

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AA 2024-B₄C KOMPOZİTLERİN ÖZELLİKLERİNE YAŞLANDIRMA
PARAMETRELERİNİN ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Müh. Adnan PATİR

HAZİRAN 2014
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME ANABİLİM DALI

AA 2024-B₄C KOMPOZİTLERİN ÖZELLİKLERİNE YAŞLANDIRMA
PARAMETRELERİNİN ETKİSİ

Metalurji ve Malzeme Müh. Adnan PATIR

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“METALURJİ VE MALZEME YÜKSEK MÜHENDİSİ”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 23.05.2014
Tezin Savunma Tarihi : 19.06.2014

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI

Trabzon 2014

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Adnan PATIR tarafından hazırlanan

AA 2024-B₄C KOMPOZİTLERİN ÖZELLİKLERİNE YAŞLANDIRMA
PARAMETRELERİNİN ETKİSİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 03 / 06 / 2014 gün ve 1556 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI


.....

Üye : Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI


.....

Üye : Doç. Dr. M. Vefa AKPINAR


.....

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Kompozit malzemeler, bilim ve teknikte ilerlemelerle ortaya çıkan ileri mühendislik malzemelerinin kombinasyonu olarak tanımlanır. Günümüzde, bu malzemeler yaygın kullanım sahasına sahiptirler. Performans, hafiflik, uygun maliyet, mükemmel mekanik ve fiziksel özelliklerinden dolayı kompozit malzemelere olan talep ve bu malzemeler üzerine yapılan araştırmalar giderek artmaktadır.

Bu çalışmada AA 2024 Matrisli B₄C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitler toz metalurjisi yöntemi ile üretildi. Üretilen tozların karakterizasyonu ve üretilen kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri araştırıldı. Çalışmada takviye malzemesi olarak B₄C parçacıkları üç farklı oranda (% 7, 14, 21”) kullanılmıştır. Üretilen kompozit malzemelerin sertlik ve çekme mukavemeti özelliklerine yaşlandırma süresinin, yaşlandırma sıcaklığının, takviye oranının etkisi araştırılmıştır.

Yüksek lisans çalışmamın her aşamasında desteğini esirgemeyen ve deneyimleri ile bana yol gösteren değerli hocam Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI'ya ve assistan arkadaşlara teşekkür ederim.

Bu çalışmamda maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme de teşekkür ederim.

Adnan PATIR

Trabzon 2014

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “AA 2024-B₄C Kompozitlerin Özelliklerine Yaşlandırma Parametrelerinin Etkisi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Aykut Çanakçı'nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda 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.
23/05/2014

Adnan PATIR

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Kompozit Malzemeler	3
1.2.1. Kompozit Malzemelerin Yapısı.....	5
1.2.1.1. Adsorbsiyon ve Islatma	6
1.2.1.2. Karşılıklı Difüzyon Bağ.....	8
1.2.1.3. Elektrostatik Çekim	8
1.2.1.4. Kimyasal Bağ Oluşumu	8
1.2.1.5. Mekanik Bağlanma	9
1.3. Metal Matrisli Kompozitler	10
1.3.1. Matris Malzemeleri.....	11
1.3.2. Takviye Malzemeleri	12
1.4. Alüminyum ve Alaşımları	13
1.4.1. Alüminyum Alaşımları	14
1.4.2. Alaşım Elementlerinin Alüminyuma Etkisi.....	17
1.5. Alüminyum Esaslı İkili, Üçlü Alaşımların Faz Diyagramları	20
1.5.1. İkili Alüminyum-Bakır Faz Diyagramı	20
1.5.2. Üçlü Al-Cu-Mg Sistemi.....	20
1.6. Alüminyum Alaşımları ve Isıl İşlemler	22
1.6.1. Isıl İşlem Türleri	22
1.6.2. Uygulanan Isıl İşlemler.....	23
1.6.3. Alüminyum Alaşımlarının Sertleştirilmesi	24
1.6.3.1. Yaşlanma Isıl İşlemi	24
1.6.3.1.1. Çözeltiyeye Alma İşlemi	26

1.6.3.1.2.	Hızlı Soğutma (Su Verme)	27
1.6.3.1.3.	Yaşlandırma Isıl İşlemi	29
1.6.3.1.4.	Çökelme Sertleştirilmesi Isıl İşleminde Dislokasyon Hareketleri	34
1.7.	Bor Karbür (B_4C).....	36
1.8.	Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	37
1.9.	Toz Metalurjisi.....	38
1.9.1.1.	Karıştırma ve Alaşımlama	38
1.9.1.2.	Sinterleme	39
1.9.1.3.	Sıcak İzostatik Presleme(SIP).....	40
1.9.1.4.	Sıcak Presleme (SP).....	41
1.9.1.4. 1.	SP’de Farklı Üretim Parametreleri	42
1.9.1.4. 2.	İşlem Parametreleri	42
1.9.1.4. 3.	İşlem Ekipmanları.....	43
1.9.1.4. 4.	SP Avantajları	44
1.9.1.4. 5.	Gaz Giderme	45
1.10.	Mekanik Alaşımlama	45
1.11.	Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı	46
2.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	48
2.1.	Malzeme.....	48
2.2.	Mekanik Alaşımlama İşlemi	49
2.4.	Parçacık Boyutu	50
2.5.	X-Işınları Kırınımı	50
2.7.	Metalografi Çalışmaları	51
3.	BULGULAR.....	52
3.1.	Toz Karakterizasyonu	52
3.2.	Isıl İşlem Öncesi İç Yapılar	53
3.3.	Isıl İşlem Sonrası İç Yapılar	54
3.3.1.	130 ⁰ C’de 10 Saat Yaşlandırılmış Numuneler	54
3.3.2.	130 ⁰ C’de 16 Saat Yaşlandırılmış Numuneler	55
3.3.3.	130 ⁰ C’de 22 Saat Yaşlandırılmış Numuneler	56
3.3.4.	160 ⁰ C’de 10 Saat Yaşlandırılmış Numuneler	57
3.3.5.	160 ⁰ C’de 16 Saat Yaşlandırılmış Numuneler	58
3.3.6.	160 ⁰ C’de 22 Saat Yaşlandırılmış Numuneler	59
3.3.7.	190 ⁰ C’de 10 Saat Yaşlandırılmış Numuneler	60
3.3.8.	190 ⁰ C’de 16 Saat Yaşlandırılmış Numuneler	61
3.3.9.	190 ⁰ C’de 22 Saat Yaşlandırılmış Numuneler	62

3.4.	Çekme Sonrası Kırılma Yüzeyleri.....	63
3.4.1.	Takviyesiz Al 2024 Kırılma Yüzey Görüntüleri	63
3.4.2.	%7 B ₄ C Takviyeli Al 2024'ün Kırılma Yüzey Görüntüleri	64
3.4.3.	%14 B ₄ C Takviyeli Al 2024'ün Kırılma Yüzey Görüntüleri	65
3.4.3.	%21 B ₄ C Takviyeli Al 2024'ün Kırılma Yüzey Görüntüleri	66
3.5.	Enerji Dağılımlı X-Işınları (EDS) Analizi.....	67
3.6.	XRD Faz Karakterizasyonu	71
3.7.	Sertlik Değerlerindeki Değişimler	75
3.7.1.	Isıl İşlem Öncesi Numunelerdeki Sertlik Değişimi	75
3.7.2.	Isıl İşlem Sonrası Numunelerdeki Sertliğin Yaşlandırma Süresine Göre Değişimi.....	76
3.7.3.	Isıl İşlem Sonrası Numunelerdeki Sertliğin Takviye Oranına Göre Değişimi ..	77
3.8.	Çekme Mukavemet Değerlerindeki Değişimler	79
3.8.1.	Isıl İşlem Öncesi Çekme Mukavemet Değerlerindeki Değişimler	79
3.8.2.	130 °C'de Çekme Mukavemet Değerlerindeki Değişimler	80
3.8.3.	160 °C'de Çekme Mukavemet Değerlerindeki Değişimler	81
3.8.4.	190 °C'de Çekme Mukavemet Değerlerindeki Değişimler	83
4.	İRDELEME	85
5.	SONUÇLAR.....	87
6.	ÖNERİLER.....	88
7.	KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

AA 2024-B₄C KOMPOZİTLERİN ÖZELLİKLERİNE YAŞLANDIRMA
PARAMETRELERİNİN ETKİSİ

Adnan PATIR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Aykut ÇANAKÇI
2014, 93 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. 49 µm boyutunda ve farklı miktarlardaki (ağırlıkça %7, %14 ve %21) B₄C parçacıkları Al2024 matris tozları ile karıştırıldı ve bu tozlar 1 saat gezegen tipli öğütücüde öğütüldü. Sonrasında bu tozlar soğuk ve sıcak presleme yapılarak bulk numune haline getirildi. Üretilen tüm kompozitlere T6 ısıl işlemi uygulanarak mikroyapı, sertlik ve çekme dayanımları gibi mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu numunelere üç farklı sıcaklıkta 130-160-190°C ve üç farklı sürede (10-16-22 saat) yaşlandırma ısıl işlemi uygulandı.

Numunelerin yapısal ve morfolojik değişimleri X ışınları kırınım cihazı ve taramalı elektron mikroskobu ile araştırıldı. Sertlik ölçümünde en yüksek sertlik değeri 130 °C'de 10 saat yaşlandırılmış %21 B₄C takviyeli kompozitte 182 BSD olarak belirlenmiştir. Çekme testinde en yüksek çekme mukavemeti 190 °C'de 10 saat yaşlandırılmış %7 B₄C takviyeli kompozitte 403 MPa olarak belirlenmiştir. SEM görüntüleri matris tozları (Al2024) içerisinde B₄C tozlarının homojen olarak dağıldığını ortaya koymuştur.

Ayrıca yaşlandırma süresi, sıcaklığı ve B₄C miktarı üretilen kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine önemli etkiye sahip olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Metal Matrisli Kompozitler, Sıcak Pres, Yaşlandırma, Isıl İşlem.

Master Thesis

SUMMARY

THE EFFECT OF AGEING PARAMETERS ON THE PROPERTIES OF THE
AA 2024/B₄C COMPOSITES

Adnan PATIR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Metallurgy and Materials Engineering
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI
2014, 93 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) methods were used to prepare mixture of Al2024-B₄C composite powders. Different amounts of B₄C particles (7 wt.%, 14 wt.%, 21wt. %) with size of 49 µm were mixed with Al 2024 powder particles and they were milled for 1h in a planetary ball mill. After, they were produced composite samples by cold and hot pressing, respectively. Precipitation hardening was applied to all produced samples and their mechanical properties such as microstructural, hardness and tensile strengths were investigated. Precipitation hardening was applied to all the samples at different temperatures and time lapses including 130-160-190⁰C and 10-16-22 hours respectively.

The structural evolutions and morphological changes of the composites were investigated using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) techniques. Maximum stiffness value was determined as 182 BSD in the samples aged for 10 hours at 130 °C and reinforced with 21wt. % B₄C particles. In the tensile test, the maximum tensile strenght was determined to be 403 MPa in the samples aged for 10 hour at 190 ⁰C and reinforced with 7wt. % B₄C. The SEM micrographs demonstrated a uniform distribution of B₄C particles in aluminum powders.

Moreover, ageing time, ageing temperature and the amount of B₄C particles had an important effect on the physical and mechanical properties of produced composites.

Key Words: Metal Matrix Composites, Hot Pressing, Ageing, Heat Treatment.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Kompozit malzemelerin takviye malzemesine göre sınıflandırılması.....	5
Şekil 2.	Kompozit malzemede matris-takviye bağı oluşumunda ara yüzey ve ara fazlar, a) Doğrudan (ara fazsız) birleşme, b) Kaplanmış takviye kullanımı c) Karşılıklı sınırlı oranda çözünmeyle ara faz oluşumu.....	6
Şekil 3.	Katı bir malzeme üzerine düşen bir sıvı damlasının düşmesinde oluşan yüzey gerilimleri γ ve ıslanabilirliğin gösterimi	7
Şekil 4.	Yüzeylerarası bağ oluşumu a) Karşılıklı difüzyon b) Elektrostatik çekim c) Polimer yönlenmesi (yüzeyde) d) Kimyasal bağ oluşumu e) Mekanik bağlanma.....	9
Şekil 5.	Temel alüminyum alaşımları	17
Şekil 6.	Al-Cu ikili alaşım sisteminin denge diyagramı.....	20
Şekil 7.	Al-Cu-Mg sistemi için 430 °C' deki izotermal kısımlar.	21
Şekil 8.	Al-Cu-Mg faz diyagramı: (a) sıvı projeksiyon (izoterm) ve (b) katı durumda faz alanlarının dağılımı	21
Şekil 9.	Doğal ve yapay yaşlandırma kademelerini gösteren ısıl işlem diyagramları.	27
Şekil 10.	%4 Cu içeren Al - Cu alaşımının TTT diyagramı.....	29
Şekil 11.	Al-Cu faz diyagramı ve Al % 4 Cu alaşımının çözeltiye alma işlemi, su verme ve çökeltme sertleşmesi safhalarında mikro yapı değişimleri	30
Şekil 12.	Alüminyum 2024 alaşımının akma dayanımının yaşlandırma sıcaklığına ve süresine göre değişimi.....	30
Şekil 13.	Çökeltme sertleştirilmesi ısıl işleminin yaşlandırma aşamasında alaşımın sertlik ve dayanım özelliklerinin yaşlandırma süresinin logaritmik değeri ile değişiminin şematik olarak gösterilişi	32
Şekil 14.	Yaşlandırma ısıl işlemi aşamaları ve mikro yapıları.....	33
Şekil 15.	Yaşlandırma sırasındaki çeşitli ara durumların gösterimi a. Çözünen atomun çözen atom içerisindeki dağılımı, b. Kendisini çevreleyen matris ile uyumlu çökelti, c. Kendisini çevreleyen matris ile uyumsuz çökelti.....	33
Şekil 16.	Çökelti partiküllerinin bir kolonu ile etkileşen bir dislokasyon çizgisi	35
Şekil 17.	Bir dislokasyonun kayma hareketi ile bir partikülün kesilmesi	35
Şekil 18.	Bir nokta temasıbaşılangıcıile sinterleme esnasındaki parçacıklar arası bağların gelişimi.....	40
Şekil 19.	Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	49
Şekil 20.	Partikül boyutu ölçüm cihazı	50
Şekil 21.	X ışınları analiz cihazı.....	50

Şekil 22. Sıcak presleme cihazı.....	51
Şekil 23. Metalografi çalışmalarında kullanılan cihazı.....	52
Şekil 24. Başlangıç tozlarının farklı büyütmelerdeki morfolojisi, a) Al 2024, b) Al 2024+%7B ₄ C C) Al 2024+%14 B ₄ C D) Al 2024+%21 B ₄ C	52
Şekil 25. Isıl işlem öncesi a-b) Al 2024 alaşımı c-d) Al 2024+%7 B ₄ C e-f) Al 2024+%14 B ₄ C g-h) Al 2024+ %21 B ₄ C kompozit iç yapıları (500X ve 1000X büyütmelerde)	53
Şekil 26. a-b) Al 2024 c-d) Al 2024+%7 B ₄ C e-f) Al 2024+%14 B ₄ C g-h) Al 2024+ %21 B ₄ C (1000X ve 2000X büyütmelerde)	54
Şekil 27. a-b) Al 2024 c-d) Al 2024+%7 B ₄ C e-f) Al 2024+%14 B ₄ C g-h) Al 2024+ %21 B ₄ C (1000X ve 2000X büyütmelerde)	55
Şekil 28. a-b) Al 2024 c-d) Al 2024+%7 B ₄ C e-f) Al 2024+%14 B ₄ C g-h) Al 2024+ %21 B ₄ C (1000X ve 2000X büyütmelerde)	56
Şekil 29. a-b) Al 2024 c-d) Al 2024+%7 B ₄ C e-f) Al 2024+%14 B ₄ C g-h) Al 2024+ %21 B ₄ C (1000X ve 2000X büyütmelerde)	57
Şekil 30. a-b) Al 2024 c-d) Al 2024+%7 B ₄ C e-f) Al 2024+%14 B ₄ C g-h) Al 2024+ %21 B ₄ C (1000X ve 2000X büyütmelerde)	58
Şekil 31. a-b) Al 2024 c-d) Al 2024+%7 B ₄ C e-f) Al 2024+%14 B ₄ C g-h) Al 2024+ %21 B ₄ C (1000X ve 2000X büyütmelerde)	59
Şekil 32. a-b) Al 2024 c-d) Al 2024+%7 B ₄ C e-f) Al 2024+%14 B ₄ C g-h) Al 2024+ %21 B ₄ C (1000X ve 2000X büyütmelerde)	60
Şekil 33. a-b) Al 2024 c-d) Al 2024+%7 B ₄ C e-f) Al 2024+%14 B ₄ C g-h) Al 2024+ %21 B ₄ C (1000X ve 2000X büyütmelerde)	61
Şekil 34. a-b) Al 2024 c-d) Al 2024+%7 B ₄ C e-f) Al 2024+%14 B ₄ C g-h) Al 2024+ %21 B ₄ C (1000X ve 2000X büyütmelerde)	62
Şekil 35. a-b) Isıl işlem uygulanmamış c-d) 190 °C 10 saat yaşlandırılmış e-f) 190 °C 16 saat yaşlandırılmış g-h) 190 °C 22 saat yaşlandırılmış numunelerin kırılma yüzeyleri.....	63
Şekil 36. a-b) Isıl işlem uygulanmamış c-d) 130 °C 10 saat yaşlandırılmış e-f) 130 °C 16 saat yaşlandırılmış g-h) 130 °C 22 saat yaşlandırılmış numunelerin kırılma yüzeyleri.....	64
Şekil 37. ı-i) 190 °C 10 saat yaşlandırılmış numunenin kırılma yüzeyleri	65
Şekil 38. a-b) 160 °C 10 saat c-d) 160 °C 16 saat e-f) 160 °C 22 saat yaşlandırılmış numunelerin kırılma yüzeyleri	65
Şekil 39. a-b) Isıl işlem uygulanmamış c-d) 160 °C 10 saat yaşlandırılmış e-f) 160 °C 16 saat yaşlandırılmış g-h) 160 °C 22 saat yaşlandırılmış numunelerin kırılma yüzeyleri.....	66
Şekil 40. 190 °C, 22 saat yaşlandırılmış numunenin a) Takviyesiz Al 2024 SEM görüntüsü b) + işaretli noktanın EDS analizi.....	67
Şekil 41. 160 °C, 22 saat yaşlandırılmış numunenin a) %7 B ₄ C takviyeli Al 2024 SEM görüntüsü b) + işaretli noktanın EDS analizi.....	68

Şekil 42.	160 °C, 22 saat yaşlandırılmış numunenin a) %21 B ₄ C takviyeli Al 2024 SEM görüntüsü b) + işaretli noktanın EDS analizi.....	69
Şekil 43.	190 °C, 22 saat yaşlandırılmış numunenin a) %21 B ₄ C takviyeli Al 2024 SEM görüntüsü b) + işaretli noktanın EDS analizi.....	70
Şekil 44.	190 °C’de 16 saat yaşlandırılmış takviyesiz Al 2024 alaşımına ait XRD spektrumu a) genel görünüm b) Al piklerinin gösterimi.....	71
Şekil 45.	190 °C’de 16 saat yaşlandırılmış takviyesiz Al 2024 alaşımına ait XRD spektrumu c) 20-30 d) 30-40 e) 40-50 theta derecesi arası büyütülmüş hali.....	72
Şekil 46.	190 °C’de 10 saat yaşlandırılmış %7 B ₄ C takviyeli Al 2024 alaşımına ait XRD spektrumu	73
Şekil 47.	190 °C’de 10 saat yaşlandırılmış %14 B ₄ C takviyeli Al 2024 alaşımına ait XRD spektrumu a) genel görünüm	73
Şekil 48.	190 °C’de 10 saat yaşlandırılmış %14 B ₄ C takviyeli Al 2024 alaşımına ait XRD spektrumu b) 20-30 theta derece arası büyütülmüş hali	74
Şekil 49.	190 °C’de 16 saat yaşlandırılmış %21 B ₄ C takviyeli Al 2024 alaşımına ait XRD spektrumu	74
Şekil 50.	Isıl işleme tabi tutulmamış numunelerde takviye oranı ile sertliğin değişimi.....	75
Şekil 51.	Farklı takviye oranlarında ve sıcaklıklarda a) 130 °C b) 160 °C’de yaşlandırma süresi ile sertliğin değişimi	76
Şekil 52.	Farklı takviye oranlarında ve sıcaklıklarda c) 190 °C’de yaşlandırma süresi ile sertliğin değişimi	77
Şekil 53.	Farklı sıcaklıklarda (130-160-190 °C) a) 10 saat yaşlandırılmış numunelerin sertliğinin takviye oranı ile değişimi	77
Şekil 54.	Farklı sıcaklıklarda (130-160-190 °C) b) 16 saat c) 22 saat yaşlandırılmış numunelerin sertliğinin takviye oranı ile değişimi.....	78
Şekil 55.	Isıl işleme tabi tutulmadan önce numunelerdeki çekme mukavemetleri	79
Şekil 56.	130 °C’de a) 10 saat b) 16 saat yaşlandırılmış numunelerin çekme mukavemeti grafikleri.....	80
Şekil 57.	130 °C’de c) 22 saat yaşlandırılmış numunenin çekme mukavemeti grafiği.....	81
Şekil 58.	160 °C’de a) 10 saat yaşlandırılmış numunenin çekme mukavemeti grafiği.....	81
Şekil 59.	160 °C’de b)16 saat c) 22 saat yaşlandırılmış numunelerin çekme mukavemeti grafikleri.....	82
Şekil 60.	190 °C’de a)10 saat b) 16 saat yaşlandırılmış numunelerin çekme mukavemeti grafikleri.....	83
Şekil 61.	190 °C’de c) 22 saat yaşlandırılmış numunenin çekme mukavemeti grafiği.....	84

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	Başlıca takviye malzemelerinin özellikleri.....	13
Tablo 2.	Saf alüminyumun özellikleri	14
Tablo 3.	Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması	15
Tablo 4.	AA 2024 alaşımının kimyasal bileşimi.....	16
Tablo 5.	AA 2024 alaşıma uygulanan işlemler sonrası özelliklerindeki değişimler	16
Tablo 6.	Alaşım elementlerinin alüminyumun özelliklerine etkisi.....	19
Tablo 7.	Al-Cu-Mg sistemlerinde değişmeyen reaksiyonlar	22
Tablo 8.	Çökelme sertleşmesi uygulanabilen alaşım sistemleri.....	26
Tablo 9.	Bor karbürün genel özellikleri	36
Tablo 10.	Al 2024 tozlarının ağırlıkça bileşimi (%)	48
Tablo 11.	Al 2024 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri	49

SEMBOLLER DİZİNİ

AMK	: Alüminyum Matrisli Kompozitler
FGM	: Functionally Graded Materials (Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler)
MMK	: Metal Matrisli Kompozitler
PMK	: Polimer Matrisli Kompozitler
GP	: Guiner Preston
TM	: Toz Metalurjisi
MA	: Mekanik Alaşımılama
SIP	: Sıcak İzostatik Pres
SP	: Sıcak Presleme
İKK	: İşlem Kontrol Katkısı
XRD	: X-ışınları Difraktometresi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
MPa	: Mega Paskal
EDS	: Enerji Dağılımlı X-ışınları
BSD	: Brinel Sertlik Değeri

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Kompozitlerin yeni bir malzeme türü olarak ortaya çıkması, 20. yüzyılın ortalarında cam elyaf takviyeli polimerlere benzer çok fazlı kompozitlerin, mühendislik ve tasarım çalışmalarına uygun olarak üretilmesiyle başlamıştır. “Ahşap, saman takviyeli kilden yapılan kerpiç, deniz kabukları ve hatta çelik gibi alışılmadık binlerce yıldır bilinen çok fazlı malzeme olmasına rağmen, farklı malzemeleri üretim sırasında bir araya getirme kavramının herkesçe kabul edilmesinden sonra kompozitler; metal, seramik ve polimerlerin yanında yeni bir malzeme grubu olarak sayılmaya başlanmıştır. Artık günümüzde bu çok fazlı kompozit yaklaşımının, hiçbir monolitik (tek bileşenli) metal alaşımı, seramik ve polimerlerin sahip olmadığı geniş bir malzeme özelliği kombinasyonları imkanı sağladığı kabul edilmiştir.” (Callister, William D., Jr. and Rethwisch, 2011).

Kompozit malzemeler çok yaygın kullanım alanı olan önemli mühendislik malzemeleri sınıfından oluşur. Kompozit malzeme üretimi dünyada 10 milyon tonun üzerindeyken, son yıllarda bu pazarın her yıl %5-10 oranında büyüdüğü belirlenmiştir. Kompozit malzemeler uygulama alanları çok çeşitlilik arz etmeye başlamıştır. Bununla birlikte, kompozit malzemeler çok geniş özellik aralığına sahip olduklarından her türlü çalışma şartlarına uygun yapı elde edilmesine imkan sağlar. Bunu biyolojik malzemeler örneğiyle daha net ifade edersek, örneğin ahşap, kemik, diş ve deri gibi malzemeler karmaşık iç yapıda tasarlanmış, performans ihtiyaçlarına cevap verebilen kompozitlerdir. Farklı mühendislik amaçlarına uyurlamak için üretilen kompozit yapının farklı bilim dallarından yararlanması gerekir. (Clyne ve Withers, 1993).

“Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla sayıdaki aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni veya tek bir malzemede toplamak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşan malzemelerdir.”(Varol, 2012). Bir kompozit malzeme yapısında; çekirdek kısmı oluşturan takviye elemanı ve çekirdeğin etrafını saran matris malzemesi bulunmaktadır. Takviye malzemesi olarak değişik morfolojiye sahip lifcikler, parçacıklar, kısa ve uzun elyaflar malzemeler kullanılmaktadır. Bunların temel mekanizması gelen yükü matris malzeme üzerinden takviye malzemesine taşımak, matrisin

rijitlik ve dayanımını artırmaktır. Buna ek olarak takviye elemanında olması gereken özellikler; kompozitin yoğunluğunu düşürmek ve yüksek çalışma sıcaklıklarında matrisin özelliklerini iyileştirmektir. Yüksek rijitlik/yoğunluk ve mukavemet/yoğunluk oranlarına sahip olan ileri malzemelerin üretimi ve tasarımı yönünden kompozit malzemeler büyük öneme sahiptirler. Bu avantajlı özelliklerinden dolayı kompozit malzemeler mukavemet ve ağırlığın büyük öneme sahip olduğu uzay ve havacılık sanayilerinde yaygın uygulama sahası bulmaktadır. Bu malzemeler yapı içerisine katıldıklarında performans ve özelliklerde önemli oranda artış görülmektedir. Kompozit malzemeler matris ve takviye malzemesine göre sınıflandırılırken, bunların içerisinde Metal Matrisli Kompozitler (MMK) önemli paya sahip olanlardan biridir (Varol, 2012).

Günümüzde metal matrisli kompozitler (MMK) ile ilgili çalışmalar giderek artmakla birlikte bu malzemelerin başlangıcı 1950'lerin sonuna dayanmaktadır. Yüksek spesifik dayanıma sahip MMK malzemeler öncelikle havacılık-uzay sanayisinde ilgi uyandırmıştır. Maliyetlerde sağladığı avantaj nedeniyle MMK malzemelere otomotiv endüstrisinin de ilgisini çekmiştir. Bu sektörde yakıt tasarrufunun ve çevre politikaları sebebiyle gaz salınımının düşürülmesinin önemi arttıkça, MMK malzemeler diğer geleneksel malzemelerin (dökme demir ve çelik) yerini almıştır. Farklı matris ve takviye malzemesi birleştirmesiyle istenen özelliklere sahip MMK üretilebilmesi sanayide çok yaygın kullanım alanı bulmasına olanak sağlamıştır (Toptan,2011).

Alüminyum, çelik ve dökme demirden sonra mühendislik alanında en çok kullanıma sahip malzemelerden biridir. Hafiflik, kolay işlenebilirliği, yüksek elektrik ve ısı iletkenliği, alüminyum ve alaşımlarının en önemli avantajlarıdır. Bu alaşımlar düşük sertlik ve aşınma direnci gösterirler. Bu dezavantajlı özelliklerinin iyileştirilmesi gerekir. Bunu sağlamak amacıyla alüminyum ve alaşımlarının ısıl işlemle iyileştirilmesi araştırmacıların ilgisini çeken bir araştırma konusu olmuştur. Alüminyum alaşımları içerisinde ısıl işlemde en çok çalışma Al-Cu alaşımları üzerine yapılmaktadır. Bu alaşımlar için sanayide yaşlandırma ısıl işlemi en yaygın olarak kullanılan ısıl işlemdir. Al-Cu alaşımlarında yaşlandırma ısıl işleminin mekanik özelliklere katkısının yanısıra işlenebilirliğe de olumlu etkisi bulunmaktadır. Bu methodla, yaşlandırma ısıl işleminde sıcaklık ve zamana bağlı olarak oluşan ikinci faz çökeltilerinin, sertlikte ve mekanik mukavemette artış sağlamıştır (Erkal, 2011).

Son zamanlarda Alüminyum matrisli kompozitler (Al-MMK), yüksek dayanımları, hafiflik yüksek elastik şekil değiştirme kabiliyeti ve aşınma dirençleriyle otomotiv sanayisinde başta silindir gömleği, motor pistonu, fren disk ve kampanaları gibi uygulamalarda kullanıma sahiptir.

AMK'lerin mekanik özelliklerini artırmak amacıyla takviye malzemesi olarak özellikle SiC, Al₂O₃, TiC ve B₄C gibi seramikler kullanılmaktadır. Bu seramik takviye malzemeleri içerisinde B₄C üstün fiziksel ve kimyasal özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. Ayrıca ülkemizin zengin bor kaynakları göz önünde bulundurulduğunda daha avantajlı bir tercih olabilmektedir.

Otomotiv endüstrisindeki uygulamalarda Al-B₄C kompozitleri ile alakalı çalışmalar giderek artmaya başlamıştır. Bu kompozitlerin üretim aşamasında temel problem, matris malzemesi ile takviye malzemesi arasında ıslatma oranının düşük olmasıdır. Sıvı faz üretim yöntemlerinden infiltrasyon methodu uygulama şartlarında zorluklara sahipken, döküm methodu da düşük ıslanabilirliğe sahiptir. Bununla birlikte, toz metalurjisi (T/M) methodunda ara yüzey kinetiğinin kontrolü kuramsal olarak iyi biçimde sağlanabilmektedir. Bu sebepten dolayı T/M üretimiyle ilgili çalışmalar ara yüzeydeki ıslatılabilirlik oranını artırmaya odaklanmakla birlikte, ileri mekanik ve fiziki özelliklere sahip uygun maliyetlerde bir üretim standardı geliştirilememiştir (Kumdalı,2008).

Yaşlandırma işleminde işlem parametreleri yaşlandırma sıcaklığı ve zamana bağlı olarak değişir. Bu sebeple değişen parametrelere bağlı olarak optimum değerler belirlenmelidir. Bu çalışmada alüminyum alaşımlarından AA2024 serisi için optimum yaşlandırma parametrelerinin belirlenmesi ve bu parametrelerdeki mekanik özelliklerin değişimi ve sertliğe olan etkisi incelenmiştir.

