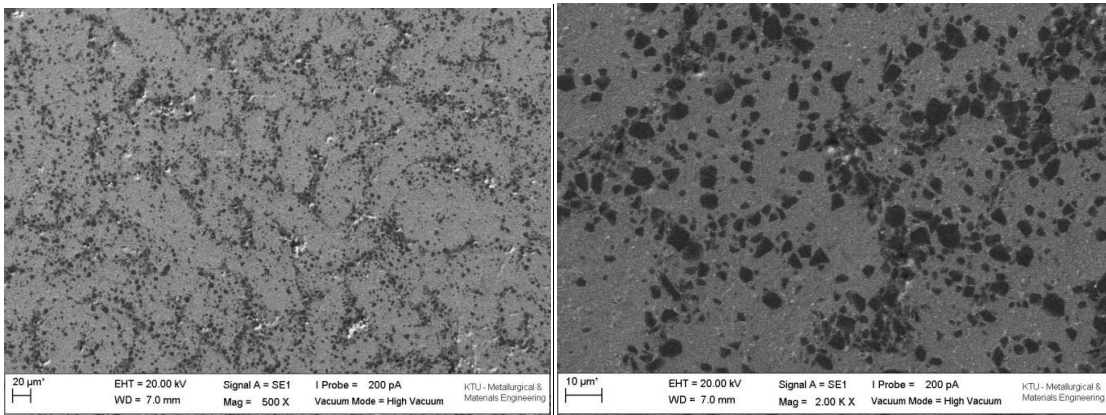


(g)

3.2.3.5. Al2024-%10İ

Küçük Büyütme

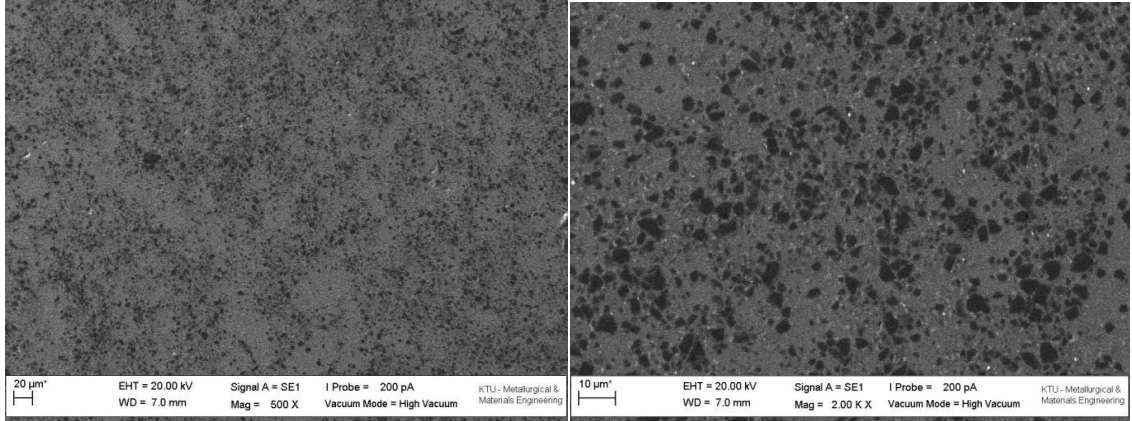
Büyük Büyütme



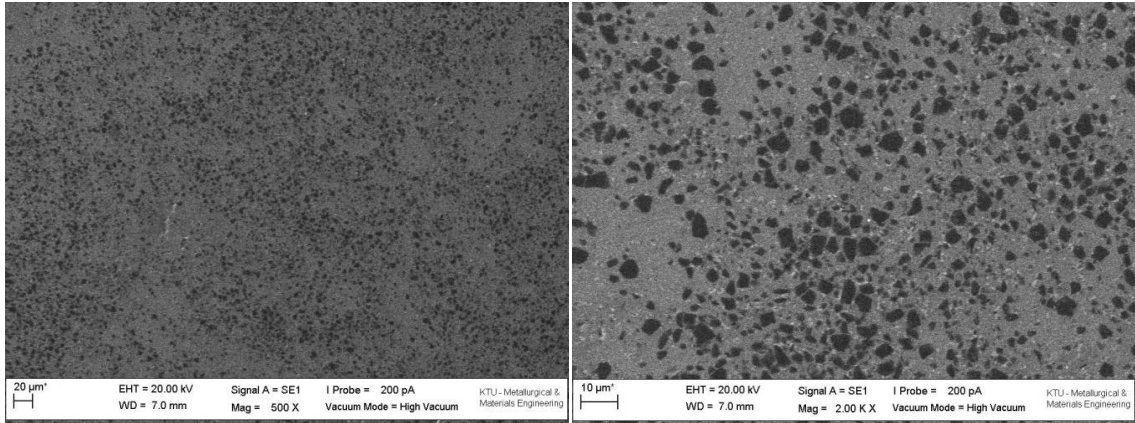
(a)

Şekil 3.50. Al2024-%10İ kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat

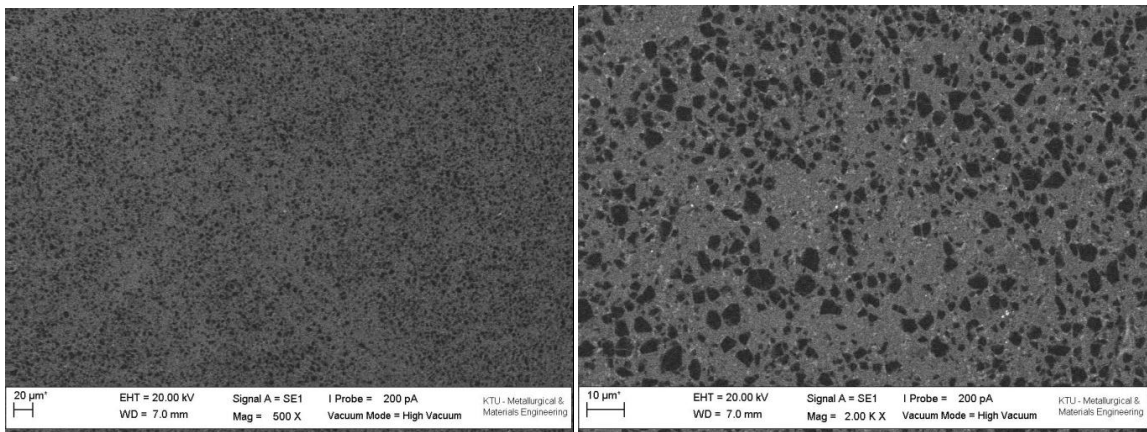
Şekil 3.50'nin devamı



(b)

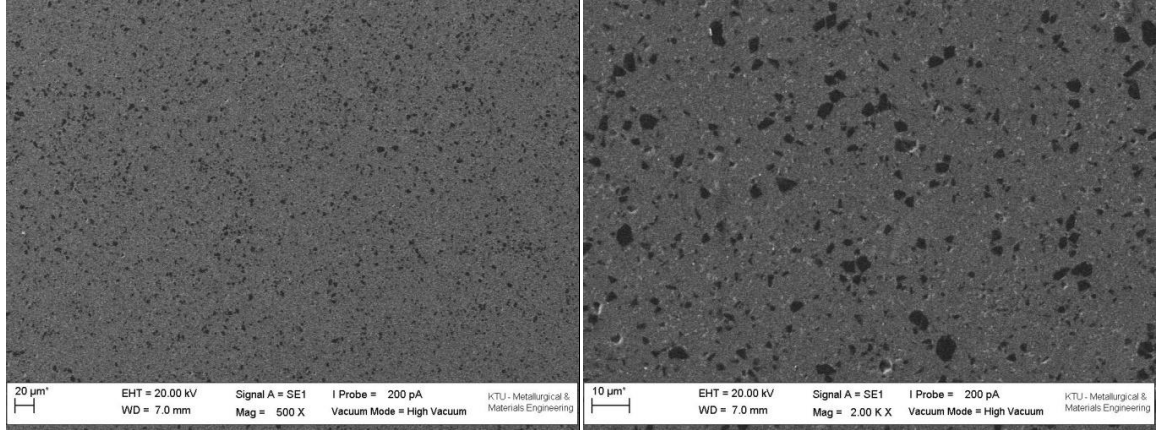


(c)

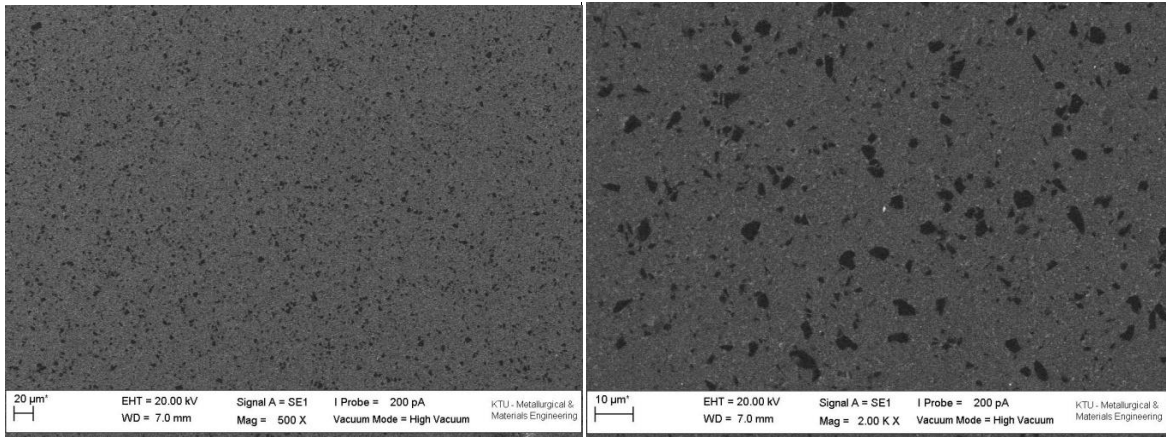


(d)

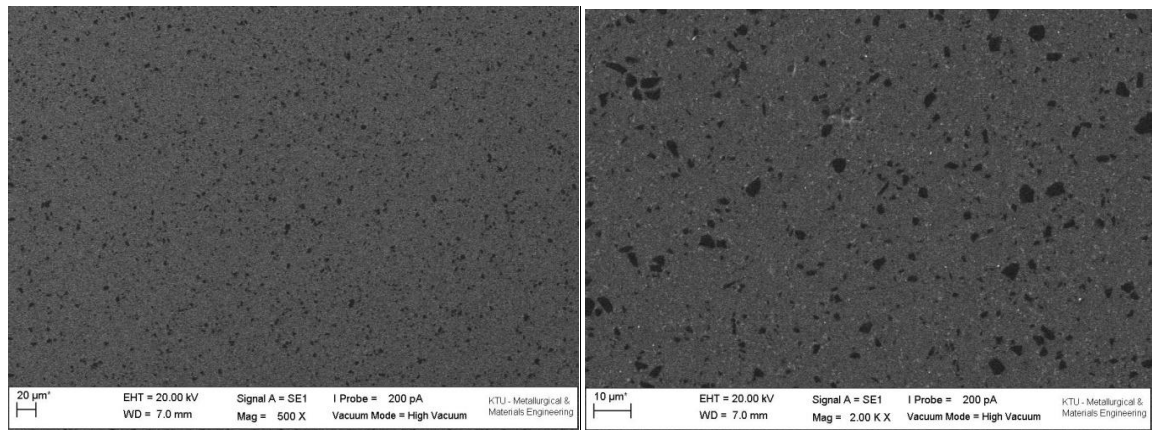
Şekil 3.50'nin devamı



(e)



(f)

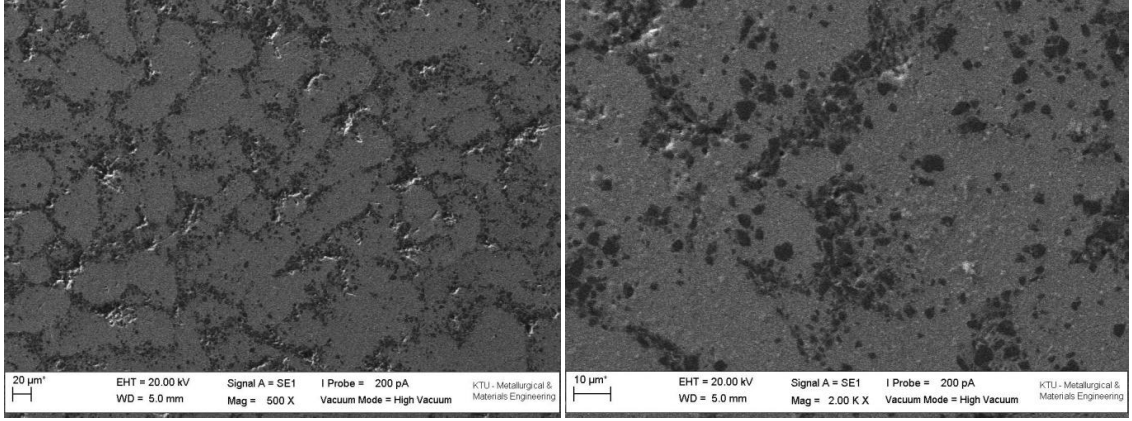


(g)

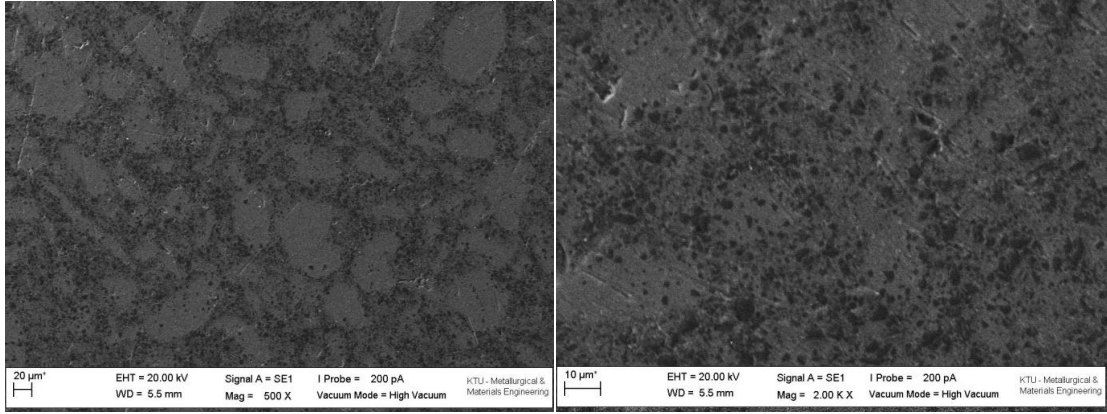
3.2.3.6. Al2024-%20İ

Küçük Büyütme

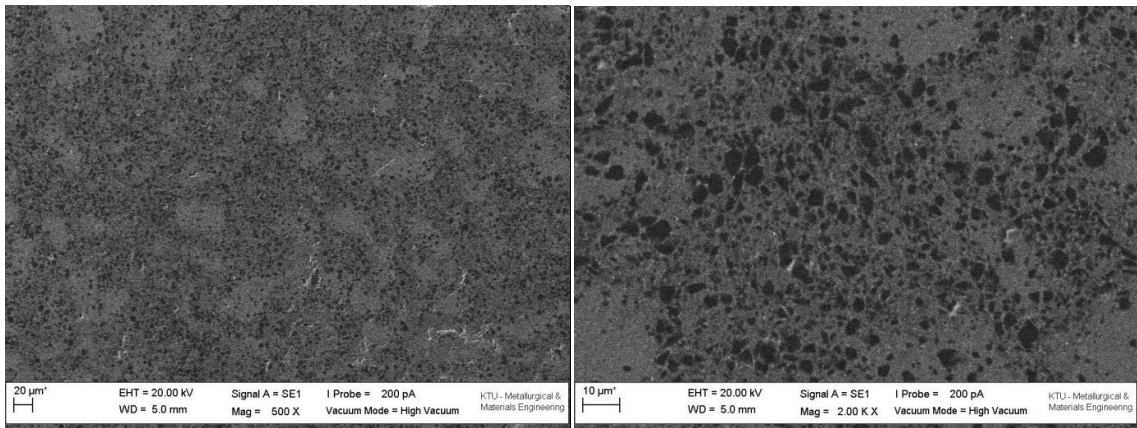
Büyük Büyütme



(a)



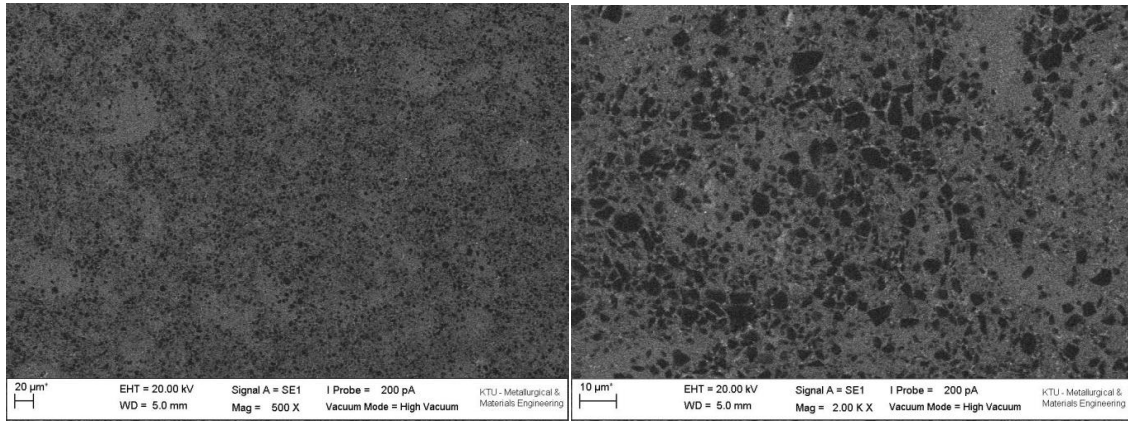
(b)



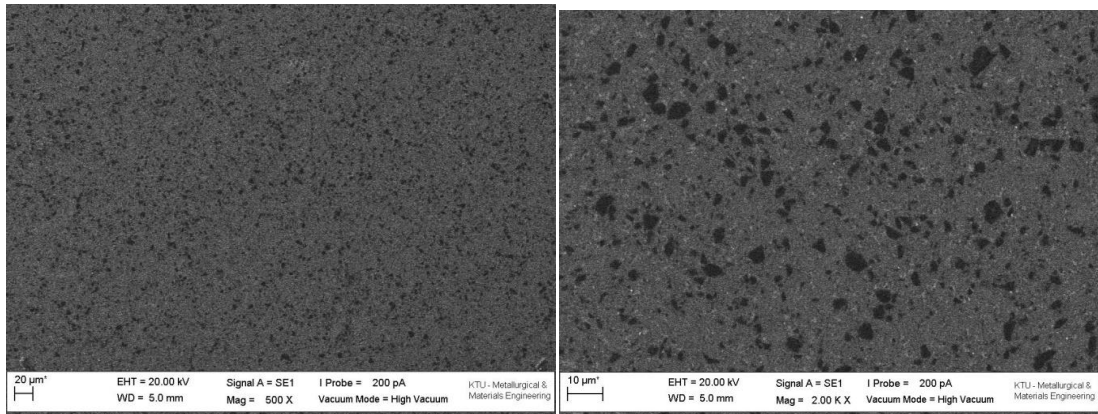
(c)

Şekil 3.51. Al2024-%20İ kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat

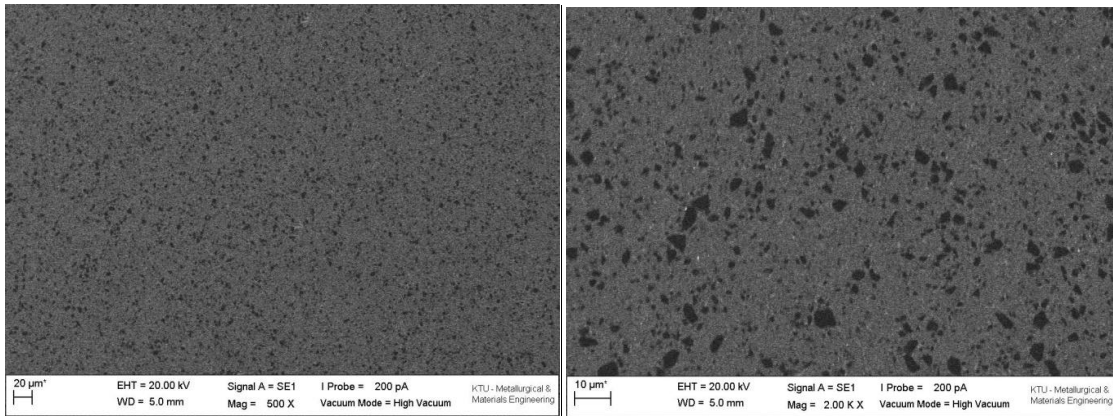
Şekil 3.51'in devamı



(d)