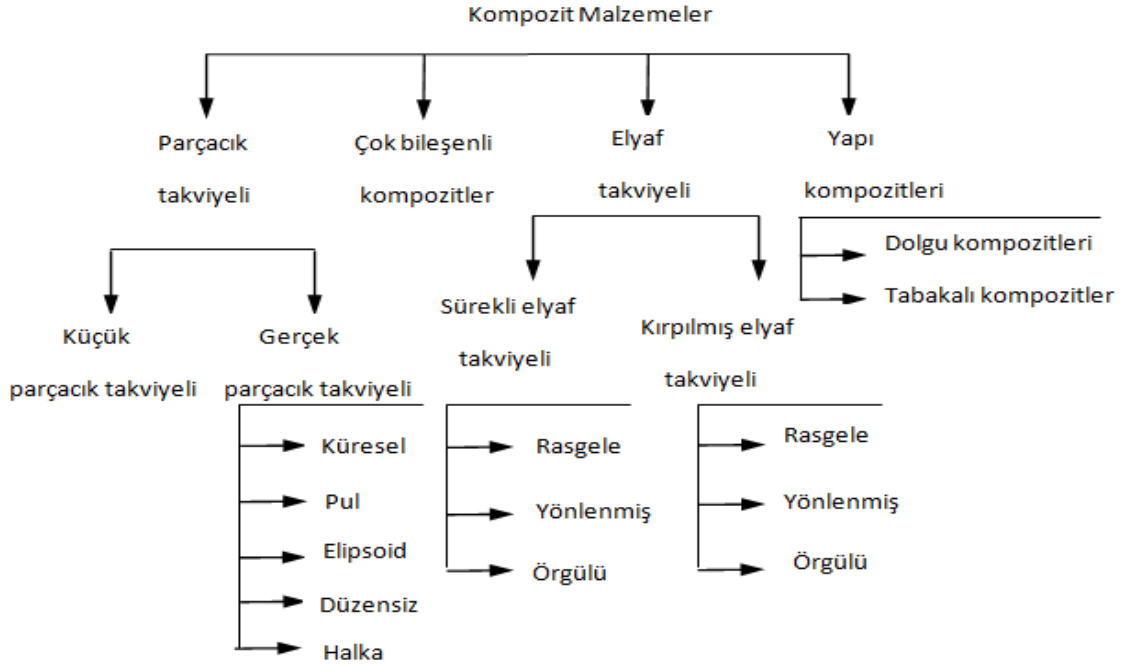
1.2. Kompozit Malzemeler

Seramik, metal, polimer, cam ve elastomer gibi malzemeler kompozitlerin meydana gelmesinde kullanılan bileşen türlerini teşkil eder. En az iki türden malzemeyi bir araya getirerek daha üstün özelliklere sahip kompozit malzemeler oluşturulabilir, ancak bu kompozit sistemlerine bağlıdır (Clyne ve Withers, 1993). Bileşenler karakteristik özelliklerini muhafaza ederler; birlikte bulunmalarına rağmen birbiri içinde tamamen çözünmez ve bir ara sistem oluştururlar (Akbulut, 2001). Bu bilgilerin doğrultusunda kompozit malzeme tanımı şöyle yapılabilir: “Kompozit malzeme, belirli özellikleri elde

etmek için makro ölçülerde farklı bileşim ve şekle sahip iki veya daha fazla makro bileşenin bir arada bulunduğu, bileşenlerin özelliklerini devam ettirdikleri için fiziksel olarak belirlendiği malzeme sistemidir” (Akbulut, 2001).

Daha üstün özelliklere sahip kompozit malzemelerin üretilmeye başlanması bugünkü metal malzemelerin teknolojik gelişmeler karşısında yetersiz kalmasından dolayı ortaya çıkmış ve bu konudaki hızlı gelişmeler olmuştur.. Hafiflik ve sağlamlık klasik malzemelere kıyasla kompozitlerde çok daha iyi olan iki önemli özelliktir. . Bu malzemelerin mekanik, kimyasal ve elektrik özellikleri yapılan çalışmalar sonucunda geliştirilmiştir. Bir çok alanda kompozit malzemelerin kullanımı yaygındır; örneğin, havacılık, deniz taşıtları, otomotiv, inşaat, askeri ve uzay teknolojisi alanlarında (Tavman, 1997 ve Ramesh, 2005). Bundan dolayı kompozit malzemelerin kullanımı artmakta ve farklı alanlarda yeni ihtiyaçlar doğmaktadır.

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. Bu sınıflandırma Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Kompozit malzemelerin takviye malzemesine göre sınıflandırılması, (Çanakçı, 2006)

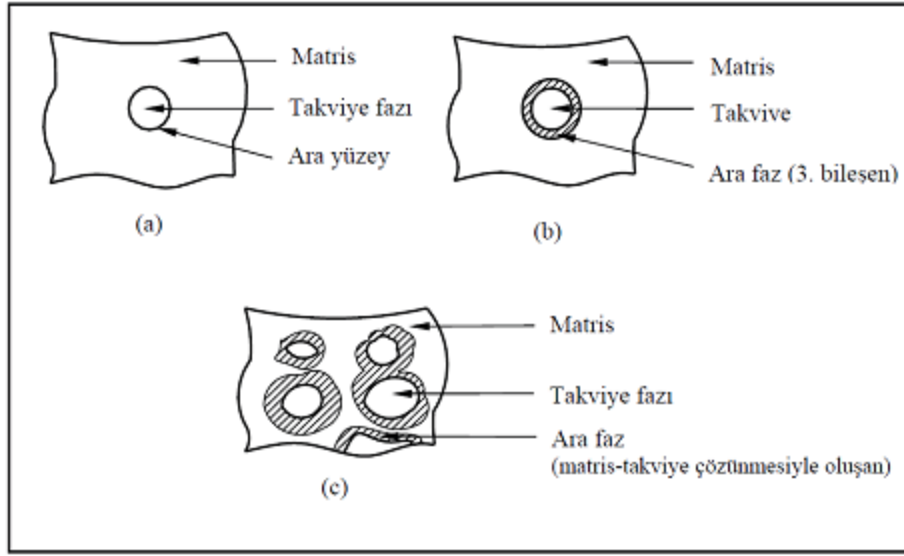
Kompozit malzemelerin sınıflandırılmasını gösteren şemaya göre kompozitler, parçacık takviyeli, çok bileşenli (parçacık, elyaf, v.b.), elyaf takviyeli ve yapısal kompozitler olmak üzere dört ana gruba ayrılır. Parçacık takviyeli kompozitlerde saçınmış faz (takviye), eş akseneldir (yani parçacık boyutları tüm yönlerde yaklaşık eşittir); elyaf takviyeli kompozitlerde saçınmış faz, elyaf geometrisindedir (yani çok büyük uzunluk/çap oranına sahiptir). Yapısal kompozitler, kompozitlerin ve homojen malzemelerin biraraya gelmesi ile oluşur (Callister and Rethwisch, 2011).

1.2.1. Kompozit Malzemelerin Yapısı

Kompozit malzemeler, daha sert ve yüksek dayanıma sahip ama nispeten daha az miktarda olan takviye malzemesi ile kompozitin ana malzemesi olan ama dayanıklılığı az ve sünekliliği fazla olan matrisden meydana gelir. Matris malzemesinin kompozit sisteminde kompozit malzemeye gelen yükleri takviye malzemelerine aktarmak, kompozit malzemenin tokluğunu artırmak, kırılan elyaflardan çatlağın yayılmasını engellemek, kompozit malzemenin mukavemetine iyileştirmek, 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 tanımında belirtildiği gibi matris ve takviye fazı birbiri içinde çözünmemelidir. Fakat çok az miktarda çözünürlük matris-takviye arasında güçlü bir bağın oluşumunu olumlu yönde etkiler (Şekil 2.c.)



Şekil 2. Kompozit malzemede matris-takviye bağı oluşumunda ara yüzey ve ara fazlar, a) Doğrudan (ara fazsız) birleşme, b) Kaplanmış takviye kullanımı c) Karşılıklı sınırlı oranda çözünmeyle ara faz oluşumu

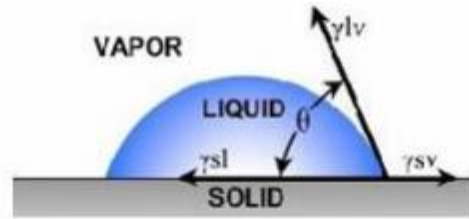
Matris-takviye ara yüzeyinin yapısı ve özellikleri kompozit malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Çünkü matris üzerine etki eden gerilmelerin takviye elemanına aktarılması ara yüzey aracılığı ile olur (Çanakçı ,2006, Hull ve Clyne,1996).

1.2.1.1. Adsorbsiyon ve Islatma

Elektriksel yönden nötr karakterde olan iki yüzey birbirine yeterli mesafede yaklaştığında aralarında bir çekim meydana gelir. Bu durum sıvıların katı yüzeyleri ıslatması ile izah edilir. İki katı yüzey birbirine temas ettiğinde yüzey pürüzlülüğü bu iki

yüzeyin belirli noktalar dışında atomsal veya mikro düzeyde birbirine temas etmesini engeller. Bununla birlikte genellikle yüzeylerde kirlenme de olabilir. Yüzeyler kirlere arındırılrsa bile temas noktalarında oluşan bağ kuvveti tüm yüzeye oranlandığında zayıf kalacaktır. Sıvının katı yüzeyindeki tüm girintileri ve çıkıntıları doldurarak aradaki havanın yerini almasıyla etkili bir ıslatma gerçekleşir.

Katı yüzeyinde bir sıvının yayılma kabiliyeti ıslatma olarak adlandırılabilir ve katı-sıvı arasındaki temas derecesini ifade eder. Şekil 3’de görüldüğü gibi ıslatma katı madde yüzeyine düşen sıvı damlacığı ile katı arasındaki temas açısıyla tanımlanabilir.



Şekil 3. Katı bir malzeme üzerine düşen bir sıvı damlasının düşmesinde oluşan yüzey gerilimleri γ ve ıslanabilirliğin gösterimi, (Rame-Hart, 2013)

Young-Dupre eşitliği ile ifade edilen yüzey enerjileri ve ıslatma açısı arasındaki temel ilişki aşağıda verilmiştir (Oh ve arkadaşları,1989, Dubre, 1869 ve Young, 1805).

$$\gamma_{kb} = \gamma_{ks} + \gamma_{sb} \cos\theta \quad (1.1)$$

Burada γ_{kb} katı-buhar ara yüzey enerjisi, γ_{ks} katı-sıvı ara yüzey enerjisi, γ_{sb} sıvı-buhar ara yüzey enerjisi ve θ ıslatma açısıdır. Katının üzerine sıvının yayılması için sistemin serbest enerjisinde azalma olması gerekir. Sıvı ile katı arasındaki bağ kuvveti (yani adhezyon işi) aşağıdaki eşitlikten bulunur:

$$W_a = \gamma_{sb} + \gamma_{kb} - \gamma_{ks} \quad (1.2)$$

(1.1) eşitliği ile verilen γ_{kb} değeri yerine konursa;

$$W_a = \gamma_{sb} (1 + \cos\theta) \quad (1.3)$$

elde edilir.

Bu nedenle sıvı ile katı arasındaki bağ kuvveti, temas (ıslatma) açısı ve sıvının yüzey gerilimi ile ifade edilebilir (Oh ve arkadaşları,1989).

Islatma açısının büyüklüğü ıslatma kabiliyetini gösterir. Buna göre;

$\theta = 0$ mükemmel ıslatma

$\theta = 180$ ıslatma yok

$0 < \theta < 180$ kısmi ıslatma gerçekleşir.

Islatmayı iyileştirmek sıvı faz ortamında metal-seramik sistemlerinde kolay değildir. Mesela, 950°C' nin altındaki sıcaklıklarda C, SiC, Al₂O₃ parçacıkları alüminyum ve alüminyum alaşımları tarafından iyi ıslatılamaz (İbrahim ve arkadaşları, 1991).

“MMK’lerde ara yüzey bağ mukavemetinin maksimum düzeyde olabilmesi için ıslatmayı iyileştirmek, kimyasal reaksiyonları kontrol etmek ve oksitlerin oluşmasını minimuma indirmek gereklidir” (Rohatgi ve arkadaşları, 1986).

1.2.1.2. Karşılıklı Difüzyon Bağ

Matris ve takviye malzemelerinin karşılıklı difüzyonu ile aralarında bağ oluşur. Aralarında çok az oranda çözünürlük olması bu bağın oluşmasına yardımcı olur.

1.2.1.3. Elektrostatik Çekim

Karşılıklı yüzeylerden bir tanesi pozitif değeri ile negatif yük taşırsa aralarında çekme oluşur. Bu mekanizma bağ oluşumuna çok önemli katkıda bulunmamakla birlikte özellikle plastik matrisli kompozitlerde takviyeye uygulanan ön kaplamalarda etkili olur.

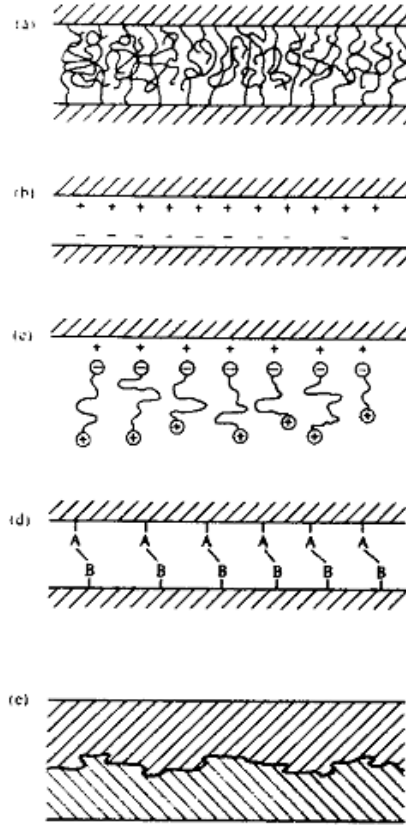
1.2.1.4. Kimyasal Bağ Oluşumu

Özellikle elyaf takviyeli kompozitlerde bu tür bağ oluşumu önemlidir. Elyafa uygulanan ön kaplama ile reçine arasında kimyasal bağ oluşur.

1.2.1.5. Mekanik Bağlanma

Matris ve takviye yüzeyleri arasında mekanik kenetlenme ile karşılıklı bağ oluşur. Ara yüzey çekme dayanımının büyüklüğü, yüzey pürüzlülüğüne ve matris-takviye fazlarının birbiri içine girmesine bağlıdır. Nervürlü çelik çubuk ile beton arasında bu tür bağ oluşur.

Ara yüzey bağ kuvvetini etkileyen bir çok faktör vardır. Örneğin katılaşma sırasında matriste oluşan çekme veya termal genişleme farklılıkları ara yüzeyde bağ kuvvetini etkileyen çekme, basma veya kesme gerilmeleri oluşturabilir.



Şekil 4. Yüzeylerarası bağ oluşumu a) Karşılıklı difüzyon b) Elektrostatik çekim c) Polimer yönlenmesi (yüzeyde) d) Kimyasal bağ oluşumu e) Mekanik bağlanma

1.3. Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler matris fazı metal ve ikinci bir faz olan takviye elemanından oluşmaktadır. Genelde takviye fazı olarak sürekli, süreksiz fiberler, kılcal kristaller ve seramik parçacıklar kullanılmaktadır. Metal matrisli kompozitler takviye elemanının şekline göre; süreksiz (kısa elyaf, kılcal kristal ve parçacık takviyeli) veya sürekli elyaf takviyeli metal matrisli kompozitler olarak iki ana gruba ayrılır. MMK'lerin mekanik özellikleri takviye malzemesinin boyutu, miktarı ve matris içerisindeki dağılımına bağlıdır. MMK'lerin mekanik özellikleri mukavemet, rijitlik, aşınma, dayanım, kırılma, sönümlenme gibi bilinen diğer geleneksel malzemelere göre daha üstündürler. Bunlara ek olarak, kompozitler tek bileşenli malzemelere kıyasla daha iyi termal, mekanik, yorulma, sürünme dayanımı, kontrol edilebilir termal iletkenlik ve düşük termal genleşme katsayısına sahiptirler. MMK'lerin yapı ve özelliklerinin tespitinde üç önemli faktör etkilidir. Bunlar matris elemanı, takviye fazı ve ara yüzey bağıdır. Takviye elemanlarının asıl işlevi gelen yükü taşımak, matrisin rijitliğini, mukavemetini ve aşınma direncini iyileştirmektir. Matrisin işlevi ise takviye elemanı ve matrisi bir arada tutarak yükü ve gerilimi aktarmak ve ayrıca çoğu takviye malzemesinin gevrek ve kırılma olmasından ötürü yüzeylerini çevresel etkilere karşı korumayı sağlamaktır (Ekici, 2012).

Metal matrisli kompozitler (MMK) matrisi sünek yapıya sahip kompozitlerdir. Bu tür kompozitler, takviyesiz olan metallerle kıyasla daha yüksek ortam sıcaklıklarında kullanıma sahiptirler, takviye işlemi ayrıca özgül rijitliğin, özgül dayanımın, aşınma dayanımının, sürünme direncinin, ısıl iletkenliğin ve boyutsal kararlılığın artmasını sağlar. Bu MMK'ler polimer matrisli kompozitlerle karşılaştırıldıklarında avantajlarından bazıları; daha yüksek kullanım sıcaklıkları, alev almama özelliği, ve organik akışkanlara karşı daha yüksek bozulma direncine sahip olmalarıdır. Metal matrisli kompozitler, PMK' lere kıyasla daha maliyetlidirler ve bu sebeple kullanımları sınırlıdır (Callister ve Rethwisch, 2011).

Metal matrisli kompozitler çok çeşitli geleneksel ve ileri şekillendirme yöntemleri ile; aralarında karıştırmalı döküm, basınçlı döküm, toz metalürjisi (TM), basınçlı sıvı metal süzdürme tekniği, derin çekme, haddeleme, sıcak ekstrüzyon gibi sıcak ve soğuk şekillendirme tekniklerinin mevcut olduğu bir çok methodla şekillendirilirler. Bu şekillendirme yöntemleri katı fazda şekillendirme, sıvı fazda şekillendirme, katı-sıvı fazda şekillendirme olarak üç gruba ayrılabilir. Bununla birlikte, metal matrisli kompozitlerin talaşlı üretimle şekillendirilmesi takviye elemanının hasarına sebep olacağından ve sert

takviye parçacıklarının işlenmesinin ekonomik olmamasından dolayı kullanım alanları kısıtlıdır. Farklı malzeme ihtiyacının gün geçtikçe artması ve bu malzemelerin geniş uygulama alanları malzeme bilimcileri farklı üretim yöntemi bulmaya sevk etmiştir. Bu farklı özellikteki malzemelerin kolay ve uygun maliyette Toz Metalürjisi (TM) yöntemi ile üretilmesi mümkündür (Orhan ve arkadaşları, 2007).

MMK malzemelerin tek bileşenli malzemelerle karşılaştırıldığında tek olumlu yönü yüksek mekanik ve fiziksel özelliklere sahip bir alternatif malzeme oluşu değil, ayrıca kullanılan takviyenin boyutu, hacim oranı, en-boy oranı gibi özelliklerini değiştirerek, istenilen mühendislik uygulamasına göre “ayarlanabilir” mekanik ve fiziksel özelliklerin sağlanmasıdır. Buna ek olarak, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler (functionally graded materials, FGM) gibi ileri malzemeler geliştirilerek belli bir mühendislik parçasının farklı bölgelerinin farklı özellikte olması mümkün kılınmıştır. MMK yapısında farklı matris-takviye kombinasyonları kullanılabilir. Matris malzemesi olarak alüminyum ve alüminyum alaşımları, düşük yoğunlukları, yüksek dayanım ve tokluk, korozyon dirençleri ve kolay işlenebilirlikleri ile yoğun talep gören malzeme sınıfını oluşturmaktadır. Bu avantajlı özelliklerinden dolayı alüminyum matrisli kompozitler (AMK) başta otomotiv ve havacılık-uzay uygulamalarında olmak üzere; otomobil silindir gömleklerinden helikopter kanat bileziklerine kadar çok yaygın bir kullanım sahası bulmaktadır.

1.3.1. Matris Malzemeleri

Matrisin temel fonksiyonu takviye malzemesine yükü aktarmak ve dağıtmaktır. Yükün aktarılması matris ve takviye arasındaki ara yüzey bağına bağlıdır. Belirli uygulama alanı için matris tercihi; yoğunluk, çekme dayanımı, yüksek sıcaklık özelliği ve süneklik gibi unsurlarla birlikte üretim yöntemi ve bunlar arasındaki uyumluluğa da bağlıdır (Nazik, 2013). MMK üretiminde çok çeşitli matris alaşımları kullanılmaktadır. Ama, Al alaşımları bu alanda ilk tercih edilenlerden bir tanesidir. Bu alaşımların seçilmelerinin sebebi düşük yoğunluk ve ergime derecesine sahip olmaları ve bir çok seramik takviye malzemesini kolay ıslatabilmelerinden dolayıdır. Alüminyum matris malzemesinde saf olarak olarak kullanılabilir gibi, alaşım olarak da kullanılabilir. Yüksek aşınma direnci ve düşük sürtünme için ticari Al-Si, düşük yoğunluk ve yüksek termal iletkenlik için Al-Mg ve Al-Cu alaşımı olarak değerlendirilmektedir. Al haricinde en çok kullanılan metal ve alaşımları

sıralayacak olursak, Ti, Mg, Cu, Ni, Pb, Ag, Nb, bronz süper alaşımlar ve intermetaliklerdir (Köksal, 2004).

1.3.2. Takviye Malzemeleri

“MMK malzemelerin üretiminde, kolay temin edilebilirliği, 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” (Toptan, 2006). Takviye elemanları genel olarak rijitlik, dayanım ve yoğunluk değerleri yönünden üstün bir kompozisyon oluşturan seramik malzemelerden tercih edilir. Bununla beraber, SiC, Al₂O₃, B₄C, TiC, TiB₂, MgO, TiO₂, AlN, BN, Si₃N₄ gibi pek çok oksit, karbür, nitrür ve borür takviye malzemesi partikül, visker veya fiber formunda kullanılabilir. Ayrıca, tungsten ve çelik fiberler gibi metalik malzemeler de takviye elemanı olarak kullanılabilir. Tablo 1’de Alüminyum matrisli kompozit malzemelerde kullanılan temel takviye malzemelerinin özellikleri verilmiştir (Toptan, 2011).

Alüminyum matrisli kompozit malzemelerde özelliklere etkiyen önemli parametrelerden biri kullanılan takviye malzemesinin morfolojisidir. Takviye morfolojisi açısından en önemli olanlar sürekli fiberler, kısa fiber ya da viskerler ve partiküllerdir. Genel anlamda, sürekli fiberler, en iyi özellikleri fiber yönlenmesi doğrultusunda sağlamaktadır fakat yüksek maliyetli olması dezavantaj oluşturmaktadır. Kısa fiber veya lifcikler, düzlemsel olarak ya da takviye yönlenmesi doğrultusunda özelliklerde önemli iyileşmeler gösterirken, sürekli fiberlere nazaran daha düşük maliyetlidirler. Partikül takviyeler ise diğerlerine göre daha az özellik artışı ortaya koyarken izotropik özellikleri ve düşük maliyetleri ile avantaj sağlamaktadırlar (Hunt ve Herling, 2004)

Tablo 1. Başlıca takviye malzemelerinin özellikleri, (Toptan, 2011)

Malzeme	Takviye Formu	Elastiklik Modülü (GPa)	Yoğunluk (g/cm ³)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Isıl Genleşme Katsayısı (x10 ⁻⁶ /K)
SiC	Partikül	448	3,21	120	3,4
SiC	Kısa fiber	400-700	3,21	32	3,4
SiC	Fiber	450	3,46		
Al ₂ O ₃	Partikül	410	3,9	25	8,3
AlN	Partikül	350	3,25	10	6,0
B ₄ C	Partikül	450	2,52	29	5,0-6,0
TiB ₂	Partikül	370	4,5	27	7,4
TiC	Partikül	320	4,93	29	7,4
BN	Partikül	90	2,25	25	3,8
Al ₂ O ₃	Kısa fiber (Saffil)	300	3,29		

1.4. Alüminyum ve Alaşımları

Alüminyumun yoğunluğu 2,7 gr/cm³ olup, çelik (7,83 g/cm³) ve bakır (8,93 g/cm³) yoğunluğunun yaklaşık üçte biri kadardır. Mukavemeti çelikten düşük olsa da, kesit artırılarak çeliğe eş değer mukavemet sağlanmaktadır. Birçok konstrüksiyon da alüminyum alaşımlarının kullanılması ağırlıkta azalmaya neden olduğundan diğer metallere kıyasla avantaj sağlamaktadır. Doğru yapılan bir tasarımda alaşımsız çelik yerine alüminyum kullanmak konstrüksiyon üzerinde %50'den daha fazla hafifleme sağlar.

Ticari saflıktaki alüminyum yaklaşık %99,3 Al'dan minimum %99,7'ye değişir. Metalde bulunan başlıca safsızlık elementleri ise demir ve silisyum ile birlikte eser halde bulunabilen titan ve bakırdır. Alüminyum kolaylıkla sıcak olarak haddelenebilir, prestren geçirilebilir veya dövülebilir, soğuk olarak haddelenebilir, çekilebilir.

Bu metalin daha saf olan türlerinde alüminyum oranı %99,99 mertebesindedir. Safsızlık elementlerinin bu tür metallerde mevcut olmayışı fiziksel ve mekanik özellikleri önemli ölçüde etkiler. Saf alüminyum metali reflektörlerin, elektrik iletkenlerinin, gıda ve kimya endüstrisinde kullanılan kaplar ile yapı sanayiinde kullanılan oluk kaplama gibi malzemelerin yapımında kullanılır. Alüminyumun fiziksel özellikleri, Aluminum Development Association tarafından verilen bilgilere göre Tablo 2'de özetlenmiştir (İçin,2013)

Tablo 2. Saf alüminyumun özellikleri, (Sun, 1998)

Atom numarası	13
Atom ağırlığı	26,97 gr/mol
Kristal yapısı	Yüzey Merkezli Kübik (YMK)
Yoğunluğu	2,7 gr/cm ³
Ergime noktası	660 °C
Yeniden kristalleşme sıcaklığı	150 °C-300 °C
Buharlaşma noktası	2450 °C
Özgül ısı	0,224 cal/gr (100 °C)
Elastisite modülü	72x 10 ³ MPa
Poisson oranı	0,33
Kayma modülü	27x 10 ³ MPa
Çekme mukavemeti	40-90 MPa
Akma mukavemeti	10-30 MPa
Kopma uzaması	% 30-40

Alüminyum, hafif ve yumuşak bir metal olup mat gümüşümsü renktedir. Bu renk, havaya maruz kaldığında üzerinde oluşan ince oksit tabakasından ileri gelir. Alüminyum, zehirleyici ve manyetik değildir. Kıvılcım çıkarmaz. Saf alüminyumun çekme dayanımı yaklaşık 49 MPa iken alaşımlandırma ve ısıl işlemlerle bu değer 700 MPa'a çıkar. Makede işlenebilir, dökülebilir; yüksek elektrik, ısıl iletkenliği ve oksitlenmeye karşı dayanıklılığı ile üretimi kolay bir metaldir. Alüminyum saflaştıkça korozyon direnci ve iletkenliği artar. Ayrıca dayanımı yaşlandırma ısıl işlemiyle önemli ölçüde arttırılabilir (Erkal, 2011).

1.4.1. Alüminyum Alaşımları

Alüminyum alaşımları üretim metotları esas alınarak dövme ve döküm olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Plastik deformasyonla şekillendirilen dövme alaşımlar, döküm alaşımlardan oldukça farklı mikroyapı ve bileşimlere sahiptirler. Her ana grup içindeki alaşımlar, ısıl işlem yapılabilir ve yapılamaz alaşımlar olmak üzere iki alt gruba ayrılırlar. Isıl işlem yapılabilir alaşımlar, yaşlandırma işlemi ile sertleştirilebilirken, ısıl işlem yapılamayan alaşımlar ise katı eriyik sertleşmesi, pekleşme ve dağılım sertleştirilmesi ile dayanım kazanırlar (Askeland, 1994). Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması, (Askeland, 1994)

Dövme Alaşımlar		Isıl İşlem
1XXX	Ticari Saflikta Al(>%99 Al)	Yaşlandırılmaz
2XXX	Al-Cu	Yaşlandırılabilir
3XXX	Al-Mn	Yaşlandırılmaz
4XXX	Al-Si veya Al-Mg-Si	Magnezyum varsa yaşlandırılabilir
5XXX	Al-Mg	Yaşlandırılmaz
6XXX	Al-Mg-Si	Yaşlandırılabilir
7XXX	Al-Zn-Mg	Yaşlandırılabilir
Döküm Alaşımlar		
1XXX	Ticari Saflikta Al	Yaşlandırılmaz
2XXX	Al-Cu	Yaşlandırılabilir
3XXX	Al-Si-Cu veya Al-Mg-Si	Kısmen yaşlandırılabilir
4XXX	Al-Si	Yaşlandırılmaz
5XXX	Al-Mg	Yaşlandırılmaz
6XXX	Al-Ms-Si	Yaşlandırılabilir
7XXX	Al-Zn-Mg	Yaşlandırılabilir
8XXX	Al-Sn	Yaşlandırılabilir

1.4.1.1. Alüminyum 2XXX Serisi

Alüminyum-bakır-magnezyum alaşımları, ilk olarak çökeltme sertleştirilmesi yapılabilen alaşımlardır. Çökeltme sertleştirilmesi yapılan ilk alaşım 2017 alaşımıdır. Bu alaşımlar yapı içerisinde özellikle % 4 Cu, % 0,6 Mg ve % 0,7 Mn bulunmaktadır. Yapı içerisinde ağırlıkça bulunan % 4,4 Cu, % 0,5 Mg, % 0,8 Mn ve % 0,8 Si'li 2014 alaşımı yapay yaşlandırmaya 2017 alaşımından daha fazla tepki vermesi için daha sonra geliştirilmiştir. Bugün en çok kullanılan Al-Cu-Mg alaşımlarından biridir. Yüksek dayanım, magnezyum içeriğini % 0,5'den % 1,5'e çıkarmakla elde edilmiştir. Magnezyumun, alüminyum-bakır alaşımlarına ilavesi alüminyum bakır alaşımlarında çökelti sertleşmesini oldukça hızlandırır ve yoğunlaştırır (Avşar, 2011) Yüksek dayanım istenen havacılık sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu alaşımlar katı eriyik ve çökelti sertleşmesiyle dayanım kazanırlar.

Endüstriyel uygulama alanı bulabilmiş en önemli alaşım AA2024 alaşımıdır.

Tablo 4. AA 2024 alaşımının kimyasal bileşimi

Alaşım Elementi	Al	Cu	Mg	Mn
Ağırlıkça Yüzdeleri	93,5	4,4	1,5	0,6

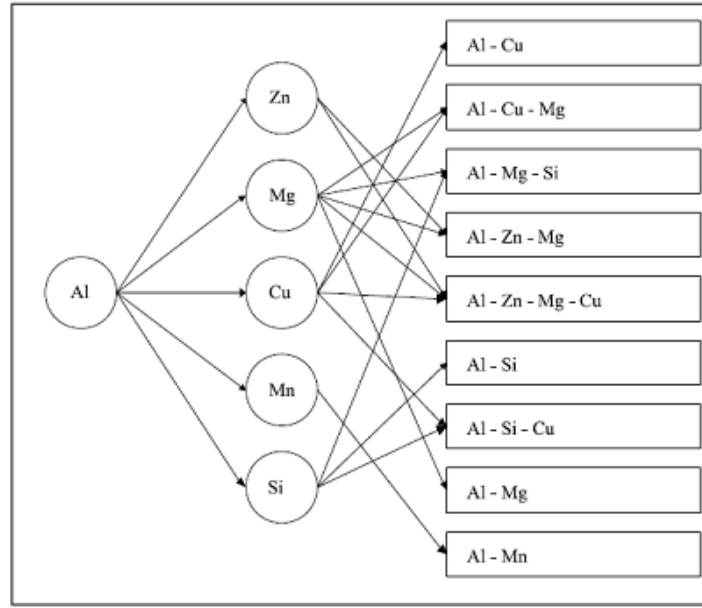
AA2024 alaşımını % 4,5 bakır, %1,5 magnezyum ve %0,6 mangan bulundurur ve çekme dayanımı 442 MPa'dır (Doğan, 1989 ve Meyveci,2007). AA2024 bakırlı bir işlem alaşımı olarak alüminyum alaşımları arasında en sert, elastik modülü ve dayanım değerleri en yüksek olanlarından biridir (Meyveci, 2007). Akma mukavemeti veya elastik modülünün önemli olduğu yerlerde, uçak gövde ve kanatlarında, ortopedik taban, perçin ve çekici tekerlekleri yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır (Karakışlak, 1978). Çözeltiye alma ısıl işleminden sonra oda sıcaklığında doğal veya yapay olarak yaşlanır (Sun, 1998). İçinde Mg bulunması nedeni ile üretimi özel yöntemler ile mümkün olmasına rağmen diğer ısıl işleme tabi tutulabilen alüminyum alaşımlarına göre şekillendirilebilme yeteneği iyidir (Askeland,1994). Bu alaşımın iyi olan fiziksel ve mekanik özelliklerine karşılık korozyona karşı olan dayanımı zayıftır. Talaşlı üretim kabiliyeti iyidir. Kaynak edilebilme kabiliyeti ortadır (Altenpohl, 1998).

Tablo 5. AA 2024 alaşıma uygulanan işlemler sonrası özelliklerindeki değişimler

Özellik	Isıl İşlem					
	T3	T361	T4	T6	T72	T861
Sertlik (BSD)	120	130	120	125	-	-
Alt Çekme Mukavemeti (MPa)	395 - 483	455 - 496	395 - 469	415 - 476	415	485 - 517
Üst Çekme Mukavemeti (MPa)	290 - 345	340 - 393	260 - 324	345 - 1393	315	245 - 490
Elastisite Modülü (GPa)	73,1	73,1	73,1	72,4	72,4	-
Yorulma Mukavemeti (MPa)	138	124	138	124	-	-
İşlenebilirlik (%)	30	70	70	70	-	-

1.4.2. Alaşım Elementlerinin Alüminyuma Etkisi

Alüminyuma katılan alaşım elementlerden ilk beklenen etki, yüksek uzama kabiliyeti ve korozyona direnci gibi faydalı özellikleri kötü yönden etkilemeden saf alüminyumun, düşük akma sınırını yükseltmektir. Alüminyuma katılan başlıca alaşım elementleri magnezyum (Mg), silisyum (Si), bakır (Cu), çinko (Zn) ve bazı durumlarda nikel (Ni) ve titanyumdur (Ti). Alaşım elementleri katılarak elde edilen temel alüminyum alaşımları Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Temel alüminyum alaşımları (Kayabaş,2003)

Alaşım elementleri alüminyum içinde üç farklı halde bulunur;

- 1) Alüminyum içinde katı halde çözünebilirler,
- 2) Katı halde alüminyum içerisinde çözünmeyip veya sınırlı miktarda çözünüp, mekanik bir karışım oluştururlar,
- 3) Bileşik oluştururlar (Gürler, 2000).

Yüzey merkezli kübik yapıya sahip olan alüminyumun kristal kafes yapısına, ancak çok küçük oranlarda bu alaşım elementlerinden alabilir. Yabancı atomlar arayer veya yeralan olarak buldukları kafes sistemi içinde kaymaya karşı direnci artırdıklarından akma dayanımını yükseltirken şekil değiştirme kabiliyetlerini pek fazla etkilemezler. Alaşım elementlerinin miktarının artması durumunda ise bu elementler, alüminyum içinde

çözünmeyen sert ve kırılğan karakterli metaller arası (intermetalik) bileşikler ve ara fazlar oluşturur. Bu durumda mukavemet değerleri daha fazla yükselir ancak şekil değiştirme kabiliyetleri azalır (Kurtuluş, 2001).

Alüminyumla alaşım elementi olarak kullanılan ilk element bakırdır. Bakır, alaşıma sertlik kazandıran başlıca elementtir (Doğan, 1989; Sun, 1998). Döküm alaşımlarında ise en fazla % 12 oranında kullanılır ve bu orana kadar mukavemeti artırır. % 12'den fazlası yapıda gevreklik meydana getirir. Dövme alaşımlarında % 3 ila % 5 oranında kullanılır. % 5'ten fazla kullanılırsa mekanik işleme güçlüğünü artırır. Ayrıca elektrik iletkenliği ve korozyon direncini düşürür (Aydın, 2002). Bakırın alüminyum içindeki çözünürlüğü sıcaklığa bağlı olarak artar. Bu nedenle bakır içeren alüminyum alaşımlarını ısıl işleme çökelme sertleşmesi ile sertleştirmek mümkündür. Çökelme için gerekli zaman, alaşımın bileşimine ve sıcaklık ile ilişkilidir. Çökelmenin mekanik özelliklere yapacağı etki, çökelen faz miktarına, boyutlarına ve dağılımına bağlıdır (Sun, 1998).

Alüminyuma ilave edilen elementler içerisinde Cu'dan sonra en önemli element silisyumdur. Alüminyum içerisinde en fazla % 13 oranında bulunmalıdır. % 13'den fazla silisyum içeren alüminyum alaşımlarının işlenmesi çok zor olmaktadır. Özellikle bakır, nikel ve magnezyum ile birlikte ilave edilirse ısıl işlem görebilen alaşım elde edilir. Fakat bu alaşımların çekme mukavemetleri çok yüksek değildir ve mukavemet artışı silisyum artışı ile orantılıdır (Aydın, 2002).

Önemli alaşım elementlerinden birisi olan magnezyum, Al-Mg alaşımına yüksek mukavemet ve süneklik, mükemmel korozyon direnci kazandırır. % 8'den fazla Mg içeren Al-Mg alaşımları ısıl işleme tabi tutulabilir ve mekanik özellikleri bu şekilde geliştirilebilir. Dövme alaşımlarda % 1 ila % 6 Mg ise şekil verme kolaylığı sağlamak için kullanılır. Genel olarak Mg ilavesi mukavemeti, haddelenebilme kabiliyetini ve işlenebilirliği artırır (Doğan, 1989; Sun, 1998; Aydın, 2002).

Alaşım içinde dökülebilirliği arttırmak için demirle birlikte manganez kullanılır. Manganez aynı zamanda metaller arası bileşiklerin özelliklerini değiştirir. Alaşımların süneklik ve tokluk özelliklerini artırır ve işlenebilirliği olumlu yönde etkiler (Aydın, 2002).

Çinko, alüminyuma ilave edilmesiyle yüksek mukavemete sahip Al-Zn alaşımları meydana getirir. Alüminyum alaşımlarının kopma mukavemeti bu şekilde artar ve haddelenebilme kabiliyeti artar. AA 7075 ve AA 7078 alaşımlarının temel alaşım elementleridir (Sun, 1998; Aydın, 2002; Doğan, 2002). Çinko, sıcak yırtılmaya sebep

olmasına rağmen diğer alaşım elementlerinden olan bakırın ilave edilmesiyle yetersizolan bazı özellikler giderilmiş olur (Sun, 1998). Genellikle magnezyumla birlikte karıştırılarak ilave edildiğinde haddeleme kabiliyetini arttırdığı gibi yüksek çekme ve darbe mukavemeti de kazandırır. Al-Zn alaşımlarında ise % 20'e kadar çinko bulunabilmektedir. Bu alaşımlar genelde uçak sanayinde kullanılan Al-Mg-Zn alaşımları olup Zn ve Mg oranı % 1'den fazladır (Doğan, 1989; Sun, 1998; Aydın, 2002).

Titanyumun tane küçültücü etkisi vardır. Mekanik özelliklerin iyileştirilmesini ve artmasını sağlar. Alüminyuma ilave edilme miktarı en fazla % 20'dir. En iyi etkisi bor ile kullanıldığı zaman görülür. Titanyum, çekme mukavemetini ve sünekliliği artırır ve ısı iletkenliği düşürür (Sun, 1998)

Demir, alüminyum cevheri içerisinde doğal olarak bulunur. Bazı alaşımların sertlik ve dayanımlarını az miktarda arttırmaktadır. Döküm alaşımların sıcak çatlama eğilimini azaltıcı yönde etki etmektedir (Aydın, 2002).

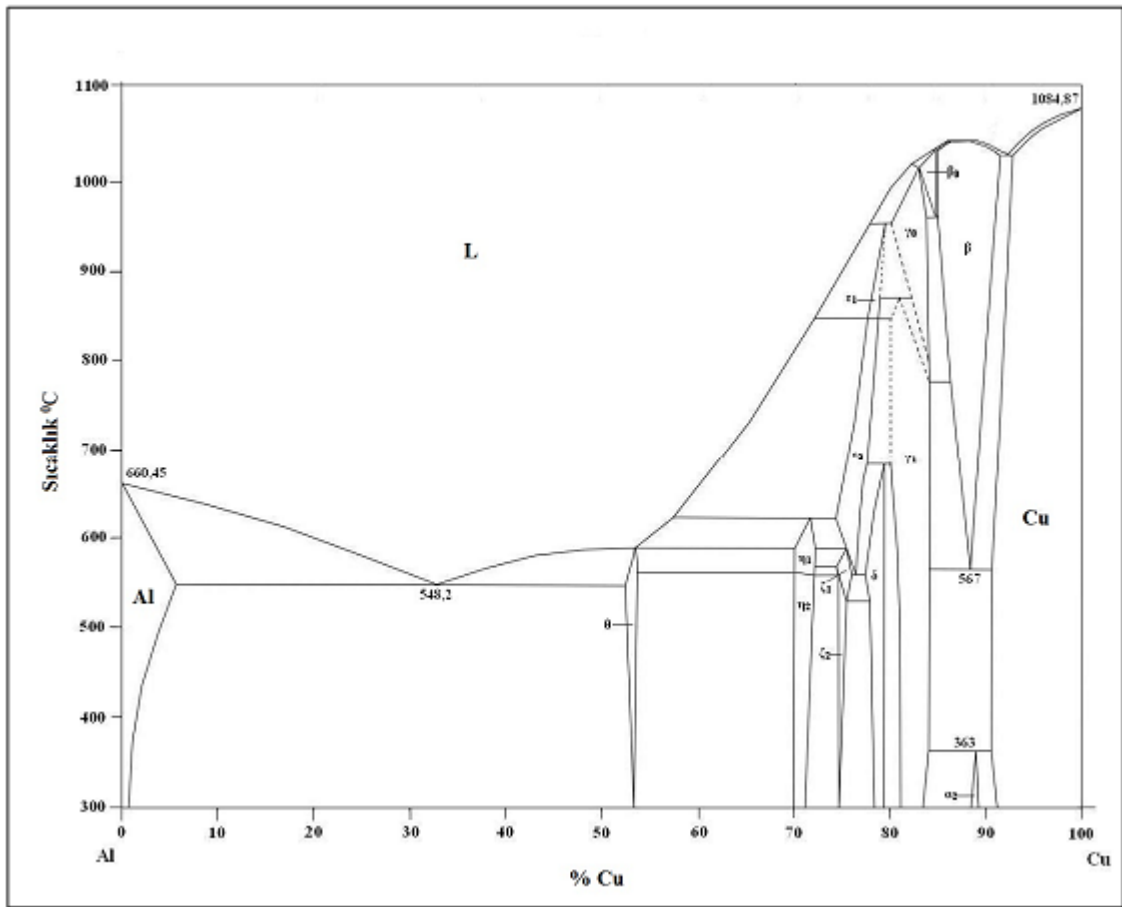
Tablo 6. Alaşım elementlerinin alüminyumun özelliklerine etkisi

Özellikler	Alaşım Elementleri									
	Cu	Si	Mg	Zn	Ni	Co	Ti	Mn	Fe	Cr
Kopma Mukavemeti	+++	++	++	+++	++	++	++			+
Elastik Sınır	+++	++	+	++	+					
Sertlik	+++		+	+	++			++	++	
Isıya Dayanıklılık	+++		+++		++				++	
Kaynak Kabiliyeti	+	+++	++	+	+		++	++		++
Talaşlı İşlenebilirlik	+++	+	++	++	++		+++	++	++	++
Elastisite Modülü	+	+++	+	++	++	+++		++	+	
Süneklilik	+	-	++				++		-	
Döküm Kabiliyeti	++	+++	+	++			++	+	+	
Korozyon Dayanımı	+	++	+++	++				+	-	+++
+++ : Çok İyi, ++ : İyi, + : Ortanın Altında, - : Kötü										

1.5. Alüminyum Esaslı İkili, Üçlü Alaşımların Faz Diyagramları

1.5.1. İkili Alüminyum-Bakır Faz Diyagramı

Al 2024 alüminyum alaşımının ana bileşeni bakır olmakla birlikte, sıcaklığın artmasıyla birlikte katı halde çözünürlüğünde yükselme gösteren faz diyagramına sahiptir. Bu özellikleri sayesinde çökeltme sertleşmesi işlemi Al 2024 alaşımına uygulanabilmektedir.



Şekil 6. Al-Cu ikili alaşım sisteminin denge diyagramı, (Lewandowski, 1989)

1.5.2. Üçlü Al-Cu-Mg Sistemi

Al-Cu-Mg üçlü sistemi, şekillendirilebilen alüminyum alaşımlarının çoğunluğu için önem arz etmektedir. Bu sistem ve faz diyagramı, özellikle diyagramın alüminyumca

Tablo 7. Al-Cu-Mg sistemlerinde değişmeyen reaksiyonlar

Reaksiyon	T (°C)	Ergiyik Metalin Bileşimi	
		Cu (%)	Mg (%)
$S \rightarrow (Al) + Al_2Cu$	549	33	-
$S \rightarrow (Al) + Al_2Cu + Al_2CuMg (S)$	507	30	6
$S \rightarrow (Al) + Al_2CuMg$ (ikili benzeş ötektik)	518	24,5	10,1
$S + Al_2CuMg \rightarrow (Al) + Al_6CuMg_4 (T)$	467	10	26
$S \rightarrow (Al) + Al_6Mg_5 + Al_6CuMg_4$	449	2,7	32
$S \rightarrow (Al) + Al_6Mg_5$	450	-	34

1.6. Alüminyum Alaşımları ve Isıl İşlemler

1.6.1. Isıl İşlem Türleri

“Alüminyum alaşımlarına yapılan ısıl işlemler değişik şekillerde uygulanabilir ve uygulanan işlem TX sembolleri ile alaşım numarasının yanına yazılır. Bu işlemler şu şekilde ifade edilmektedir”:

- “O: Tavlanmış, F : Üretildiği gibi, H: Sertleştirilmiş, T: Isıl işleme tabi tutulmuş
- T1: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve tabii yaşlanmaya bırakılmış.
 - T2: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve tabii yaşlanmaya bırakılmış.
 - T3: Çözeltiye alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş ve tabii yaşlanmaya bırakılmış.
 - T4: Çözeltiye alma işlemi yapılmışve tabii yaşlanmaya bırakılmış.
 - T5: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuşve suni yaşlandırma yapılmış.
 - T6: Çözeltiye alma işlemi yapılmışve suni yaşlandırma yapılmış.
 - T7: Çözeltiye alma işlemi yapılmışve aşırı yaşlandırma yapılmış.
 - T8: Çözeltiye alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmişve suni yaşlandırma yapılmış.
 - T9: Çözeltiye alma işlemi yapılmış, suni yaşlandırma yapılmışve soğuk şekillendirilmiş.
 - T10: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş, soğuk şekillendirilmişve suni yaşlandırma yapılmış” (Eker,2008).

1.6.2. Uygulanan Isıl İşlemler

Isıl işlem, metallerde aranan özellikleri geliştirmek amacıyla uygulanan ısıtma işlemi veya işlemler serisi olarak tanımlanmaktadır. Bir başka deyişle metallere uygulanan ısıtma ve soğutma işlemi gerektiren şartlarda kimyasal bileşiminde değişim meydana gelmeksizin mekanik özelliklerin kontrol edilmesine olanak sağlayan işlemler olarak da tanımlanabilir. (Beton and Rollason, 1958; Doğan, 1989).

Alüminyum alaşımlarına eklenen alaşım elementlerinin ısıl işlem uygulanması sonucunda mukavemeti artırırken, ısıl işlemin uygulanmasına imkan vermeyen bazı alaşım elementlerinin eklenmesi de mümkündür. Bu nedenle, ısıl işleme karşı dövme veya döküm alüminyum alaşımlarının gösterdikleri davranışa göre, ısıl işlem uygulanabilen veya uygulanamayan olarak ikiye ayrılmaktadır (Su, 1988; Doğan, 1989; Yüksel, 1991; Aydın, 2002).

Isıl işlem uygulanabilen alaşım elementleri, yüksek sıcaklıklarda yüksek oranda katı fazda erime kabiliyetine sahip olurken, düşük sıcaklıklarda katı fazda erime kabiliyeti belirli oranda kalmaktadır. Bu özellikler alaşımlara ısıl işlem uygulanmasına olanak sağlamaktadır (Aydın, 2002). “Dövme alaşımları arasında ısıl işleme tabi tutulabilenler grubuna dahil olanlar: 2XXX, 6XXX ve 7XXX serileridir. 2011, 2014, 2017, 2018, 2024, 2025, 4032, 6151, 6061, 6063 ve 7075’dir” (Doğan, 1989; Aydın, 2002).

Alüminyum alaşımlarında yaşlandırma sertleşmesi ısıl işlemde sertlik artışı, ince ve homojen şekilde çökelen ikinci faz çökeltilerinin etkisiyle sağlanmaktadır. Bu sebeple sertleştirme işlemi “çökeltme sertleşmesi” olarak tanımlanmıştır. Çökeltme sertleşmesi, demir dışı metallerde mukavemet artırma yöntemlerinden biridir. Başlıca uçak sanayisinde kullanılan alüminyum alaşımlarının sertleştirilmesi de bu işlemle gerçekleşmektedir. Bu ısıl işlem sayesinde mekanik özelliklerle birlikte manyetik ve iletkenlik özelliklerini de değiştirmektedir. Bu sebeple çökeltme sertleşmesi ısıl işlemi, elektronik malzemelerin özelliklerinin iyileştirilmesi için de tatbik edilmektedir (Çimenoğlu vd, 1989; Sun, 1998).

Yaşlandırılabilir özellikte olan önemli alüminyum alaşımlarından Al 2024, sıcak ekstrüzyon ve haddeleme ile üretilmektedir. Alüminyum alaşımları arasında en yüksek sertlik değeri, mukavemet ve elastisite modülüne sahip alaşımdır. Uygulama alanı olarak uzay, uçak yapımlarında, ortopedik tabanlarda, perçin ve çekme tekerleklerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu alaşımlara doğal ve yapay yaşlandırma uygulanabilmektedir. Al 2024 alaşımı bünyesinde magnezyum bulunmaktadır. Bu nedenle özel üretim

yöntemleriyle üretilirler. İyi şekillendirilebilme kabiliyetine sahiptirler. Diğer alaşımlarla karşılaştırıldıklarında daha iyi fiziksel ve mekanik özellik göstermektedir (Kaçar ve arkadaşları., 2003).

Çökelti fazlarının oluşmasıyla mekanik özellikleri iyileştirilen yaşlandırılabilir alüminyum alaşımlarında çökelti farklı alaşım sistemleri için farklı bileşiklerden oluşmaktadır.

Bunları aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz.

- a) Al-Cu alaşımları, CuAl_2 bileşiği ile mukavemet kazanır.
- b) Al-Cu-Mg alaşımları, Mg'un yoğun olarak bulunduğu bileşiklerle mukavemet kazanır.

1.6.3. Alüminyum Alaşımlarının Sertleştirilmesi

Yaşlandırma sertleşmesi veya çökeltme sertleştirilmesi, 19. yüzyılın başlarında Alfred Wilm tarafından Almanya'da keşfedilmiştir. Alfred Wilm, bünyesinde %2 Cu içeren alüminyum alaşımına, sertleştirme sağlamak amacıyla çeliklere uygulanan ısı işlem aynı biçimde uygulanmıştır. İlk olarak yumuşak olan alaşımın ısı işlem sonrasında doğal yaşlandırma sonrasında sertliğinin arttığı belirlenmiştir. Bunun nedeni 1911 yılına kadar açıklanamadı. Yaşlandırma sertleşmesi ısı işleminin amacı, dislokasyon hareketini engelleyerek alaşımın sertliğini, akma mukavemetini, çekme mukavemeti gibi mekanik özelliklerinin artırılmasına olanak sağlamaktır. Bu alaşımlarda ısı işlem yoluyla elde edilen yüksek dayanım, ikinci çökelti faz taneciklerinin dislokasyon hareketindeki etkileşimden ötürü meydana gelmektedir. İkinci faz çökeltilerinin kafese bağlı uyum durumlarına göre çevrelerinde meydana gelen ve çarpılmalar sonucu ortaya çıkan gerilme bölgeleri ile dislokasyon hareketlerini engeller. Kafes yapısı ile uyumlu olmayan çökeltelerde gerilme alanı, kafese bağlı çökeltilere göre daha küçük olduğundan uyumlu yapılar sertleşme üzerinde daha etkin rol oynar (İçin, 2013).

1.6.3.1. Yaşlanma Isıl İşlemi

Yaşlandırma ısı işlemi, genel anlamda demir dışı metallerin dayanımını iyileştirmede uygulanan dikkate değer methodlardan biridir. Mesela, uçak sanayisinde

kullanılan hafif alüminyum alaşımlarına sertleştirme yaşlandırma ile yapılmaktadır. Bununla beraber, bu yöntemle ultra-yüksek dayanımlı çelikler sertleştirilmektedir. Buna yaygın bir örnek olarak yüksek dayanımlı çelikler (Maraging Steel) gösterilebilir. Bu çelikler, yaşlandırma ısıl işlemi sonrasında yüksek mukavemet ve tokluk özelliklerine sahiptirler. Yaşlanma, malzemeyi solidüs eğrisinin üstünde bir sıcaklıkta aşırı doymuş katı halden, yaşlandırma süresi ve sıcaklığının etkisiyle yeni bir fazın çökmesiyle malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileşme göstermesidir.

Yaşlanma İşlemi: “Yaşlanma, ancak denge diyagramlarında solvüs eğrisi bulunan alaşımlarda ve sadece solvüs eğrisinin sınırladığı katı eriyik bileşimlerinde meydana gelebilir. Yani, alaşım elementinin çözünme miktarı sıcaklıkla artmalıdır. Yaşlanma meydana gelebilmesi için başlıca iki kademe mevcuttur. Bunlar sırasıyla; çözeltiye alma ve çökeltme işlemidir”(Callister, 2007).

Yaşlandırma setleşmesi ısıl işlemi, ince parçacıklar şeklindeki yeni ve sert fazın ortaya çıkması neticesinde meydana gelir. Başka bir ifadeyle, matris fazı içerisinde küçük boyuttaki ikinci faz parçacıklarının homojen bir biçimde dağılmasını sağlandığı bir ısıl işlem yöntemidir.

Alaşım sistemlerine yaşlandırma sertleşmesinin uygulanabilmesi için üç önemli kriter vardır. Bunlar;

- 1) Belirli bir sıcaklıkta bir elementin diğer element içerisinde çözünürlüğü tek bir eriyik fazına sahip olması gerekir. Örneğin; Al – Cu faz diyagramında solvüs eğrisinin üzerindeki α fazı bu özelliği sağlar.
- 2) Ana element içindeki çözünen elementin çözünme sınırının, sıcaklığın düşmesiyle birlikte çözünürlüğünün hızla azalması gerekir. Yani alaşımın faz diyagramının solvüs eğrisi içermesi gerekir.
- 3) Alaşım sisteminin, katı eriyik fazı, oda sıcaklığında yavaş soğutulduğunda iki farklı katı faza dönüşmesi gerekir. Örneğin; Al – Cu denge diyagramında solvüs eğrisinin altında yapı $\alpha + \beta$ katı fazlarına dönüşür.

Çökeltme sertleşmesi görülen bazı metallerin alaşımları aşağıdaki Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Çökeltme sertleşmesi uygulananabilen alaşım sistemleri

Metal	Alaşım
Al	Al - Mn
	Al - Cu
	Al - Mg - Si
	Al - Zn - Mg - Cu
	Al - Mg
	Al - Zn - Mg
	Al - Cu - Mg
Cu	Cu - Be
	Cu - Co
Fe	Fe - C
	Fe - N
Ni	Ni - Cr - Ti - Al

Çökeltme sertleşmesi alaşım sistemlerini uygulanması üç aşamada gerçekleşir.

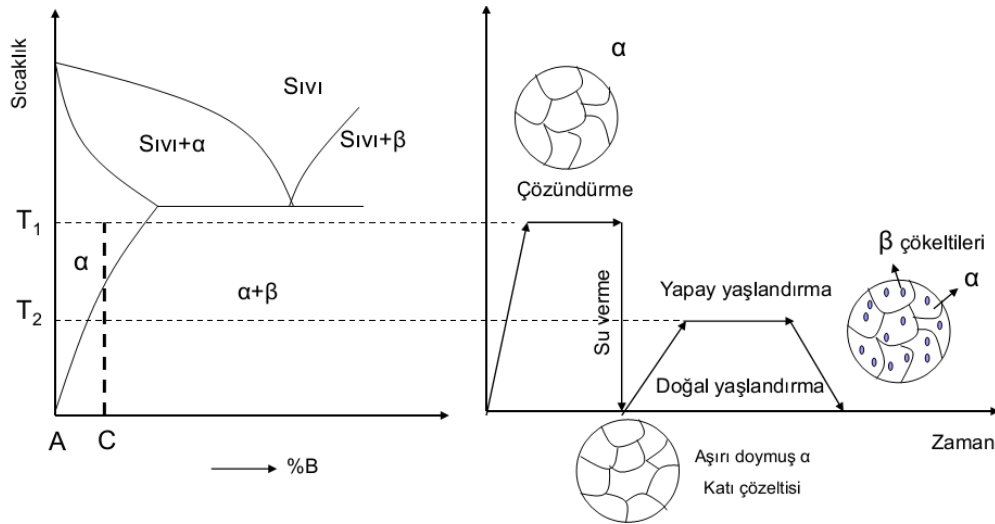
- 1) Katı çözeltili alma
- 2) Hızlı soğutma (su verme)
- 3) Yaşlandırma

1.6.3.1.1. Çözeltili Alma İşlemi

Çözeltili alma işleminin amacı, aşırı doymuş tek fazlı çökecek fazı içeren bir katı eriyik oluşturmaktır. Bu işlemin amacı, çökecek fazı içeren aşırı doymuş tek fazlı bir katı eriyik elde etmektir. Bunu işlemi gerçekleştirmek için şekil 9'daki C bileşimine sahip yaşlandırılabilir alaşım ilk olarak solvüs eğrisinin üzerinde T_1 gibi bir sıcaklığa ısıtılır ve bu sıcaklıkta ikinci faz (Θ fazı), α katı eriyiği içinde tamamen çözülünceye kadar bekletilir. T_1 sıcaklığında yapı tamamen α 'ya dönüştükten sonra alaşım ani olarak soğutulur. Aniden soğutma işlemi Θ fazının çökmesine olanak vermez ve aşırı doymuş α katı meydana gelir. Bu durumda α katı eriği kararsızdır. Buna ilaveten, ani soğuma sonucu yapı içerisinde çok fazla miktarda atom boşluğu da bulunmaktadır (Callister, 2007).

Yaşlandırma sertleşmesi ısı işleminin ilk aşaması olan çözeltili alma işleminde yapı tek fazlı bir katı çözeltili içerisinde çözünen atomlardan oluşur. Şekil 9'da C bileşime sahip bir alaşımı ele alırsak, çözeltili alma işlemi alaşımın oda sıcaklığında α fazı ile birlikte bulunan β fazının tamamıyla çözüldüğü, α fazı bölgesinde T_1 gibi bir sıcaklığa kadar ısıtılır ve bu sıcaklıkta belirli bir süre (25 mm kalınlık için yaklaşık olarak 1 saat)

beklenme işlemiyle α fazı içerisinde β fazının tamamen çözünmesi sağlanır. Katı çözeltiliye alma ısıl işleminde, işlem parametreleri bileşim, ısıtma hızı, sıcaklık ve bekleme süresidir. Mesela, çözeltiliye alma sıcaklığı Al – Cu alaşımlarında 465 – 565 °C sıcaklıkları arasındadır. Çözeltiliye alma işleminde ısıtma işlemi Al_2Cu fazının tamamen çözünebilmesi için yavaş yapılmalıdır. Bununla birlikte hızlı ısıtma işlemi uygulanırsa bu faz tamamı ile çözünmez. Bu yapıdaki alaşım, ötektik sıcaklığına veya üzerine ısıtıldığında matris ile Al_2Cu fazının ara yüzeyinde ergime meydana gelecektir. Bu koşullarda alaşıma su verme işlemi uygulanırsa yapı içerisinde ince ötektik rozetleri ortaya çıkacaktır. Çözeltiliye alma işlemi düşük sıcaklıkta yapılması halinde ise ikinci fazın tamamen çözünmesine olanak sağlamayacak ve alaşım yumuşama gösterecektir.



Şekil 9. Doğal ve yapay yaşlandırma kademelerini gösteren ısıl işlem diyagramları

1.6.3.1.2. Hızlı Soğutma (Su Verme)

Su verme işlemi, çözeltiliye alma işleminin ardından alaşım, yayınmaya ve bu sebeple β fazının yeniden oluşmasına imkan tanımaksızın yüksek bir hızla ve bir çok alaşım için oda sıcaklığı düzeyinde sıcaklığa ani olarak soğutulur. Böylelikle, β atomları ile aşırı doymuş, kararsız α katı çözeltilisi oluşturulur. Bu halde alaşım kayda değer oranda yumuşak ve düşük mekanik özellikte olur.