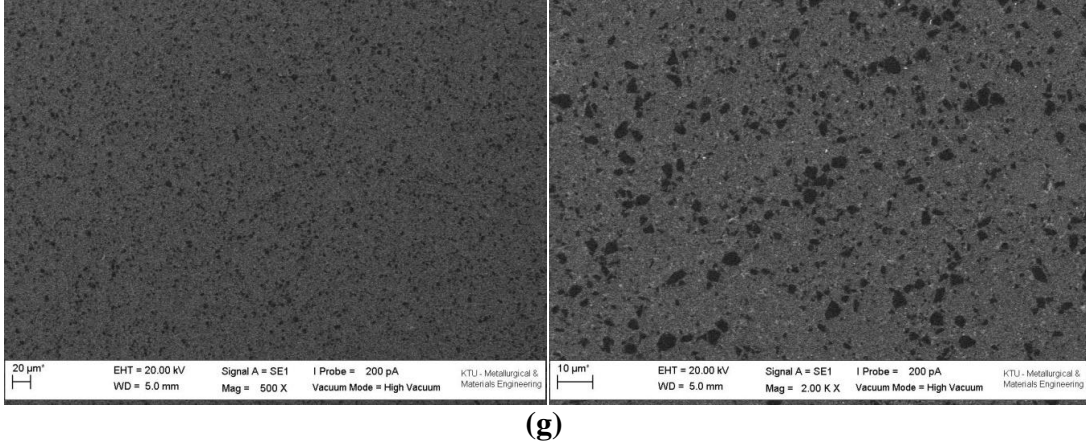


(e)



(f)

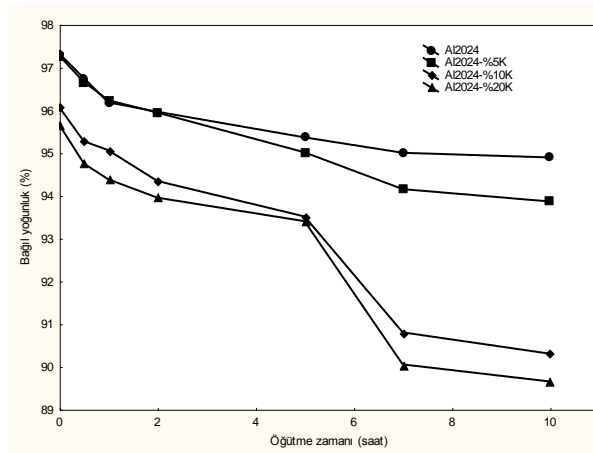
Şekil 3.51'in devamı



3.2.4. 400 MPa Basınçla Preslenen Numunelerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

3.2.4.1. 1. Grup Kompozitlerin Yoğunluk Değerleri

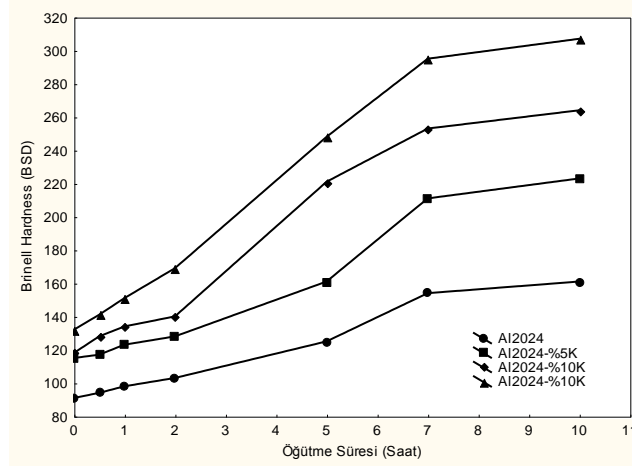
Artan sıkıştırma basıncı yoğunluk değerlerini artırmış ve bağıl yoğunluğu % 97 değerine kadar yükseltmiştir. Sıkıştırma basıncı toz metalurjisi ürünlerinin şekillendirilmesinde en önemli parametredir. Sıkıştırma türü ve basıncı yoğunluk değerlerini önemli derecede etkilemektedir. Yoğunluk değerlerinin değişimi incelendiğinde 7 saatlik öğütme işlemine kadar yoğunluk değerlerinin lineer olarak azaldığı daha sonra ise önemli bir değişimin olmadığı yani denge şartlarının oluştuğu görülmektedir.



Şekil. 3.52 Al 2024 ve kaba takviye parçacıklı kompozitlerin yoğunluğunun öğütme zamanı ile değişim

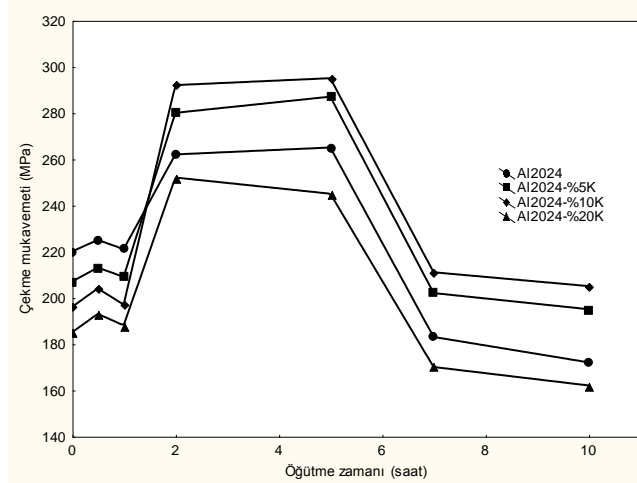
3.2.4.2 1. Grup Kompozitlerin Sertlik Değerleri

Artan sıkıştırma basıncı ile azalan porozite diğer bir deyişle artan yoğunluk değerleri sertlik değerini de olumlu yönde etkilemiştir.



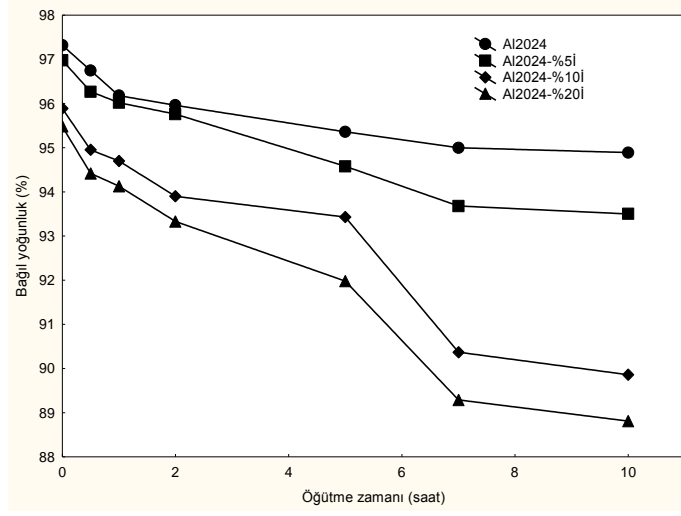
Şekil. 3.53. Al 2024 ve kaba takviye parçacıklı kompozitlerin sertlik değerlerinin öğütme zamanı ile değişimi

3.2.4.3. 1. Grup Kompozitlerin Çekme Mukavemeti Değerleri



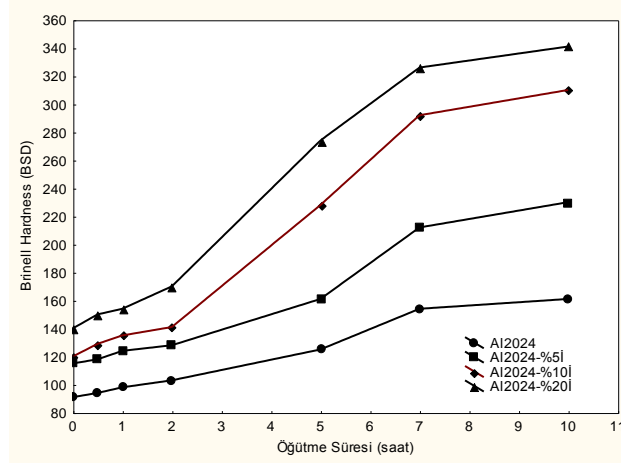
Şekil. 3.54 Al 2024 ve kaba takviye parçacıklı kompozitlerin çekme mukavemeti değerlerinin öğütme zamanı ile değişimi

3.2.4.4.2. Grup Kompozitlerin Yoğunluk Değerleri



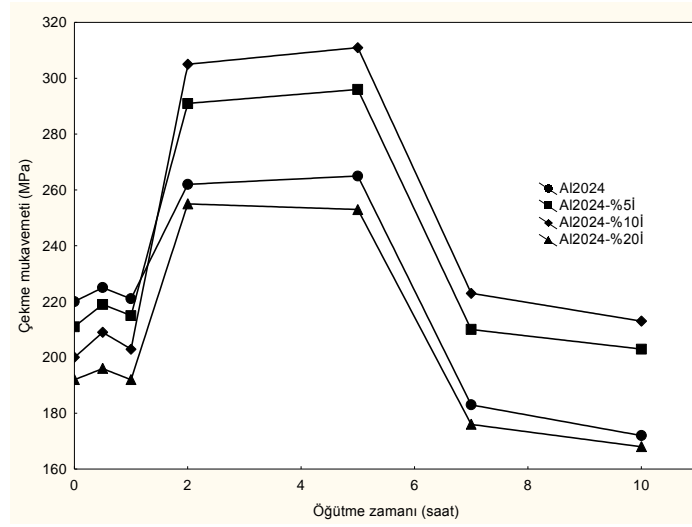
Şekil. 3.55 Al 2024 ve ince takviye parçacıklı (a) kompozitlerin yoğunluğunun öğütme zamanı ile değişimi

3.2.4.5. 2. Grup kompozitlerin Sertlik Değerleri



Şekil. 3.56 Al 2024 ve ince takviye parçacıklı kompozitlerin sertlik değerlerinin öğütme zamanı ile değişimi

3.2.4.6. 2. Grup Kompozitlerin Çekme Mukavemeti Değerleri



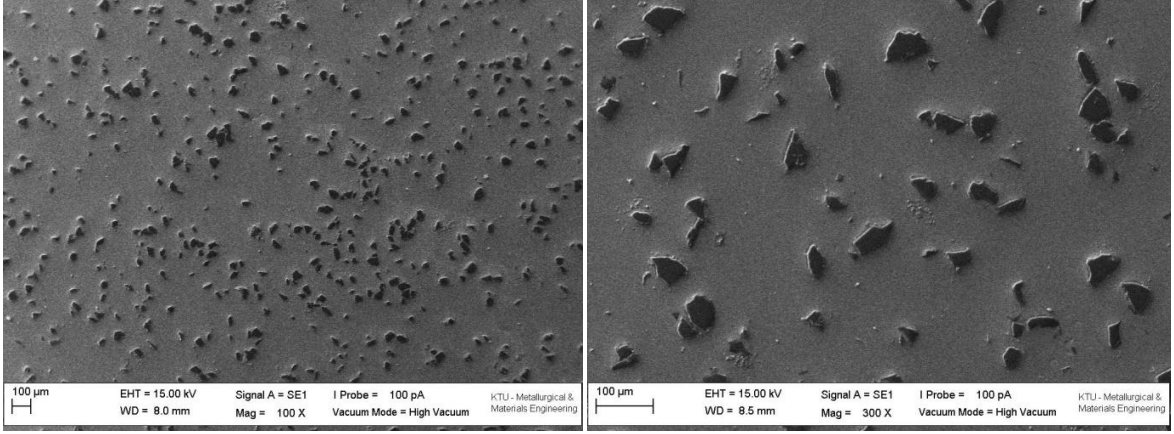
Şekil. 3.57. Al 2024 ve ince takviye parçacıklı kompozitlerin çekme mukavemeti değerlerinin öğütme zamanı ile değişimi

3.2.5 600 MPa Basınçla Preslenen Numunelerin İçyapı İncelemeleri

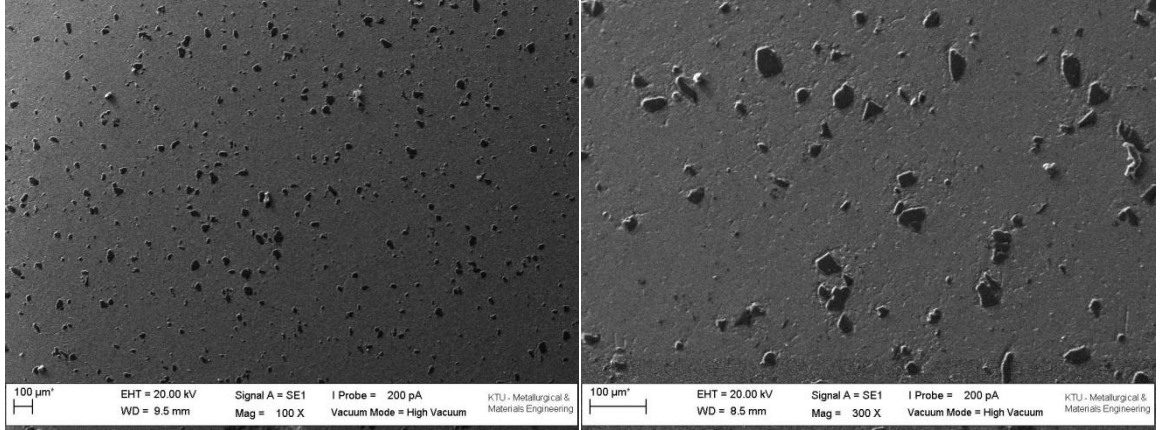
3.2.5.1 Al2024-%5K

Küçük Büyütme

Büyük Büyütme



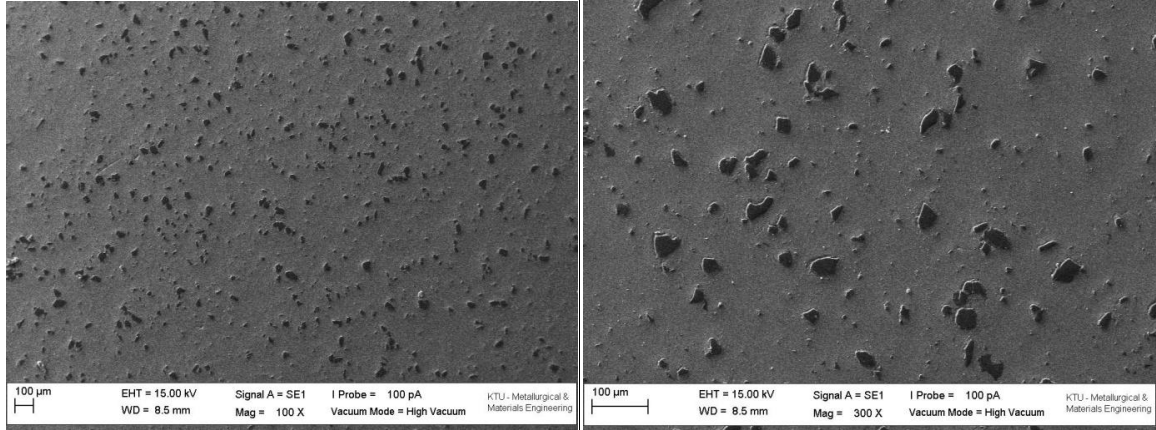
(a)



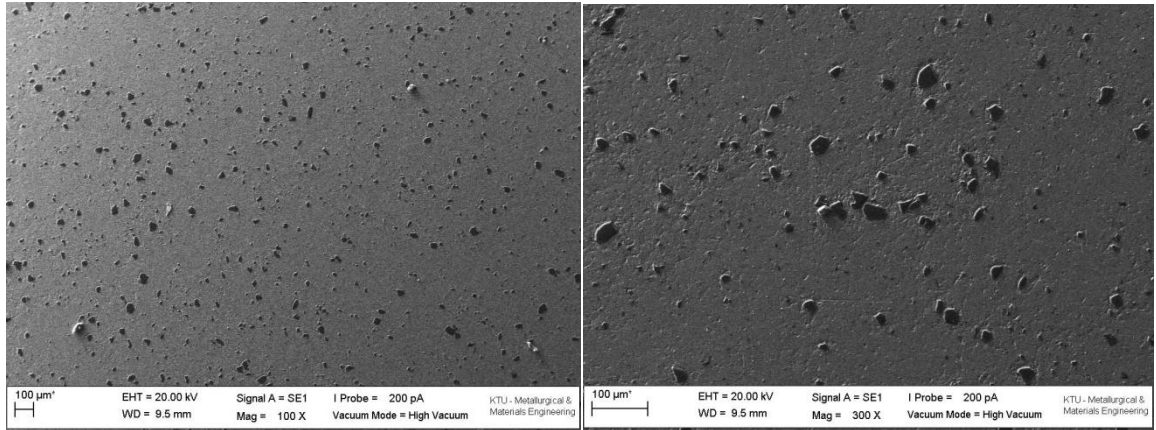
(b)

Şekil 3.58. Al2024-%5K kompozitlerinin farklı mekanik alaşım süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat

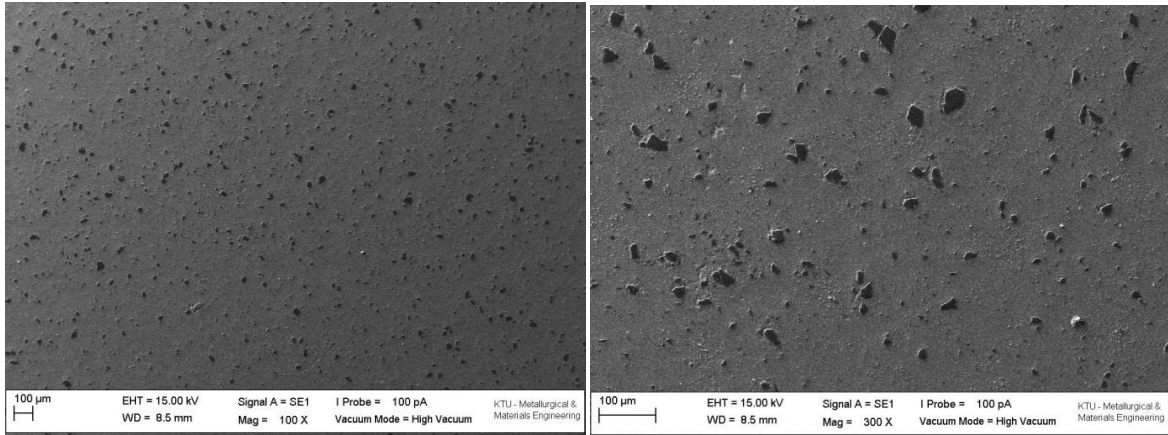
Şekil 3.58'in devamı



(c)

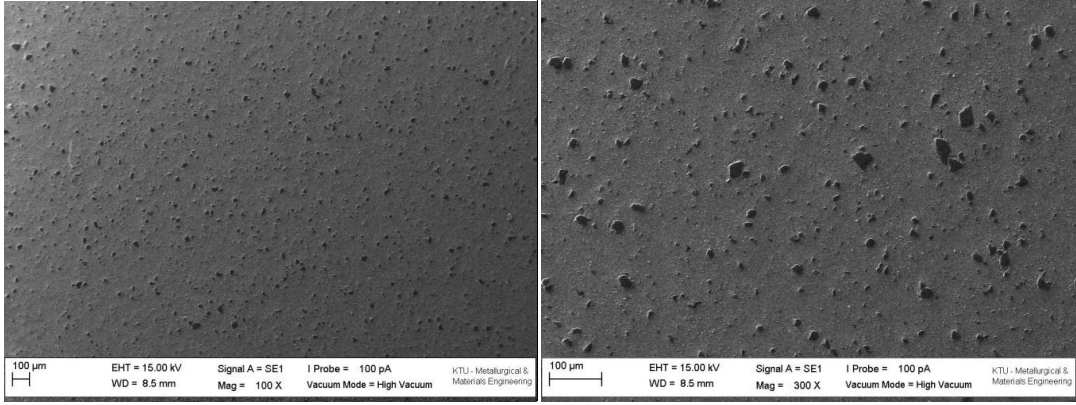


(d)

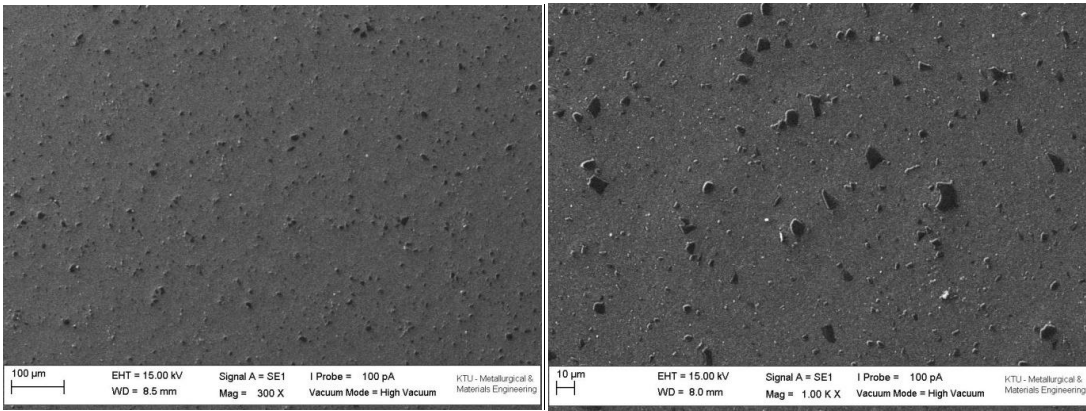


(e)