Yaşlandırma ısıl işleminde en önemli aşamalardan biri su vermedir. Su verme işleminde amaç çözeltiliye alma işlemiyle meydana gelen aşırı doymuş katı eriyiğin ani

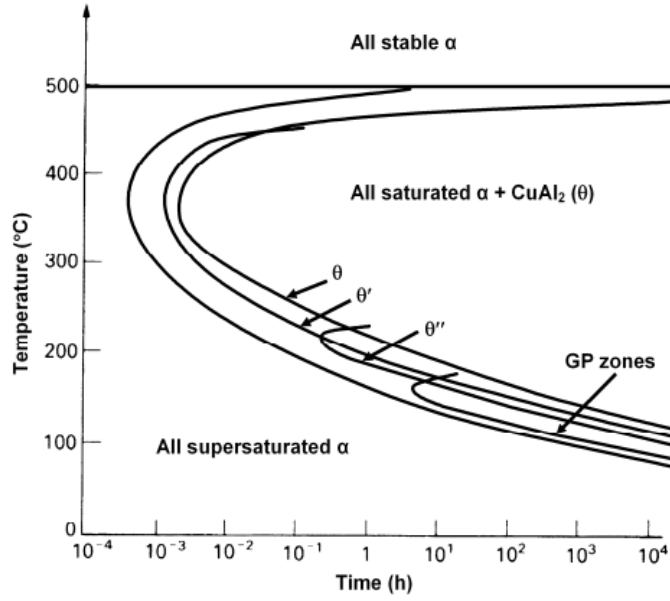
soğuma ile toparlanmasına izin vermeden korunarak oda sıcaklığına soğutulmasını sağlamaktır (Aydın, 2002). Su verme işlemi yapılmazsa tane sınırlarında ve kayma düzlemlerinde katı eriyikler çökerek şekil değiştirme kabiliyetinde azalma ve taneler arası koroyon mukavemetinde düşme meydana gelir (Karakışlak, 1980; Doğan, 1989).

Şekil 9'daki faz diyagramında gösterildiği üzere hızlı su verme işlemi T_1 sıcaklığında yapılmaktadır. “Çözeltiye alınan alaşımın su verilmesiyle oluşan aşırı boşluk konsantrasyonu beklenen denge difüzyonundan daha hızlı difüzyon oluşması ile çözünen atomlar toparlanarak GP (Guiner-Preston) bölgelerinin oluşmasına neden olurlar” (Aydın, 2002). Hızlı soğutma işlemi sırasında çökme oluşumunu sağlamak için su verme ortamının düşük ısı absorbe etme katsayısına sahip olmalı ve fırın ile soğutma ortamı arasında mesafe minimum yapılarak su verme işlem süresi en aza düşürülmelidir. Uygulamada hızlı soğutma işlemi maksimum su verme gecikmesi ve maksimum su sıcaklığı ile kontrolü sağlanmaktadır (Karakışlak, 1980; Doğan, 1989).

Su verme ortamına malzemeler fırından mekanik olarak veya otomatik olarak gönderilebilir, ancak burada önemli olan nokta maksimum su verme gecikme süresini geçmemelidir. Standartlara göre bu süre, fırın kapısının açılmasından malzemenin su verme ortamına daldırılmasına kadar geçen süredir. Müsaade edilen maksimum süre, oda sıcaklığında havanın hızı, sıcaklık ve parçaların kesitlerine bağlıdır (Karakışlak, 1980; Doğan, 1989).

Hızlı soğutma işleminde su verme aralığı ve su verme ortamı kritik faktörlerdir. Su verme aralığı mümkün olduğunca azaltılmalıdır. Su verme aralığı, 10 ile 20 saniye arasında kısa sürelerde olmalıdır (Doğan, 1989).

Hızlı soğutma işlemi ile en iyi maksimum mukavemet ve tokluk malzemeye kazandırılır. Buna ilave olarak, hızlı su verme, çözeltiye alma işleminin etkisinin kalıcılığını artırmak suretiyle yaşlandırma sertleşmesinin daha etkili olmasını sağlayacaktır. Su verme işleminin gerçekleşme hızına bağlı olarak malzemenin mukavemeti de orantılı olarak artacaktır (Doğan, 1989; Aydın, 2002). Mukavemet artırma işlemleri kırılmalardan korunmak amacıyla su verme işleminden hemen sonra veya mümkünse 24 saat içinde yapılmalıdır (MMO, 1978; Doğan, 1989).

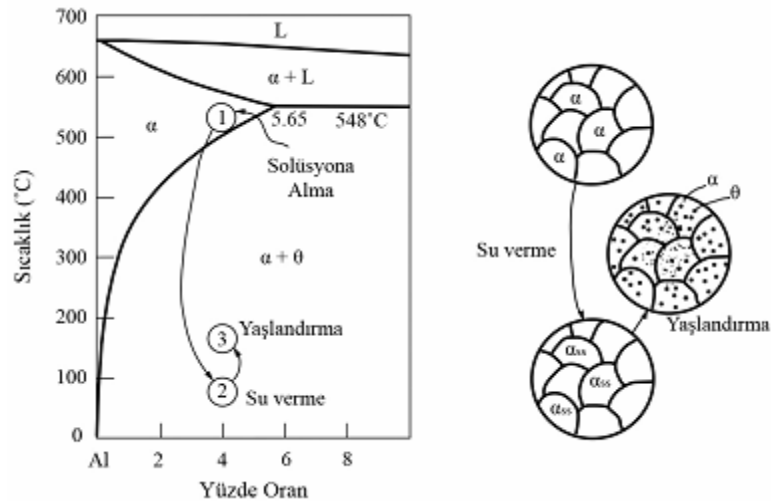


Şekil 10. %4 Cu içeren Al - Cu alaşımının TTT diyagramı

1.6.3.1.3. Yaşlandırma Isıl İşlemi

Isıl işlemin son aşaması çökeltme veya yaşlandırma ısıl işlemi olarak tanımlanır ve aşırı doymuş katı çözelti halindeki alaşımın Şekil 10'da gösterilen $\alpha + \beta$ ikili faz bölgesinde T_2 ile belirtilen ve yayınının yeterince gerçekleşebileceği bir sıcaklığa kadar ısıtılmasını içerir. Bu sıcaklıkta C bileşimindeki β çökelti fazı, α aşırı doymuş katı faz içinde dağılmış ince küresel parçacıklar şeklinde oluşmaya başlar ve bu işlem yaşlandırma olarak adlandırılır. T_2 sıcaklığında yeterli sürede bekletildikten sonra alaşım oda sıcaklığına soğutma işlemi yavaş yapılır (İçin,2013).

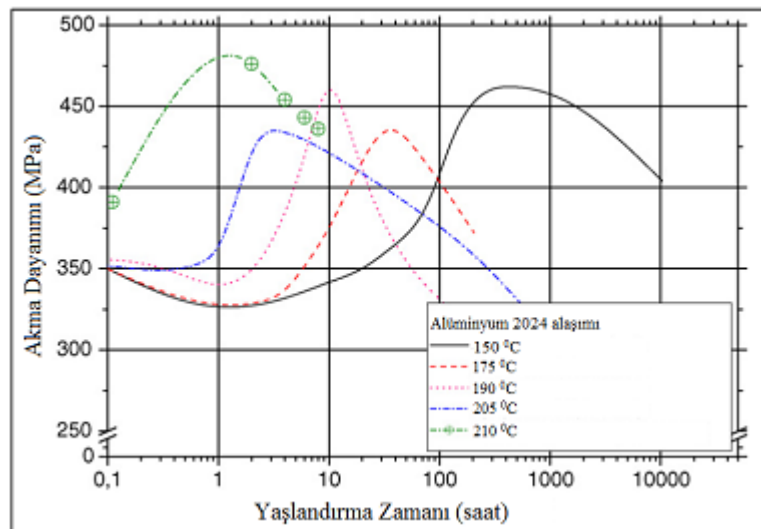
Aşırı doymuş katı eriyiğin solüsyona alınması ve hızlı soğutmadan sonra oda sıcaklığında (doğal yaşlanma) veya denge solvüs eğrisinin altında (suni yaşlanma) bir sıcaklıkta çökelmeye alınması olayı yaşlandırma veya çökeltme ısıl işlemi olarak bilinir. Bir başka deyişle aşırı doymuş bir katı fazdan zaman ve sıcaklık etkisiyle yeni bir fazın ortaya çıkmasına çökeltme sertleşmesi (yaşlanma) adı verilir. Şekil 12'de görüldüğü gibi çözeltiye alma işleminde takiben su verme işlemi ve son olarak yaşlandırma işlemi yapılmaktadır.



Şekil 11. Al-Cu faz diyagramı ve Al % 4 Cu alaşımının çözeltiye alma işlemi, su verme ve çökeltme sertleşmesi safhalarında mikro yapı değişimleri (Erdoğan, 1996)

Yaşlandırma ısıl işlemi T_2 sıcaklığına ısıtılma işlemi yapmaksızın oda sıcaklığında uzun süre bekletilerek doğal yaşlandırma adı verilirken, bu işlem T_2 sıcaklığında belirli sürelerde yapılır ise yapay yaşlandırma olarak adlandırılır.

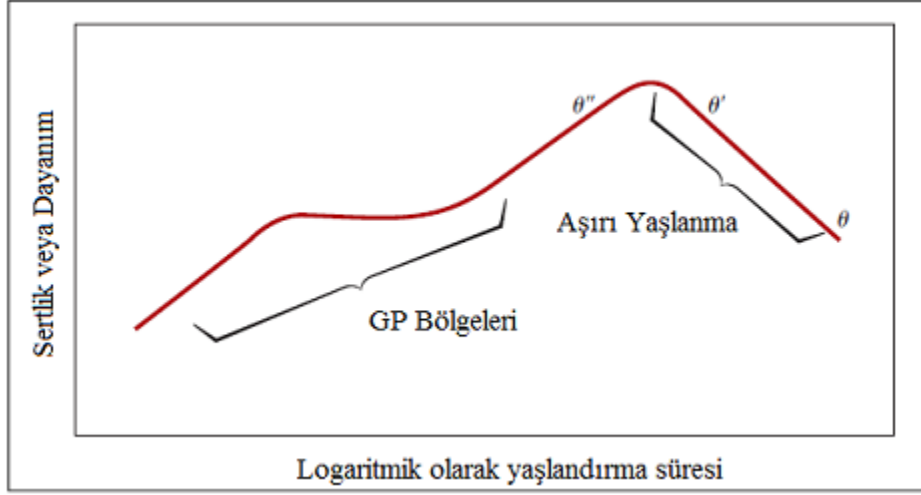
Yaşlandırma ısıl işlem süresi arttıkça, mukavemet ve sertlik değerleri de artış gösterir fakat maksimum bir değere ulaştıktan sonra azalmaya başlamaktadır. Yaşlandırma süresi uzun tutulur ve bunun sonucunda malzemenin mukavemet ve sertlik değerlerinde azalma meydana gelirse bu durum aşırı yaşlandırma olarak adlandırılır.



Şekil 12. Alüminyum 2024 alaşımının akma dayanımının yaşlandırma sıcaklığına ve süresine göre değişimi, (Nikolaos, 2009)

“Çökelti sertleşmesinin temel mekanizması çözünen atomların uyumlu bir topluluk meydana getirmesini sağlamaktır. Bu oluşum ile bir araya toplanan çözünen atomlar bir taraftan matris kristal yapısına uyum gösterirken atom boyutları arasındaki farktan dolayı büyük miktarda gerilme meydana gelir. Bu nedenle çökeltinin gerilmealanının varlığı malzemede dislokasyon hareketine engel olduğundan malzemeye daha fazla mukavemet veya gerilme kazandırır. Malzeme mukavemetinin artmasında önemli bir etki ise çökelti veya çözünen atom gruplarının uyumlu veya uyumsuz olmasına bağlıdır. Çökeltinin ilk safhalarında ikinci faz tamamen oluşmakta, fakat ikinci fazınkine benzer bir kristal yapısı katı ergiyikle sıkı temas halinde büyümektedir. İki yapı arasındaki atom dizilişi uygun ise katı ergiyik distorsiyona uğramaktadır. Bu küçük boyutlu çökelti parçacıkları ilk olarak 1938'de Guinler Preston tarafından x ışınları ile bulunmuştur. Bundan dolayı bu ön kademe çökeltilerine literatürde GP zonları denir” (Doğan, 1989). Guiner-Preston (GP) bölgesi olarak bilinen çözünen atomların çökeltileri kristal ve mikro yapıda değişiklik nedeniyle malzeme özelliklerinde önemli derece de etkili olurlar. GP bölgesinin boyutu, şekli ve dağılımı; alaşımın kimyasal bileşimi, uygulanmış olan mekanik ve ısıl işleme bağlıdır. GP bölgeleri X ışınları ile tanımlanabilirken bazı durumlarda elektron mikroskoplarıyla ile görülebilir. “Çözen ve çözünen atom boyutlarının birbirine yakın olduğu durumlarda GP bölgeleri küresel şekildedir (Al-Ag ve Al-Zn). Ancak atom boyutları arasındaki fark büyükse (Al-Cu sistemi) GP bölgesi disk şeklinde olur. GP bölgeleri boyut itibarıyla yaklaşık 100 \AA çapında $10-15 \text{ \AA}$ yüksekliğinde olup açıkça yeni bir faz veya yeni bir kristal yapı oluşturmaktan ziyade matris kafesinde distorsiyona uğramış bir bölge oluştururlar. Bu tür oluşum tamamen dengeli bir yapı oluşturduğundan mikro yapıda önemli bir değişim olmadan ürettikleri geniş bir deformasyon ve dislokasyon hareketlerini kısıtlayan gerilme alanlarının oluşturmalarından dolayı malzemenin mekanik özelliklerini artırır” (Doğan, 1989; Aydın, 2002).

“Alüminyum alaşımlarına uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi esnasında çeşitli bölgeler oluşmaktadır. Bu bölgeler; GP-1, GP-2, θ^{11} ve θ^1 bölgeleri olarak sıralanmaktadır. Alüminyum-bakır içeren alaşımların çoğunda GP-1 bölgeleri (100) düzlemleri boyunca alüminyum matris kafes yapısıyla uyumlu zengin bakır içeren yaklaşık 100 \AA uzunluğunda ve birkaç atom kalınlığında bakır atomları kümeleri şeklindedir. Bakır atomunun atomik yarıçapı (r) alüminyumun atomik yarıçapından küçük olmasından dolayı ($r_{Al}=0,143 \text{ nm}$, $r_{Cu}=0,128 \text{ nm}$) GP bölgesinin çevresindeki matris düzlemi bakır katmanına doğru yaslanır” (Aydın, 2002).



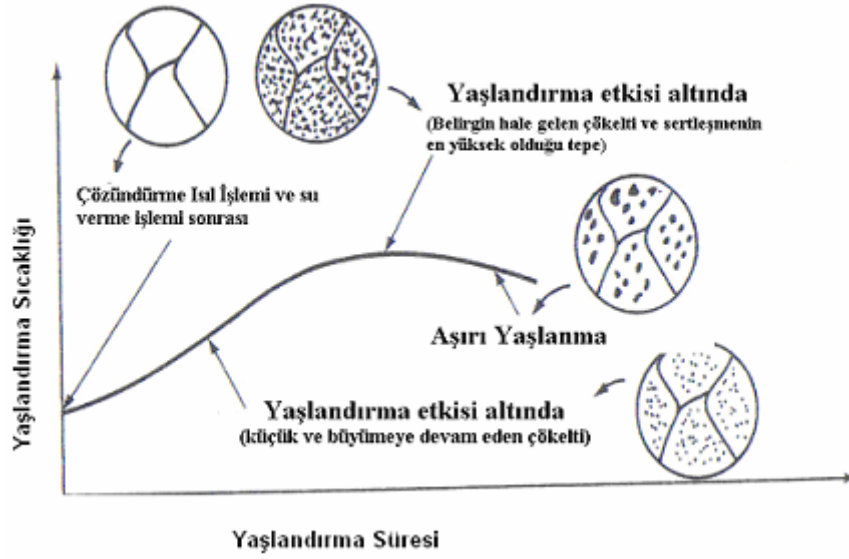
Şekil 13. Çökelme sertleştirme ısıl işleminin yaşlandırma aşamasında alaşımın sertlik ve dayanım özelliklerinin yaşlandırma süresinin logaritmik değeri ile değişiminin şematik olarak gösterilişi

“GP-2 bölgeleri GP-1 bölgelerinden daha kalın (yaklaşık olarak 150 \AA) ve daha geniş (yaklaşık olarak 1500 \AA) çapta tetragonal kristal yapılı disk şeklinde çökelen parçacıklardan oluşur. GP-2 bölgeleri Al ve Cu atomları Cu_2Al_5 bileşiği kapsayan bir yapı meydana getirirler” (Aydın, 2002).

“Gerilme yaşlandırması, uyumlu çökelti mesafelerinin düzenlenmesini kontrol etmede en önemli yöntemlerden biridir. Çökeltilerin anizotropik dağılımı yaşlandırma esnasında gerilim uygulayarak belirlenebilir. Bu anizotropik dağılım iki fazlı malzemenin anizotropik davranış göstermesini sağlar” (Aydın, 2002).

“Al-Cu alaşımında, çökelti fazı (θ^1) tetragonal kristal yapıya sahiptir. $A\theta^1=4,04 \text{ \AA}$ ve $\text{Cu}\theta^1=5,80 \text{ \AA}$ matrisin $AA1=4,049 \text{ \AA}$ dur. Bu θ^1 fazı ve matris (Al) arasındaki yapısal farklılık düzensiz çökelti oluşumuna sebep olur” (Aydın, 2002).

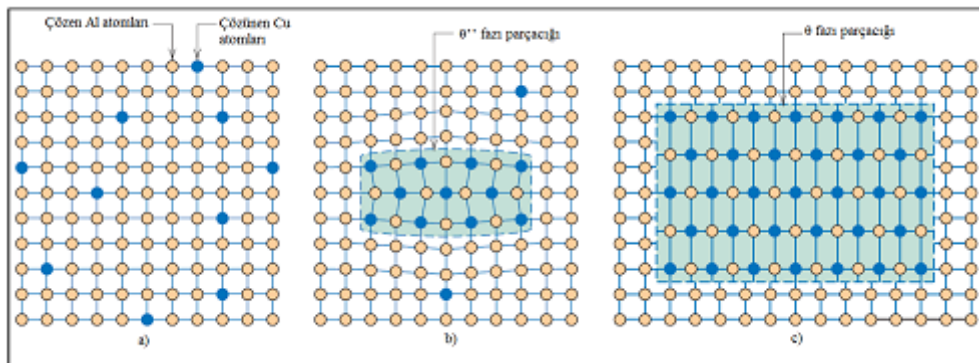
“Yaşlandırma ısıl işlemi sayesinde elde edilen maksimum özellikler θ^1 bölgesinde elde edilir. Isıl işleme devam edildiğinde çökeltilerin boyutları ve dağılımı ideal olmaktan çıkarak komşu çökeltelerde birleşip aşırı derecede büyürler (Şekil 14). Bu durumda oluşan bölgeler θ bölgeleri olarak bilinmektedir. Çökeltilerin aşırı derecede büyümesinden, çökelti arası mesafe de artmaktadır. Bu durumda oluşan çökelti arası mesafe dislokasyon hareketlerini önleyemeyecek durumdadır. Böylece alaşım θ^1 bölgesinde kazanmış olduğu üstün özellikleri θ bölgesinde kaybeder” (Aluminium, 1967; Aydın, 2002).



Şekil 14. Yaşlandırma ısıl işlemi aşamaları ve mikro yapıları, (Askeland, 1998)

“Çökeltmenin başlangıcında çökelti boyutları çok küçük olduğundan deformasyon sırasında dislokasyon hareketine engel teşkil etmezler ve bu sebeple malzemenin sertliğinde önemli bir değişiklik olmaz. Fakat çökeltinin boyutları arttıkça; çökelti dislokasyon hareketi için engel teşkil ederler ve malzemenin mukavemeti artar” (Doğan, 1989).

Yaşlanma süresi arttıkça sertlik değerinde azalma meydana gelir. Bu durumda çökeltinin yapısı θ' veya θ'' 'dir (Doğan, 1989). Şekil 15’de ise yaşlandırma ısıl işlemi atomik düzeyde mekanizmanın nasıl gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 15. Yaşlandırma sırasındaki çeşitli ara durumların gösterimi a. Çözünen atomun çözen atom içerisindeki dağılımı, b. Kendisini çevreleyen matris ile uyumlu çökelti, c. Kendisini çevreleyen matris ile uyumsuz çökelti (Askeland, 1998).

1.6.3.1.4. Çökeltme Sertleştirilmesi Isıl İşleminde Dislokasyon Hareketleri

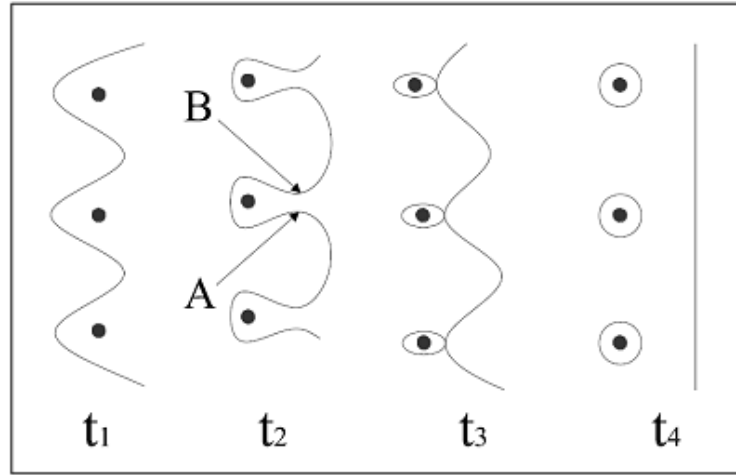
Bir metalin dayanımı, dislokasyonların çoğalması ve hareketleri ile kontrol edilir. Yaşlanma ile sertleştirilen bir alaşımın yüksek mukavemeti, dislokasyonlar ile dağılmış olan çökelti fazlarının karşılıklı etkileşimlerinin neticesinde ortaya çıkmaktadır. Sonuç itibarıyla, uyumlu bir ikinci faz çökeltmesi, en mükemmel mukavemet artış mekanizmasını sağlaması muhtemel yöntemlerden biridir.

Kayan dislokasyonların dağılmış parçacıklarla etkileşimi Δt olarak ifade edilebilen miktarda kritik kayma gerilmesini arttıracaktır. Teorik çalışmalar, Δt 'yi dislokasyon-partikül etkileşim parametrelerinin bir fonksiyonu olarak belirlemiştir. Dislokasyon-partikül etkileşimini üç aşamada gerçekleştirir. Bu aşamalar, dislokasyonların dağılmış olan parçacıklarının ne şekilde nüfuz ettikleri esasına göre yapılmaktadır.

Dislokasyonlar,

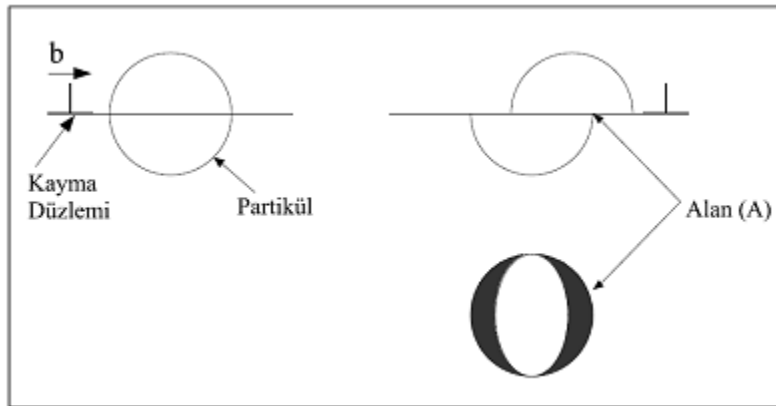
- 1) Partikülleri halkaya alırlar,
- 2) Partikülleri keserler ve
- 3) Partiküllerin etrafında çapraz kayarlar.

“Partikül halkalanmasının anlaşılması için Şekil 16’da oldukça faydalı bir şekildir. Bu şekil, bir dislokasyonun çökelti partikülleri ile karşılaştığı yerde partikül arkasına doğru nasıl kavis yaptığını göstermektedir. Uygulanan kayma gerilmesinin artmasıyla t_2 zamanında Şekilde gösterilen A ve B noktalarında tekrar birleşmek üzere dislokasyonel kavis yapmaya devam ederler. Burada A noktasındaki dislokasyon davranışının B ile ters olduğuna dikkat etmek gerekir. Sonuçta, eğer bu dislokasyon parçaları karşılaşırlarsa yok olacaklar ve ana dislokasyonun Şekilde t_3 zamanı ile gösterildiği gibi halkalanmış dislokasyondan ayrılmasına yol açacaktır. Dislokasyonlar her zaman bir partikülü geçmeye çalışırken bu tür halkaları partikül etrafında bırakacaklardır” (İçin, 2013)



Şekil 16. Çökelti partiküllerinin bir kolonu ile etkileşen bir dislokasyon çizgisi

“Yukarıdaki mekanizmada, direkt partikül-dislokasyon teması noktalarında dislokasyonların durdurulacağı şekilde partikül ve dislokasyon arasındaki itme kuvvetinin yeterince büyük olduğu kabul edilmektedir. Ancak, bazı durumlarda dislokasyonun çökeltinin içinden kayması veya geçmesi mümkündür. Şekil 17’de gösterildiği gibi böyle birdurumda partikül, dislokasyon kayma düzlemiyle b kadar bir mesafede kayar. Bu mekanizmaları iki alt gruba ayırmak mümkündür. Dislokasyon partikül etkileşim mesafesi $10b$ ’den daha kısa ise bu tür etkileşim kısa mesafeli etkileşim, eğer bahsedilen mesafe $10b$ ’den daha büyük ise uzun mesafeli etkileşim olarak adlandırılmaktadır” (İçin, 2013).



Şekil 17. Bir dislokasyonun kayma hareketi ile bir partikülün kesilmesi

1.7. Bor Karbür (B₄C)

Bor karbür, son yıllarda dikkat çeken seramik malzemeler (alumina, silisyum karbür, silisyum nitrür, elmas, kübik bor nitrür) arasında önemli bir yere sahiptir. İleri teknoloji uygulamalarında yoğun tercih edilmesine sebep olan özellikler: yüksek sertlik, yüksek ergime noktası, kimyasal etkenlere karşı gösterdiği yüksek direnç, yüksek nötron absorblama kabiliyeti, iyi mekanik özellikler ve düşük yoğunluktur. Bu tür malzemelerin en büyük dezavantajlarından biri düşük kırılma tokluğuna sahip olmasıdır.

Bünyesinde yaklaşık % 80 bor içermesi, bileşiğin yüksek ergime noktası ve iyi kimyasal ve fiziksel kararlılığından dolayı nötronların absorbe edilmesinde bor karbür daha etkin ve daha ekonomiktir. Bor içeriğinin yüksek olması, bor karbürü diğer bor bileşiklerini üretmede önemli bir kaynak haline getirmektedir. Elmastan daha ekonomik olduğu için aşındırıcı ve parlaticı olarak da kullanılır .

“Bor karbür oldukça sert ve düşük yoğunluklu bir malzemedir. Ancak, bor karbürün yaygın kullanımı, gevrek kırılmaya karşı hassasiyetinden ve tamamen yoğun, hiçbir iç yapı kusuru içermeyen uniform bir malzeme elde edilmesindeki zorluklardan, üretiminde kullanılan yöntemlerin hem pahalı hem de seri üretime uygun olmamasından ve bu yöntemlerin karmaşık şekilli parçaların üretimine izin vermemesinden dolayı sınırlanmaktadır”(Öğünç, 2006).

Bor karbürün bir dezavantajı da yüksek yoğunluklu malzeme üretimi için sinterleme koşullarının çok zor olmasıdır.

Tablo 9. Bor karbürün genel özellikleri, (Öğünç, 2006)

B ₄ C malzeme türü	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertlik (Vickers)	Eğme Muk. (Mpa)	Young Modülü (Gpa)	Termal Genleşme Katsayısı 27-1697°C (10 ⁻⁶ /K)	Shear Modülü (Gpa)	Poisson Oranı	Kırılma Tokluğu (Mpa/m ²)
Sıcak preslenmiş	2,51	-	480±40	441	-	188	0,17	3,6±0,3
Sinterlenmiş (1 % C ağı.)	2,44	3700	351±40	390	5,73	166	0,17	3,3±0,2
Sinterlenmiş (3 % C ağı.)	2,46	-	353±30	372	-	158	0,17	3,2±0,2

“Bor karbürün ilgi çeken bazı özellikleri ergime sıcaklığı (2450⁰C), kaynama noktası (3500 ⁰C), sertliği (2900-3580 kg/mm², Knoop, 100g), Young modülü (450-470 GPa), kayma modülü (180 GPa) , havada oksidasyon sıcaklığı (875 ⁰K’in üzeri), oda sıcaklığında

elektrik iletkenliği ($140 \Omega^{-1}m^{-1}$) ve uzama katsayısıdır ($5 \times 10^{-6}/^{\circ}K$). Nükleer uygulamalar için termalnötron tutma kesiti 600 barn'dır. Tablo 9'da bor karbürün fiziksel özellikleri listelenmiştir" (Öğünç, 2006).

Bor karbürün sıcak preslenmesi methodu sanayide basit parçalar üretmek için tercih edilir. Bu işlemde ideal yoğunlukta ürün üretebilmek için; kullanılan tozun tane boyutu $2\mu m$ 'nin altında olmalı, $2373-2473^{\circ}K$ sıcaklığına çıkılmalı ve toza 15-45 dak. süreyle 30-40 MPa basınç uygulanmalıdır. Sıcak presleme işleminde, yüksek yoğunlukta malzeme elde etmek için çıkılması gereken sıcaklığı düşürmek, malzemenin oksidasyon ve termal şok dayanımını arttırmak ve tane büyümesini engelleyerek, daha iyi mekanik özellikler sağlamak amacıyla sisteme Mg, Al, V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Si ve Ti katılarak yapılır. Ancak bu katkılar üründe safsızlığa sebep olacağından, bu bor karbür nükleer uygulamalarda kullanılamaz.

1.8. 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"(Eker, 2008).

1. Katı faz üretim yöntemleri
 - Difüzyonla bağlama
 - Toz metalurjisi (TM)
 - Haddeleme
2. Sıvı faz üretim yöntemleri
 - Sıvı Metal İnfiltrasyon
 - Basınçlı İnfiltrasyon
 - Basınsız İnfiltrasyon
 - Sıkıştırma Döküm
 - Sıvı Metal Karıştırma
 - Plazma Püskürtme

3. Diğer Yöntemler

- Rheocasting ve Compcasting Döküm Yöntemleri
- Vidalı Ekstrüzyon
- In-Situ Tekniği
- XD Tekniği

1.9. Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi, metal ve metalik alaşımların tozlarını üretmek ve tozlardan ergitmeden basınç ve sıcaklık yardımıyla iş parçası üretme amacını mekanik ve fiziko-kimyasal yöntemlerle gerçekleştirmektedir. Toz partiküllerinin birbirine bağlanmasını sağlayan ve sinterleme adı verilen bu ısıl işlem malzemenin mekanik mukavemetini artırırken, daha dayanıklı malzeme elde edilmiş olur. Sinterleme sıcaklığı tek bileşenli sistemlerde mutlak ergime sıcaklığının $2/3$ ile $4/5$ arasında yer almaktadır. Metalik bünye içindeki oranları düşük olan karışım elemanlarının ergimesi çok bileşenli sistemlerin sinterlenmesinde istenilen bir durumdur(Şahin, 2006).

Matris malzemesi metal olan kompozit malzemelerin elde edilmesinde toz metalurjisi yöntemi çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Toz metalurjisi kullanılarak elde edilen kompozit üretiminin ilk yöntemlerden olması, sıvı metallerin seramik partikülleri ıslatmasındaki zorluğu nedeniyle. Partikül ya da whisker formunda destek materyalleriyle beraber toz haldeki metal kullanılarak bu yöntemle metal matrisli kompozit malzeme elde edilir.

Sıklıkla kullanılan matris malzemeleri alüminyum, titanyum ve bakır iken, silisyum karbür, grafit, titanyum karbür ise en çok tercih edilen takviye elemanlarıdır.