Şekil 3.58'in devamı



(f)

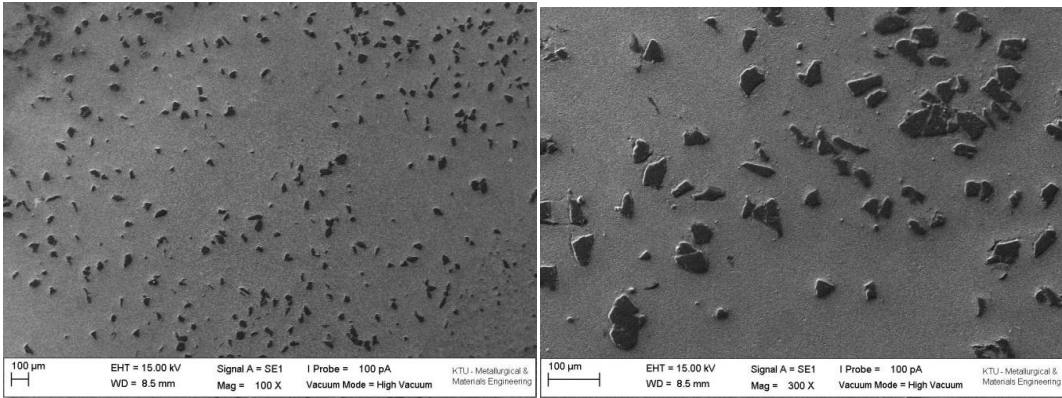


(g)

3.2.5.2 Al2024-%10K

Küçük Büyütme

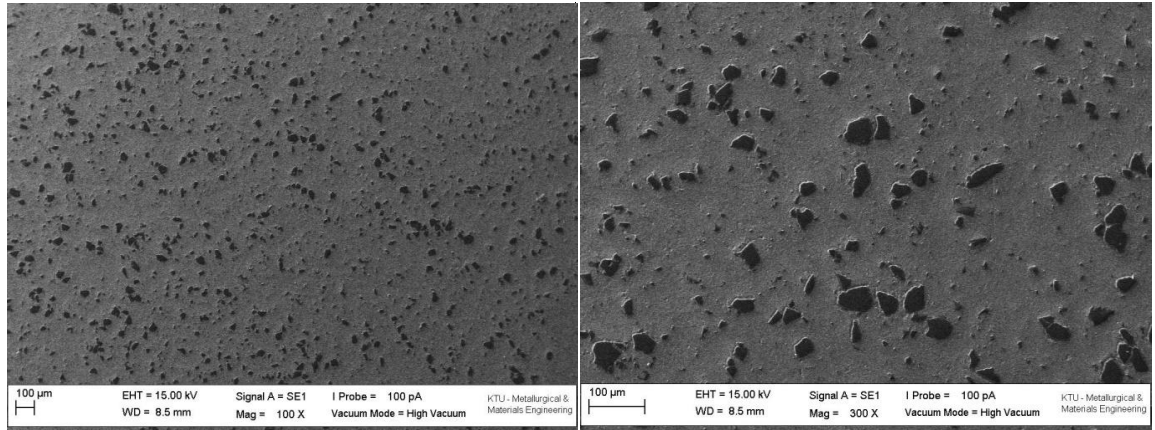
Büyük Büyütme



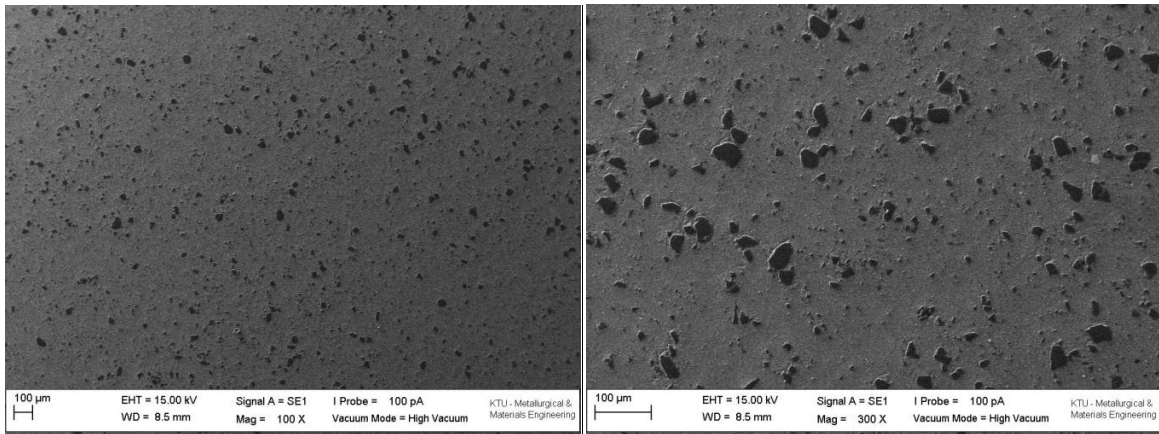
(a)

Şekil 3. 59. Al2024-%10K kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 saat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat

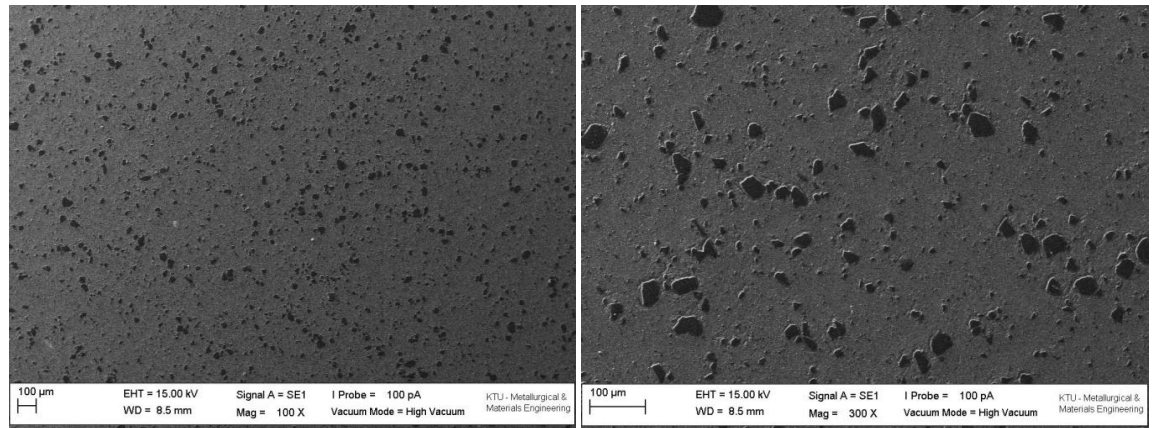
Şekil 3. 59'un devamı



(b)

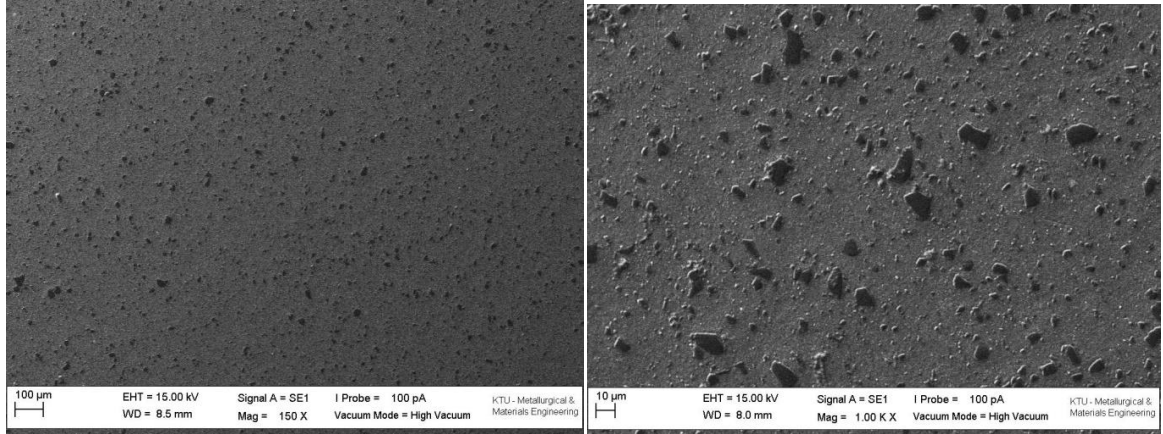


(c)

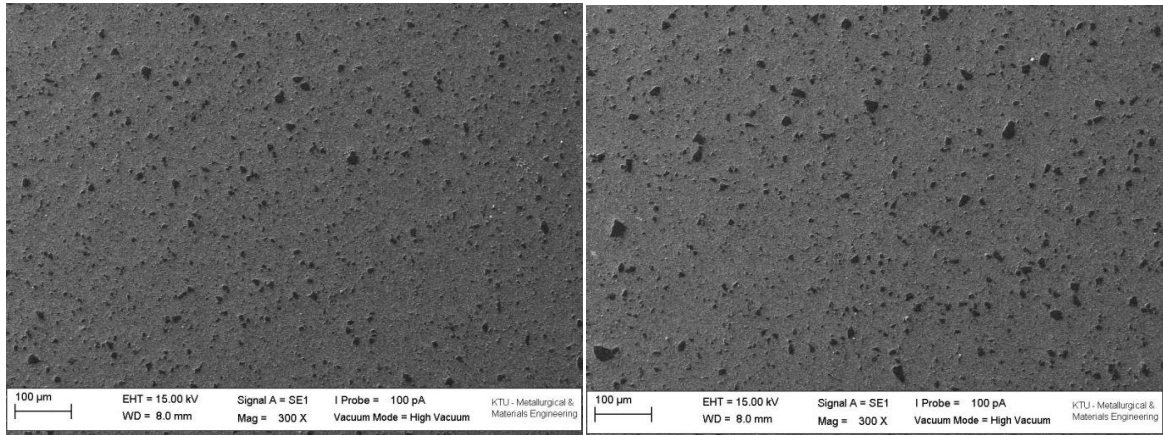


(d)

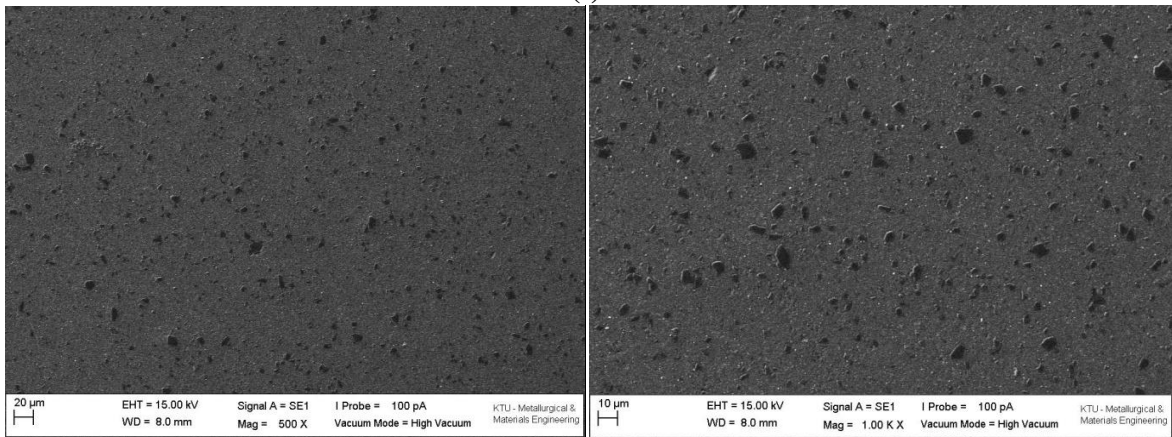
Şekil 3. 59'un devamı



(e)



(f)



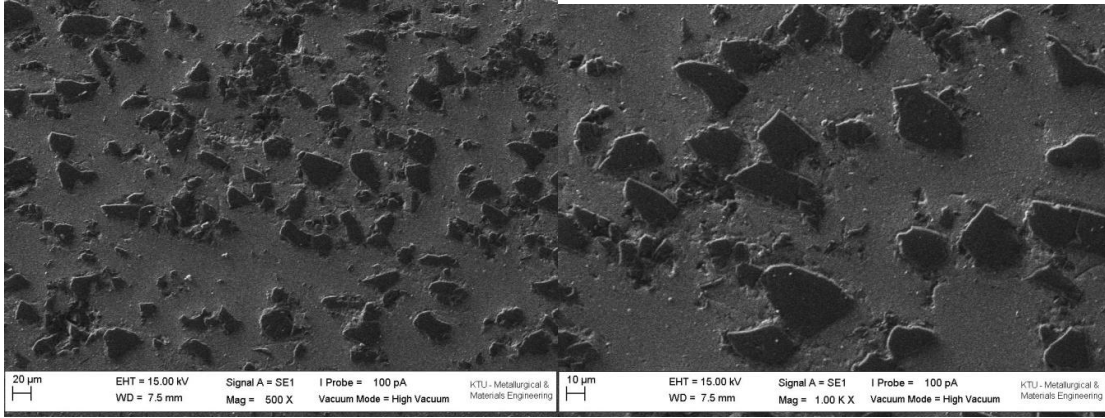
(g)

3.2.5.3 Al2024-%20K

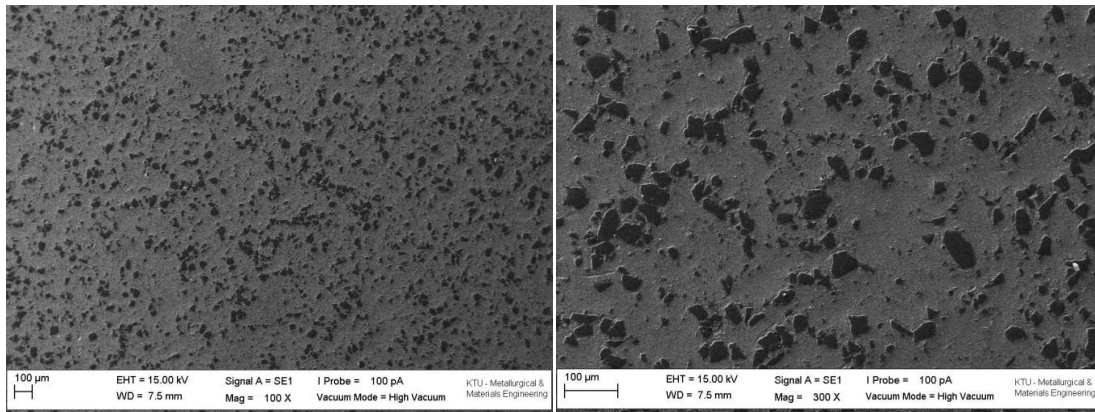
Küçük Büyütme

Büyük Büyütme

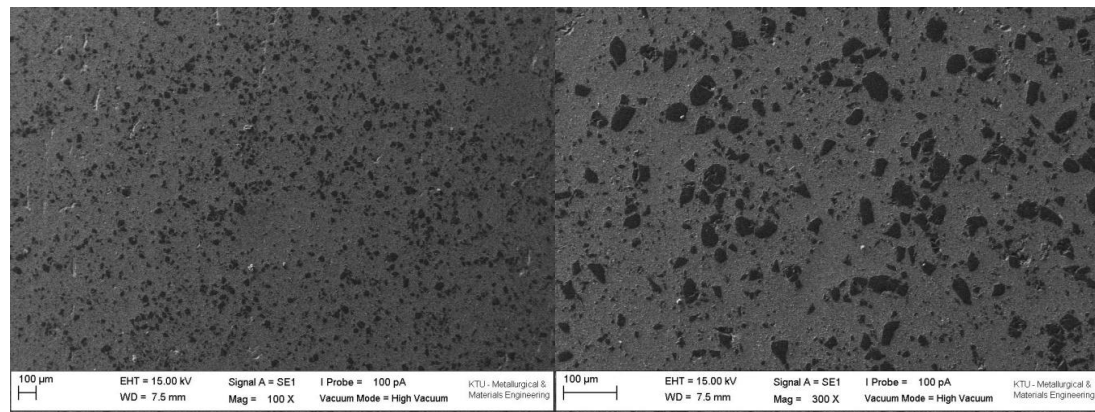
0 saat



(a)



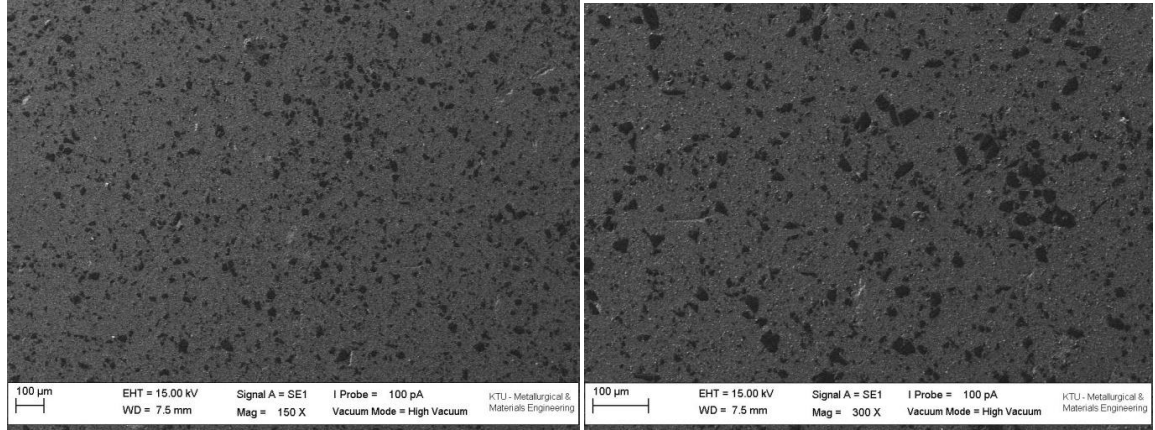
(b)



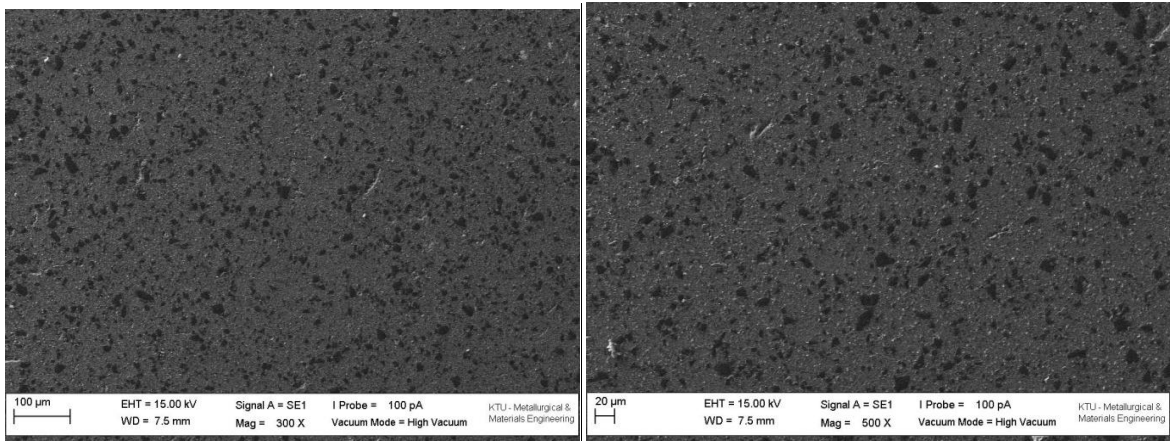
(c)

Şekil 3. 60. Al2024-%20K kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat

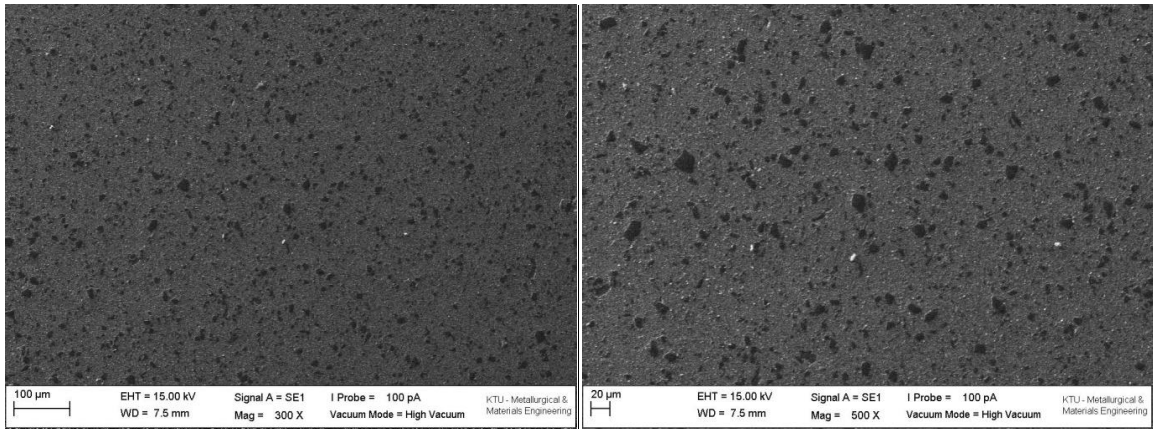
Şekil 3. 60'ın devamı



(d)