1.9.1. Toz Metalurjisinde MMK Kompozitlerin Üretim Basamakları

1.9.1.1. Karıştırma ve Alaşımlama

Aynı metalin, benzer kimyasal nitelikleriyle farklı tane boyutundaki tozlarını karıştırmakla harmanlama oluşturulur. Farklı kimyasal özelliklerdeki tozların bir araya gelmesi ise karıştırma değildir. Tozların tane boyutu dağılımının kontrolü için sıkıştırma öncesi

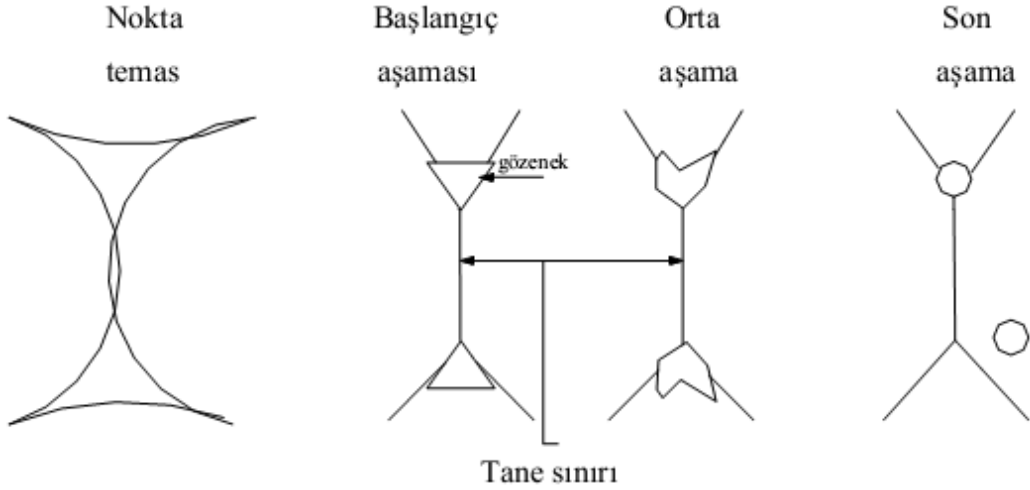
harmanlama uygulanır. Örnek olarak, sinterlemenin kolaylaştırılması için kalın taneli tozların içerisinde ince taneli tozların belirli oranlarda eklenmesi suretiyle kaba taneli tozlar daha iyi sıkışırken kötü sinterleme özelliği gösterir. Farklı kimyasal özellikteki tozlar karıştırılarak yeni kombinasyonlar oluşturulur. Elementel toz karışımları alaşım formülasyonlarının kazanımında bir kısım TM parçalarının üretimi için kullanılır. Elementel tozların belirli oranlarda karıştırılmasından oluşturulmuş karışım tozlarının sıkıştırılması önceden alaşım haline getirilmiş tozları sıkıştırmaktan yükselmiş gerilme sertleşmesi oranından dolayı daha kolaydır. Karıştırma ve harmanlamanın kötü yanları da mevcuttur. Fazlasıyla uzatılmış karıştırma uygulandığında toz taneleri gerilme sertleşmesi ile karşılaşmış olacak, böylece preslemeyi zorlaştıracaktır. Bununla birlikte tozların kirlenmesini bu işlemler sırasında önlemek gerekir. Farklı şekil, tane boyutlu ve yoğunluğunluklu tozların karıştırılmasının ardından yine ayrışma gözlemlenebilir. Bu yüzden, karışım tozlarına taşınma esnasında, tekrar karıştırma işlemi uygulamak ya da bu tozları sarsıntıdan korumak gerekebilir (Aydın, 1997).

Mekanik alaşımlama (MA), katı faz reaksiyonlarıyla alaşımların şekillendirilmesi, elementel tozların bilyalı değirmenle öğütme esnasında, sonrasında sıcak presleme ve sıkıştırma işleminin takip ettiği, bazı kompozitlerin elde edilmesinde önemli rol oynar. Bu yöntemle elde edilen kompozitler böylelikle kuvvetlendirilmiş temiz iç yüzeyler, anayapı ve katkı fazlı alaşım arasında iyi bağlanma göstermektedir. MA süreciyle iyi katkı fazlı alaşımların homojen dağılımı tespit edilebilir.

1.9.1.2. Sinterleme

Metalin mutlak ergime sıcaklığının altında, soğukta presleme sonucu elde edilmiş parçalarda atomik taşınım olayları ile toz tanecikleri arasında bağ oluşturmak amacıyla yapılan ısı işlemi sinterlemedir.

Yeni dislokasyonlar oluşturmada, sinterleme esnasında maruz kalınan yüzey gerilmeleri yetersiz kalmaktadır. Ayrıca, ince tozların ısı işlemi tabii tutulduğunda dislokasyon hareketleri oluşturduğu elektron mikroskopunda gözlemlenmiştir (Hiçyılmaz, 1999).



Şekil 18. Bir nokta teması başlangıcı ile sinterleme esnasındaki parçacıklar arası bağların gelişimi

1.9.1.3. Sıcak İzostatik Presleme (SIP)

Aynı basınç ile her yönden sıkıştırma işlemidir. Eşit yoğunlaşma için en iyi yöntemdir. Hidrostatik presleme, izostatik preslemenin sıvı ile yapıldığında verilen addır. (Hiçyılmaz, 1999).

Son zamanlarda yapılan çalışmalar, silikon nitritle birlikte bazı yüzeylerde istenen özelliklerde geliştirmeye yardımcı olmaktadır. Fiber katkılı kompozitlere benzer olarak izotropik ve homojen olmayan seramikler de rijit, şekil kontrollü aletlerin bir veya daha çok bölümlerinin elde edilmesinde kullanılabilirler.

Genel olarak yüksek sıcaklığa dayanıklı seramiklerde çok güçlü iç atomik bağlar yer almaktadır. Bu tür seramikler yüksek sıcaklıklarda ve uzun süreli periyotlarda kullanımlarda, rijit ve dayanıklı olma, yüksek sertliğe sahip olma gibi beklenen özellikleri karşılamaktadır. Seramik bileşiklere istenen son halini vermenin güç olmasının nedeni kuvvetli bağlarla bağlanmalarından dolayıdır. Visker katkılı kesme aletleri dışında kimi hallerde tercih edilmelerinin nedeni SP'nin az maliyetli olmasıdır. İstenilen şekillerle bu ürünlerin imalatı güçtür. Mekanik, kimyasal, termal ve şekil özellikleri nedeniyle yüksek sıcaklığa dayanıklı seramiklerin imalatı tercih sebebidir.

SIP çoğu durumlarda seramiklerin, sıklık ve şekillendirmeleri için tek çözüm yolu olarak bulunmuştur. Yüksek sıcaklık seramikleri için önemli olan sadece SIP' in SP' den 5-10 kere daha büyük basınç seviyelerinin olmasıdır. Ayrıca SIP yöntemi, karışık şekilli bileşikler üretmektedir.

Bir inert gaz (genellikle Argon), basıncıgözenekli yapıya iletme sürecinde kullanılmaktadır. Gaz basıncı, tipik 100-300 Mpa, (her zaman 2000 °C üzerinde ve büyük boy endüstriyel aletlerde) bütün yüzeylere uygulanmaktadır. Sıklık için kuvvetin artmasınısağlanmalıdır. Malzemedeki kesme kuvvetinin yokluğu ve herhangi bir kalıp sürtünmesinin olmaması, sıcak preslemeden daha yüksek seviyelerde, SIP' i daha güçlü bir sıkıştırma metodu haline getirmektedir. Her zaman seramikleri sinterlemek zordur. SIP' de, yüksek gaz basıncı, gözenekli yapıya iletildiğinde, maddeyi oldukça rijit ve dış etkilere karşı dayanıklı hale getirmektedir. SIP, yüksek sıcaklık seramiklerinin bazı tiplerinin imali için uygundur (Larker vd., 1999).

SIP tekniklerinin kullanılması toz sıkıştırmasının ve kutunun gömülme hareketi tarafından sebep olduğu bazıproblemleri yok etmektedir. Daha düzgün dağılımlı mikro yapı ve özellik üretmek için basınç daha düzgünce uygulanabilmektedir. SIP daha pahalıdır ve daha düzgün ekipmanlara ihtiyaç duymaktadır. Yeni üretim metotları geliştirmek alternatif bir çözümdür (ASM Handbook, Cilt 7).

1.9.1.4. Sıcak Presleme (SP)

“Bir kalıp içine doldurulan toz kütesinin sıkıştırılmasıdemektir. Presleme, tek hareketli zımba veya çift hareketli zımba ile yapılabilir. Tek yönlü sıkıştırma yoluyla tam yoğunluğa kavuşmak mümkün değildir. Çift yönlü sıkıştırmada toz alt ve üst zımba tarafından aynı anda sıkıştırılmaktadır. Bu yöntemde, kalıp duvarıile toz partiküller arasındaki sürtünme kuvveti, kalıp tabanında bulunan yay gibi esnek elemanın yay kuvvetini yenip kalıbın aşağıya doğru hareket etmesini sağlayarak, tozun taban yüzeyine alt zımbanın, üst zımba ileeşit şiddetle basınç uygulamasını sağlar. Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra TM parçası alt zımbanın yukarı hareketi ile kalıptan çıkarılır. Yoğunluk dağılımı tek yönlü presleme ile elde edilen parçalara göre daha homojendir. En düşük yoğunluk sıkıştırılmış parçanın orta noktasında bulunur. Yoğunluk dağılımı orta noktadan geçen yatay ve dikey eksenlere göre simetriktir”(Hiçyılmaz, 1999).

Basınç, statik veya dinamik olarak ısıtılmıştoza bir veya iki yerden zıt yönlerde tek bir eksenden uygulanmaktadır. Oksidasyon veya hava tarafından nitridasyondan sıcak tozları korumak için kontrollü bir atmosfere ihtiyaç vardır. Sıkıştırılmış kutu içinde toz metalin sıcak preslenmesi toz metalin eski sıkıştırma uygulamalarındandır. SP ile yüksek özellikte ürün elde edilmesine rağmen, kalıbın aşınması, zımba yüzleşmelerinde kalıp

duvarlarına sıvı metalin kaynaması bundan dolayıda sıkıştırılmış yüzeylerin bozulması, kutu duvarları ve hareketli burçlar arasındaki boşluktur, numune kaybı, alet aşınması gibi dezavantajları vardır (ASM Handbook, Cilt 7).

1.9.1.4. 1. SP’de Farklı Üretim Parametreleri

Plastik deformasyon yüksek sıcaklığa bağlı olarak istisnai malzemeler dışında meydana gelmektedir. Buna bağlı olarak sıvı faz ve alaşım sistemlerinin sıvı ve katı komponentleri arasındaki sıvı metalin, ıslatma performansının artmasına bağlı olarak dağılım oranları arttırılmıştır. Toz hacminin özelliklerine bağlı olarak değişik basınçların uygulanması gerekmektedir. Malzeme nitelik ve türüne bağlı olarak, dayanım, dayanıklılık, mevcut parça hacmi , şekli, yüzeysel özellikleri, oksidasyon filmlerinin sıvı faz üzerinde olması gibi durumlar basınç faktörünü etkiler ve malzeme mühendisinin bu argümanlara göre kullanması gerekli olan basıncı belirleyeceği skalayı inisiyatifine sunar.

Tozlar soğukta preslenmek için basınç limitlerine sahiptir. Yüksek basınç limitleri, tozların soğuk preslenmesi için gerekli olan limit basıncı aşmamalıdır. SP sıcaklıklarının yüksek olması, malzeme özelliklerinin ortaya çıkması için gereklidir. Sıkıştırmanın basınç altında en kısa sürede yapılması önemlidir. Üretim oranlarına bakıldığında bu oranın SP için sinterleme ve soğuk presleme üretim oranlarından daha düşük olduğu görülmektedir (ASM Handbook, Cilt 7).

1.9.1.4. 2. İşlem Parametreleri

SP yöntemi çeşitli tekniklere sahiptir. Bu yöntemin esasında ergimiş metalin belli oranda basınca maruz bırakılarak hacimsel büzme deformasyonuna tabii tutulması esasına dayanmaktadır. Tercih edilecek yöntem metal malzemenin fiziki parametrelerine göre değişir. Aparatlar ve tozları sağlamlaştırma işlemleri ve artık ürünlerin uzaklaştırılması soğuk presleme ve sinterleme operasyonlarından çok farklı değildir. Bu manada SP teknikleri çeşitli ortak özellikleriyle aynı işlemlerden geçmektedir.

1.9.1.4. 3. İşlem Ekipmanları

Zamanla oluşan yayılma ve yorulmalar dolu plastik deformasyon, dolu yoğunluk gibi kavramların oluşmasının sebebi olarak görülmektedir. Zaman bunların ötesinde dengenin ve trans ısının oluşmasında gerekli bolluğu içermeli, reaksiyonların sağlıklı bir şekilde cereyan etmesinde etken faktör olduğu göz ardı edilmemelidir. Uygun denenmiş sıcaklığa ulaşıldığında Mukavemet arttırma işlemine gidilerek operasyon oluşumuna başlanır. Uygun metalin tayini sıkıştırma aletleri için uygun olup olmadığının belirlenmesi, SP' nin olmazsa olmazlarındadır. Burada karşımıza çıkan sıkıştırma tipi kavramı sıkıştırma aletinin tasarım parametrelerine uygun olarak belirlenmektedir. Alette bulunan burçların ve kutunun yüksek sıcaklıkta fiziksel değişimlerini kestirmek önemlidir.

Burçlar yüksek dayanımlı malzemelerden oluşturulması plastik deformasyon ve metalin ergiyerek kaynamasından uzaklaşmamızı sağlar. Bu duruma maruz kalmamak için kutu ve burçlara dikkat edilmelidir. Yüksek sıcaklıklarda, SP' de rol alana Grafit ve Tungsten karbid karışımları olmasına karşın ergimiş metallerin bu yönde kullanılması hiçte kolay değildir ki bir istisna ile küçük sıkıştırma basınçlarında kullanılmaları olanaklı hale gelmektedir.

Statik basınç değerleri grafitlerde 28-42 MPa aralığında basınç değerlerinde kullanım sahası bulmakta olup basıncın 42 Mpa'dan daha büyük olması halinde kullanılmazlar. Grafit içeren çelikleri sıcaklığın 500°C' nin üzerindeki durumlarda uygun değildir, bunula beraber yüksek hız çelik zarlari 140 MPa ve 800°C' de bazı işlemlerde dayanım gösterebilmektedir. Plastik deformasyona ve yorulmaya maruz kalan kalıp, parça distorsiyonuna ve enjeksiyon zorluklarını da beraberinde getirmektedir. Pik sıcaklık ve basınç tesirleri altında kalıbın yüksek gerginliğe ulaşıldığında dayanması için, cidar kalınlıklarının önceden yeterli bir şekilde tasarımı önem kazanmaktadır. Mekanik operasyonlarda başarı elde etmede kullanılan aletlerin içine alacağı malzemeyle yüksek sıcaklıkta girebileceği kimyasal reaksiyonların önemli olduğu veya önemsenmesi gerektiği açıktır. Kullanılan aletlerin grafit içerenlerinde, kalıba yerleştirmede grafit burçların yanması yük hasarları ortaya çıkmasına sebebiyet vermektedir. Ayrıca kontrolsüz atmosferde, oksitlenmeler olduğu gözlenmektedir.

SP sonucunda ortaya çıkan karbonun oksit gazları, işleme tabi tutulan metali oksit etkisinden uzaklaştırmakta buna karşın sıkıştırma yüzeyinin karbürize olmasına neden olmaktadır.

Kalıp cidarlarının anormal basınç kuvvetlerine maruz kalması kalıp duvarlarının ergimesini tetikleyebilmektedir. Bazı özel yağlayıcılar kalıp cidarlarına uygulanmakta buda kalıp yüzeyini aşınmadan ve oluşabilecek diğer etkilerden kurtarmaktadır. Kullanılan tozlar burçlara yapışmakta veya reaksiyona girerek burç ve sıkıştırılmış toz metal ayırlamaz duruma düşmektedir. Akabinde bunları birbirinden ayırmak için yapılan girişimler ve fazla güç sarfiyatı onulmaz geri dönüşü olmayan hasarları beraberinde getirmektedir. Oksidasyon etkileri tozun açığa çıkan geniş boş yüzeyinden reaktif olmakta veya meydana gelme olasılığı artmaktadır.

Sıkıştırılacak tozların termal genişlemesinin büyüklüğü, kalıp içindeki tozun ısını düşürmek zorlaşmaktadır. Gerek kalıp içindeki sıkıştırılmış numune tozların kalıptan çıkartılması gerekse kalıbın büzülmesi elde edilmek istenen neticeden uzaklaşmayı ve can sıkıntısı bir durum oluşmasına neden olmakta, çıktının bozulmasına sebep olabilmektedir. Presleme sırasında SP' nin ana konusu tozu istenen sıcaklığa getirmektir. Sıkışması için metale ısı taşınımını sağlamak, ısıl balans şartlarını oluşturmak, prese maruz kalmış tozun sıcaklığının kontrol edilmesini sağlayarak SP sisteminin sonuçlarını ortaya çıkarmak mümkün olmaktadır.

Ön preslemede yüksek yoğunluk sıkıştırması gerekmektedir. Bu şartlar altında, indüksiyon ısıtması hızlı olabilmektedirler. Sıkıştırılmış toz metal, seramik kaplarda veya çelik kaplarda suyla soğutulabilmektedir.

Konveksiyonla veya sıcaklık transferiyle toz sıkıştırma geniş olarak kullanılmaktadır. Konveksiyonla ısıtmak düzgün sıcaklık dağılımını sağlamaktadır. Termokupullar sıcaklığı kontrol etmek için kullanılmaktadırlar (Kaya, 1999).

Kontrollü atmosfere ihtiyaç duyulan SP' de reaktif metal ve alaşım tozlarında, orijinal olarak ayrılmış amonyak içeren, hidrojen veya hidrojen-nitrojen gazı karışımı kullanılmaktadır (Asm Handbook, Cilt 7).

1.9.1.4. 4. SP Avantajları

“SP ile düzgün iç yapılmazemeler imal edilmektedir. Maliyeti düşüktür. Oksitlenmeyen seramikler yapılmaktadır. Bu yöntemle saptanan fiziksel özellikler daha iyidir. Yüksek yoğunluklara bağlı olarak sağlama sağlanmaktadır” (Kaya, 1999).

1.9.1.4. 5. Gaz Giderme

“Yüksek performanslı alaşımları için, TM rotalarıyla üretilen tozun gazını gidermek, alaşımın sıklığı tamamlamak için uygulanmalıdır. Toz parçacığı üzerindeki alüminyum oksit yüzeyinin varlığı hidrasyona (nemlendirme) bağlıdır. TM ile Al alaşımlarının mekanik özellikleri, alüminyum oksit ana yapı içinde düzgün dağılımıyla düzeltilebilir. Alüminyum alaşımlarının oksitlenmesi ilk olarak atomizasyon (püskürtme) ve depolama sırasında yer almaktadır. Oksitlenme oda sıcaklığında, oksijenin düşük parça basıncı altında yer alır ($P_{O_2}=10^{-16}$ bar)” (Kaya, 1999).

Düzgün bir yapı elde etmek için, alaşım içinde O_2 seviyelerini aza indirmek veya hidratları yok etmek gerekmektedir. Al alaşım tozları içindeki oksitlenme kabul edilemez. Tozların sıkıştırma sıcaklığında veya daha yüksek sıcaklıklarda gazlarının giderilmesi gerekir. Diğer yanda, sıkıştırma sırasında toz parça yüzeylerinden toplanması, gözeneklilik veya kabarcıklaşma sonuçlarını vermektedir. Genellikle, toz kütlesi ısıtılırken, $1,33322 \cdot 10^{-8}$ bar basıncın altında kalıbın boşaltılmasıyla tozun gazı giderilebilir (ASM Handbook, Cilt 7).

450°C sıcaklığın tozdan su buharını taşımaya uygun olduğu görülmektedir. Al tozlarının gazını giderme yüksek sıcaklıkta kuru argon atmosferi altında denenmektedir (Kaya, 1999).

1.10. 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. Yüksek enerjili öğütme işleminin kullanıldığı mekanik alaşımlama işlemi oksit indirgeme ve son zamanlarda da kaplama işlemi olarak da kullanılmaktadır. Klasik alaşımlama işlemleri sırasında karşılaşılan ergime problemleri, istenmeyen reaksiyonların oluşumu, takviye elamanı ve matris arasındaki ısıtma problemleri ve takviye elemanın heterojen dağılımı gibi problemler mekanik alaşımlama yöntemi ile ortadan kaldırılabilir” (Varol, 2012)

Mekanik alaşımlama 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

içersinde 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. Alüminyum gibi sünek malzemelerin İKK olmaksızın öğütülmeleri imkânsızdır. Metanol, stearik asit, ve etanol en çok kullanılan işlem kontrol katkısı malzemeleridir” (Varol, 2012).

1.11. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

“Bor karbür, çok yüksek sertlik, yüksek elastiklik modülü, yüksek ısıl kararlılık, mükemmel kimyasal inertlik, yüksek korozyon direnci, yüksek darbe mukavemeti, yüksek aşınma direnci gibi üstün fiziksel, kimyasalve mekanik özelliklere sahip, rombohedral kristal yapısında kovalent bağlı bir bileşiktir. AMK malzemelerde en çok kullanılan takviye malzemeleri SiC ve Al₂O₃ malzemelere göre üstün özelliklere sahip olmasına rağmen B4C tozlarının maliyetlerinin diğeri takviye malzemelerine göre yüksek olması sebebiyle Al-B4C kompozitleri üzerine yapılan çalışmalar, Al-SiC ve Al Al₂O₃ kompozitlerine göre sınırlı sayıdadır. Ancak, Al-SiC ve Al-Al₂O₃ gibi rakiplerine göre daha düşük yoğunluk, daha yüksek elastiklik modülü, daha yüksek spesifik rijitlik gibi

özellikleri ile Al-B₄C kompozitleri, özellikle aşınma ve hafifliğin birlikte istendiği uygulamalar için cazip bir malzemedir”(Toptan, 2011)

“Toz metalurjisi yöntemiyle MMK’lerin üretiminde MA, sıcak presleme, sıcak ve soğuk izostatik presleme gibi üretim yöntemleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Yapılan araştırmalarda parçacık dağılımı, gözeneklilik gibi mikroyapı özellikleri araştırılmıştır. SP yönteminde basınç ve sürenin MMK’lerin mikroyapısal etkileri araştırılmıştır. Çalışmalar sonrasında B₄C başta olmak üzere birçok takviye elemanın döküm yöntemiyle üretiminde karşılaşılan sorunlar SP ile çözülmüş, homojen ve yüksek yoğunluklu (>%95) MMK’lerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Genel olarak üretilen kompozitlerin sertlik, çekme, eğme gibi mekanik özelliklerinin yanı sıra aşınma davranışları da birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. MMK’ler mekanik özellikler bakımından değerlendirildiğinde, kullanılan takviye elemanına bağlı olarak parçacık dağılımının ve ara yüzey bağının mekanik özellikler üzerinde etkin rol oynadığı belirlenmiştir” (Ekici, 2012).

“Kaçar vd. (2003) yapmış oldukları çalışmada, AA 2024 malzemesinin aşınma davranışlarını yaşlandırma işlemi uygulayarak incelemişlerdir. 495 °C’de solüsyona alındıktan sonra oda sıcaklığında su verme işlemiyle ani soğutulan numuneler 1 hafta boyunca oda sıcaklığında doğal yaşlandırma, 120 °C’de 24 saat, 150 °C’de 18 saat, 160 °C’de 16 saat ve 200 °C’de 2 saat yapay yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Metalografik verilere göre CuAl₂ faz çökeltilerinin ve intermetalik yapıların yaşlandırma sıcaklığıyla birlikte büyümeye başladığını göstermiştir” (Kaçar et al., 2003).

Siddiqui vd. (2000) yapmış oldukları çalışmada, yaşlandırma ısıl işlemi parametrelerinin, AA 6063 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. AA 6063 alüminyum alaşımı yaşlandırılarak, yaşlanmanın en tepe noktası (pik noktası) ve aşırı yaşlanma süreci tespit edilmiştir. AA 6063 alaşımlı numuneler öncelikle 520 °C’de 2 saat solüsyona alınmıştır. Daha sonra yapay yaşlandırma ısıl işlemi dokuz farklı sıcaklık ve yedi farklı sürede gerçekleştirilmiştir.

“Bedir, gözeneksiz parçaların üretimi ve ıslatılabilirliğinin iyileştirilmesi açısından, parçacık takviyeli kompozitlerin üretiminde sıcak presleme yönteminin geleneksel toz metalurjisi yöntemi karşısında çok daha etkili bir yöntem olduğunu belirtmiştir. Çalışmasında Al-%5Cu alaşımına hacimce %10, %20, %30 SiC ve %10, %20 B₄C tozları ilave ederek sıcak presleme davranışlarını incelemiştir. Sıcak presleme işlemi, ötektik sıcaklığın üzerinde 600 °C’de, 25 MPa basınç altında 5 dakika süreyle gerçekleştirmiştir. Isıl işlemin kompozitin sertliği üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla 530 °C sıcaklıkta

Çözelti ısıı işlemleri uygulamış ve 180 °C’de 2, 4, 6, 8, 12, 20 ve 24 saat çeşitli yaşlandırma periyotlarında bekletmiştir. Isıl işlem sonrasında en iyi sertlik değerine 10 saat yaşlandırma süresiyle ulaşıldığını ve mikro yapı incelemeleri sonucunda da homojen bir dağılımın elde edildiğini bildirmiştir” (Bedir, 2007).

Bu çalışmada yaygın ve önemli kullanım alanına sahip olan, yaşlandırma ısıı işlemine tabi tutularak mekanik özelliklerinde iyileşme sağlanabilen Al 2024 alaşımı ve düşük yoğunluk ile yüksek elastikiyete sahip B₄C takviye malzemesi tercih edilmiştir. Yapılan literatür taraması sonucunda bu kompozit yapıların yaşlandırılması ve mekanik özellikleri üzerine yeterli çalışma yapılmadığı tespit edilmiştir. Bu sebepten dolayı Al 2024 matrisli B₄C parçacık takviyeli kompozitlerde yaşlandırmanın fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi kullanılarak Al2024-B₄C kompozitlerinin üretimi ve ısıl işlem parametrelerinin kompozit özelliklerine etkisi araştırılmıştır. İlk olarak kompozit tozlar mekanik alaşımlama yöntemi ile homojen olarak karışımı sağlanmış ve bu tozların morfolojisi, boyutu, sertliği ve kristal boyutları ölçülerek toz karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Takviye malzemesi olarak ortalama 49 µm boyutunda B₄C takviye oranı olarak da ağırlıkça üç farklı oran (% 7, % 14 ve % 21) seçilmiştir. TM 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 Instron mikrosertlik ölçüm cihazı ile yürütülmüştür. Toz karakterizasyon işlemleri tamamlandıktan sonra kompozit tozlar 500 MPA basınç ile preslenmiş ve daha sonrada sıcak presleme yapılarak kompozit numuneler üretilmiştir. Üretilen bu numuneler farklı sıcaklık (130⁰C, 160⁰C, 190⁰C) ve farklı sürelerde (10, 16, 22 saat) yaşlandırma ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Üretilen bu kompozitlerin, makro sertlik değerleri, çekme dayanımı ve iç yapı incelemeleri yapılarak en uygun üretim parametreleri belirlenmiştir.

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 10. Al 2024 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 11. 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

2.2. Mekanik Alaşımlama İşlemi

Bu çalışmada toz karışımları gezegen tip bilyeli öğütücüde (Fritsch Pulveristte Premium 7) 400 dv/dak öğütme hızında mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Öğütme işlemi sadece homojen dağılımı sağlamak amacıyla yapılmıştır. Bu yüzden öğütme süresi 1 saat olarak belirlenmiştir. 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 30 gr ve bilye-toz ağırlık oranı 10:1 olarak seçilmiştir.

2.3. Parçacık Morfolojisi

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



şekil 19. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

2.4. Parçacık Boyutu

Başlangıç tozları ve mekanik alaşımlanmış tozların parçacık boyutu dağılım ölçümleri Malvern Instruments TM marka Mastersizer 2000e (Şekil 20) model lazer parçacık boyut ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçüm işlemleri saf su ortamında yapılmıştır.



Şekil 20. Partikül boyutu ölçüm cihazı

2.5. X-Işınları Kırınımı

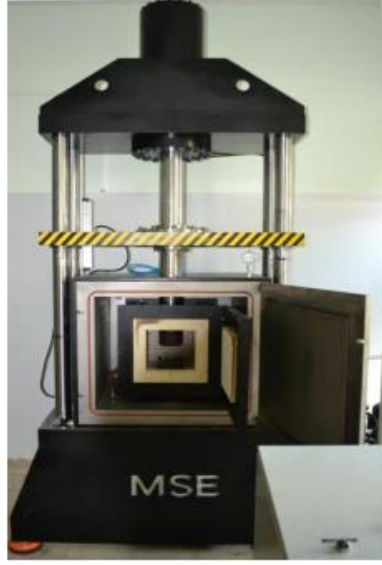
TM ile üretilen ısıl işlem görmüş numunelerin X ışınları analizi yapılarak farklı ısıl işlem süre ve sıcaklıklarında oluşan intermetalik fazların incelemesi yapılmıştır. Bu çalışmalar, X ışınları difraktometreleri (XRD) (Şekil 21) kullanımıyla 40kV ve 30mA koşullarında ve $Cu\alpha(1,54059 \text{ \AA})$ radyasyonu altında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 21. X ışınları analiz cihazı

2.6. Sıcak Presleme

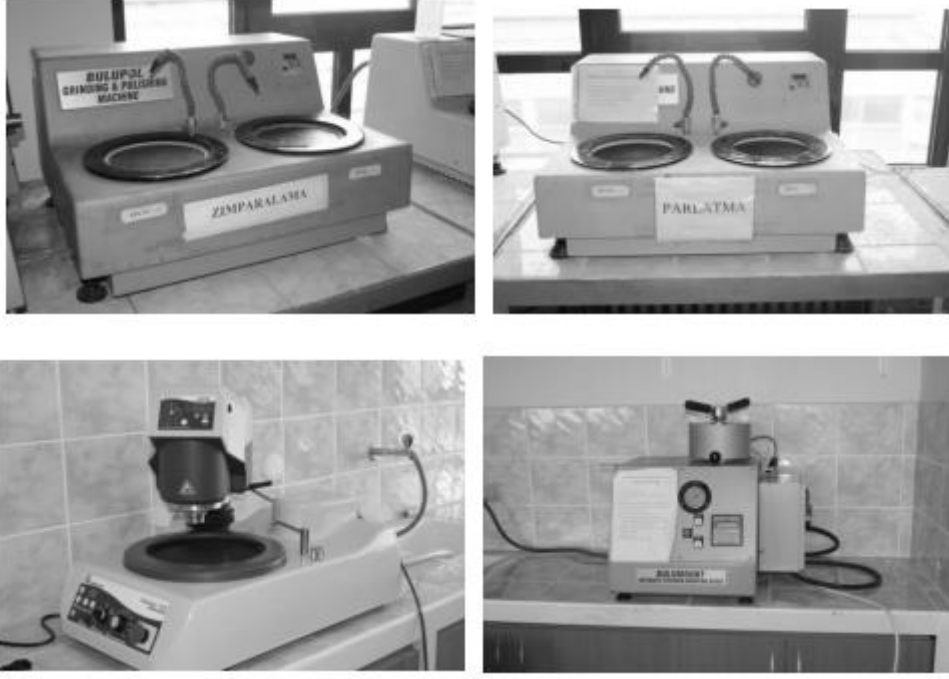
AA2024-B₄C kompozit tozlarına ilk olarak soğuk presleme işlemi uygulanmıştır. Soğuk presleme basıncı 500 MPa'dır. Soğuk preslenen numuneler 525 °C sıcaklıkta 3 saat ısıtıl işlem fırınında bekletildikten sonra 100 ton kapasiteli tek eksenli preste 1 saat süre ile 500 MPa basınçla sıcak preslenerek kompozit numuneler üretilmiştir (Şekil 22). Presleme esnasında kalıp yüzeylerine yağlayıcı olarak çinko stearat sürülmüştür.