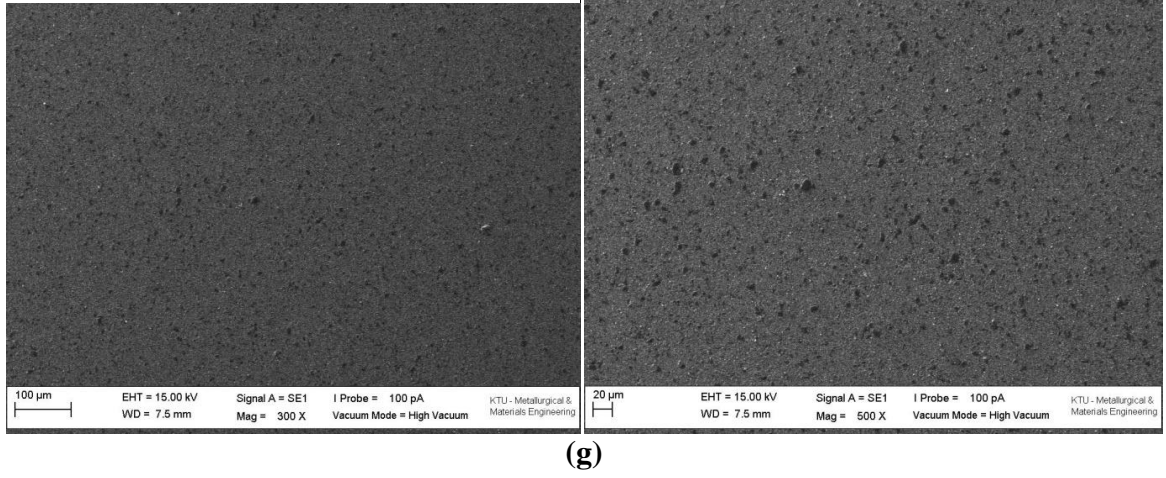


(e)



(f)

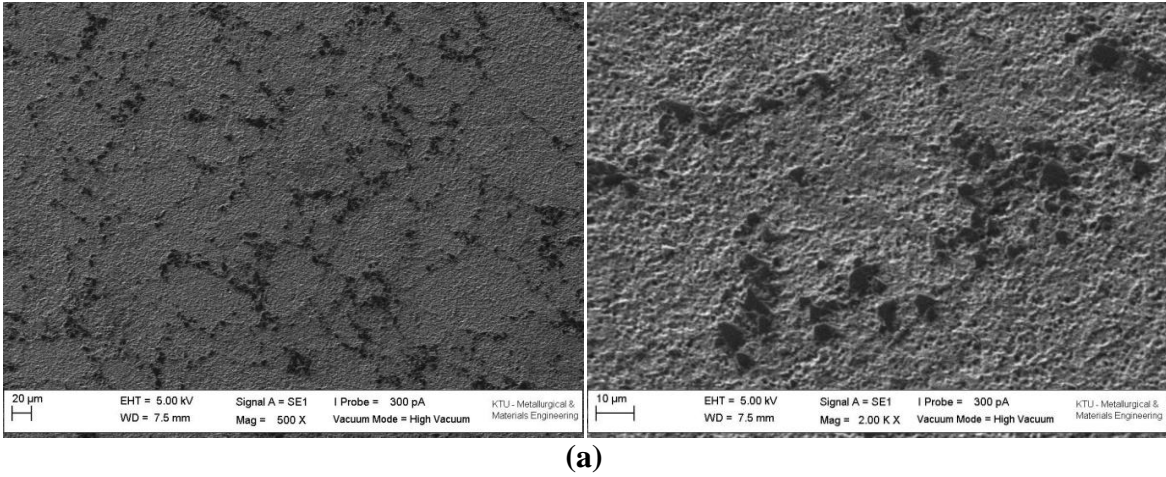
Şekil 3. 60'ın devamı



3.2.5.4 Al2024-%5İ

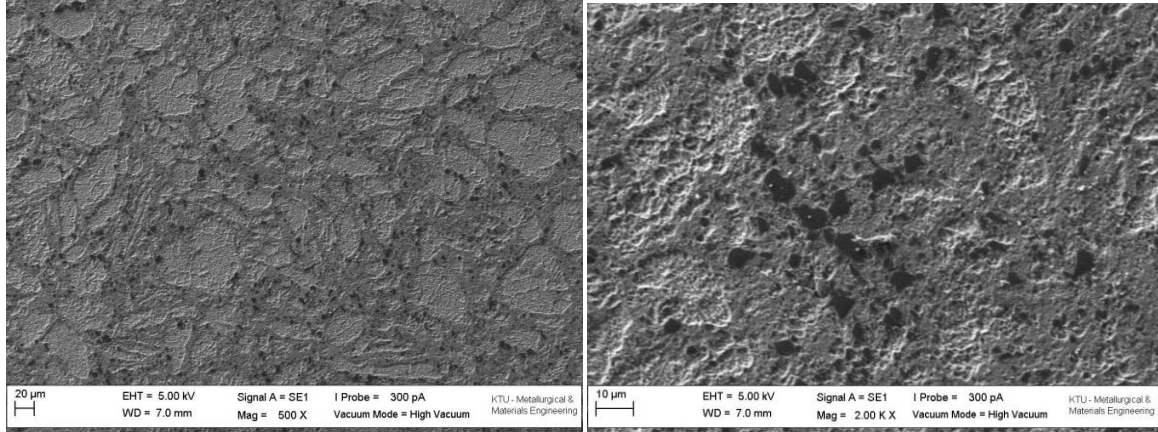
Küçük Büyütme

Büyük Büyütme

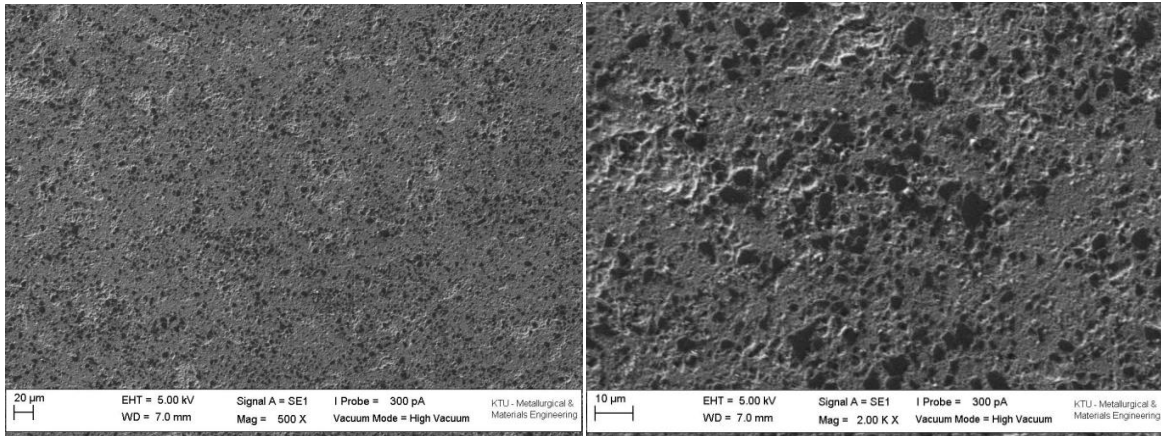


Şekil 3.61. Al2024-%5İ kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 sat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 10 saat

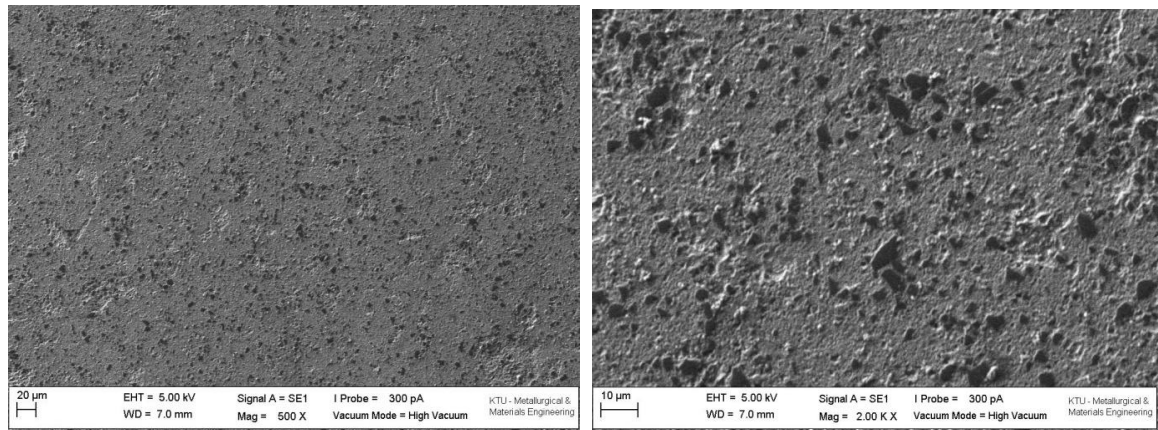
Şekil 3.61'in devamı



(b)

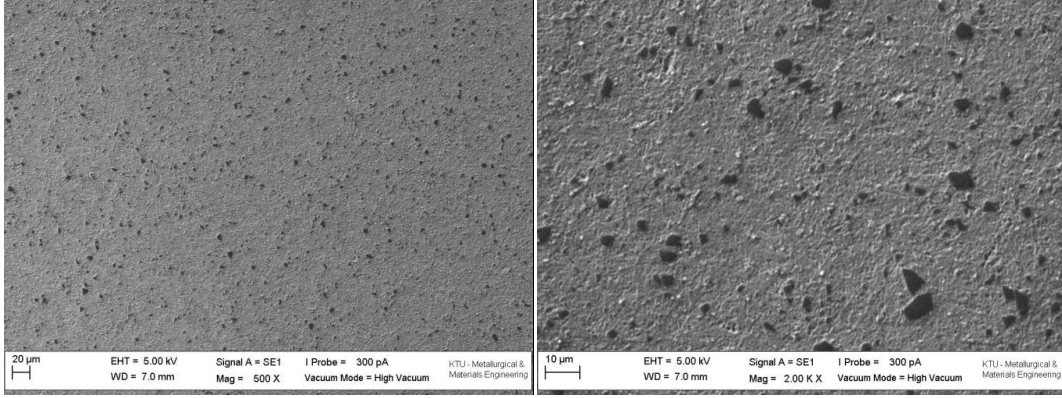


(c)

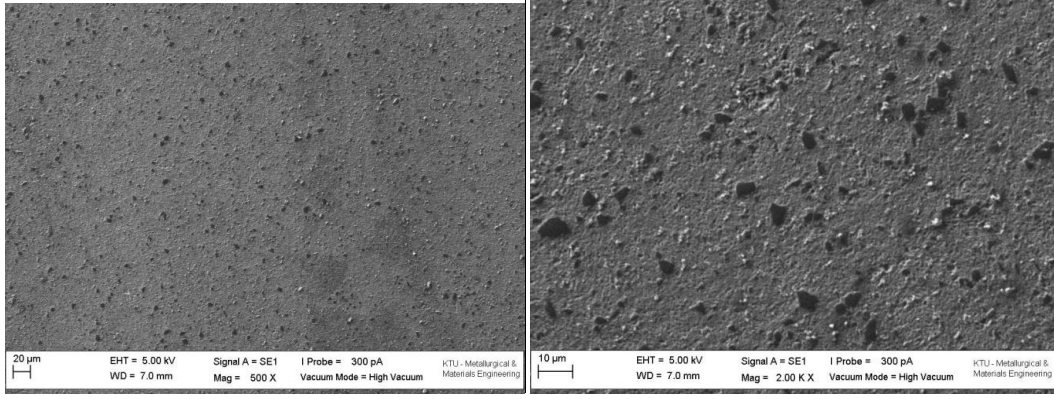


(d)

Şekil 3.61'in devamı



(e)

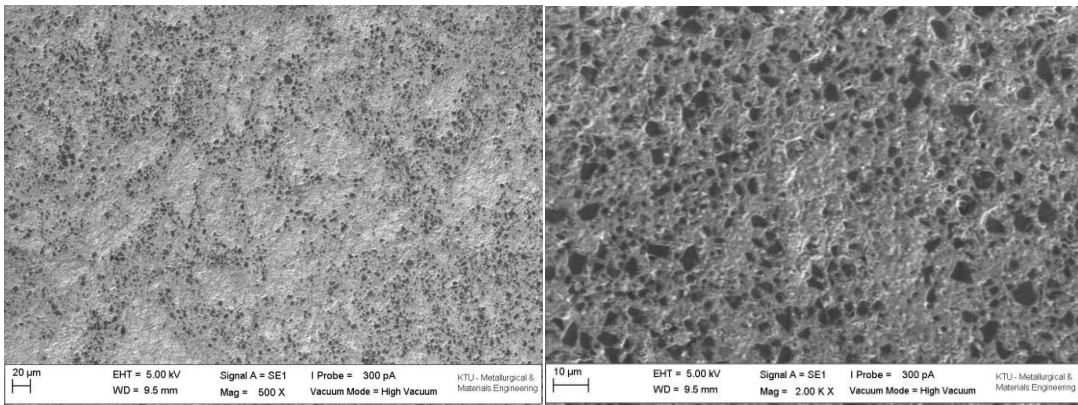


(f)

3.2.5.5 Al2024-%10İ

Küçük Büyütme

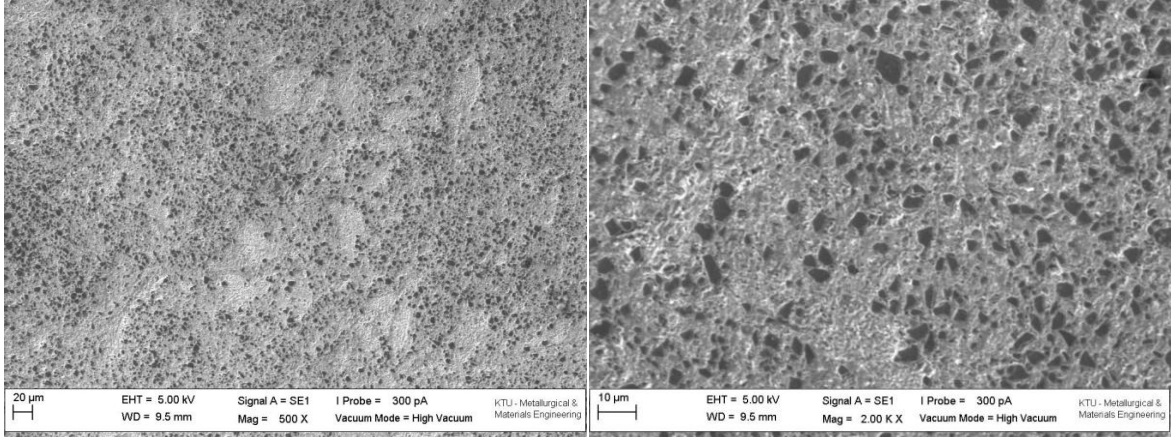
Büyük Büyütme



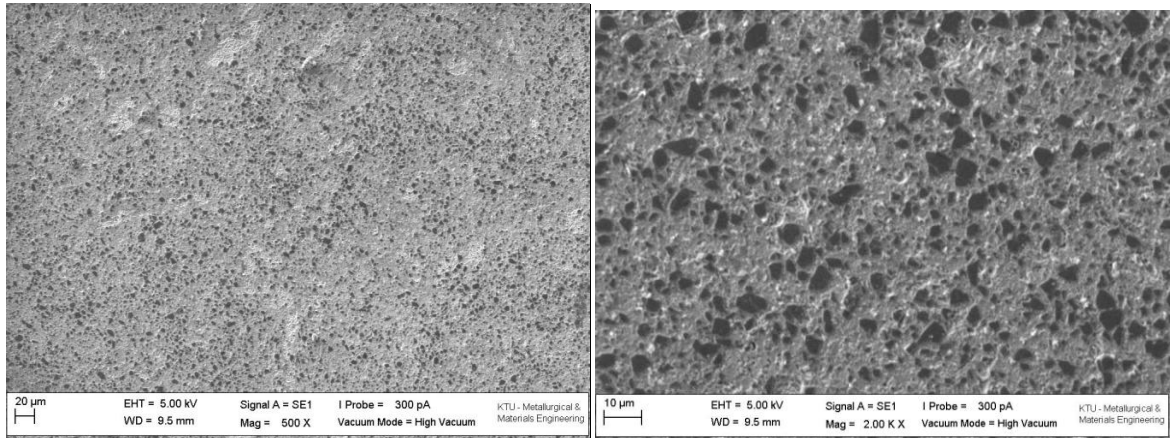
(a)

Şekil 3.62. Al2024-%10İ kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 saat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat

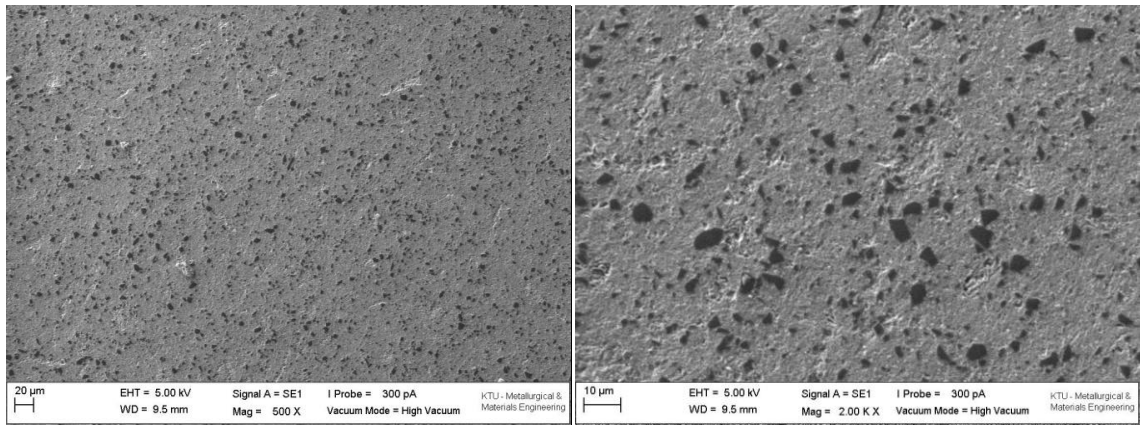
Şekil 3.62'nin devamı



(b)

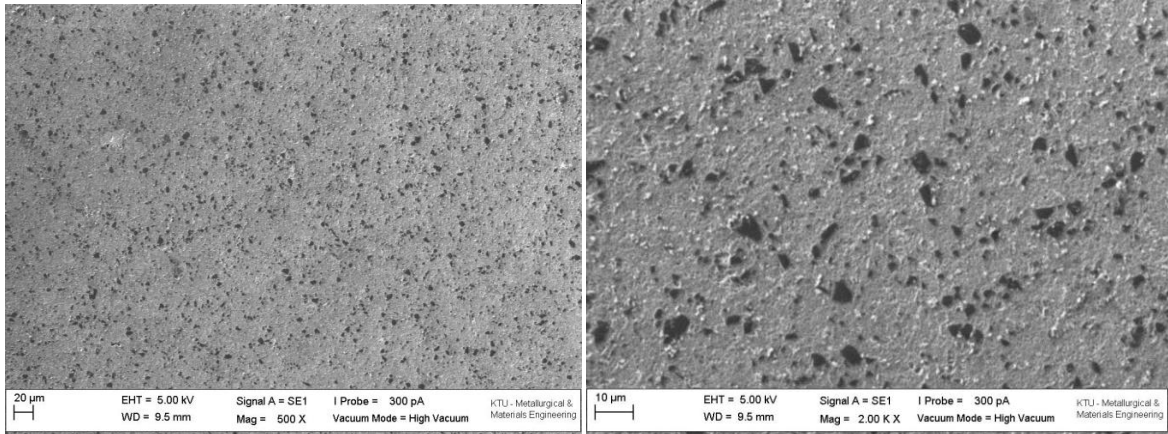


(c)

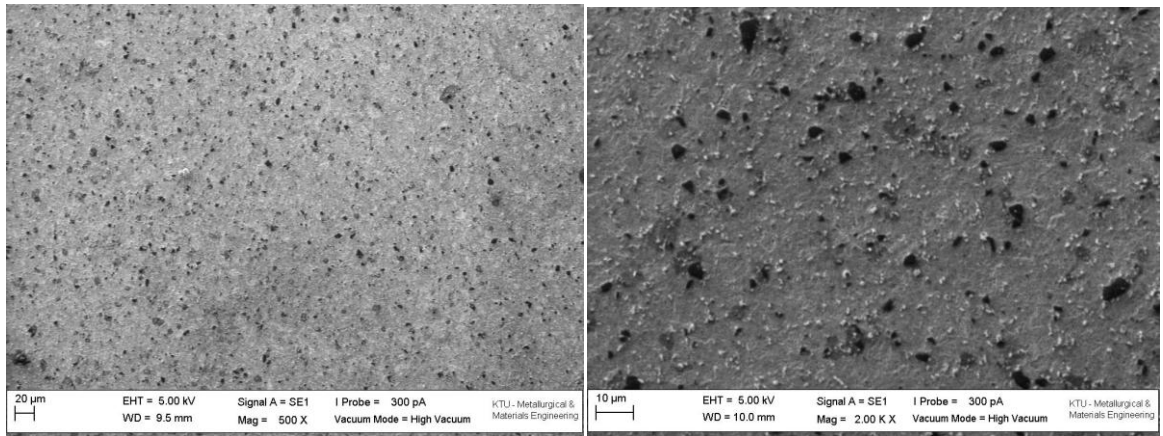


(d)