Şekil 22. Sıcak presleme cihazı

2.7. Metalografi Çalışmaları

TM yöntemi ile üretilen kompozit tozların ve kompozitlerin sertlik ölçümleri ve kompozitlerin içyapı incelemeleri için gerekli metalografik işlemler yarı otomatik (Şekil 23) ve tam otomatik zımparalama ve parlatma cihazları ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ihtiyaç duyulan numuneler için bakalite alma işlemi de yapılmıştır.

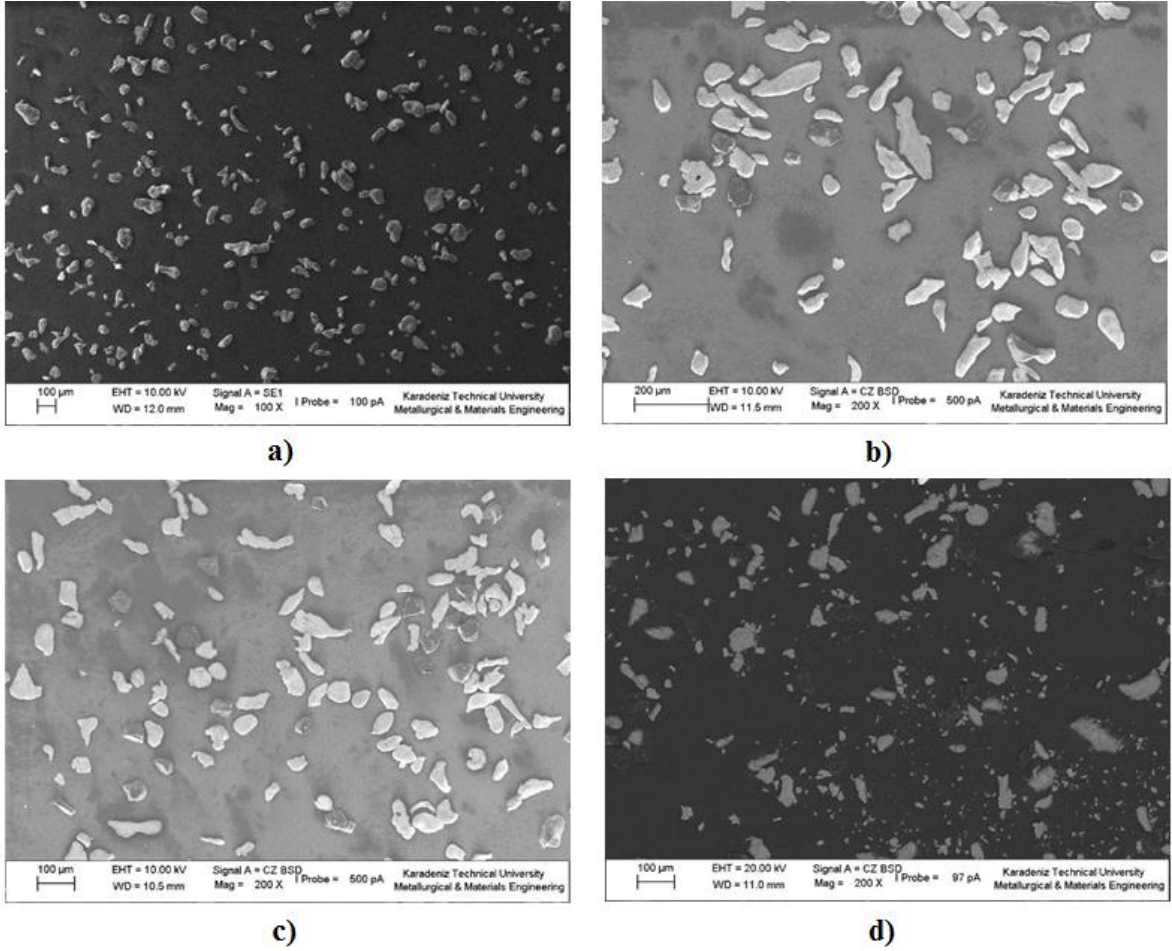


Şekil 23. Metalografi çalışmalarında kullanılan cihazı

3. BULGULAR

3.1. Toz Karakterizasyonu

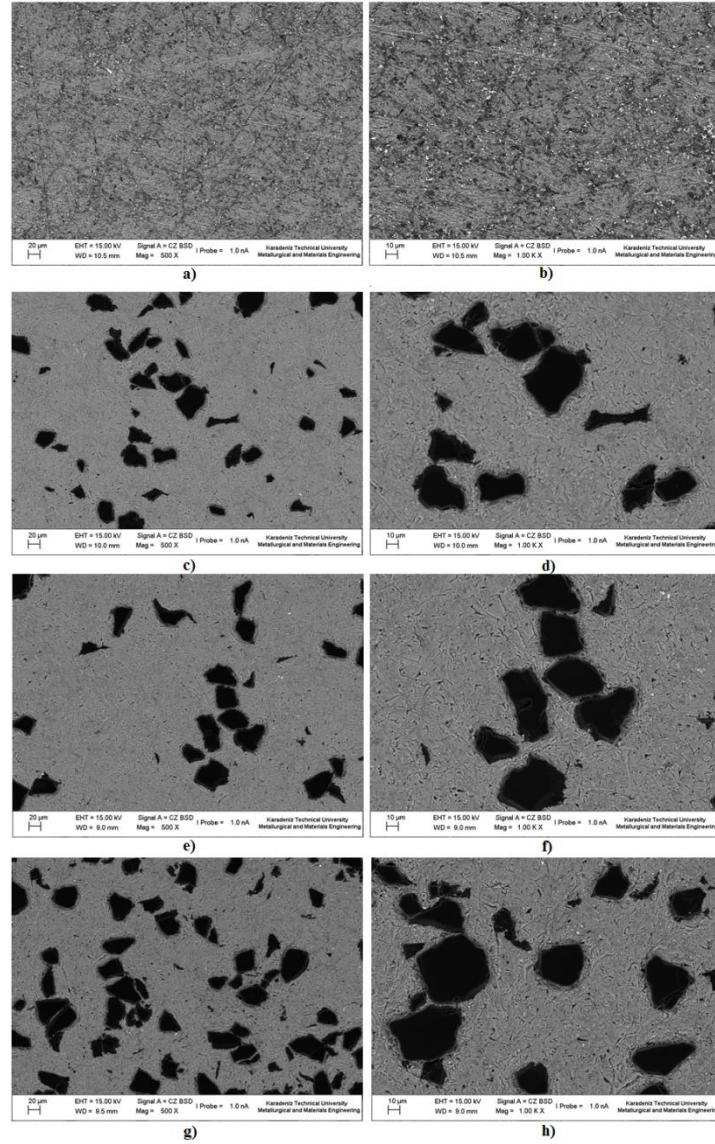
Tozlara uygulanan 1 saatlik homojen karışımı sağlamak amaçlı mekanik alaşımlama sonucu ortaya çıkan tozların SEM görüntüleri incelendiğinde Al 2024 toz morfolojisinin düzensiz şekilli olduğu buna nazaran B₄C toz morfolojisinin açılı veya poligonal olduğu anlaşılmaktadır. Öğütme işlemi sonucunda pulsu Al 2024 toz morfolojisi elde edilmiştir. Takviye oranının artmasıyla birlikte B₄C toz boyutunda azalma meydana gelmiştir.



Şekil 24. Başlangıç tozlarının farklı büyütmelerdeki morfolojisi, a) Al 2024, b) Al 2024+%7B₄C c) Al 2024+%14 B₄C d) Al 2024+%21 B₄C

3.2. Isıl İşlem Öncesi İç Yapılar

Üretimi gerçekleştirilen MMK'lerin parçacık dağılımı ve intermetalik fazların oluşumu numuneler hazırlanarak mikroyapı incelemelerle gözlemlenmiştir. Burada ısıl işlem öncesinde intermetalik fazların gözlemlenmediği (Şekil 25), ısıl işlem sonrasında SEM görüntülerinde intermetaliklerin ortaya çıktığı gözlemlenmiştir (Şekil 26-34). Daha doğru sonuçların tetkiki için EDS ve XRD analizleri de sonuçları teyit etmiştir. Üretilen kompozitlerde B_4C parçacıklarının homojen olarak dağıldığı görülmektedir.

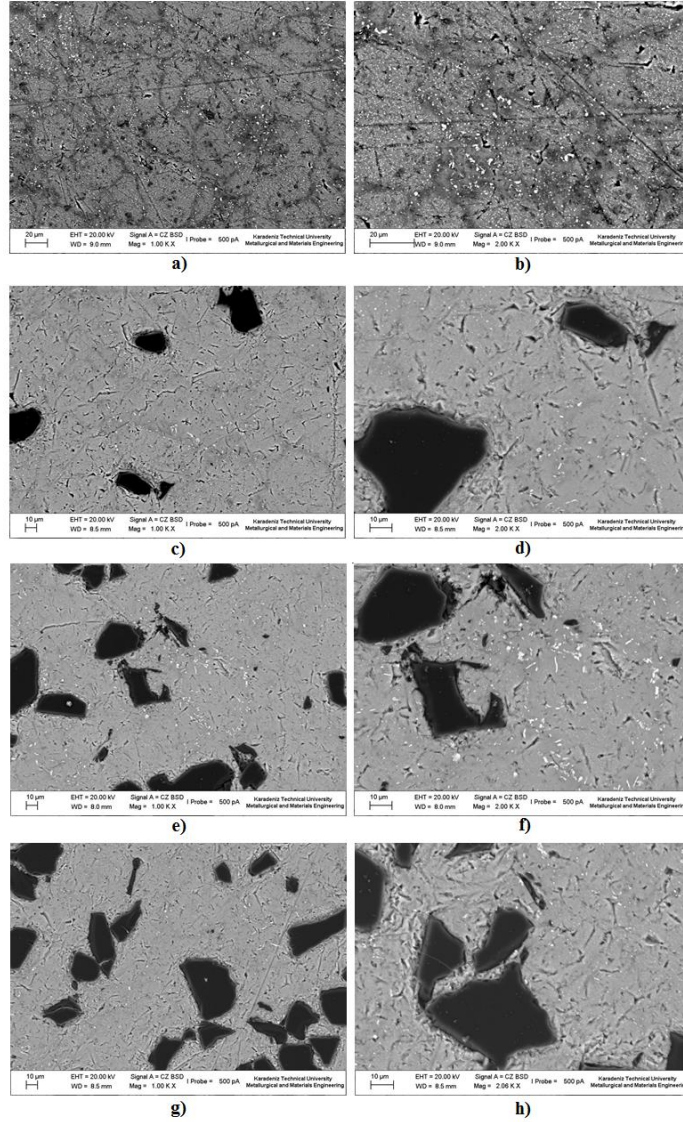


Şekil 25. Isıl işlem öncesi a-b) Al2024 alaşımı c-d) Al 2024+%7 B_4C e-f) Al 2024+%14 B_4C g-h) Al 2024+ %21 B_4C kompozit iç yapıları (500X ve 1000X büyütme)de)

3.3. Isıl İşlem Sonrası İç Yapılar

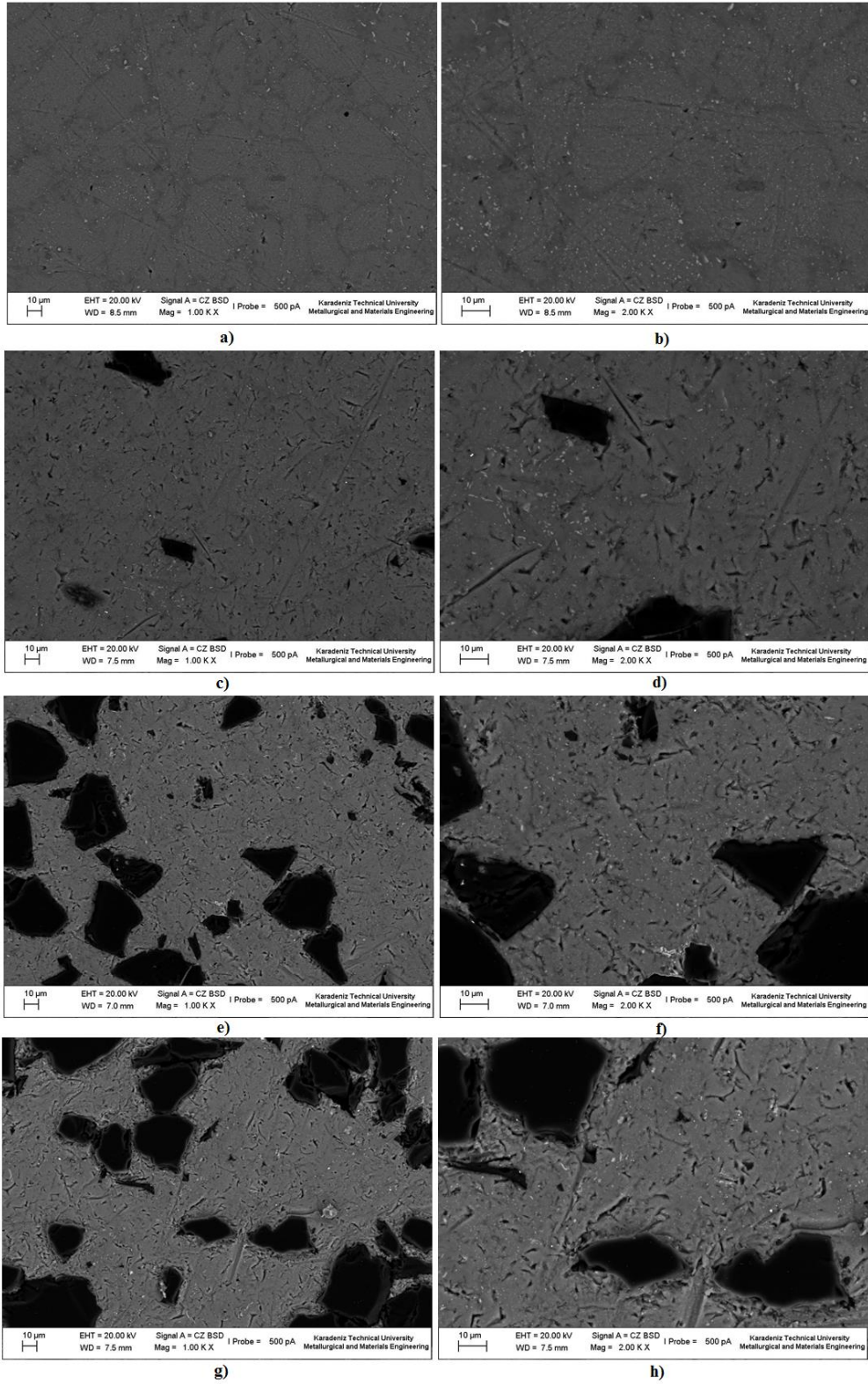
Isıl işlem sonrasında yüzeyde meydana gelen SEM görüntülerindeki gri metalik renkteki yapılar intermetalikleri göstermektedir. EDS analizlerinde işaretli olan intermetalik fazlar genel olarak çubuksu ve oval yapılara sahiptirler. Bu yapılara yapılan EDS ve XRD analizlerine dayanarak bakırca zengin bakır alümina CuAl_2 , MgCuAl_2 , Mg_2Cu intermetalik çökeltileri görülmektedir (Şekil 26-34).

3.3.1. 130°C ' de 10 Saat Yaşlandırılmış Numuneler



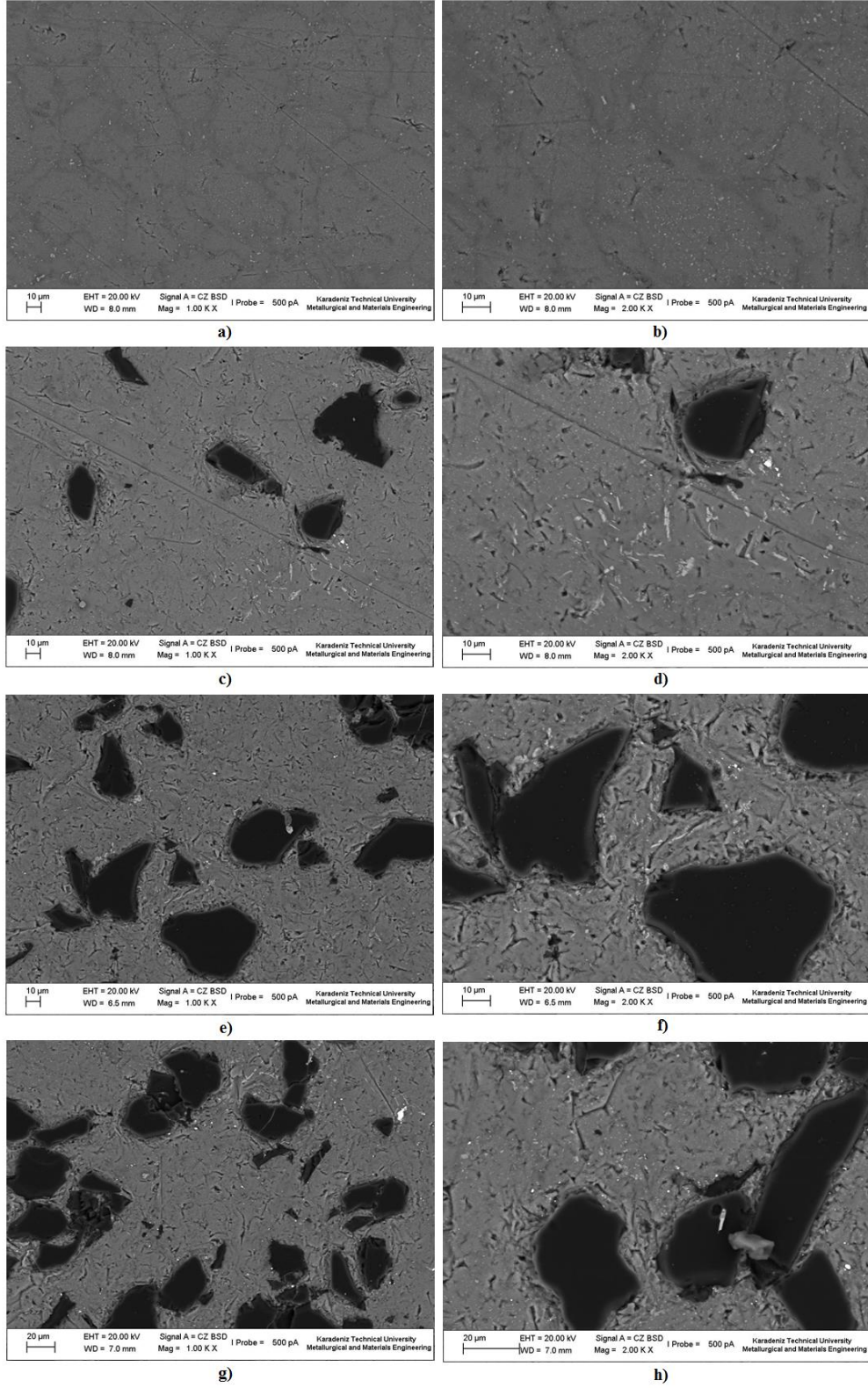
Şekil 26. a-b) Al 2024 c-d) Al 2024+%7 B_4C e-f) Al 2024+%14 B_4C g-h) Al 2024+ %21 B_4C (1000X ve 2000X büyütmelerde)

3.3.2. 130 °C'de 16 Saat Yaşlandırılmış Numuneler



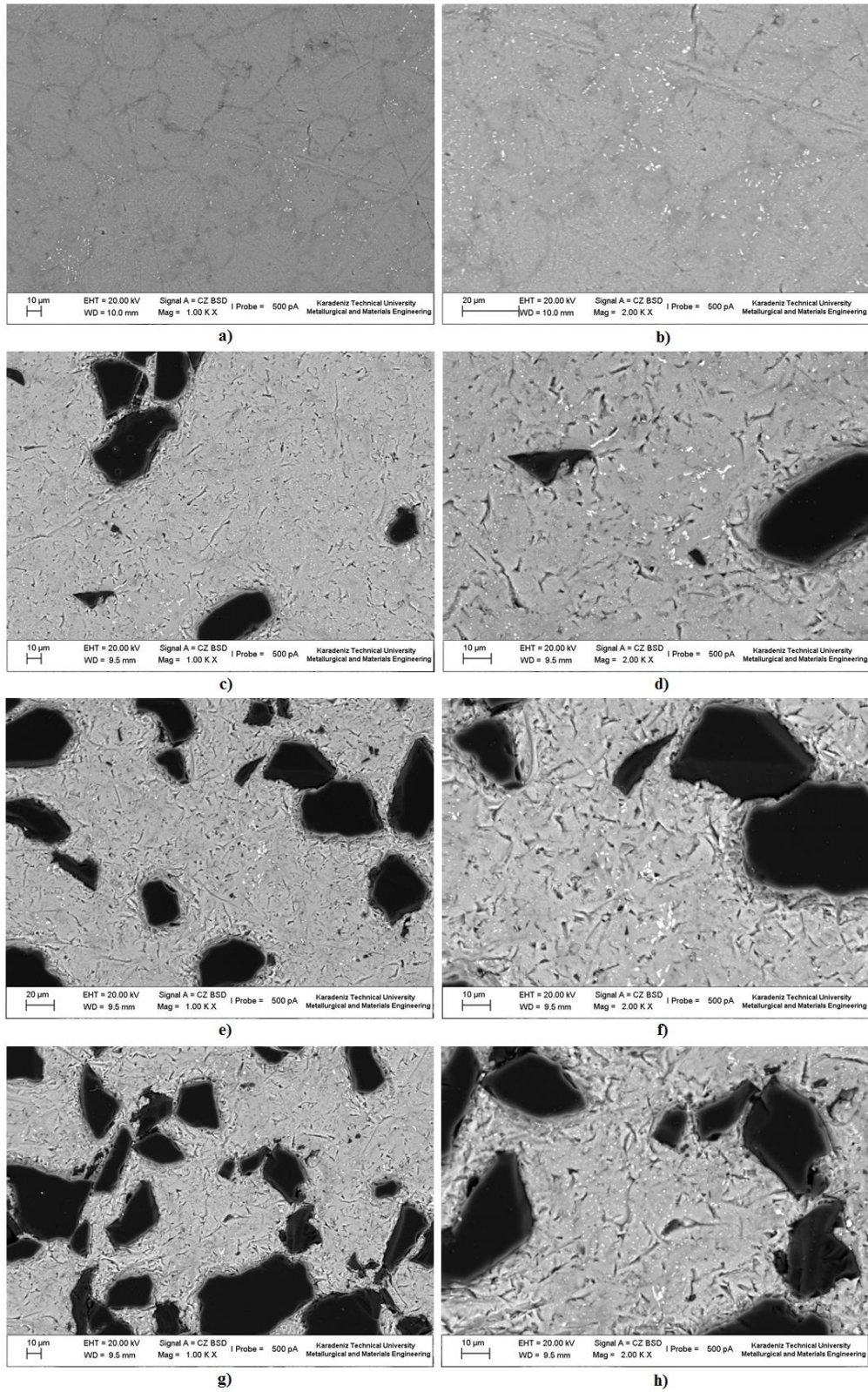
Şekil 27. a-b) Al 2024 c-d) Al 2024+%7 B₄C e-f) Al 2024+%14 B₄C g-h) Al 2024+%21 B₄C (1000X ve 2000X büyütmeleerde)

3.3.3. 130 °C'de 22 Saat Yaşlandırılmış Numuneler



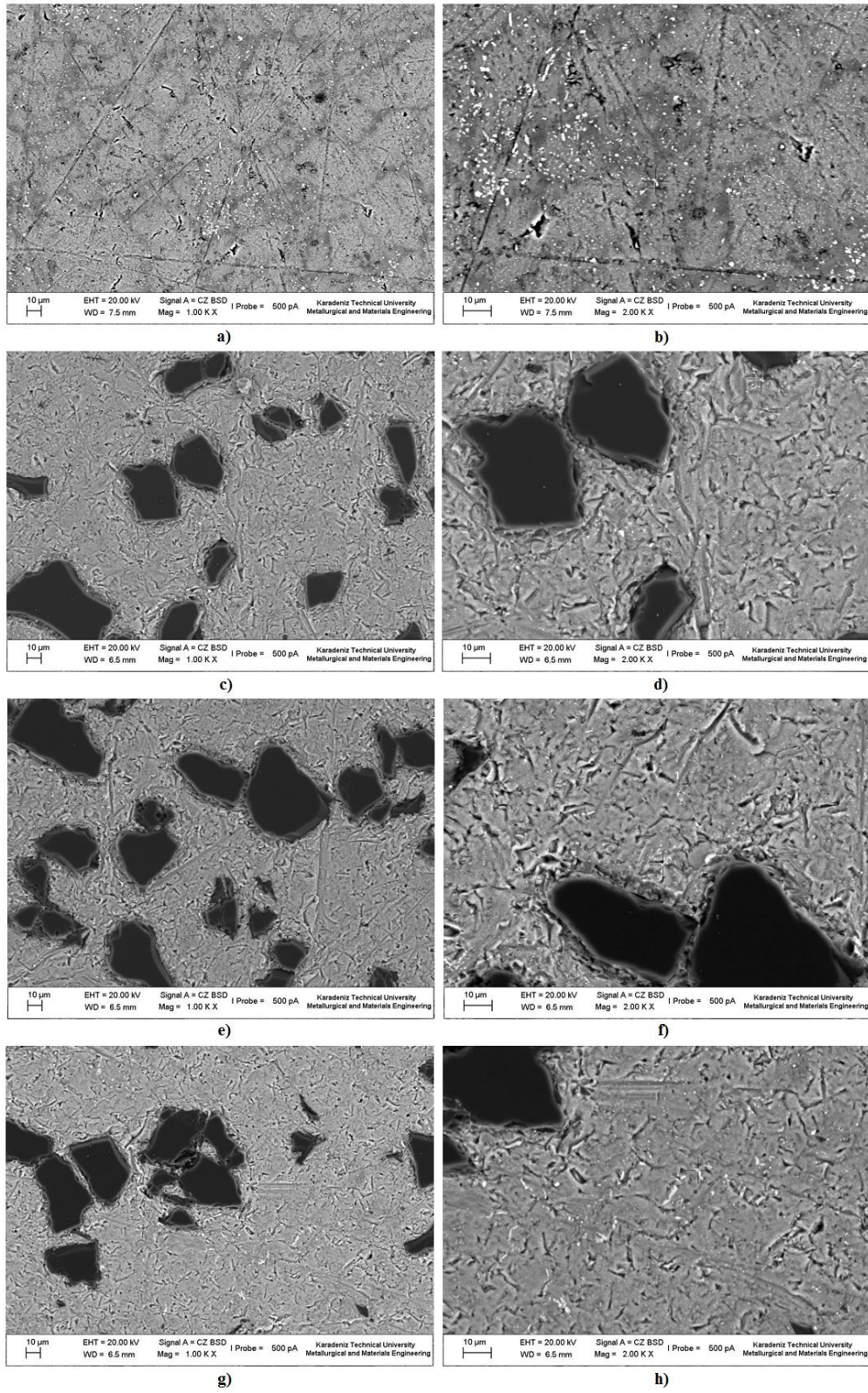
Şekil 28. a-b) Al 2024 c-d) Al 2024+%7 B₄C e-f)) Al 2024+%14 B₄C g-h) Al 2024+ %21 B₄C (1000X ve 2000X büyütmeleerde)

3.3.4. 160 °C'de 10 Saat Yaşlandırılmış Numuneler



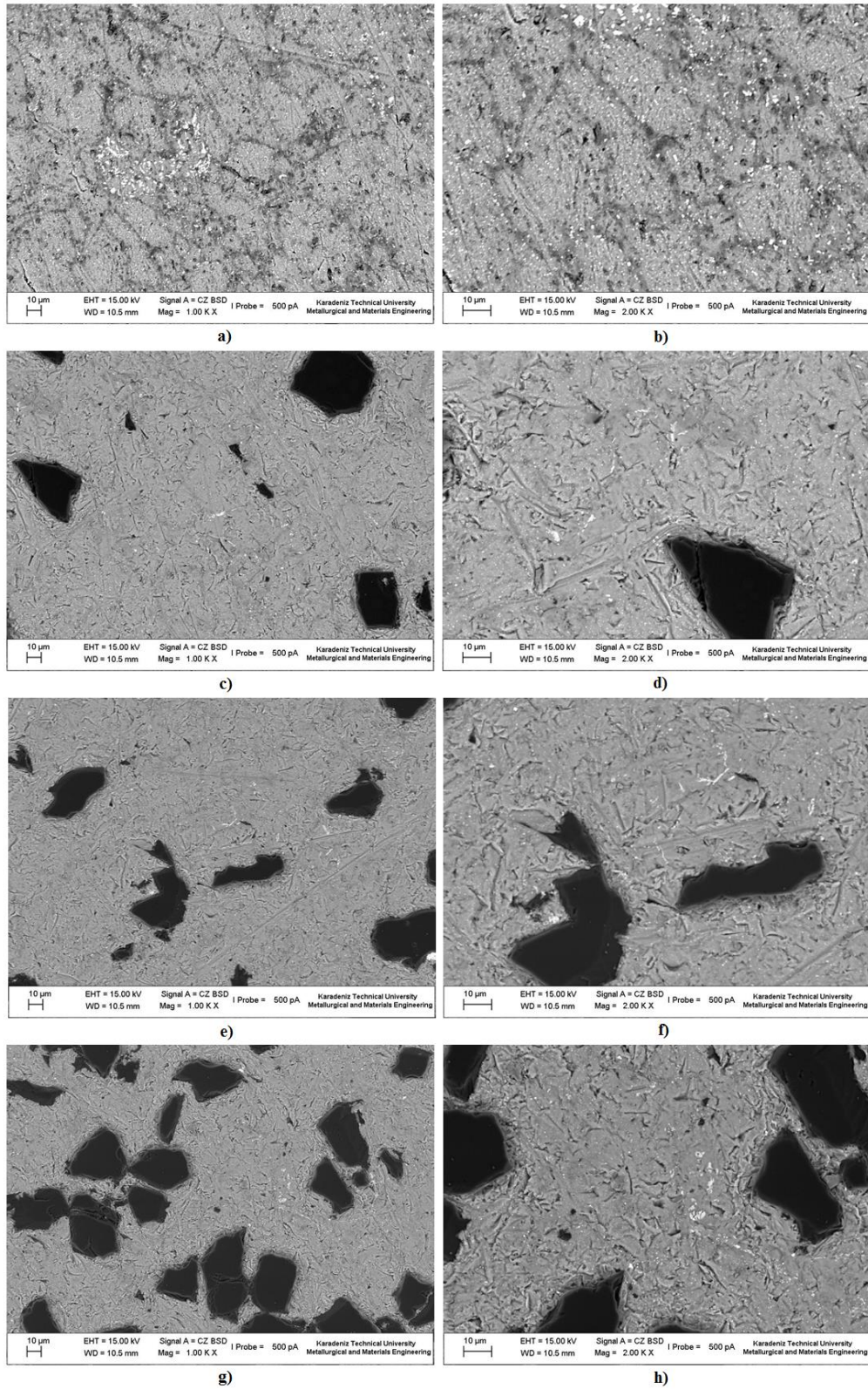
Şekil 29. a-b) Al 2024 c-d) Al 2024+%7 B₄C e-f) Al 2024+%14 B₄C g-h) Al 2024+%21 B₄C (1000X ve 2000X büyütmelede)