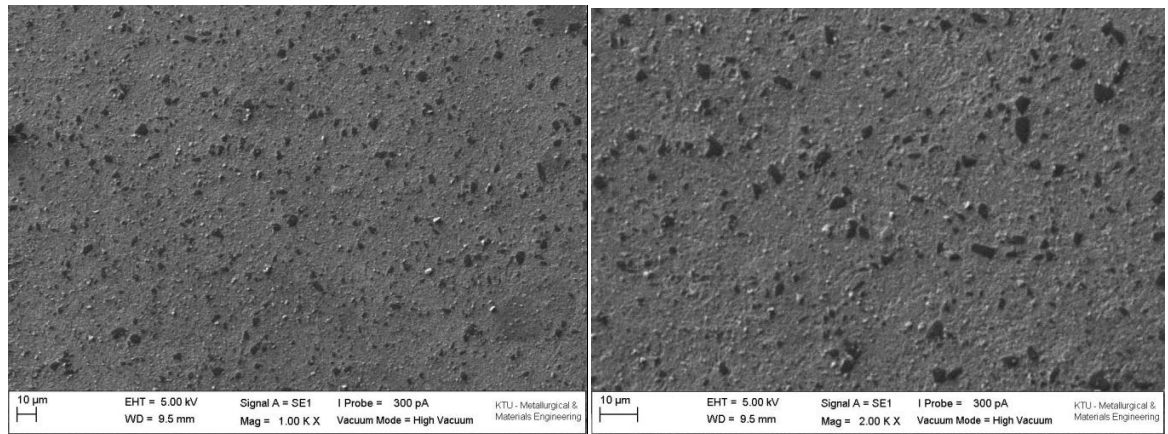
Şekil 3.62'nin devamı



(e)



(f)

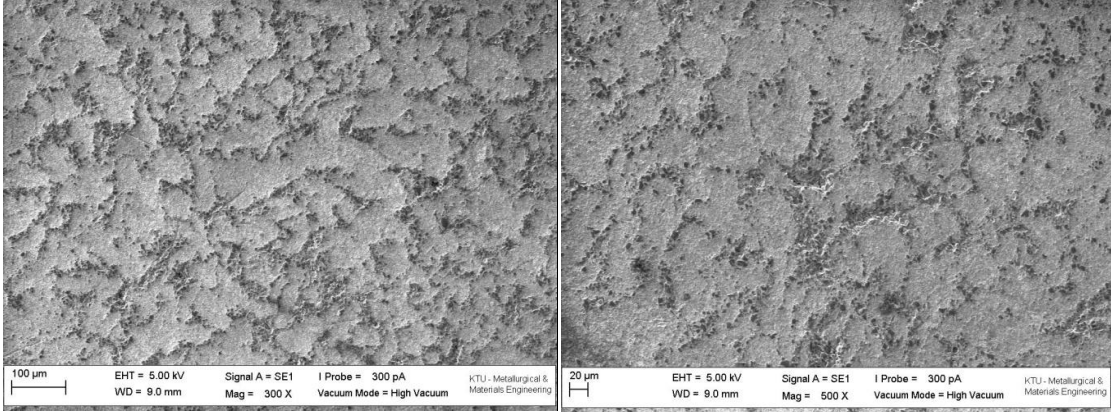


(g)

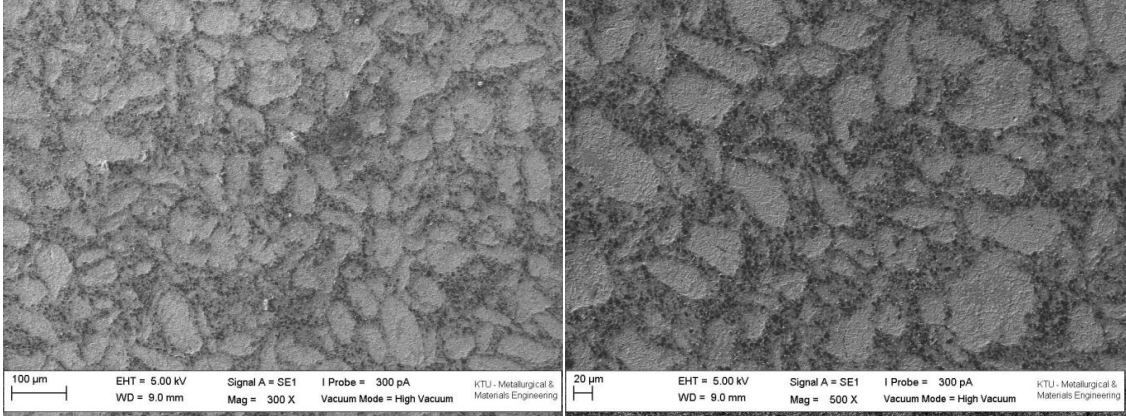
3.2.5.6 Al2024-%20İ

Küçük Büyütme

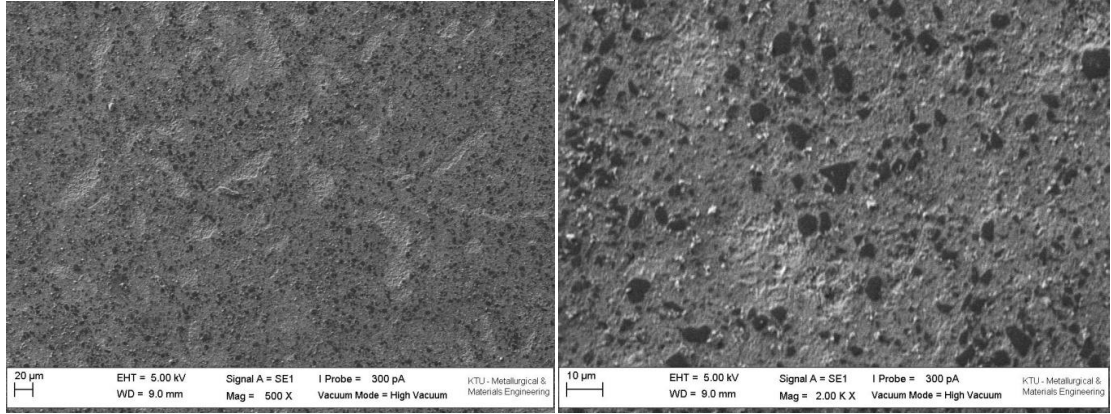
Büyük Büyütme



(a)



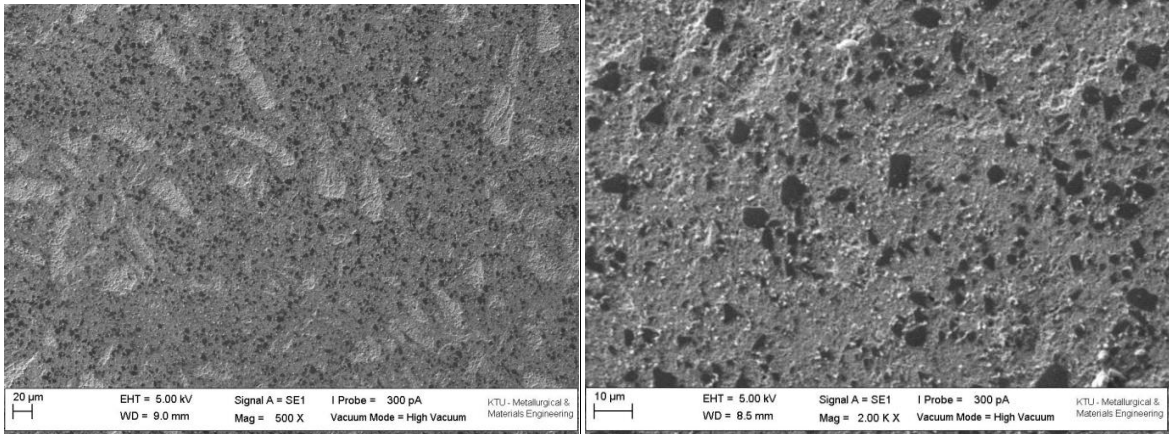
(b)



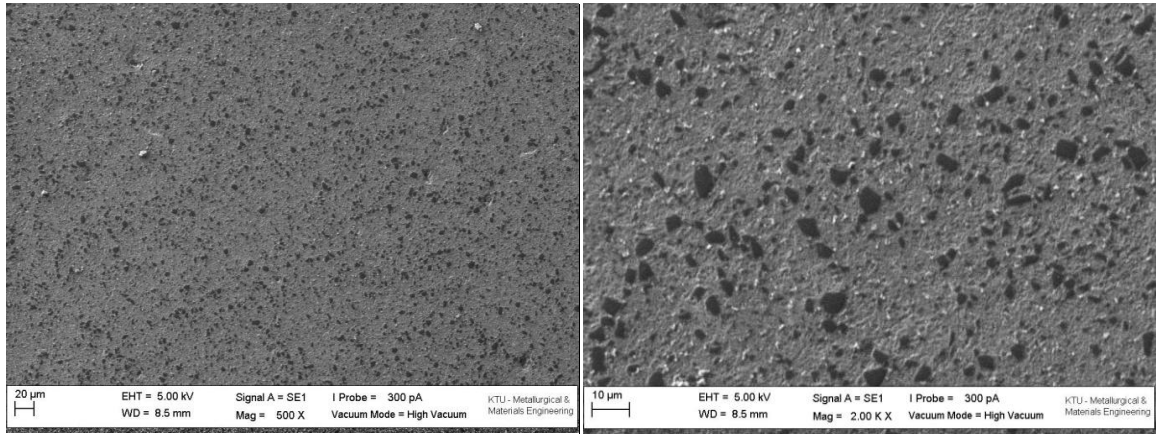
(c)

Şekil 3.63. Al2024-%20İ kompozitlerinin farklı mekanik alaşımlama süreleri sonucunda oluşan genel ve ayrıntılı iç yapı görüntüleri, (a) 0 saat, (b) 0.5 saat, (c) 1 saat, (d) 2 saat, (e) 5 saat, (f) 7 saat, (g) 10 saat

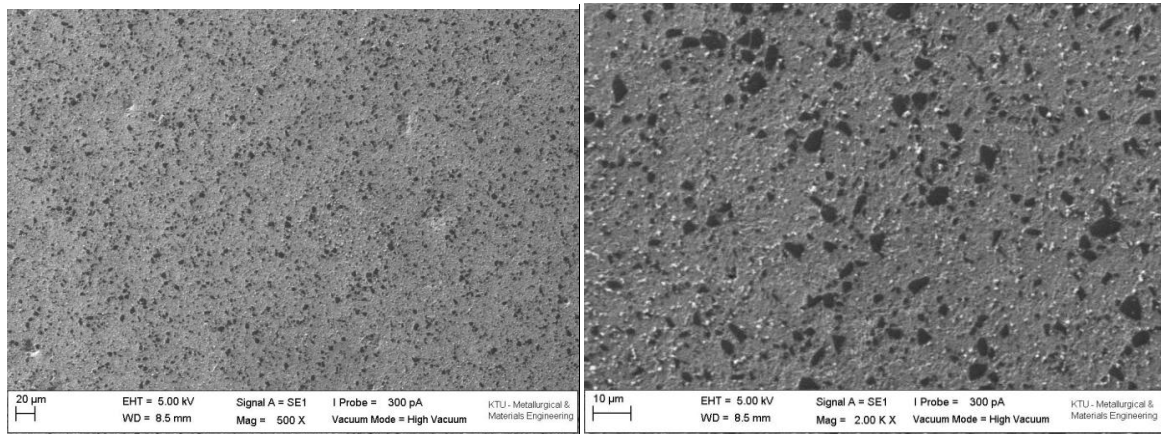
Şekil 3.63'ün devamı



(d)

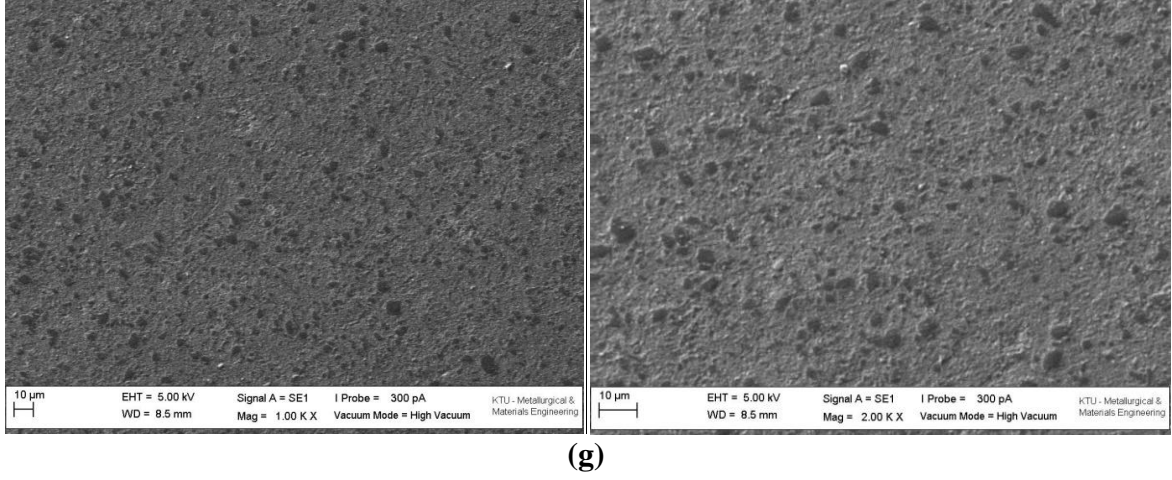


(e)



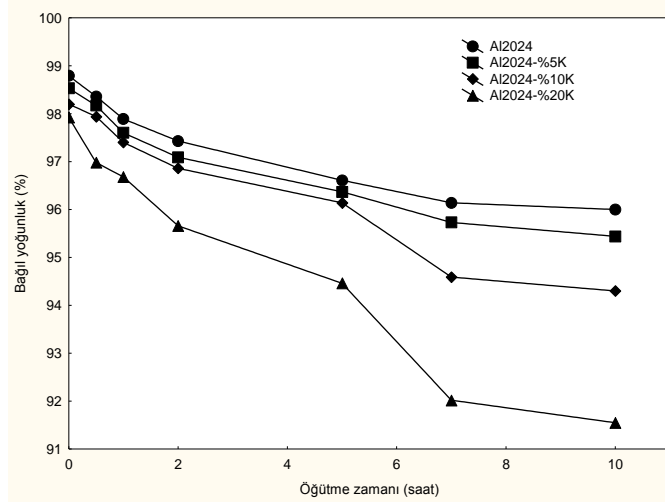
(f)

Şekil 3.63'ün devamı



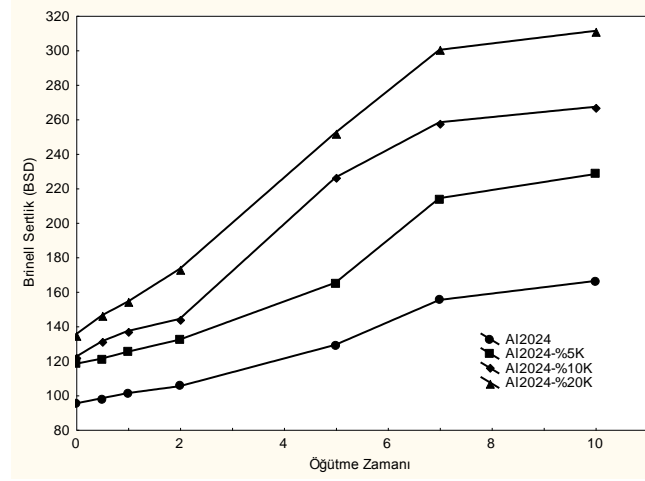
3.2.6 600 MPa Basınçla Preslenen Numunelerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

3.2.6.1. 1. Grup Kompozitlerin Yoğunluk Değerleri



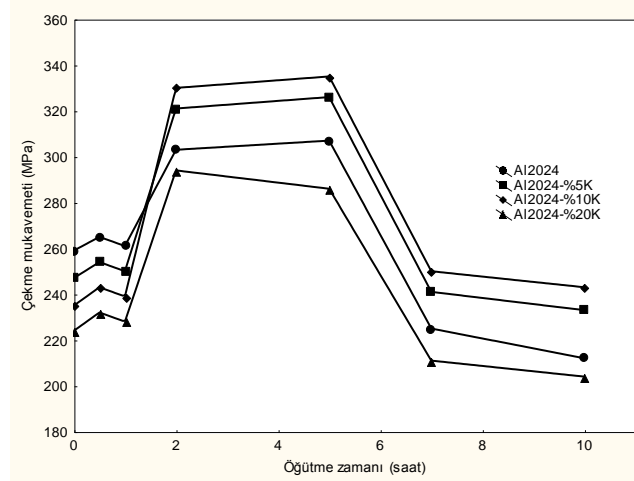
Şekil. 3.64. Al 2024 ve kaba takviye parçacıklı kompozitlerin yoğunluğunun öğütme zamanı ile değişimi

3.2.6.2 1. Grup Kompozitlerin Sertlik Değerleri



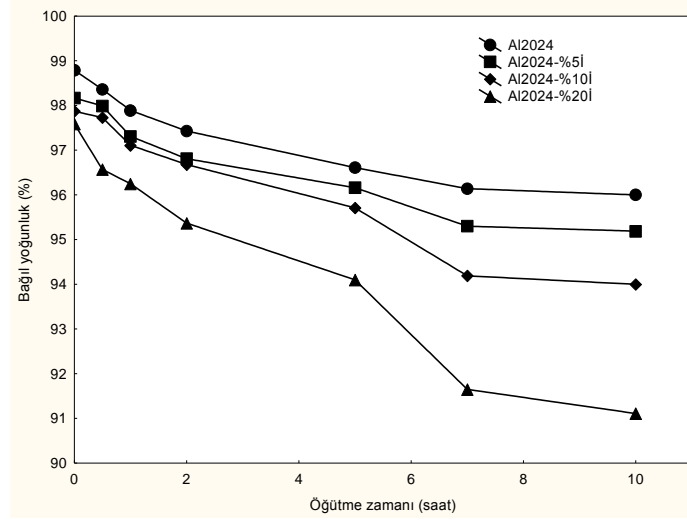
Şekil. 3.65. AI 2024 ve kaba takviye parçacıklı (a) kompozitlerin sertlik değerlerinin öğütme zamanı ile değişimi

3.2.6.3. 1. Grup kompozitlerin Çekme Mukavemeti Değerleri



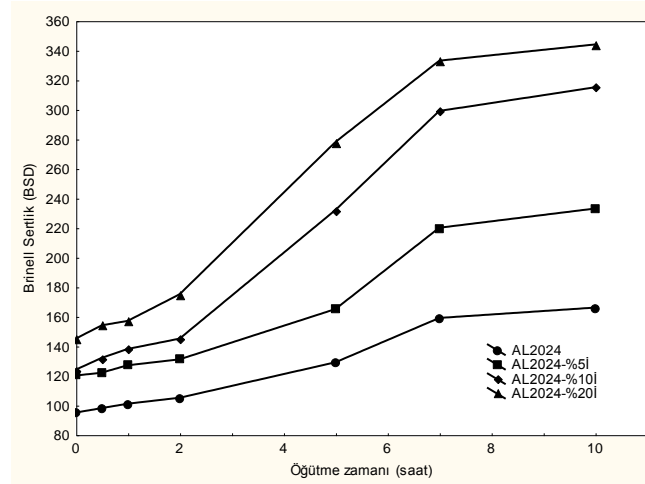
Şekil. 3.66. AI 2024 ve kaba takviye parçacıklı kompozitlerin çekme mukavemeti değerlerinin öğütme zamanı ile değişimi

3.2.6.4. 2. Grup Kompozitlerin Yoğunluk Değerleri



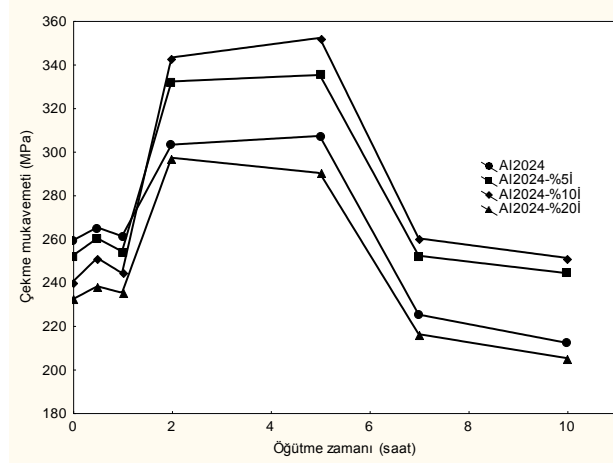
Şekil. 3.67. Al 2024 ve İnce takviye parçacıklı kompozitlerin yoğunluğunun öğütme zamanı ile değişimi

3.2.6.5. 2. Grup Kompozitlerin Sertlik Değerleri



Şekil. 3.68. Al 2024 ve ince takviye parçacıklı kompozitlerin sertlik değerlerinin öğütme zamanı ile değişimi

3.2.6.6. 2. Grup Kompozitlerin Çekme Mukavemeti Değerleri

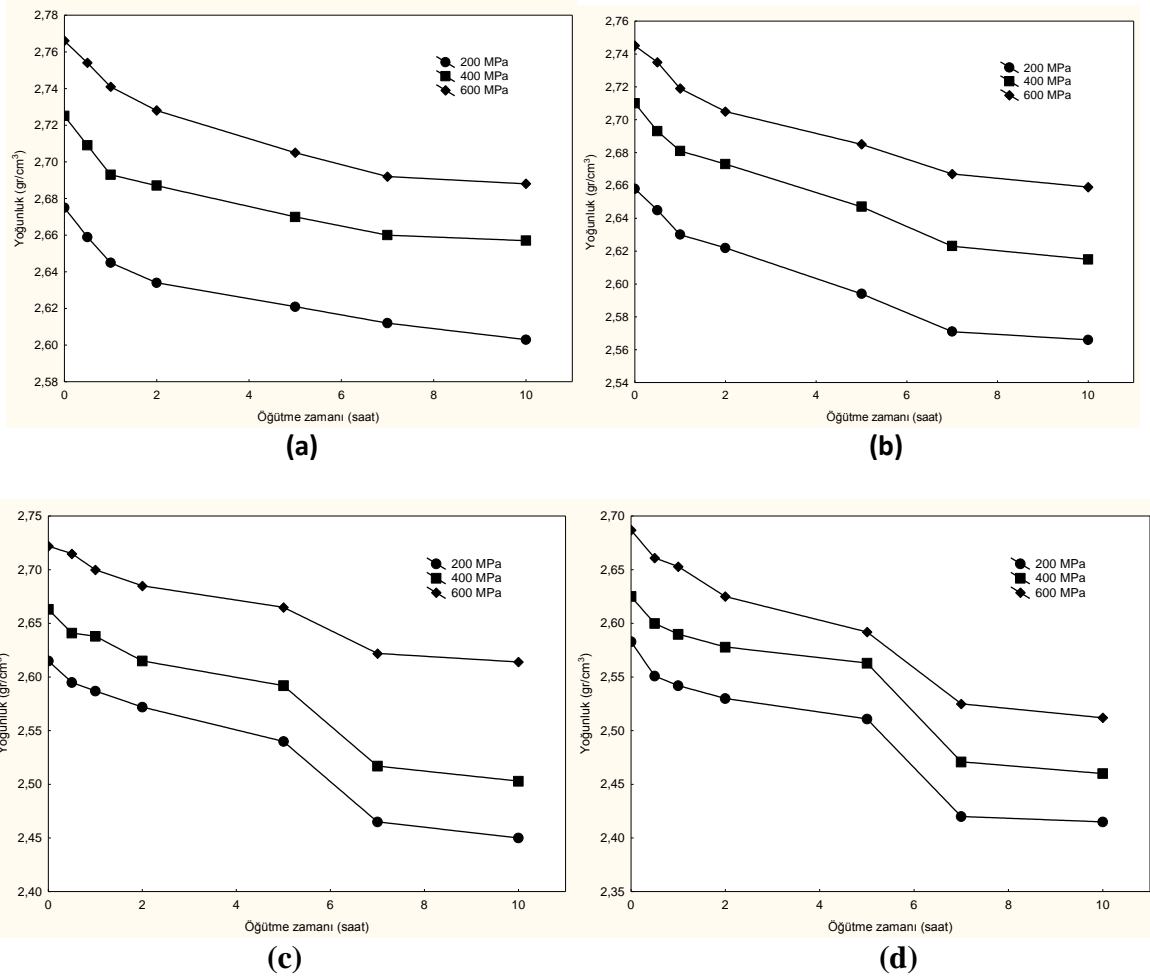


Şekil. 3.69. Al 2024 ve ince takviye parçacıklı kompozitlerin çekme mukavemeti değerlerinin öğütme zamanı ile değişimi

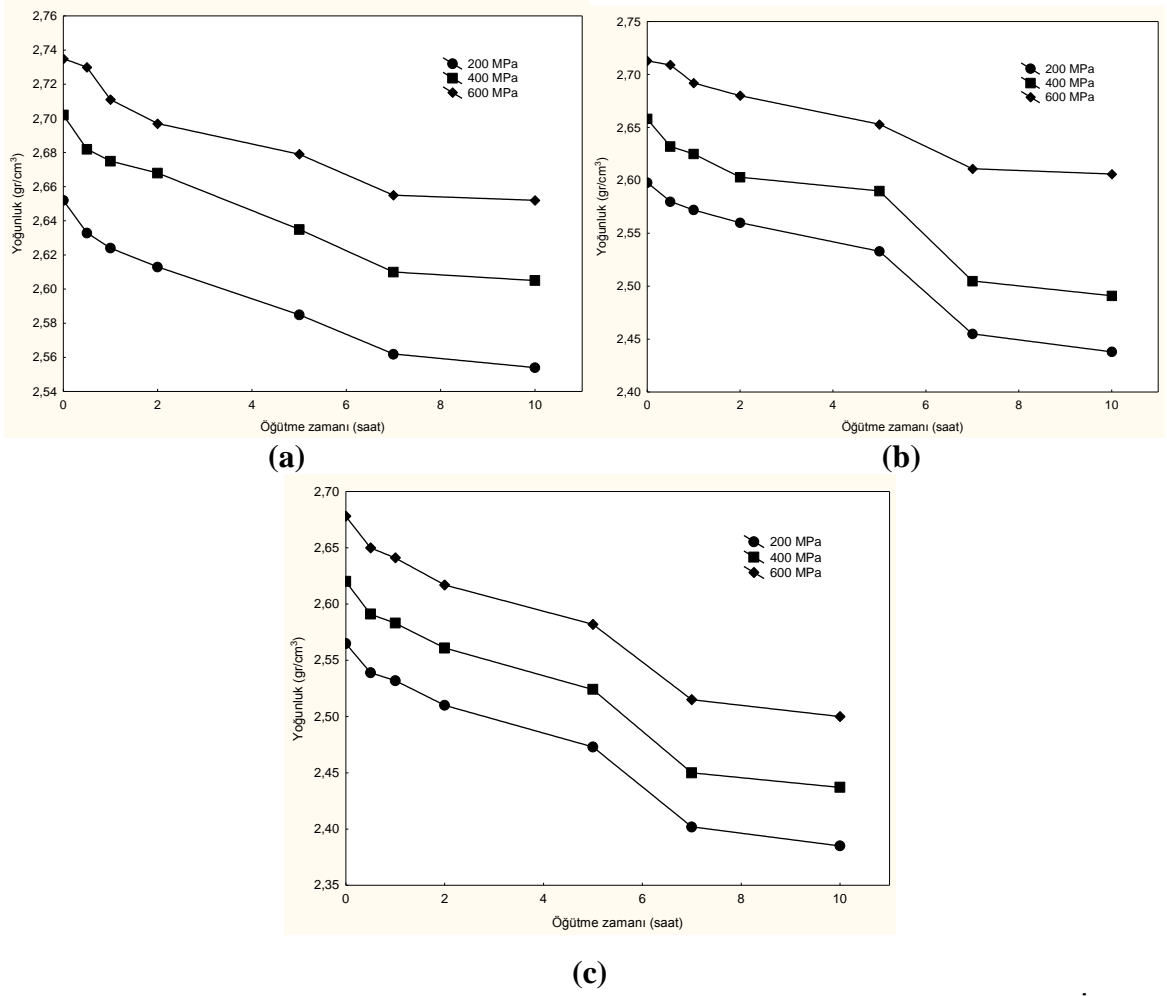
3.2.7. Fiziksel ve Mekanik Özelliklerin Sıkıştırma Basıncı ile Değişimi

Aşağıdaki grafiklerde sıkıştırma basıncının üretilen bütün malzemelerin yoğunluk, sertlik ve çekme mukavemeti değerlerine etkisi verilmiştir. Artan sıkıştırma basıncı ile üretilen malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri iyileşmiştir.

3.2.7.1. Yoğunluk

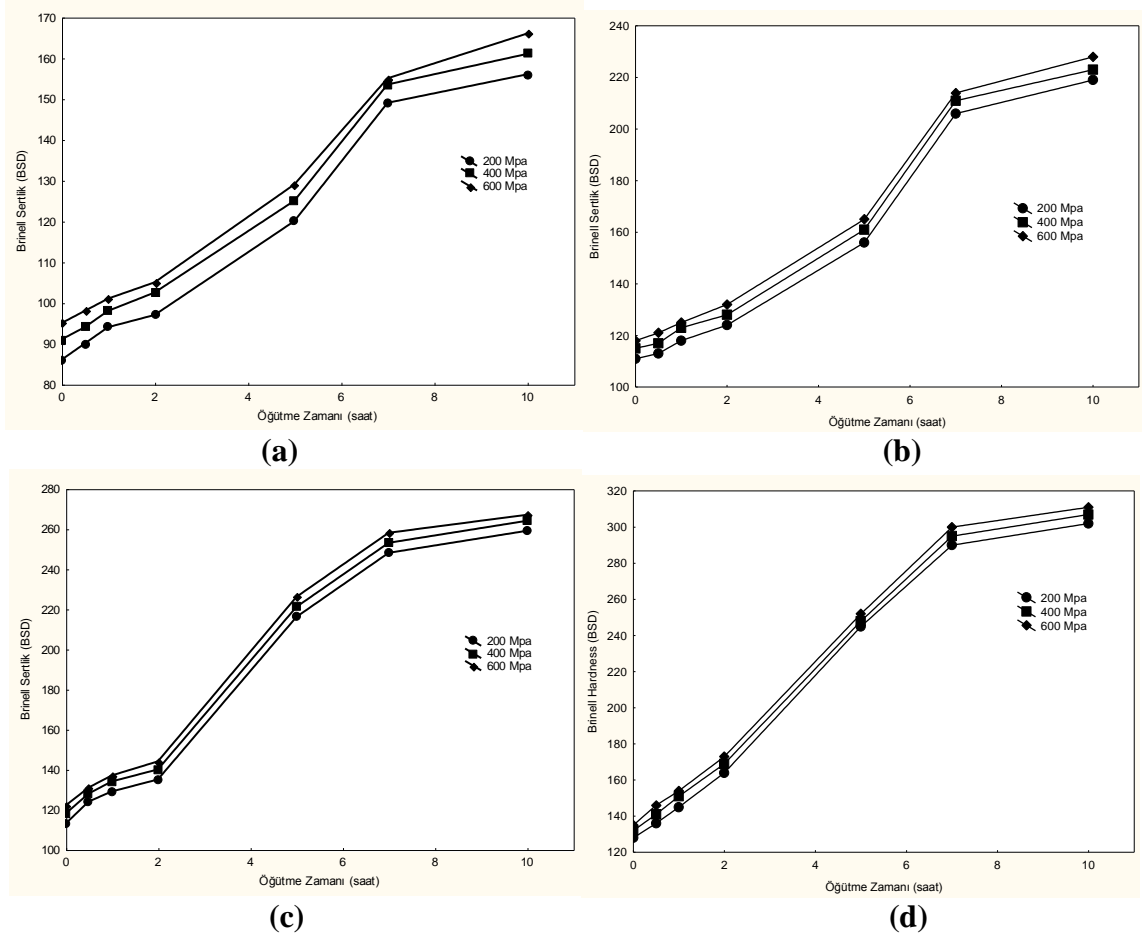


Şekil. 3.70. Sıkıştırma basıncı ile yoğunluk değerlerinin değişimi, (a) Al 2024, (b) Al2024-%5K, (c) Al2024-%10K, (d) Al2024-%20K

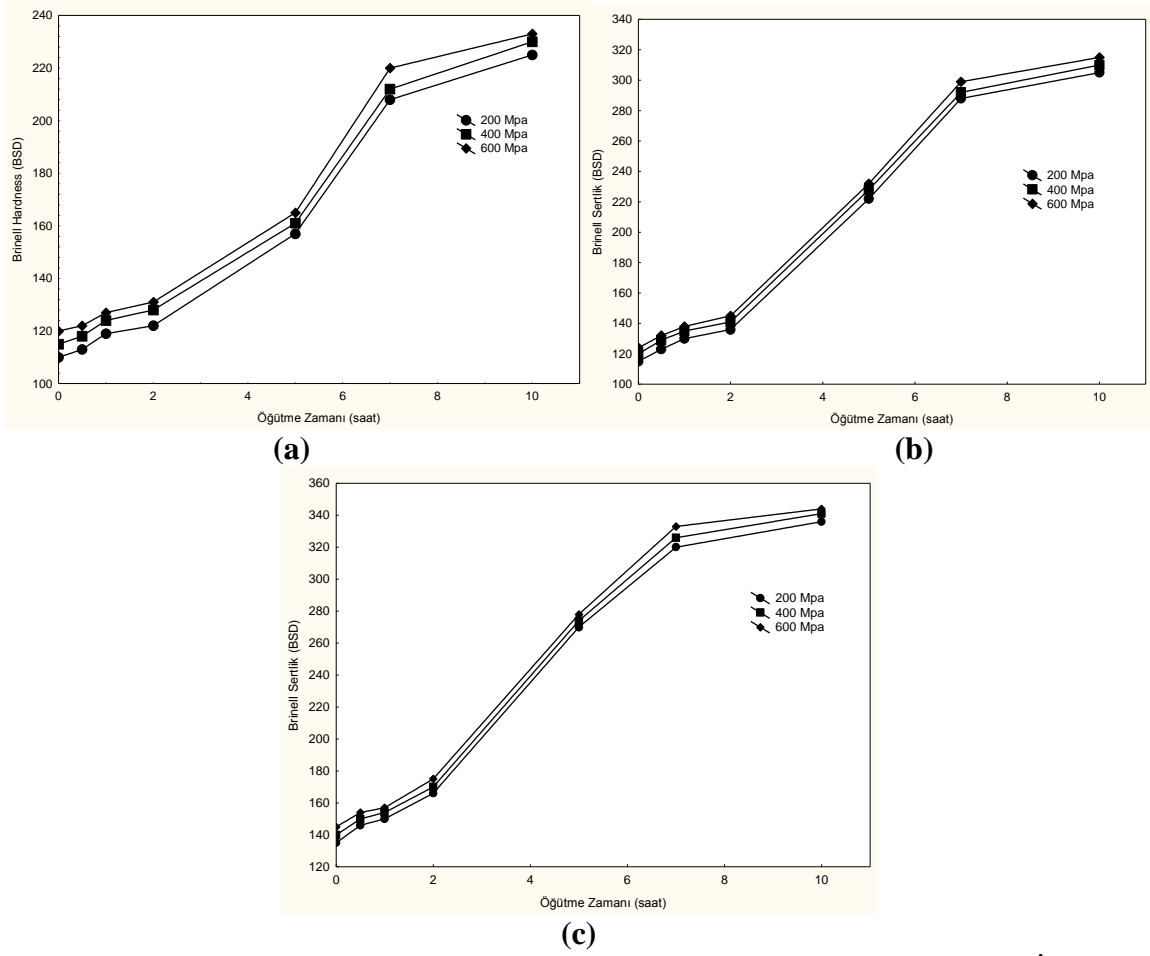


Şekil. 3.71. Sıkıştırma basıncı ile yoğunluk değerlerinin değişimi, (a) Al2024-%5İ, (b) Al2024-%10İ, (c) Al2024-%20İ

3.2.7.2. Sertlik

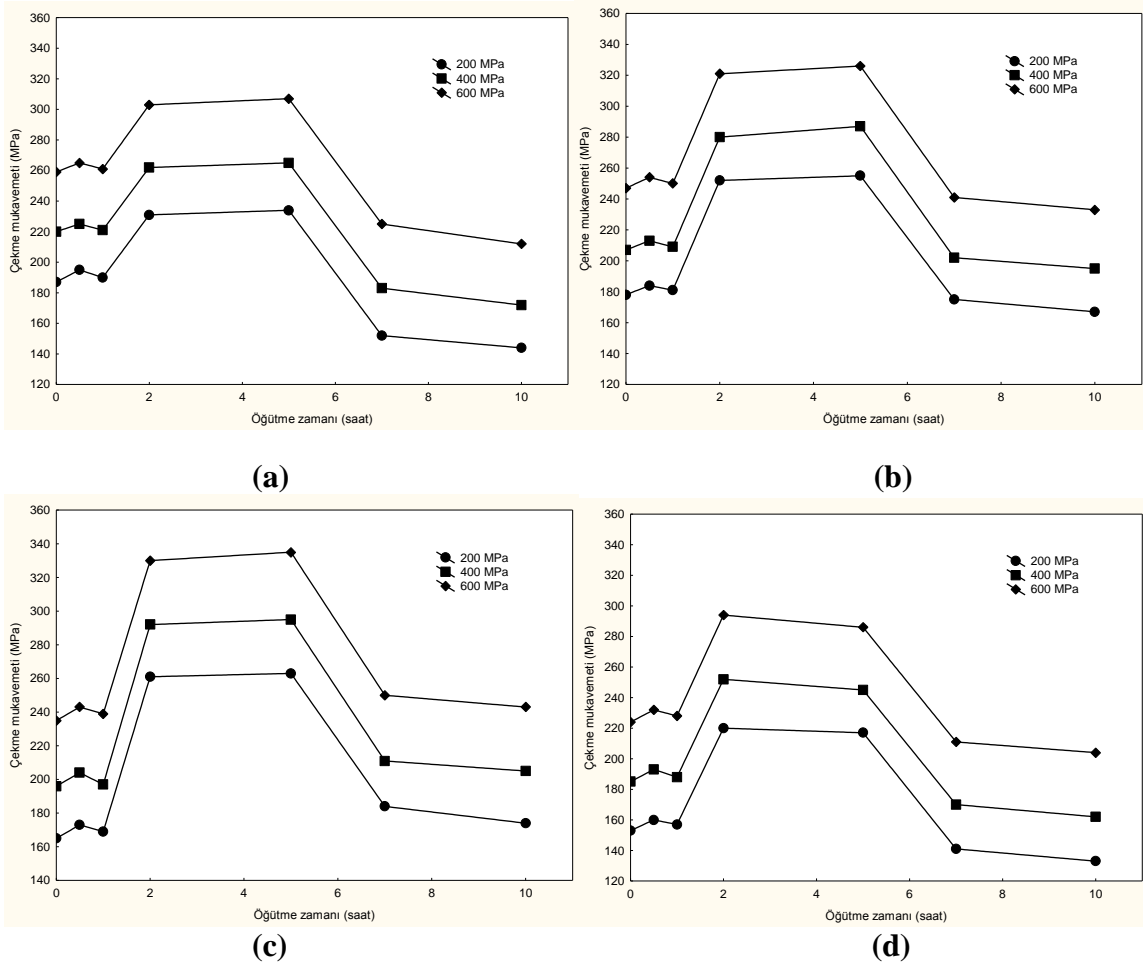


Şekil. 3.72. Sıkıştırma basıncı ile sertlik değerlerinin değişimi, (a) Al 2024, (b) Al2024-%5K, (c) Al2024-%10K, (d) Al2024-%20K

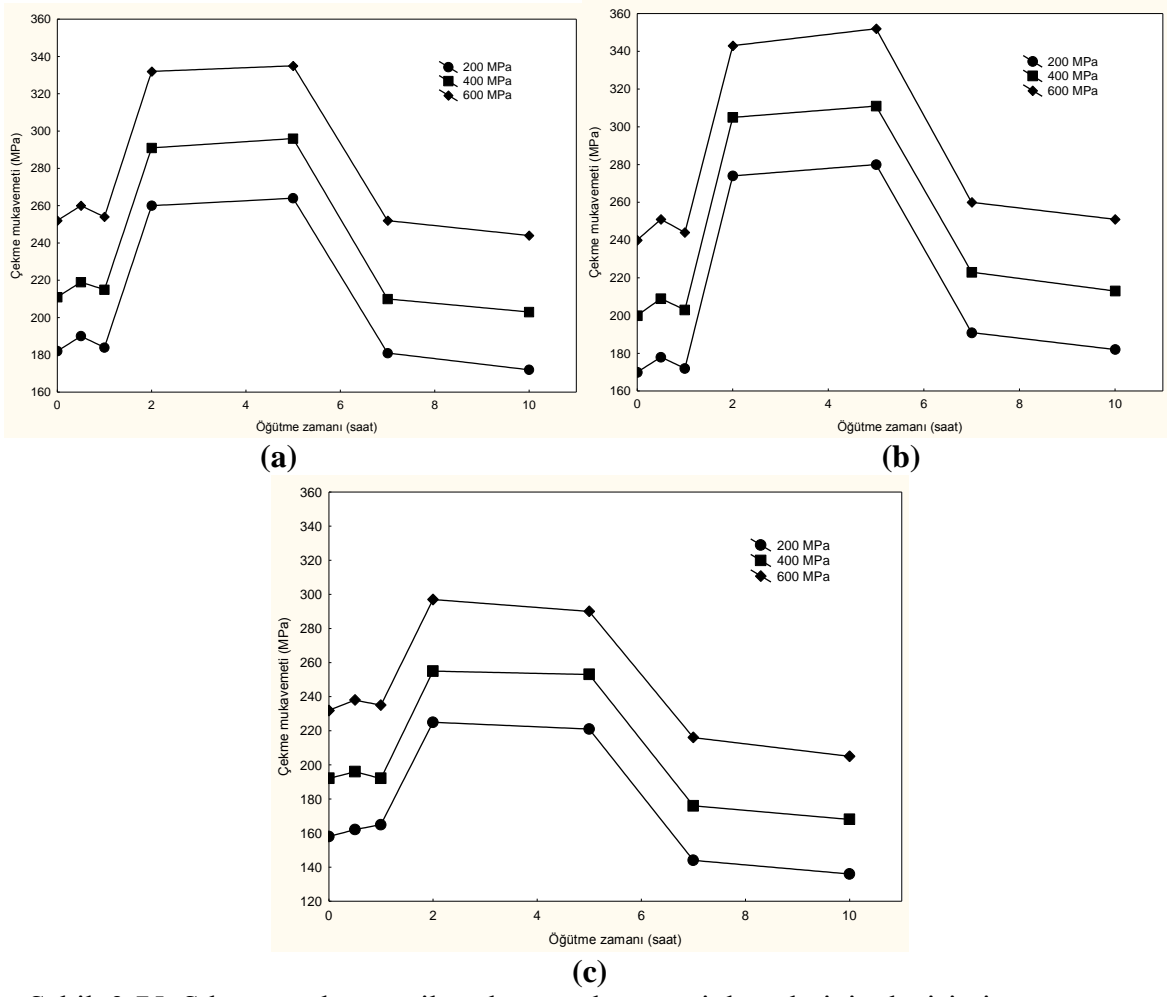


Şekil. 3.73. Sıkıştırma basıncı ile sertlik değerlerinin değişimi, (a) Al2024-%5İ, (b) Al2024-%10İ, (c) Al2024-%20İ