3.3.5. 160 °C'de 16 Saat Yaşlandırılmış Numuneler



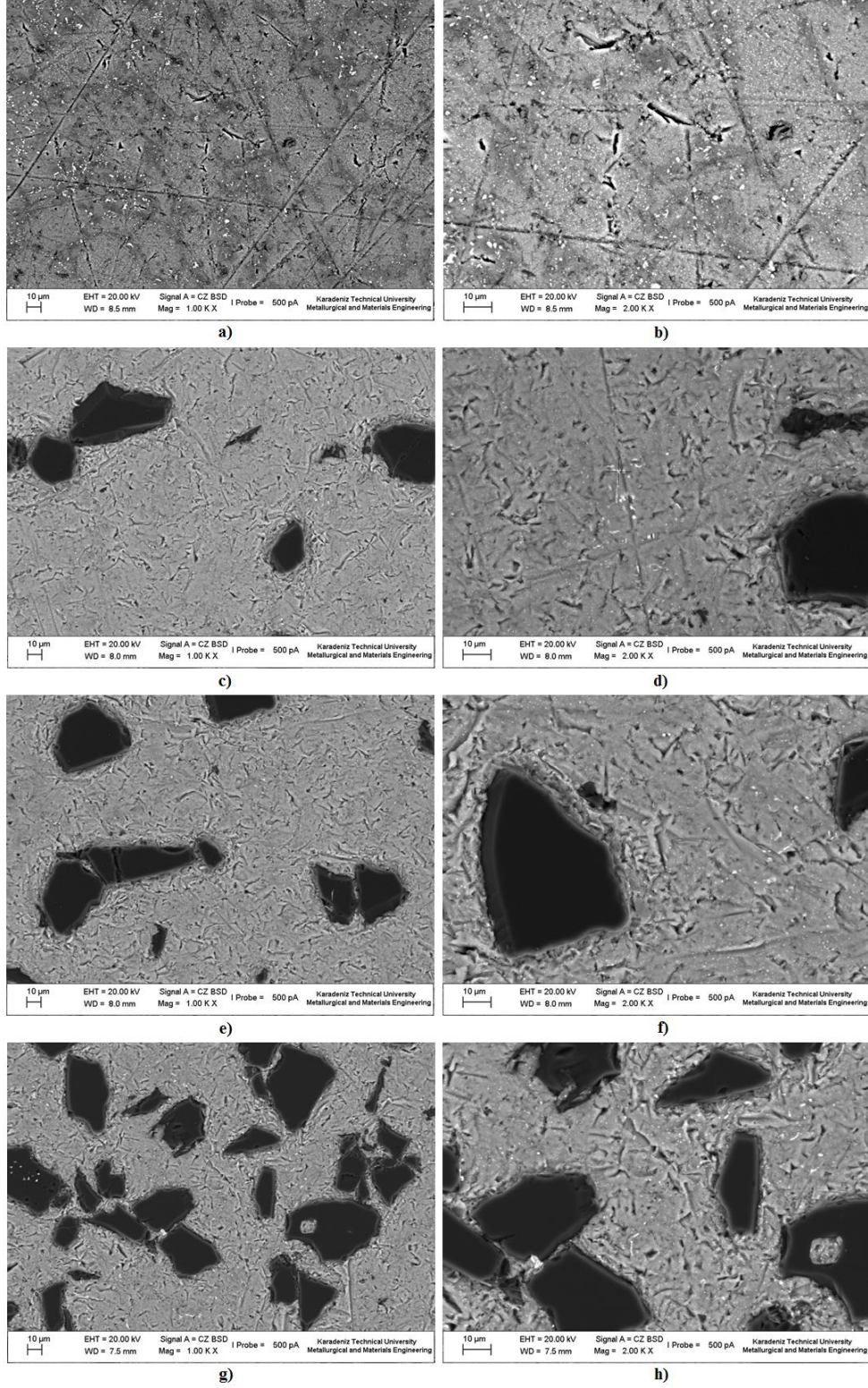
Şekil 30. a-b) Al 2024 c-d) Al 2024+%7 B₄C e-f) Al 2024+%14 B₄C g-h) Al 2024+%21 B₄C (1000X ve 2000X büyütmelemlerde)

3.3.6. 160 °C'de 22 Saat Yaşlandırılmış Numuneler



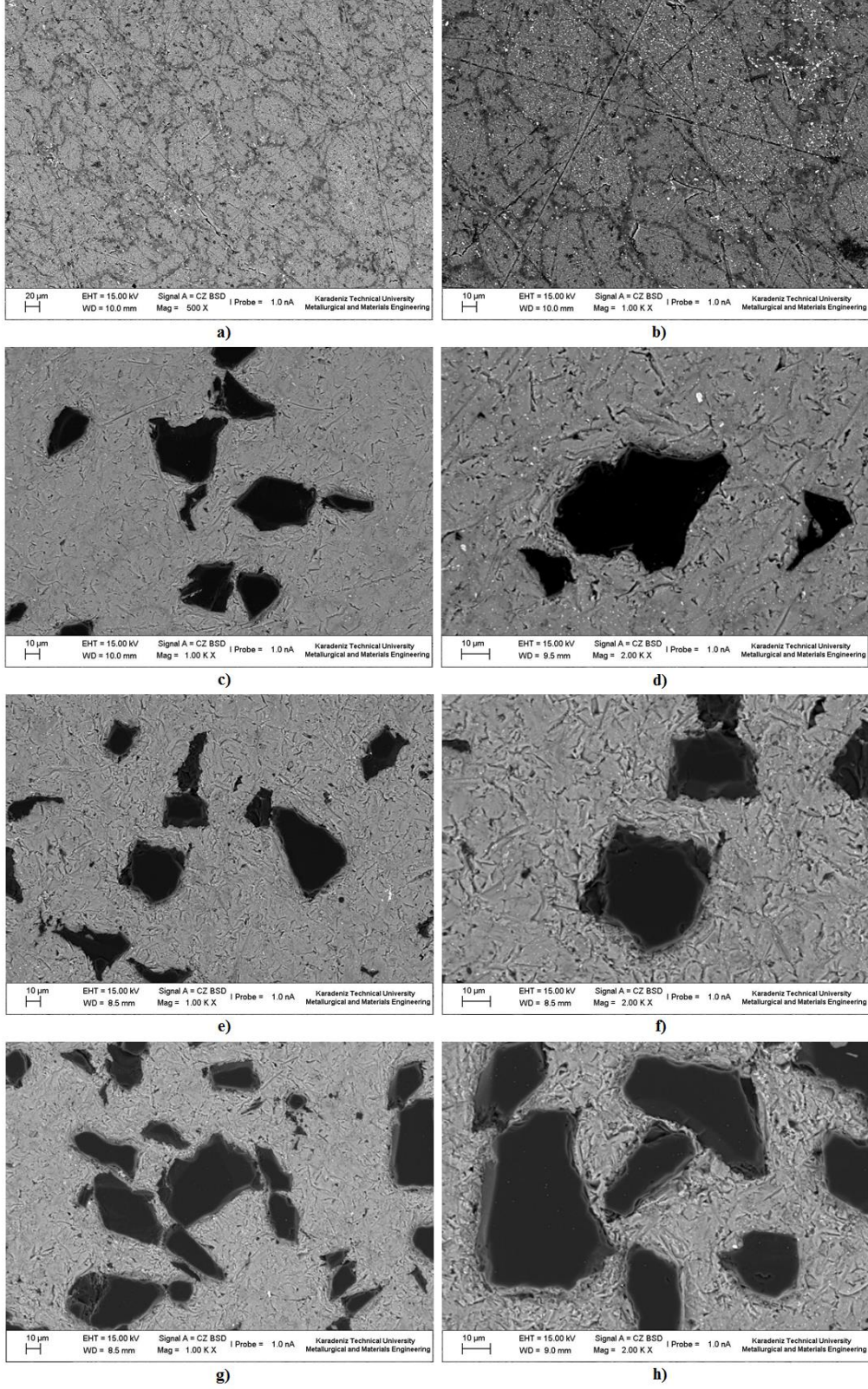
Şekil 31. a-b) Al 2024 c-d) Al 2024+%7 B₄C e-f) Al 2024+%14 B₄C g-h) Al 2024+%21 B₄C (1000X ve 2000X büyütmelede)

3.3.7. 190 °C'de 10 Saat Yaşlandırılmış Numuneler



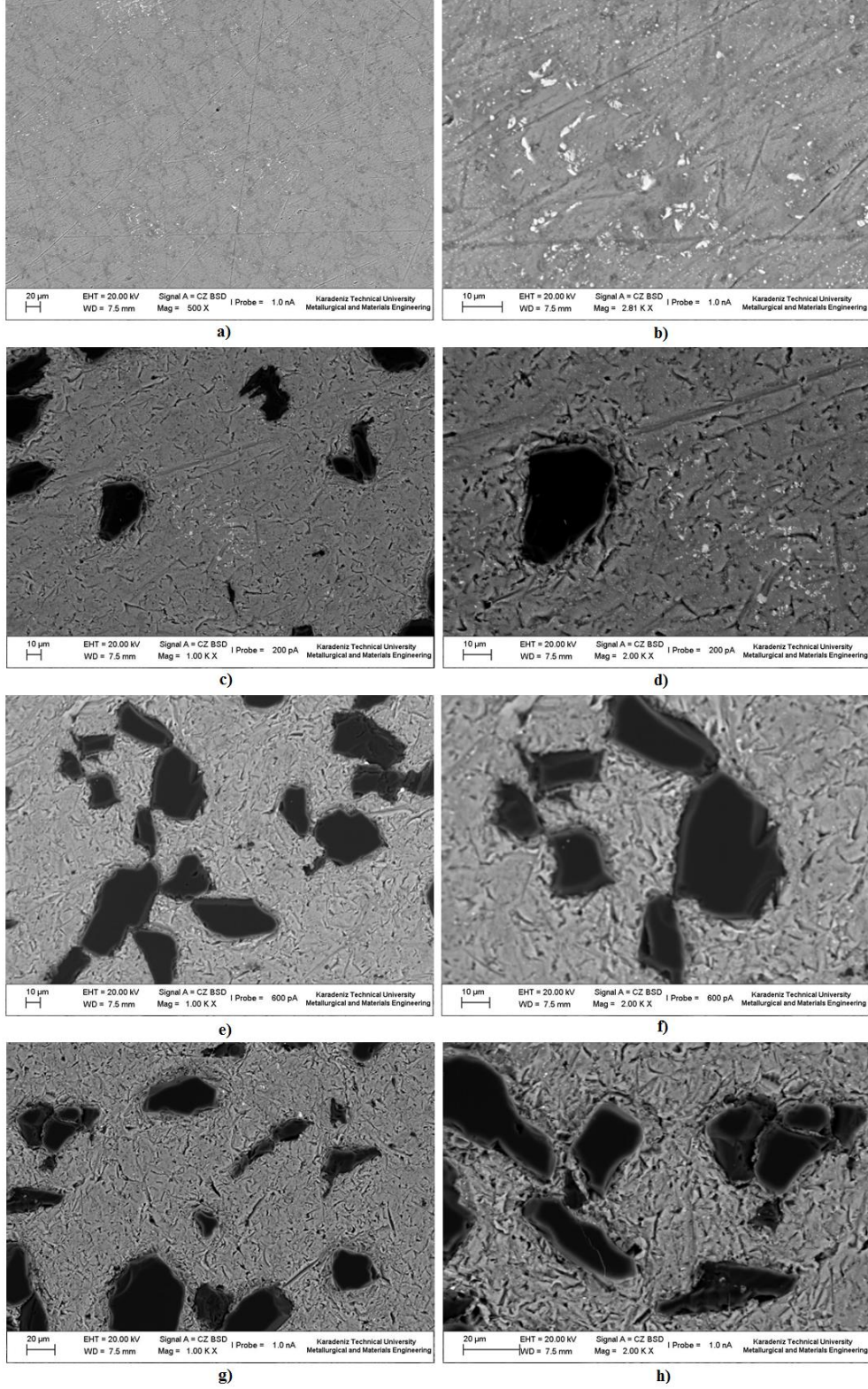
Şekil 32. a-b) Al 2024 c-d) Al 2024+%7 B₄C e-f) Al 2024+%14 B₄C g-h) Al 2024+ %21 B₄C (1000X ve 2000X büyütmelerde)

3.3.8. 190 °C' de 16 Saat Yaşlandırılmış Numuneler



Şekil 33. a-b) Al 2024 c-d) Al 2024+%7 B₄C e-f) Al 2024+%14 B₄C g-h) Al 2024+%21 B₄C (1000X ve 2000X büyütmelemlerde)

3.3.9. 190 °C'de 22 Saat Yaşlandırılmış Numuneler

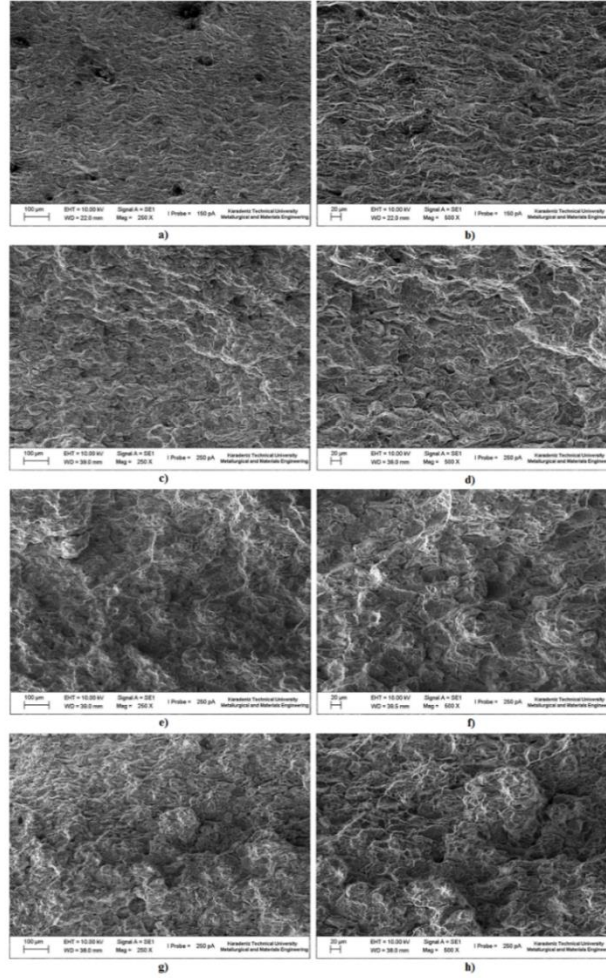


Şekil 34. a-b) Al 2024 c-d) Al 2024+%7 B₄C e-f) Al 2024+%14 B₄C g-h) Al 2024+ %21 B₄C (1000X ve 2000X büyütmeleerde)

3.4. Çekme Sonrası Kırılma Yüzeyleri

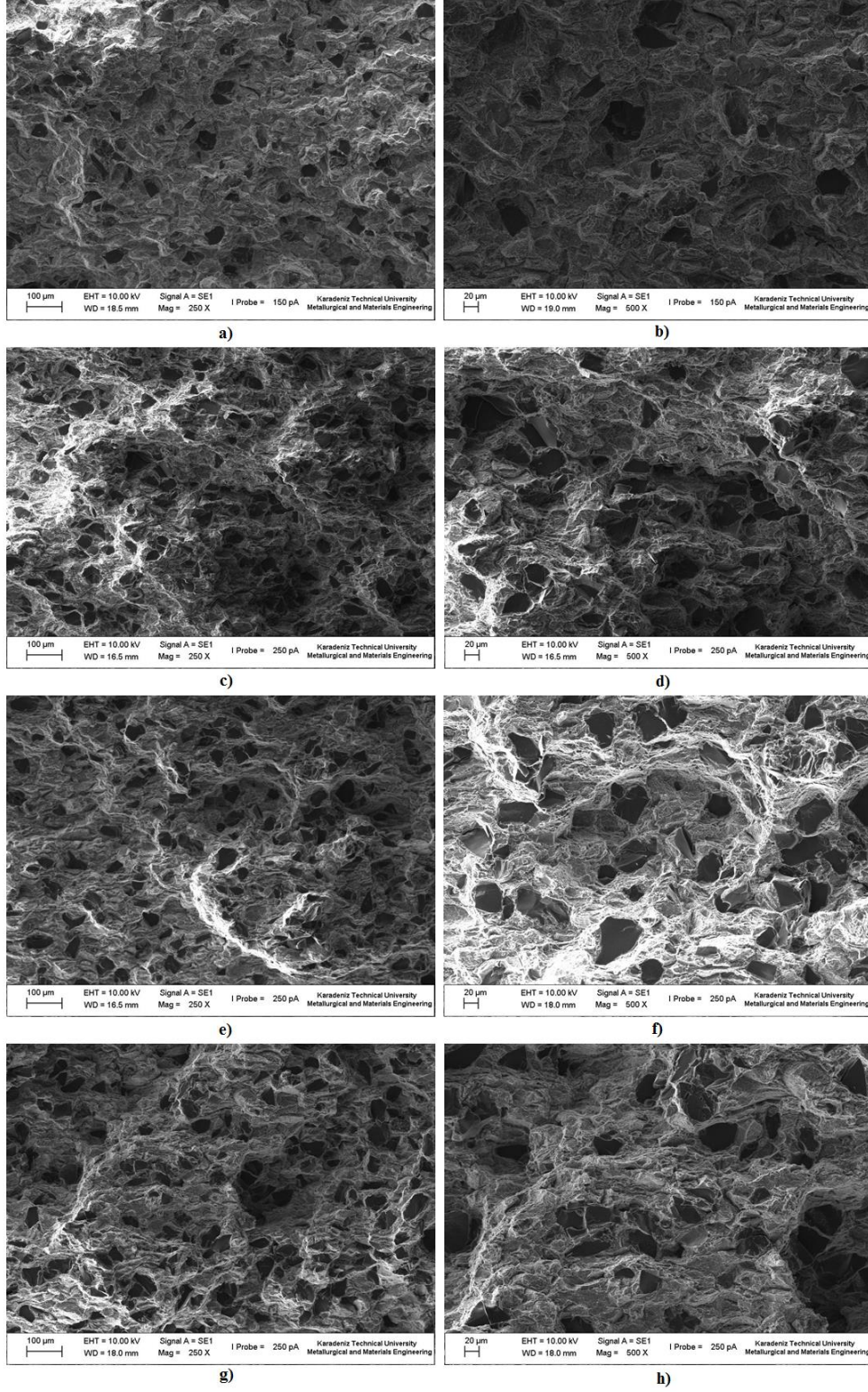
Çekme deneyi sonrasında, kırılma sisteminin daha iyi kavranabilmesi için kompozit numunelerin kırılma yüzeyleri SEM incelemeleri ile karakterize edilmiştir. MMK'lerde kırılma üç ana kırılma sistemiyle açıklanmaktadır. Bu sistemler; ara yüzey yapışmaması, takviye partiküllerinin kırılması, boşluk çekmesi ve büyümesidir (Srivatsan ve Annigeri, 2000). Matris alaşımlarında gevrek ve sünek kırılma birlikte görülmüştür. Beyaz renkli bölgeler sünek kırılma meydana geldiğini gösterirken, çatlakların oluştuğu ve gevrek kırılmanın meydana geldiği gözlemlenmiştir (Şekil 35-39).

3.4.1. Takviyesiz Al 2024 Kırılma Yüzey Görüntüleri

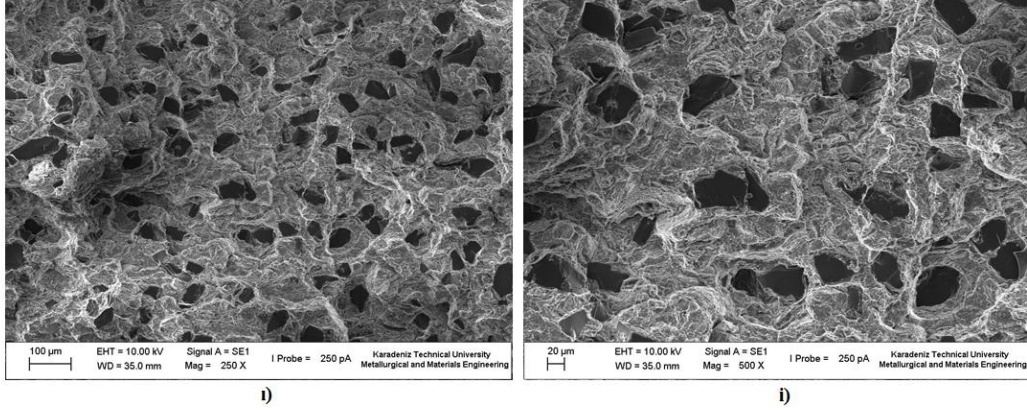


Şekil 35. a-b) Isıl işlem uygulanmamış c-d) 190 °C 10 saat yaşlandırılmış e-f) 190 °C 16 saat yaşlandırılmış g-h) 190 °C 22 saat yaşlandırılmış numunelerin kırılma yüzeyleri

3.4.2. %7 B₄C Takviyeli Al 2024' ün Kırılma Yüzey Görüntüleri

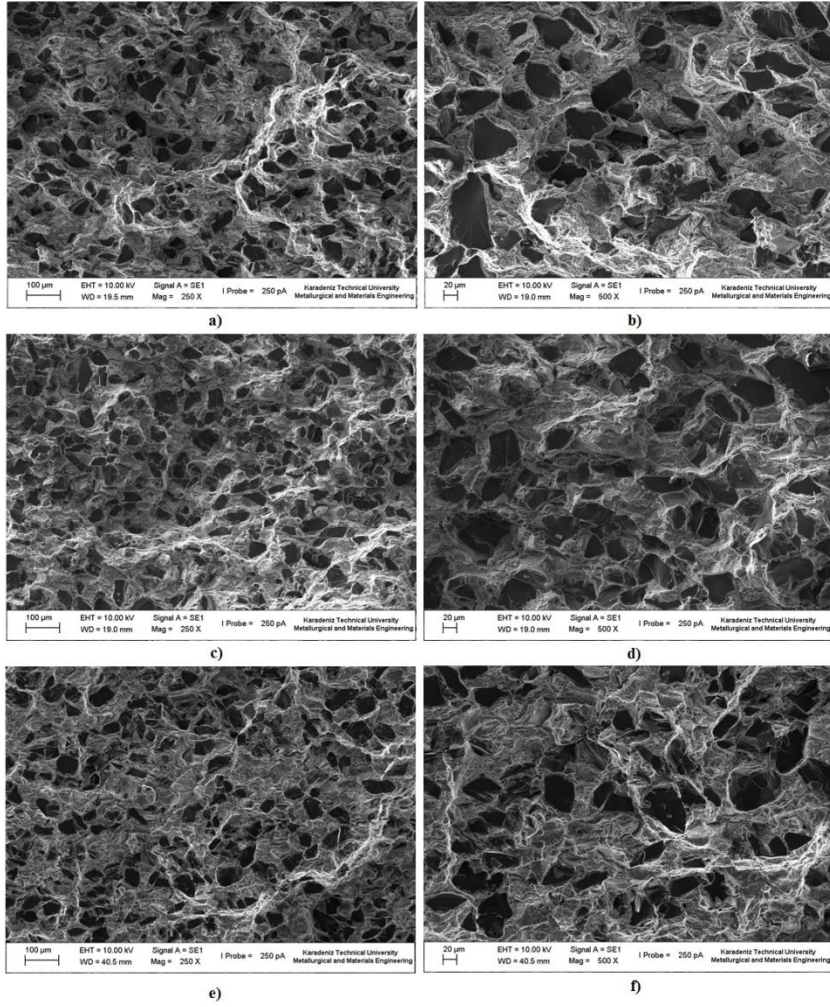


Şekil 36. a-b) Isıl işlem uygulanmamış c-d) 130 °C 10 saat yaşlandırılmış e-f) 130 °C 16 saat yaşlandırılmış g-h) 130 °C 22 saat yaşlandırılmış numunelerin kırılma yüzeyleri



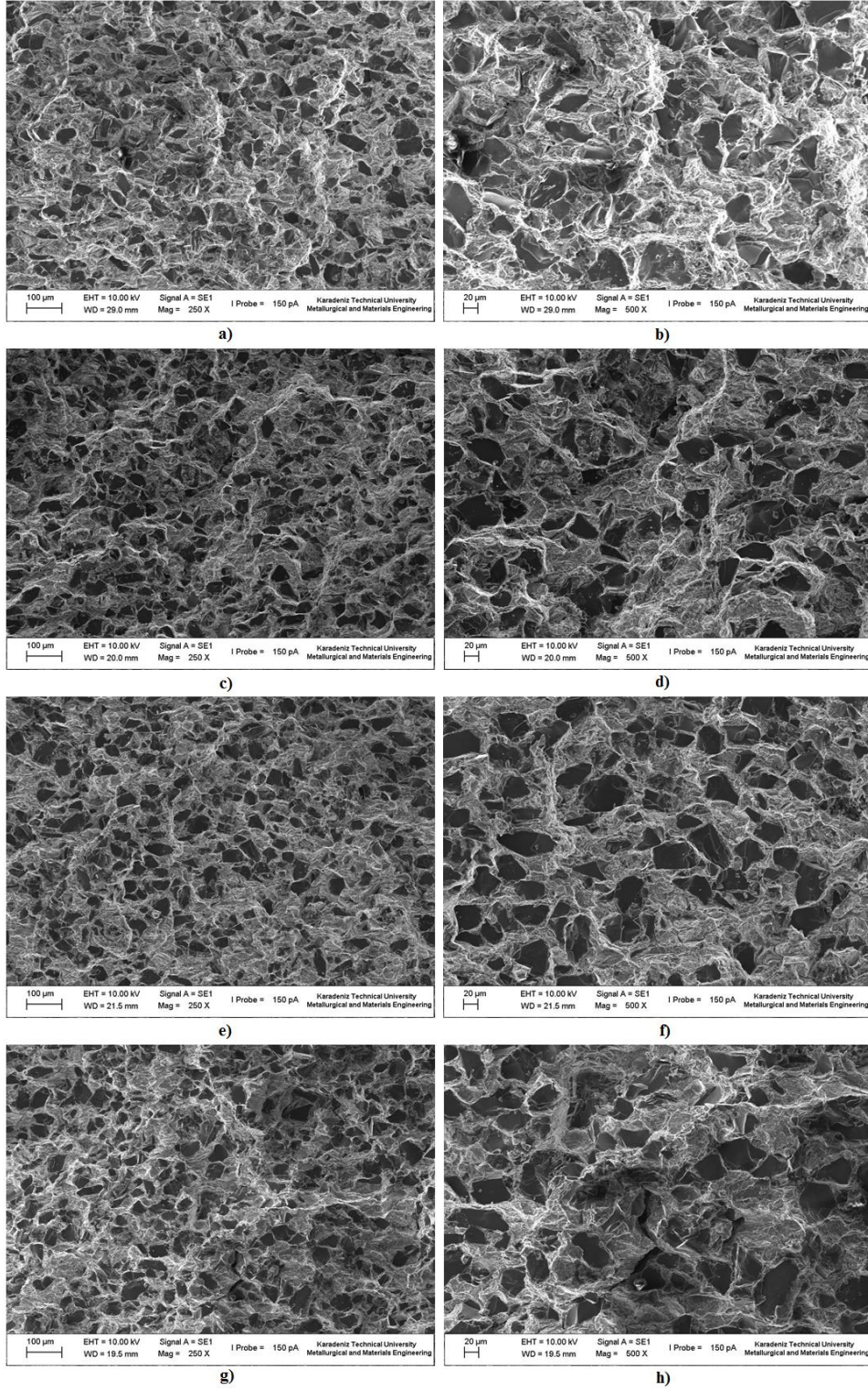
Şekil 37. ı-i) 190 °C 10 saat yaşlandırılmış numunenin kırılma yüzeyleri

3.4.3. %14 B₄C Takviyeli Al 2024' ün Kırılma Yüzey Görüntüleri



Şekil 38. a-b) 160 °C 10 saat c-d) 160 °C 16 saat e-f) 160 °C 22 saat yaşlandırılmış numunelerin kırılma yüzeyleri

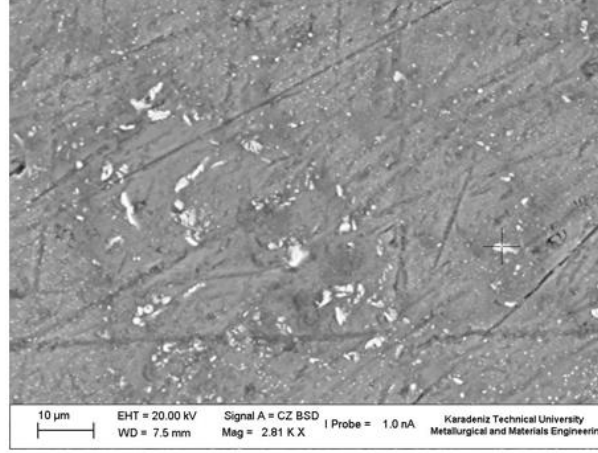
3.4.3. %21 B₄C Takviyeli Al 2024' ün Kırılma Yüzey Görüntüleri



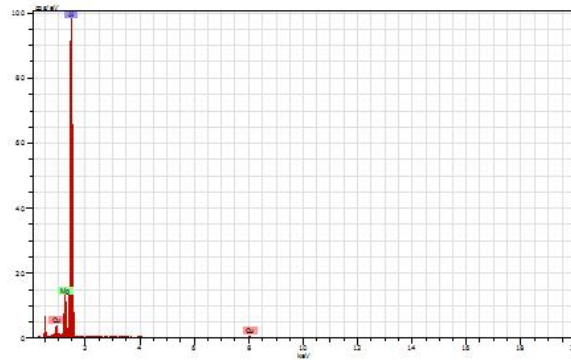
Şekil 39. a-b) Isıl işlem uygulanmamış c-d) 160 °C 10 saat yaşlandırılmış e-f) 160 °C 16 saat yaşlandırılmış g-h) 160 °C 22 saat yaşlandırılmış numunelerin kırılma yüzeyleri

3.5. Enerji Dağılımlı X-Işınları (EDS) Analizi

Yapılan elementel analizler sonucunda SEM görüntüleri üzerinde işaretli noktalarındaki intermetalik fazlara analiz yapılmıştır. Genel olarak başlangıçta ortalama %4,5 Cu ve %1,5 Mg içeriğine sahip Al 2024 alaşımı kullanıldığından ısıl işlem sonrasında Cu ve Mg oranlarında ciddi artışlar gözlemlendi. Burada oluşan çökelti fazlarında Cu oranı %33' lere varan artışlar gösterirken Mg oranı % 12'lere kadar yükselme göstermiştir. Yapı içerisinde çubuksu, düzensiz şekilli ve oval yapılar gözlemlenirken, bu yapılarda genellikle çubuksu yapıların bakırca zengin ve oval yapıların magnezyumca zengin olduğu söylenebilir.