3.2.7.3. Çekme Mukavemeti



Şekil. 3.74. Sıkıştırma basıncı ile çekme mukavemeti değerlerinin değişimi, (a) Al 2024, (b) Al2024-%5K, (c) Al2024-%10K, (d) Al2024-%20K



Şekil. 3.75. Sıkıştırma basıncı ile çekme mukavemeti değerlerinin değişimi
a) Al2024-%5İ, (c) Al2024-%10İ, (d) Al2024-%20

4.İRDELEME

Morfolojik incelemeler sonucunda elde edilen toz morfolojileri mekanik alaşımlama sistemindeki sünek-gevrek bileşimin karaktersitikleri ile aynıdır (Şekil 3.2 ve Şekil 3.3). Öğütmenin ilk saatlerinde ulaşılan pulsu yapıyı daha sonra soğuk kaynak ve kırılma mekanizmaları takip etmiş ve 7 saatlik öğütme sonunda hemen hemen kararlı hale ulaşılmıştır (Şekil 3.5 ve Şekil 3.7) [8-10]. Takviye parçacıklarının morfolojik değişime etkisi gömülme ve kırılma işlemlerini etkilemesi şeklinde olmuştur. Sert takviye parçacıklarının sünek matris tozlarına gömülmesi yâda gömülmemesi kırılma işlemini etkilemektedir. Dolayısıyla sert parçacık sayısı ne kadar fazla olursa mekanik alaşımlama işlemi o oranda hızlanmakta ve kararlı hal şartlarına daha erken ulaşılmaktadır. Sert parçacıkların bir nevi kırıcı etkisi oluşturması bu oluşumda temel etkendir [14, 27, 29]. Yapılan çalışma sonucunda sert parçacıkların iki türlü kırılma olayına sebep olduğu görülmüştür. Birincisi büyük boyutlu takviye parçacıklarının kırıcı bilyeler gibi davranarak matris tozlarını aralarına alıp (bilye-toz-bilye etkileşimi gibi takviye-matris-takviye etkileşimi) kırılma olayında aktif görev almaları ikincisi ise takviye parçacıklarının matris tozları içersine gömülerek bilye-toz-bilye çarpışmalarında matris tozuna gelen çarpma enerjisi ile matris tozunu kırmaya çalışması. Elde edilen toz boyutu verilerinden bu iki tip mekanizmadan birincisinin daha etkin olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 3.22 ve Şekil 3.23). Birinci gurup takviye parçacıklarının ortalama boyutu 49µm ikinci grup takviye parçacıklarının ortalama boyutu ise 5 µm olarak seçilmişti. Görüldüğü gibi parçacık boyutları arasındaki fark hemen hemen 10 katdır. Bununla birlikte elde edilen toz boyutu arasındaki fark ise çok azdır ve 10 saatlik öğütme işlemi sonucunda elde edilen toz boyutu değerleri hemen hemen aynıdır. Artan takviye parçacıklarının oranıda toz boyutunu etkileyen diğer bir faktördür. Hem başlangıç boyutlarının küçük olması hem de kırılma etkinliği artırması artan takviye oranının olumlu yönleridir.

Toz sertlikleri incelendiğinde ince takviye boyutuna sahip kompozitlerde elde edilen toz sertliklerinin daha yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 3.24 ve Şekil 3.25). Bunun sebebi ince takviye parçacıklarının gömülme kabiliyetinin kaba takviye parçacıklarına göre çok daha iyi olmasıdır. Takviye parçacıklarının matris tozları içersine gömülmesi aynı alana düşen parçacık sayısını artırdığından toz sertliğini artırmıştır. Kaba parçacıkların toz boyutunda oluşturduğu olumlu etki toz sertliğinde olumsuz etki olarak karşımıza çıkmaktadır. Matris tozlarının kaba takviye parçacıklarını sarmaması sonucu özellikle

öğütmenin başlangıç saatlerinde oldukça düşük toz sertliklerinin elde edilmesine neden olmuştur. Bununla birlikte ilerleyen öğütme saatlerinde takviye parçacıklarının kırılması ile artan gömülme kabiliyeti toz sertliklerini yükseltmiştir.

Kompozit morfolojileri sonucunda alınan SEM görüntülerinde takviye parçacıklarının hem matris içersindeki dağılımı hemde boyut dağılımları net bir şekilde görülmektedir (Şekil 3.36). Artan öğütme süresi ile takviye parçacıkları matris içersinde homojen bir şekilde dağılmakta, topaklanmalar ortadan kaldırılmakta ve takviye parçacıkları arasındaki mesafede azalmaktadır (Şekil 3.39) [30, 45, 64]. Geleneksel toz metalurjisi yöntemi ile ortadan kaldırılamayan topaklanma sorunu şekillerdende görüldüğü gibi mekanik alaşımlama yöntemi ile ortadan kaldırılmıştır. Kaba ve ince takviye parçacıkları ile oluşturulan kompozitler arasında morfolojik açıdan temel fark topaklanmadır. Kaba takviye parçacıklarının gömülme kabiliyetinin düşük ve aynı takviye oranına göre sayılarının daha az olmasından dolayı topaklanma eğilimi azdır (Şekil 3.35). Buna karşılık ince takviye parçacıklı kompozitlerde matris parçacıklarının sınırlarında yoğunlaşan takviye parçacıklarının topaklanma eğilimi oldukça fazladır (Şekil 3.38). Artan takviye oranı her iki grup kompozit içinde topaklanma eğilimini artırmıştır.

Kompozit yoğunlukları incelendiğinde topaklanma eğilimi daha fazla olan ince takviye parçacıklı kompozitlerin yoğunluk değerlerinin daha düşük olduğu görülmüştür (Şekil 3.43, Şekil 3.55 ve Şekil 3.67). Tane sınırlarında biriken takviye partikülleri tozların yoğunlaştırılmasını etkilediğinden porozite değerlerini artırarak yoğunluğun düşmesine neden olmuştur (Şekil 3.61). Ayrıca artan takviye oranı her iki grup kompozit içinde yoğunluk değerlerinin düşmesine neden olmuştur [30, 33]. Artan sert parçacıklarının kompozit tozların sıkıştırılmasındaki olumsuz etkisi bunun sebebidir. Yoğunluk değerlerine karşılık azalan takviye boyutu ve artan takviye oranı ile sertlik değerleri artmıştır (Şekil 3.41 ve Şekil 3.44). Aynı alana düşen parçacık sayısının daha fazla olması ve öğütme sonucu oluşan deformasyon sertleşmesi sertlik artışının temel nedenleridir.

Çekme mukavemeti değerleri incelendiğinde ağırlıkça %10 parçacık takviye oranına kadar artan takviye boyutu ile çekme mukavemeti değerlerinin arttığı % 20 parçacık oranında ise porozite değerlerinin artışı nedeniyle çekme mukavemeti değerlerini düşüğü gözlemlenmiştir (Şekil 3.42 ve Şekil 3.45). Ayrıca ince boyutuna sahip kompozitlerde çekme mukavemetleri daha da düşmüştür (Şekil 3.54 ve Şekil 3.57). Aşırı topaklanma eğilimi ve artan parçacık sayısı sonucu porozite değerlerinin artması bu azalmanın sebebidir.

Sıkıştırma basıncındaki artış porozite değerlerini azalttığından bütün fiziksel ve mekaniksel özellikleri olumlu şekilde artırmıştır (Şekil 3.70, Şekil 3.71, Şekil 3.72, Şekil 3.73, Şekil 3.74, Şekil 3.75). Sıkıştırma yöntemi olarak seçilen sıcak presleme yöntemi ile elde edilen en yüksek bağıl yoğunluk değerleri % 99 değerine yaklaşmıştır. Geleneksel sıkıştırma ve presleme yöntemi ile toz metalurjisi ürünlerde bu değerlere çıkmak oldukça zordur [43, 60]. Sıcak preslemenin sağladığı bu avantaj çekme mukavemeti değerlerini olumlu yönde etkilemiştir.

5. SONUÇLAR

Yapılan deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bulguların değerlendirilmesinden çıkarılan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1-Morfolojik incelemeler sonucunda sünek-gevrek (Al2024-B₄C) bileşimde 0.5-1 saat aralığında soğuk kaynak, 1-5 saat aralığında kırılma, 5-7 saat aralığında kırılma-soğuk kaynak, 7-10 saat kararlı hal aşamalarına ulaşılmıştır.

2-İnce takviye parçacıklarının matris tozları içersine gömülme kabiliyeti daha iyidir.

3-Al2024 alaşımı ve kompozit tozlarda 10 saatlik mekanik alaşımlama işlemi sonunda kararlı toz boyutuna ulaşılmıştır. Elde edilen en düşük toz boyutu değeri 7 µm dir. Artan öğütme süresi, artan takviye oranı ve azalan takviye boyutu ile toz boyutu değerleri azalmıştır.

4-Kaba takviye parçacıklarının sünek matris tozlarını kırma etkinliği fazladır.

5-İnce takviye parçacıklarının sünek matris içersine gömülmesi matris tozlarını parçalama yeteneğini azaltmıştır.

6-Toz sertlikleri artan öğütme zamanı azalan partikül boyutu ve artan takviye oranı ile artmıştır. İnce takviye parçacıklarının matris içersine gömülme kabiliyeti nedeniyle toz sertlikleri daha yüksektir.

7-Üretilen tozların faz karakterizasyonu sonucu yeni bir fazın oluşmadığı görülmüştür.

8-Artan öğütme süresi ile artan deformasyon XRD piklerinde genişlemeye sebep olmuştur.

9-Takviye parçacıklarının matris içersindeki dağılımı artan öğütme zamanı ile iyileşmiş ve bütün grup numunelerde homojen dağılıma ulaşılmıştır.

10-Yoğunluk değerleri artan öğütme süresi, artan takviye oranı ve azalan takviye boyutu ile azalmıştır. Artan öğütme süresi ile homojen partikül dağılımı sağlanmasına rağmen artan deformasyon sertleşmesi tozların sıkıştırılabilme kabiliyetinin azalması yoğunluk değerlerini bir miktar azaltmıştır. Üretilen bütün malzemelerde ulaşılan en yüksek bağıl yoğunluk değeri % 98.79 en düşük yoğunluk değeri ise % 86.92 dir.

11-Sıcak presleme yöntemi ile elde edilen yoğunluk değerleri geleneksel yöntemle ulaşamayacak kadar yüksektir.

12-Kompozit sertlikleri artan öğütme süresi, artan takviye oranı ve azalan takviye boyutu ile artmıştır.

13-Çekme mukavemeti değerleri 5 saatlik mekanik alaşımlama süresi sonuna kadar artma eğilimi daha sonra ise azalma eğilimi göstermiştir. Üretilen kompozitlerde en yüksek çekme mukavemeti 352 MPa olarak bulunmuştur.

14-Artan sıkıştırma basıncı kompozit malzemelerin fiziksel ve mekaniksel özelliklerini iyileştirmiştir.

15-Mekanik alaşımlama yöntemi homojen partikül dağılımını sağlarken sıcak presleme yöntemide yoğunluk değerlerini teorik değerlere yaklaştırarak geleneksel toz metalurjisi yönteminin dezavantajlarını ortadan kaldırmıştır.

6. ÖNERİLER

1-Nano boyutlu matris ve takviye parçacıklarının kullanımı veya üretimi ile kompozitlerin fiziksel ve mekaniksel özellikleri iyileştirilebilir.

2-Sıcak presleme koşullarının iyileştirilmesi üretilen kompozit özelliklerini iyileştirebilir. Sabit basınç ve sabit sıcaklık koşulları tam olarak sağlandığında bu çalışmada kullanılan sıkıştırma basıncı değerlerinden çok daha düşük değerlerde daha iyi sonuçlara ulaşılabilir.

3-Al2O3 alaşımının yaşlandırılabilme özelliğinden yararlanılarak kompozit özellikleri iyileştirilebilir.

4-Soğuk ve/veya sıcak plastik deformasyon yöntemleri ile porozite miktarları daha da düşürülerek üretilen kompozitlerin fiziksel ve mekaniksel özellikleri iyileştirilebilir.

7. KAYNAKLAR

1. Muscat, D., Titanium carbide/Aluminum composites by melt infiltrasyon, Ph. D. Thesis, McGill University, Montreal, 1993.
2. Özgün, E.C., Mekanik Alaşım Yöntemiyle Sentezlenen Al-TiC ve Al-Ti-C Toz ve Sinter Kompozitlerin Mikroyapısal ve Fiziksel Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
3. Sabau, E., Contributions Regarding the Mechanical Behavior of Composite Structures with Polymeric Matrix, Ph. D. Thesis, Technical University of Cluj-Napoca, Cluj, 2009.
4. Aktaş, H., Alüminyum Matrisli Al₂O₃ Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Alaşım Yöntemiyle Üretimi ve Kuru Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
5. Zaid, N.T., Damage Mechanics of Composite Materials using Fabric Tensors, Master Thesis, Applied Science University, Amman, 2005.
6. Rabiei, A., Vendra, L. ve Kishi, T., Fracture behavior of particle reinforced metal matrix composites, Composites: Part A, 39 (2008) 294–300.
7. Saberi, Y., Zebarjad, S.M. ve Akbari, G.H., On the role of nano-size SiC on lattice strain and grain size of Al/SiC nanocomposite, Journal of Alloys and Compounds, 484 (2009) 637–640.
8. Çanakçı, A. ve Varol, T., Aşamalı İşlem Kontrol Katkısı Tekniğinin Yüksek Enerjili Öğütme İşlemi Üzerine Etkisi, 1. Ulusal Nanoteknoloji Kongresi, Haziran 2011, İstanbul Bildiriler Kitabı, 8-16.
9. Suryanarayana, C., Mechanical Alloying and Milling, Marcel Dekker Press, New York, 2004.
10. Fuentes, J.J., Rodrigue, J.A. ve Herrera, E.J., Processing of mechanically alloyed aluminum powder: A metallographic study, Materials Characterization, 61 (2010) 386 - 395.
11. Bolokang, S., Banganayi, C. And Phasha, M., Effect of C and milling parameters on the synthesis of WC powders by mechanical alloying, Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 28, (2010) 211–216.
12. Smith, W.F., Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Çeviri Kınıkoğlu, N.G., 3. Baskı, Literatür Yayıncılık, İstanbul, 2001.
13. Askeland, D.R., The Science and Engineering of Materials, Çeviri Dr. Erdoğan, M., 1.Cilt, 3.Baskı, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 1998.
14. Rahimiana, M., Parvin, N. ve Ehsania N., Investigation of particle size and amount of alumina on microstructure and mechanical properties of Al matrix composite made by powder metallurgy, Materials Science and Engineering A, 527 (2010) 1031–1038.

15. Mertgenç E., Savurmalı Döküm Yöntemiyle Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretimini Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2004.
16. Çanakçı A., AA2024 matrisli B₄C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Vortex Yöntemiyle Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2006.
17. Hull, D., Clym, T.W., An Introduction to Composites Materials, Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1996.
18. Tekmen Ç., Metal Matrisli Kompozitlerin Sıkıştırılmalı Döküm Yöntemi ile Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2006.
19. Frage N., Froumin N., Aizenshtein M., Kutsenko L., Fuks D. ve Dariel M.P., Reactive wetting in titanium carbide/non-reactive metal systems, Current Opinion in Solid State and Materials Science, 9 (2005) 189–195.
20. Ma, G.F., Zhang, H.F., Li, H. ve Hu, Z.Q., Wetting behavior of CuZr-based BMGs/alumina system, Journal of Alloys and Compounds, 462 (2008) 343–346.
21. Liu, G.W., Muolo, M.L., Valenza, F. ve Passerone, A., Survey on wetting of SiC by molten metals, Ceramics International, 36 (2010) 1177–1188.
22. Sangghaleh, A. ve Halali, M., Effect of magnesium addition on the wetting of alumina by aluminium, Applied Surface Science, 255 (2009) 8202–8206.
23. Wynblatt, P., The Effects of Interfacial Segregation on wetting in Solid metal-on-metal and metal-on-Ceramics Systems, Acta mater., 48 (2000) 4439–4447.
24. Zhang X.P., Ye L., Mai Y.W., Quan G.F. ve Wei W., Investigation on diffusion bonding characteristics of SiC particulate reinforced aluminium metal matrix composites (Al/SiC_p-MMC), Composites: Part A, 30 (1999) 1415-1421.
25. Eker, A.A., Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler ve Üretimi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü Ders Notları, İstanbul, 2008.
26. Toptan, F., Alüminyum Matrisli B₄C takviyeli kompozitlerin döküm yöntemi ile üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
27. Ying, D.Y. ve Zhang, D.L., Processing of Cu-Al₂O₃ metal matrix nanocomposite materials by using high energy ball milling, Materials Science and Engineering A, 286 (2000) 152-156.
28. Zahid, G.H., Azhar, T., Musaddiq, M., Rizvi, S.S., Ashraf, M., Hussain, N. ve Iqbal, M., In situ Processing and aging behaviour of an aluminium/Al₂O₃ composite, Materials and Design, 32 (2011) 1630-1635.
29. Anvari, S.Z., Karimzadeh, F. ve Enayati, M.H., Synthesis and Characterization of NiAl-Al₂O₃ nanocomposite powder by mechanical alloying, Journal of Alloy and Compounds, 477 (2009) 178-181.

30. Canakci, A., Varol, T. ve Ertok, Ş., The Effect of Reinforcement Ratio on Hardness of Al-Al₂O₃ Composites Fabricated by Mechanical Alloying Technique, 6th International Powder Metallurgy Conference & Exhibition, Ankara 2011, Bildirile Kitabı, 232-240.
31. Gan, K. ve Gu, M., The compressibility of Cu/SiC_p powder prepared by high-energy ball milling, Journal of Materials Processing Technology, 199 (2008) 173–177.
32. Mousavi Abarghouie, S.M.R. ve Seyed Reihani, S.M., Aging behavior of a 2024 Al alloy-SiC_p composite, Materials and Design, 31 (2010) 2368-2374.
33. Kumdalı F., Alüminyum matrisli B₄C takviyeli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemi ile üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
34. Hashim, J., Looney, L. ve Hashmi, M.S.J., Metal Matrix Composites: production by stir casting method, Journal of Materials Processing Technology, 92-93 (1999) 1-7.
35. Bilici, İ., Ti-Fe Alaşımlarından Basınçsız İnfiltrasyon Yöntemiyle Seramik Metalik Kompozit Malzeme Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2005.
36. Candan E., Effect of alloying additions on the porosity of SiC_p preforms infiltrated by aluminum, Materials Letters, 60 (2006) 1204-1208.
37. Xing, C., Chengxiao, Y., Leding, G. ve Biao, Y., TiB₂/Al₂O₃ ceramic particle reinforced aluminum fabricated by spray deposition, Materials Science and Engineering: A, 496 (2008) 52-58.
38. Manchang G., Jianmin H. ve Peiyong L., Fabrication and Characterization of Cast Magnesium Matrix Composites by Vacuum Stirr Casting Process, Journal of Material Science, 12 (2003) 128-134.
39. Gündüz, O., Ark fiziksel buhar biriktirme yöntemiyle ZrN kaplamaların farklı bias voltajlarında üretimi ve karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2004.
40. Soydan, F.A., Ark-FBB Yöntemiyle Üretilen Ultra-Sert Nanokompozit TiAlSiN Filmlerin Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
41. Abbasipour, B., Niroumand B. and Monir Vaghefi, S.M., Compocasting of A356-CNT composite, Trans Nonferrous Met. Soc. China, 20 (2010) 1561-1566.
42. Sasaki, G., Yoshida, M., Fuyama, N. ve Fujii, T., Modeling of Compocasting process and fabrication of AZ91D Magnezyum Alloy Matrix composites, Journal of Materials Processing Technology, 130-131 (2002) 151-155.
43. Dikici, B., Bedir, F. ve Gavgalı, M., Al-TiC In-situ Nano Kompozitlerin Sıcak Presleme Yöntemiyle Üretilmesi, 5.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Mayıs 2009, Karabük, Bildiriler Kitabı, 13-15.

44. Özçelik, Ö., In-situ Alumina Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
45. Arık H., Production and Characterization of in situ Al₄C₃ reinforced aluminum-based composite produced by mechanical alloying, Materials and Design, 25 (2004) 31-40.
46. Hongming W., Guirong L., Yutao Z. ve Gang C., In Situ fabrication and microstructure of Al₂O₃ particles reinforced aluminum matrix composites, Materials Science and Engineering A, 527 (2010) 2881-2885.
47. Maleki, A., Shafyei, A. ve Niroumand, B., Effects of squeeze casting parameters on the microstructure of LM13 alloy, Journal of Materials Processing Technology, 209 (2009) 3790-3797.
48. Kılıç, C., Sıkıştırma Döküm Yöntemi ile Üretilmiş ve Soğuk haddelenmiş AlMg₃/SiC_p Kompozitinin Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 2008.
49. Kumral, C., Sıkıştırma Döküm İle Üretilmiş Al₂O₃ Takviyeli AA6110 Kompozit Malzemesinin Mekanik Özellikleri ve Isıl İşlem Davranışlarının Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 2007.
50. Goh, C.S., Soh, K.S., Oon, P.H. ve Chua, B.W., Effect of squeeze casting parameters on the mechanical properties of AZ91-Ca Mg alloys, Materials and Design, 31 (2010) 50-53.
51. Ghomashchi, M.R. ve Vikhrov, A., Squeeze Casting: an overview, Journal of Materials Processing Technology, 101 (2000) 1-9.
52. Muratoğlu M., Yılmaz O. Ve Aksoy M., Investigation on diffusion bonding characteristics of aluminum metal matrix composites (Al-SiC_p) with pure aluminum for different heat treatments, Journal of Materials Processing Technology, 178 (2006) 211-217.
53. Ekerer, F.A., Alumina-SiC Parçacık Destekli T/M Al- Matrisli Kompozitlerin Üretilmesi Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2007.
54. Torralba, J.M., Costa, C.E. ve Velasco, F., P/M aluminum matrix composites: an overview, Journal of Materials Processing Technology, 133 (2003) 203–206.
55. Söyler, A.U., Mekanik Alaşımlama Yöntemleri İle Üretilmiş Al-Fe Tabanlı Sic Ve Y₂O₃ Pekiştiricili Kompozitlerin Geliştirilmesi Ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
56. Başaran, A., Toz Metal Parçalara Isıl Ve Mekanik Yüzey İşlemlerin Birlikte Uygulanabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2007.

57. Kurt, A.O., Toz Üretim Yöntemleri ve Sinterleme, Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Ders Notları.
58. Hafizpour, H.R., Simchi, A. ve Parvizi, S., Advanced Powder Technology, 21 (2010) 273–278.
59. Randall, M.G., Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşleme, Çeviri Süleyman Sarıtaş, Mehmet Türker ve Nuri Durlu, Toz Metalurjisi Derneği Yayınları, Ankara, 2007.
60. Ergün, N., Bor Karbür-Silisyum Karbür Kompozitlerinin Reaktif Sıcak Presleme ile Üretilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
61. Rahimian, M., Ehsani, N., Parvin, Nader. ve Baharvandi, H.R., The effect of particle size, sintering temperature and sintering time on the properties of Al–Al₂O₃ composites, made by powder metallurgy, Journal of Materials Processing Technology, 209 (2009) 5387–5393.
62. Xueran L., Yongbing L., Xu R., Jian A. ve Zhanyi C., Fabrication of supersaturated solid solution of carbon in copper by mechanical alloying, Materials Characterization, 58 (2007) 504-508.
63. Saberi, Y., Zebarjad, S.M. ve Akbari, G.H., On the role of nano-size SiC on lattice strain and grain size of Al/SiC nanocomposite, Journal of Alloys and Compounds, 484 (2009) 637–640.
64. Krakhmalev, P.V., Preparation of Mo(Si,Al)₂–ZrO₂ nanocomposite powders by mechanical alloying, International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 22 (2004) 205–209.
65. Ward T.S., Chen W., Schoenitz, M., Dave, R.N. ve Dreizin, E.L., A study of mechanical alloying processes using reactive milling and discrete element modeling, Acta Materialia, 53 (2005) 2909–2918.
66. Canakci, A. ve Varol, T., The Effect of Gradual Process Control Agent Technique on the Morphology of Al Powders Fabricated by High Energy Ball Milling, 6th International Powder Metallurgy Conference & Exhibition, Ankara 2011, Bildiriler Kitabı, 701-710.
67. Kubaski, E.T., Cintho, O.M. ve Capocchi, J.D.T., Effect of milling variables on the synthesis of NiAl intermetallic compound by mechanical alloying, Powder Technology, 214 (2011) 77–82.
68. Farahbakhsh, I., Zakeri, A., Manikandan, P. Ve Hokamoto, K., Evaluation of Coating Layers Formed on Ni Ball during Mechanical Alloying of Cu Powder, Applied Surface Science, 257 (2011), 2830–2837.

69. Romankov, S., Sha, W., Kaloshkin, S.D. ve Kaevitser, K., Fabrication of Ti–Al coatings by mechanical alloying method, Surface & Coatings Technology, 201 (2006) 3235–3245.
70. Bostan, B., Mekanik Alaşım ve Ekstrüzyon Sonrası Al₄C₃ Oluşumunun İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 23 (2008) 343-348.
71. Karabulut H., ve Çıtak, R., Al Matrisli ve SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Farklı Mekanik Alaşım Sürelerinde Üretilmesi ve Karakterize Edilmesi, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ 2011, Bildiriler Kitabı, 16-18.
72. Kaya, H., Spex Tip Mekanik Alaşım Cihazının Tasarımı, İmalatı Ve Öğütme Kabiliyetinin İncelenmesi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük 2009, Bildiriler Kitabı, 13-15.
73. Bostan, B., Alüminyum-Carbon Tozlarından Mekanik Alaşım ve Sonrası İşlemlerle Al₄C₃ Sentezlenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2003.
74. Bhattacharya P., Bellon, P., Averbach, R.S. ve Hales, S.J., Nanocrystalline TiAl powders synthesized by high-energy ball milling: effects of milling parameters on yield and contamination, Journal of Alloys and Compounds, 368 (2004) 187–196.
75. Asgharzadeh, H., Simchi, A. ve Kim, H.S., In situ synthesis of nanocrystalline Al6063 matrix nanocomposite powder via reactive mechanical alloying, Materials Science and Engineering A, 527 (2010) 4897–4905.
76. Arami, H. ve Simchi, A., Reactive milling synthesis of nanocrystalline Al–Cu/Al₂O₃ nanocomposite, Materials Science and Engineering A, 464 (2007) 225–232.
77. Çanakçı, A., Varol, T., AA2024-B₄C_p Metal Matrisli Kompozitlerin Mekanik Alaşım Yöntemi ile Üretimi ve Mikroyapısı, 1. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, İzmir 2011, Bildiriler Kitabı, 204-215.
78. Adamiak, M., Mechanical alloying for fabrication of aluminium matrix composite powders with Ti-Al intermetallics reinforcement , Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 31 (2008) 191-196.
79. Suryanarayana, C., Mechanical Alloying and Milling, Progress in Materials Science, 46 (2001) 1-184.
80. Güler, Ö., Oksit Takviyel Bakır Kompozitin Mekanik Alaşım Yöntemi İle Üretilmesi ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2006.
81. Fogagnolo, J.B., Velasco, F, Robert, M.H. ve Torralba, J.M., Effect of mechanical alloying on the morphology, microstructure and properties of aluminium matrix composite powders, Materials Science and Engineering A, 342 (2003) 131-143.

82. Canakci, A., Varol, T. ve Nazik, C., The Effect of amount of Methanol on the Properties of Al-Al₂O₃ Composite Powders, 6th International Powder Metallurgy Conference & Exhibition, Ankara 2011, Bildiriler Kitabı, 122-129.
83. Cebeci, H.A., Mekanik Alaşım Yöntemi İle Üretilen SiC Takviyeli Alüminyum Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Bilim Uzmanlığı Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2008.
84. Ertok Ş. Alüminyum Matrisli Al₂O₃ Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Alaşım Yöntemi ile Üretimi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2011.
85. Canakci, A., Varol, T., Şen, R., Yıldız, S., The Effect of milling speed on the Particle Morphology and Particle Size of Al 2024 Powders Prepared by Using High Energy Ball Milling, 6th International Powder Metallurgy Conference & Exhibition, Ankara 2011, Bildiriler Kitabı, 628-633.
86. Ayas, E., Al₂O₃-TiC/TiCN Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2003.
87. Onat, A., Akbulut H. ve Yılmaz, F., Production and characterisation of silicon carbide particulate reinforced aluminium–copper alloy matrix composites by direct squeeze casting method, Journal of Alloys and Compounds, 436 (2007) 375–382.
88. Scudino, S., Liu, G., Prashanth, K.G., Bartusch, B., Surreddi, K.B., Murty B.S. ve Eckert, J., Mechanical properties of Al-based metal matrix composites reinforced with Zr-based glassy particles produced by powder metallurgy, Acta Materialia, 57 (2009) 2029–2039.
89. Kumar S., ve Balasubramanian V., Developing a mathematical model to evaluate wear rate of AA7075/SiCp powder metallurgy composites, Wear, 264 (2008) 1026–1034.
90. Rahimian, M., Parvin, N. ve Ehsani, N., The effect of production parameters on microstructure and wear resistance of powder metallurgy Al–Al₂O₃ composite, Materials and Design, 32 (2011) 1031–1038.
91. Liu, Z.Y., Wang, Q.Z., Xiao, B.L., Ma, Z.Y. ve Liu, Y., Experimental and modeling investigation on SiCp distribution in powder metallurgy processed SiCp/2024 Al composites, Materials Science and Engineering A, 527 (2010) 5582–5591.
92. Rajan, T.P.D., Pillai, R.M., Pai, B.C., Satyanarayana, K.G. ve Rohatgi, P.K., Fabrication and characterisation of Al–7Si–0.35Mg/fly ash metal matrix composites processed by different stir casting routes, Composites Science and Technology, 67 (2007) 3369–3377.
93. Lira, C.S. ve Clegg A.J., The production and evaluation of metal-matrix composite castings produced by a pressure-assisted investment casting process, Journal of Materials Processing Technology, 67 (1997) 13-18.
94. Kambakas, K. Ve Tsakirooulos, P., Sedimentation casting of wear resistant metal matrix composites, Materials Science and Engineering A, 435–436 (2006) 187–192.

95. Zhou, W. ve Xu, Z.M., Casting of SiC Reinforced Metal Matrix Composites, Journal of Materials Processing Technology, 63 (1997) 358-363.
96. Kaczmar, J.W., Pietrzak, K. ve Wlosinski, W., The production and application of metal matrix composite materials, Journal of Materials Processing Technology, 106 (2000) 58-67.
97. Corrochano, J., Lieblich, M. ve Ibáñez, J., The effect of ball milling on the microstructure of powder metallurgy aluminium matrix composites reinforced with MoSi₂ intermetallic particles, Composites: Part A, 42 (2011) 1093–1099.
98. Eslamian, M., Rak, J. ve Ashgriz, N., Preparation of aluminum/silicon carbide metal matrix composites using centrifugal atomization, Powder Technology, 184 (2008) 11–20.
99. Lin, Y.C., Li, H.C., Liou, S.S. ve Shie, M.T., Mechanism of plastic deformation of powder metallurgy metal matrix composites of Cu–Sn/SiC and 6061/SiC under compressive stress, Materials Science and Engineering A, 373 (2004) 363–369.
100. Frary, M., Abkowitz, S., Abkowitz, S.M. ve Dunand, D.C., Microstructure and mechanical properties of Ti/W and Ti/6Al/4V/W composites fabricated by powder-metallurgy, Materials Science and Engineering A, 344 (2003) 103-112.
101. Wang, H., Zhang, R., Hu, X., Wang, C.A., Huang, Y., Characterization of a powder metallurgy SiC/Cu–Al composite, Journal of Materials Processing Technology, 197 (2008) 43–48.
102. Hashim, J., Looney, L., Hashmi, M.S.J., Particle distribution in cast metal matrix composites-Part I, Journal of Materials Processing Technology, 123 (2002) 251–257.
103. Xeu H.S, Zou M.H. ve Liu C.M., Microstructural characteristics and properties in centrifugal casting of SiCp/Zl104 composite, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 19 (2009) 1410-1415.
104. Aldasa, K. ve Mat, M.D., Experimental and theoretical analysis of particle distribution in particulate metal matrix composites, Journal of Materials Processing Technology, 160 (2005) 289–295.
105. Gopalakrishnan, S. ve Murugan, N., Production and wear characterisation of AA 6061 matrix titanium carbide particulate reinforced composite by enhanced stir casting method, Composites: Part B, 43 (2012) 302–308.
106. Vincent, C., Silvain, J.F., Heintz, J.M. ve Chandra, N., Effect of porosity on the thermal conductivity of copper processed by powder metallurgy, Journal of Physics and Chemistry of Solids, 73 (2012) 499–504.
107. Islam, M.A. ve Farhat, Z.N., The influence of porosity and hot isostatic pressing treatment on wear characteristics of cast and P/M aluminum alloys, Wear, 271 (2011) 1594– 1601.
108. Abdizadeh, H., Ashuri, M., Moghadam, P.T., Nouribahadory, A., Baharvandi, H.R., Improvement in physical and mechanical properties of aluminum/zircon composites

- fabricated by powder metallurgy method, Materials and Design, 32 (2011) 4417–4423.
109. Canakçı, A., Varol, T., Zerin, İ.G. ve Özkaya, S., Production Al-B₄C Functionally Graded Material by Powder Metallurgy Method, 6th International Powder Metallurgy Conference&Exhibition, Ankara 2011, Bildiriler Kitabı, 49-56.
 110. Abbaszadeh, H., Masoudi, A., Safabinesh, H. ve Takestani, M., Investigation on the characteristics of micro- and nano-structured W-15 wt.%Cu composites prepared by powder metallurgy route, Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 30 (2012) 145–151.
 111. Thein, M.A., Lu, L. ve Lai, M.O., Effect of milling and reinforcement on mechanical properties of nanostructured magnesium composite, Journal of Materials Processing Technology 209, (2009) 4439–4443.
 112. Asgharzadeh, H., Simchi, A. ve Kim, H.S., A plastic-yield compaction model for nanostructured Al6063 alloy and Al6063/Al₂O₃ nanocomposite powder, Powder Technology, 211 (2011) 215–220.
 113. Hesabi, Z.R., Hafizpour, H.R. ve Simchi, A., An investigation on the compressibility of aluminum/nano-alumina composite powder prepared by blending and mechanical milling, Materials Science and Engineering A, 454–455 (2007) 89–98.
 114. Çanakçı, A., Varol, T. ve Ertok, Ş., Toz metalurjisi yöntemi ile Üretilen Al-Al₂O₃ Kompozitlerinin Özellikleri Üzerine Takviye Oranının Etkisi, I. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, İzmir 2011, Bildiriler Kitabı, 144-154.
 115. Botcharova, E., Heilmaier, M., Freudenberger, J., Drew, G., Kudashov, D., Martin, U. ve Schultz, L., Supersaturated solid solution of niobium in copper by mechanical alloying, Journal of Alloys and Compounds, 351 (2003), 119-125.
 116. Ozdemir, I., Ahrens, S., Mucklich, S. Ve Wielage, B., Nanocrystalline Al–Al₂O₃p and SiCp composites produced by high-energy ball milling, Journal of Materials Processing Technology, 205 (2008) 111–118.
 117. Mhadhbi, M., Khitouni, M., Azabou, M., Kolsi, A., Characterization of Al and Fe nanosized powders synthesized by high energy mechanical milling, Materials Characterization, 59 (2008) 944 – 950.
 118. Azimi, M., Akbari, G.H., Development of nano-structure Cu–Zr alloys by the mechanical alloying process, Journal of Alloys and Compounds, 509 (2011) 27–32.
 119. Fogagnolo, J.B., Amadora, D., Ruiz-Navas, E.M. ve Torralba, J.M., Solid solution in Al–4.5 wt% Cu produced by mechanical alloying, Materials Science and Engineering A, 433 (2006) 45–49.
 120. Alam, S.N., Synthesis and characterization of W–Cu nanocomposites developed by mechanical alloying, Materials Science and Engineering A, 433 (2006) 161–168.
 121. Çanakçı, A. ve Varol, T., Yüksek enerjili öğütmeyle üretilen AA2024-B₄C_p kompozit tozların karakterizasyonu, I. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, İzmir 2011, 667-675,.

122. Sivasankaran, S., Sivaprasad, K., Narayanasamy, R. ve Iyer, V.K., An investigation on flowability and compressibility of AA 6061100-x-x wt.% TiO₂ micro and nanocomposite powder prepared by blending and mechanical alloying, Powder Technology, 201 (2010) 70–82.
123. Gan, K. ve Gu, M., The compressibility of Cu/SiCp powder prepared by high-energy ball milling, Journal of Materials Processing Technology, 199 (2008) 173–177.
124. Fogagnolo, J.B., Ruiz-Navas, E.M., Robert, M.H. ve Torralba, J.M., The effects of mechanical alloying on the compressibility of aluminium matrix composite powder, Materials Science and Engineering A, 355 (2003) 50-55.
125. Derakhshandeh, R., Jenabali, J.H.A., An investigation on the capability of equal channel angular pressing for consolidation of aluminum and aluminum composite powder, Materials and Design, 32 (2011) 3377–3388.
126. Giménez, S., Zubizarreta, C., Trabadelo, V. ve Iturriza, I., Sintering behaviour and microstructure development of T₄₂ powder metallurgy high speed steel under different processing conditions, Materials Science and Engineering A, 480 (2008) 130–137.
127. Henriques, V.A.R., Bellinati, C.E. ve Silva C.R.M., Production of Ti–6%Al–7%Nb alloy by powder metallurgy (P/M), Journal of Materials Processing Technology, 118 (2001) 212-215.
128. Dabhade, V.V., Rama Mohan, T.R. ve P. Ramakrishnan, Sintering behavior of titanium–titanium nitride nanocomposite powders, Journal of Alloys and Compounds, 453 (2008) 215–221.
129. Tang, F., Anderson, I.E. ve Biner, S.B., Solid state sintering and consolidation of Al powders and Al matrix composites, Journal of Light Metals, 2 (2002) 201–214.
130. Hong C., Han J., Zhang X. ve Meng S., Influence of hot pressing on microstructure and mechanical properties of combustion synthesized TiB₂–Cu–Ni composite, Journal of Materials Processing Technology, 183 (2007) 445–449.
131. Jia, C., Sun, L., Tang, H. ve Qu, X., Hot pressing of nanometer WC–Co powder, International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 25 (2007) 53–56.
132. Jie Meng, J., Jia, C. ve He, Q., Effect of mechanical alloying on the structure and property of Ni₃Al fabricated by hot pressing, Journal of Alloys and Compounds, 421 (2006) 200–203.
133. Bedir, F., Characteristic properties of Al–Cu–SiCp and Al–Cu–B₄Cp composites produced by hot pressing method under nitrogen atmosphere, Materials and Design, 28 (2007) 1238–1244.
134. Tang, F., Anderson, I.E., Gnaupel-Herold, T. ve Prask, H., Pure Al matrix composites produced by vacuum hot pressing: tensile properties and strengthening mechanisms, Materials Science and Engineering A, 383 (2004) 362–373.

135. Montealegre Meléndez, I., Neubauer, E. ve Danninger, H., Consolidation of titanium matrix composites to maximum density by different hot pressing techniques, Materials Science and Engineering A, 527 (2010) 4466–4473.
136. Köksal, F., Al-Cu-SiC Kompozitlerin Sıcak Presleme Yöntemi ile Üretimi ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2004.

ÖZGEÇMİŞ

Temel VAROL 1980 yılında Trabzon'da doğdu. 2002 yılında Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2003-2006 yılları arasında çeşitli firmalarda doğal gaz projelendirme ve imalat mühendisi olarak çalıştı. 2006 yılında Tokat 48. Piyade eğitim alayında kısa dönem asker olarak askerlik hizmetini tamamladı. 2006-2009 yılları arasında ticaretle uğraştı. 2010 yılında Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı ve aynı yıl K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü 50/d kadrosuna Araştırma Görevlisi olarak atanmış olup halen görevine devam etmektedir. Evli ve 1 çocuk babasıdır. 2012 yılı içerisinde kabul edilen 4 adet yayını (SCI/Expanded) ve 2011 yılı içerisinde sunulmuş 9 adet bildirisi bulunmaktadır. İyi derecede İngilizce bilmektedir.