a)

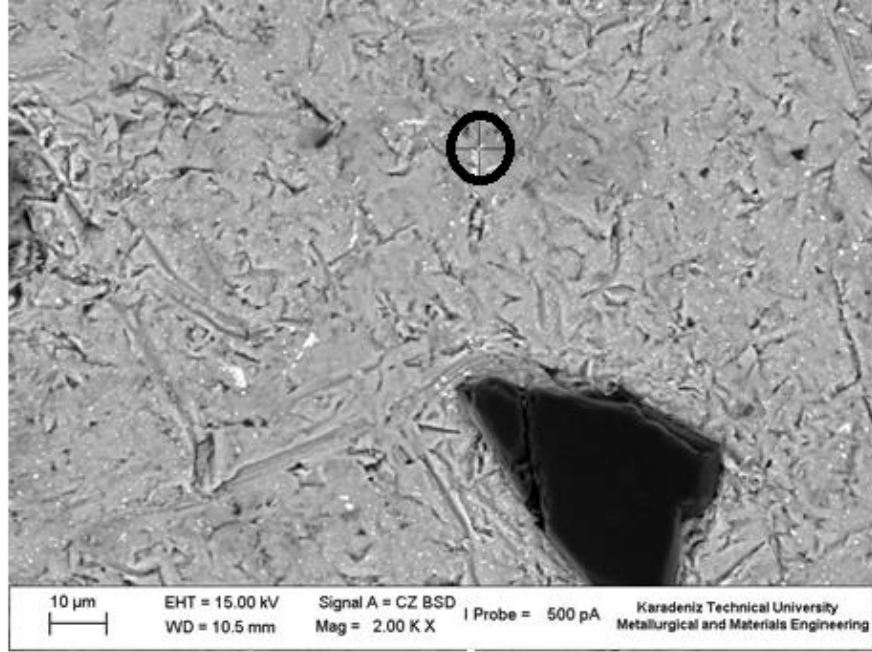


El AN Series	unn. C [wt. %]	norm. C [wt. %]	Atom. C [at. %]	Error [%]
Mg 12 K-series	7.20	9.04	10.20	0.4
Al 13 K-series	68.88	86.46	87.86	3.3
Cu 29 K-series	3.59	4.50	1.94	0.2

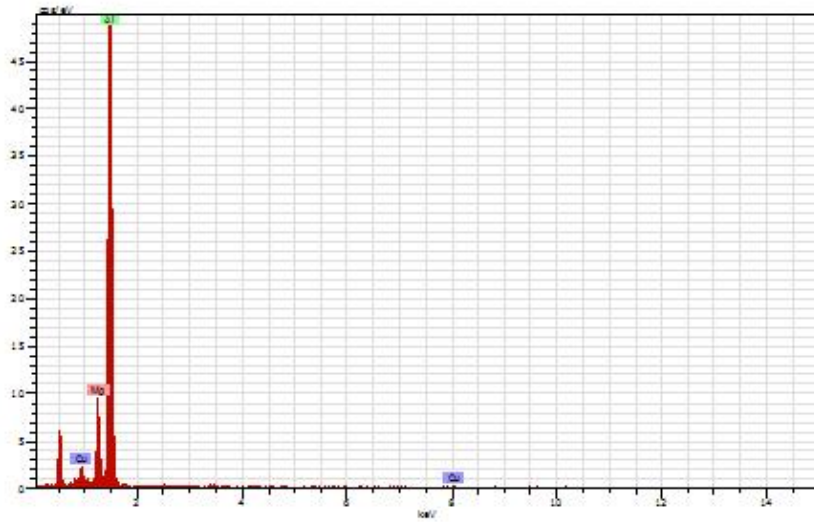
Total:	79.66	100.00	100.00	

b)

Şekil 40. 190 °C, 22 saat yaşlandırılmış numunenin a) Takviyesiz Al 2024 SEM görüntüsü b) + işaretli noktanın EDS analizi



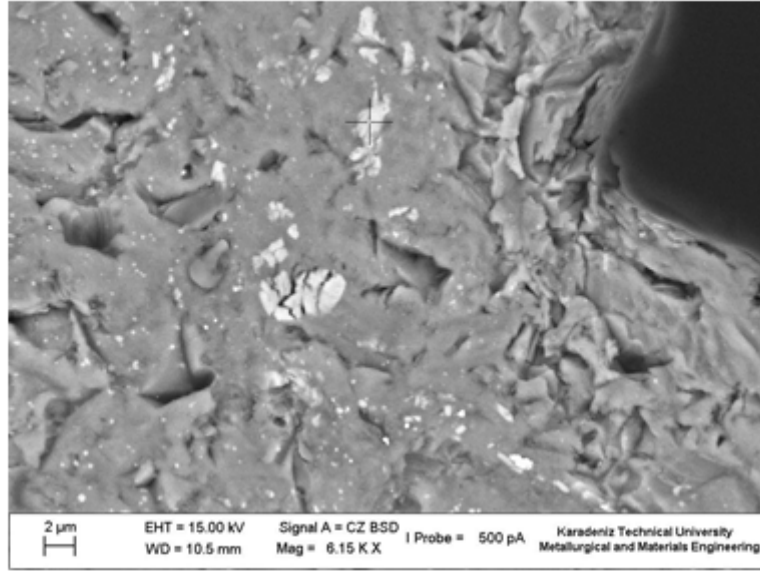
a)



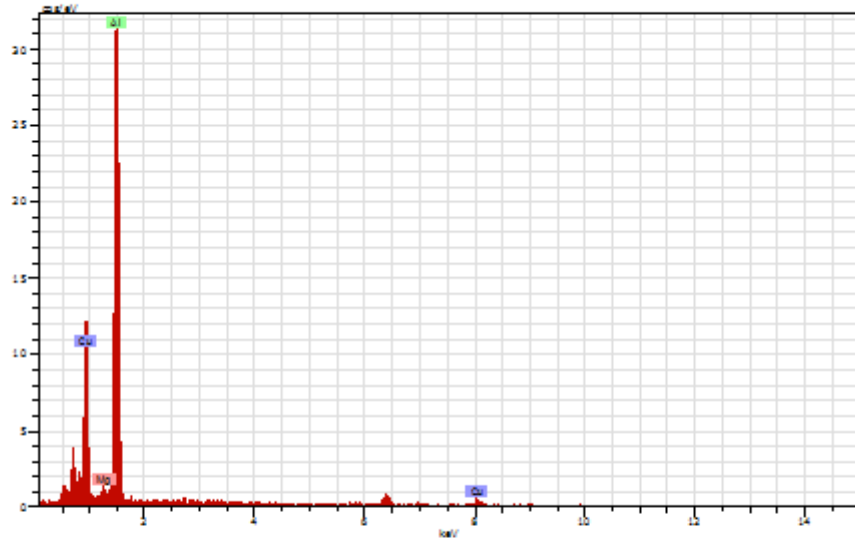
El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mg	12	K-series	11.17	12.24	14.08	0.7
Al	13	K-series	72.44	79.33	82.21	3.6
Cu	29	K-series	7.70	8.43	3.71	1.0
Total:			91.31	100.00	100.00	

b)

Şekil 41. 160 °C, 22 saat yaşlandırılmış numunenin a) %7 B₄C takviyeli Al 2024 SEM görüntüsü b) + işaretli noktanın EDS analizi



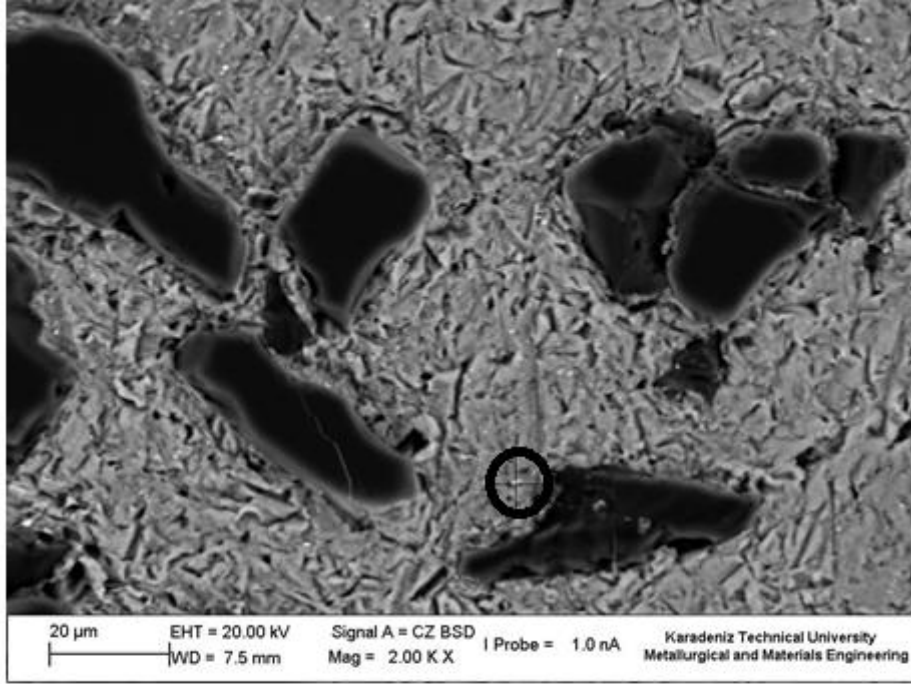
a)



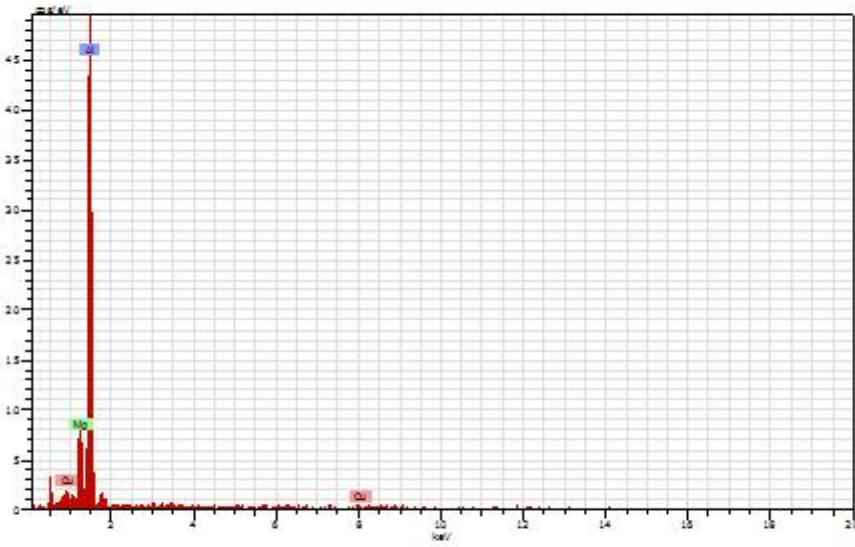
El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mg	12	K-series	1.00	1.73	2.38	0.1
Al	13	K-series	37.10	64.65	79.96	1.8
Cu	29	K-series	19.29	33.62	17.66	1.5
Total:			57.38	100.00	100.00	

b)

Şekil 42. 160 °C, 22 saat yaşlandırılmış numunenin a) %21 B₄C takviyeli Al 2024 SEM görüntüsü b) + işaretli noktanın EDS analizi



a)



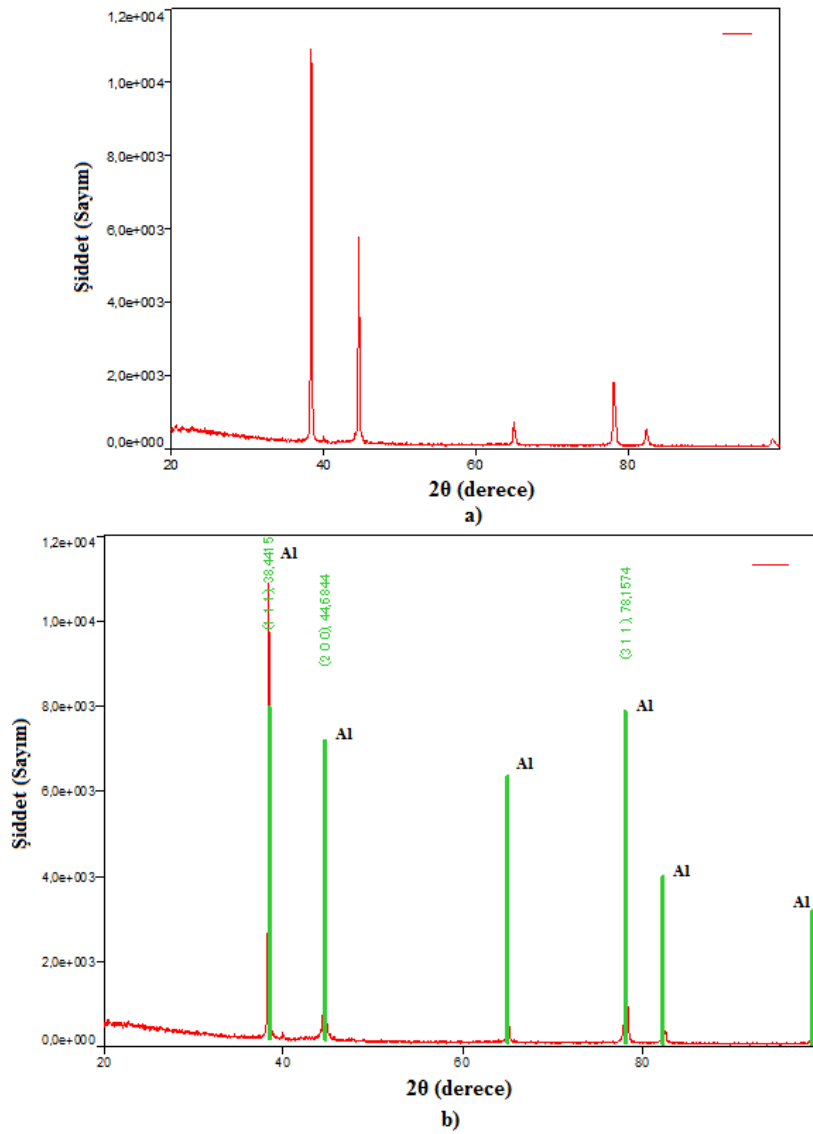
El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mg	12	K-series	8.72	11.77	13.47	0.7
Al	13	K-series	59.87	80.85	83.31	3.2
Cu	29	K-series	5.46	7.38	3.23	0.7
Total:			74.05	100.00	100.00	

b)

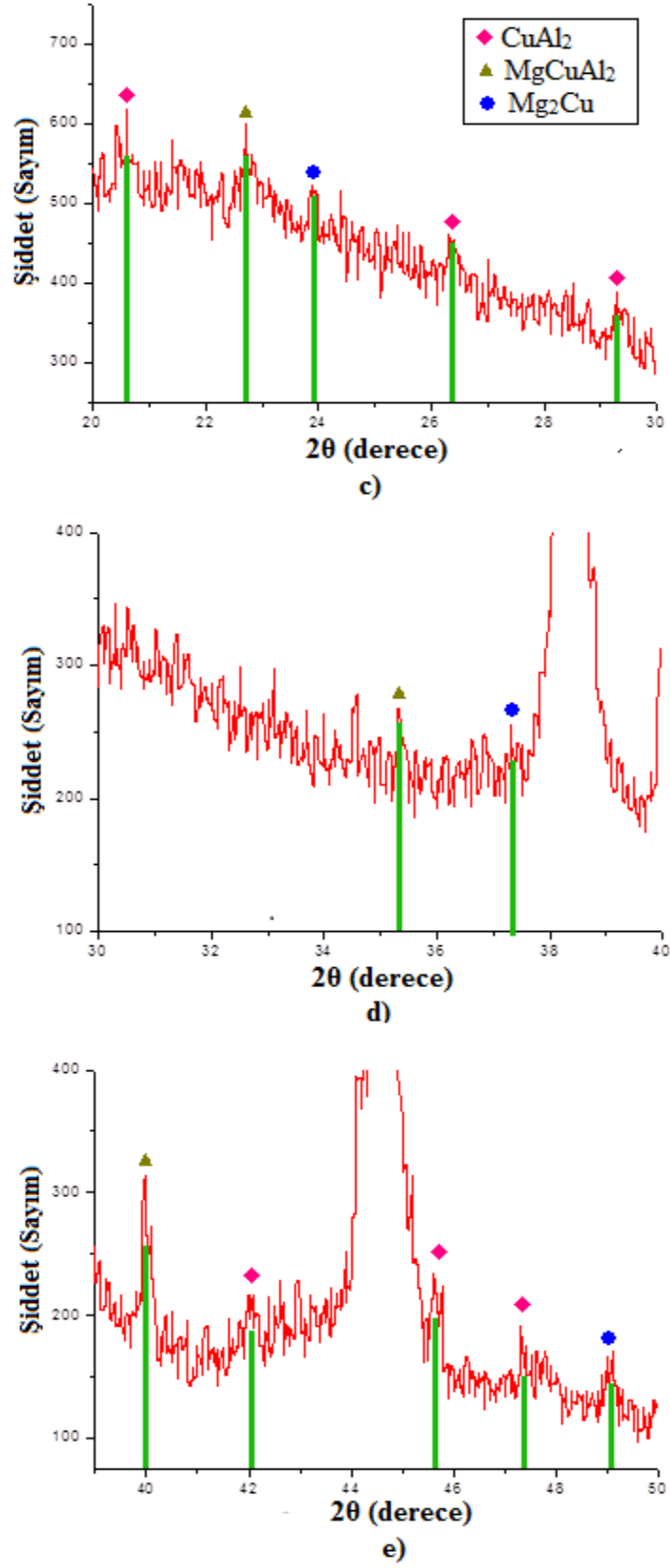
Şekil 43. 190 °C, 22 saat yaşlandırılmış numunenin a) %21 B₄C takviyeli Al 2024 SEM görüntüsü b) + işaretli noktanın EDS analizi

3.6. XRD Faz Karakterizasyonu

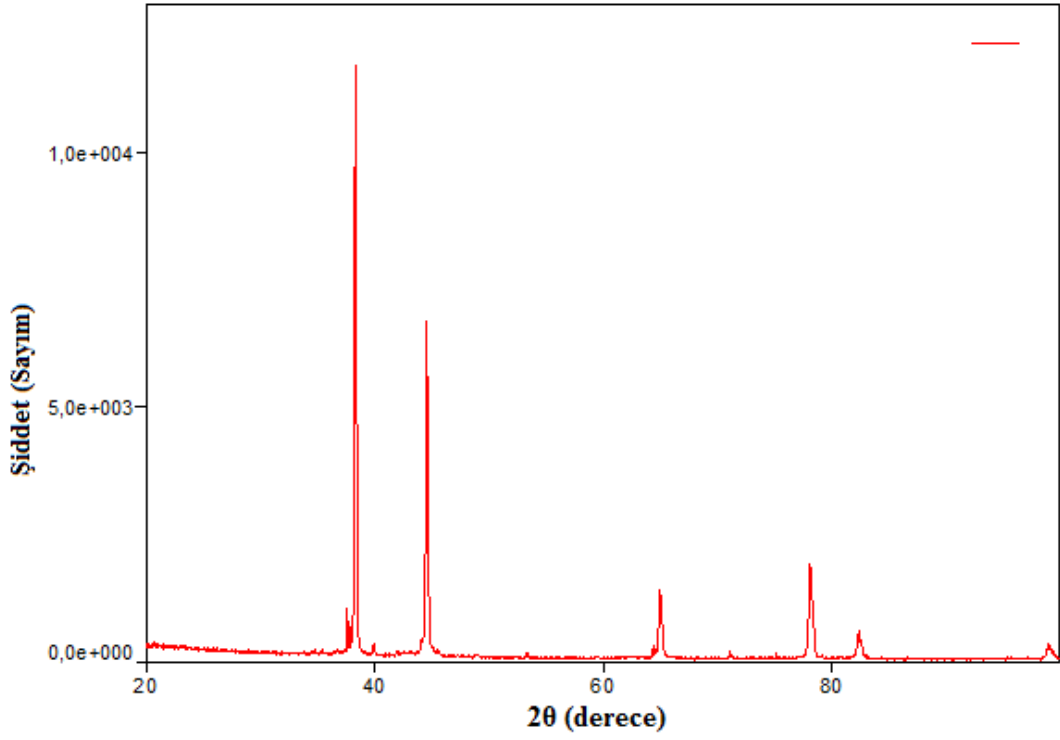
İntermetaliklerin oluşumunu ve faz karakterizasyonu belirlemek amacıyla kompozit numunelere XRD analizi yapılmıştır. Şekil 44’ de yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış Al 2024 alaşımına ait XRD pikleri görülmektedir. Pikler çok yüksek şiddete sahip olduğundan daha düşük şiddete sahip piklere büyütme yaparak fazların oluşumunu gösteren pikleri göstermeye çalıştık. Burada intermetalik fazların CuAl_2 , MgCuAl_2 , Mg_2Cu gibi oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca takviyeli numunelerde B_4C piklerine de rastlanmıştır.



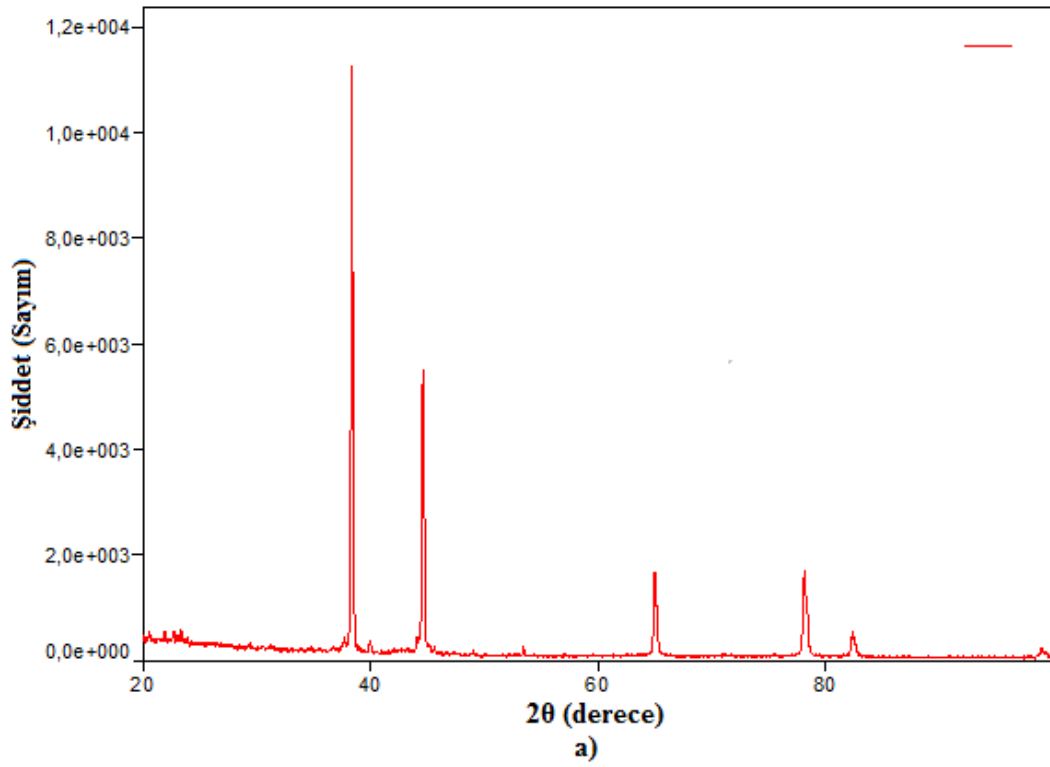
Şekil 44. 190 °C’de 16 saat yaşlandırılmış takviyesiz Al 2024 alaşımına ait XRD spektrumu a) genel görünüm b) Al piklerinin gösterimi



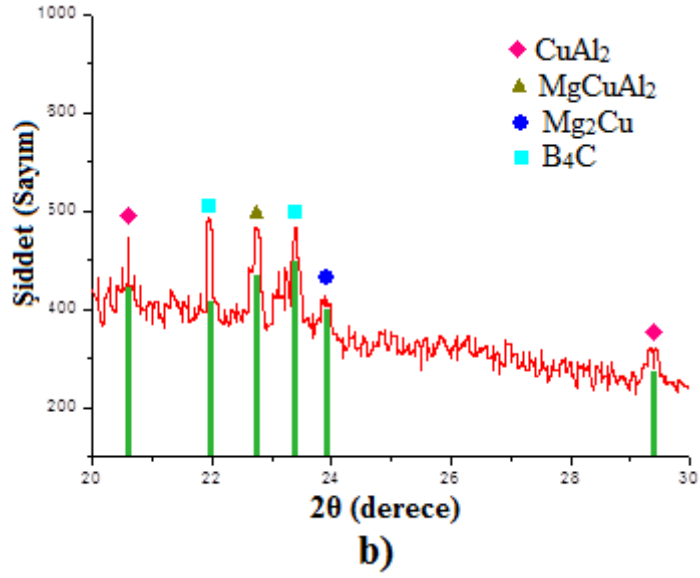
Şekil 45. 190 °C’de 16 saat yaşlandırılmış takviyesiz Al 2024 alaşımına ait XRD spektrumu c) 20-30 d) 30-40 e) 40-50 theta derecesi arası büyütülmüş halı



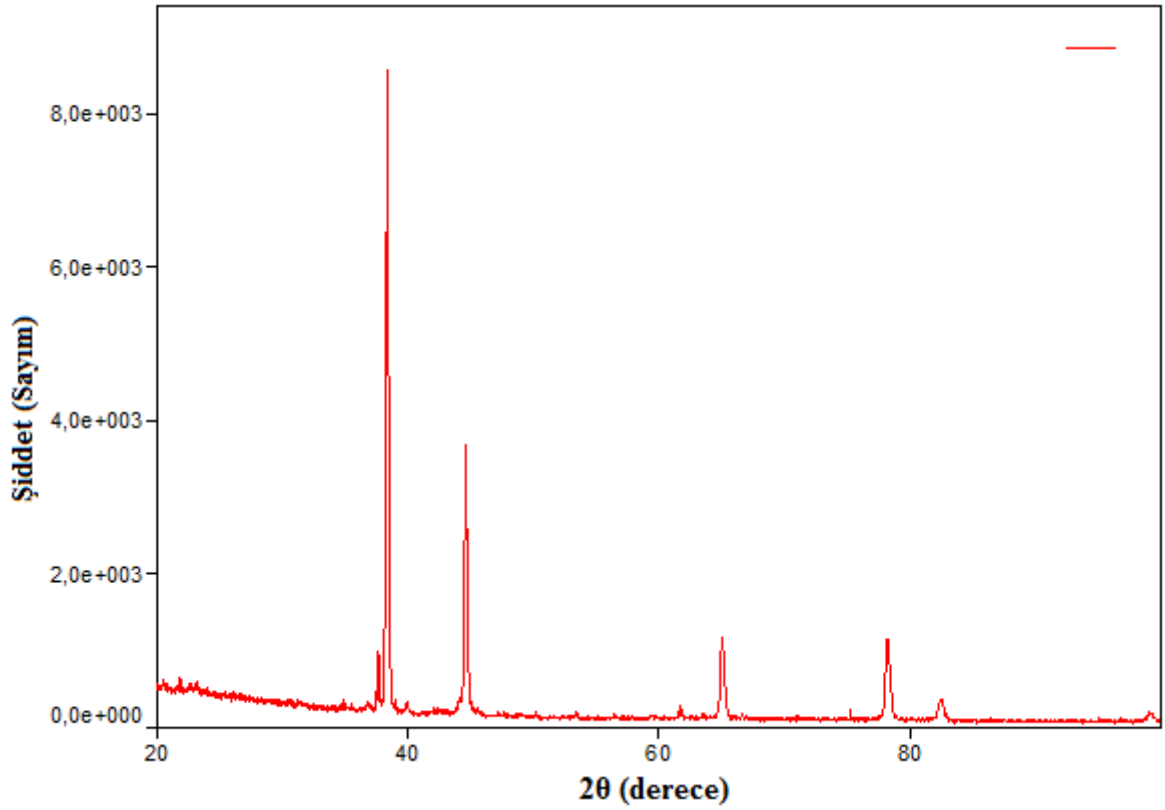
Şekil 46. 190 °C’de 10 saat yaşlandırılmış %7 B₄C takviyeli Al 2024 alaşımına ait XRD spektrumu



Şekil 47. 190 °C’de 10 saat yaşlandırılmış %14 B₄C takviyeli Al 2024 alaşımına ait XRD spektrumu a) genel görünüm



Şekil 48. 190 °C' de 10 saat yaşlandırılmış %14 B₄C takviyeli Al 2024 alaşımına ait XRD spektrumu b) 20-30 theta derece arası büyütülmüş hali

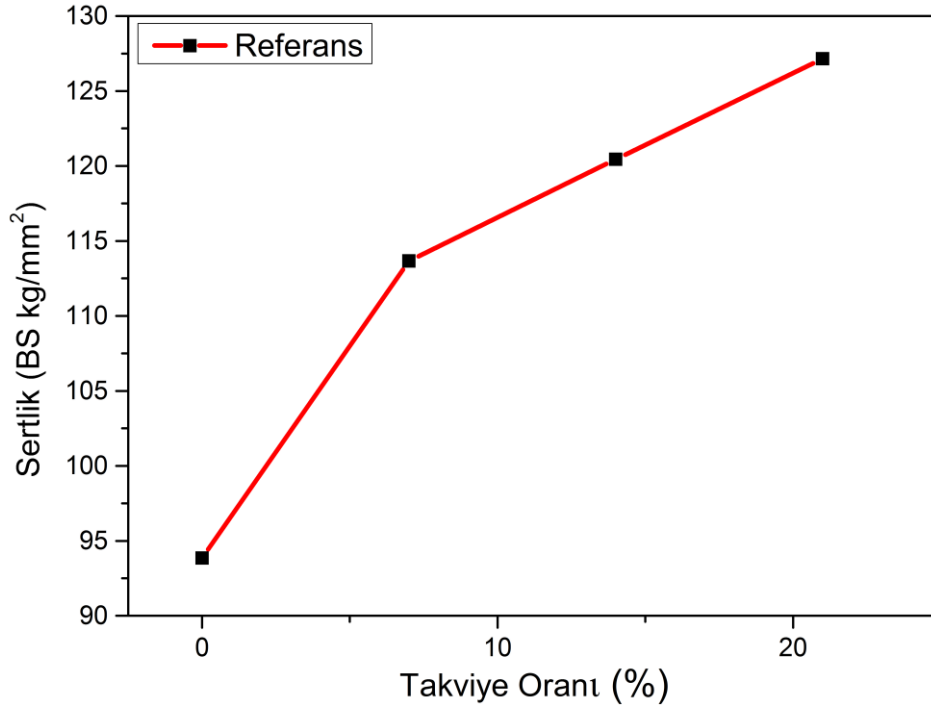


Şekil 49. 190 °C' de 16 saat yaşlandırılmış %21 B₄C takviyeli Al 2024 alaşımına ait XRD spektrumu

3.7. Sertlik Değerlerindeki Değişimler

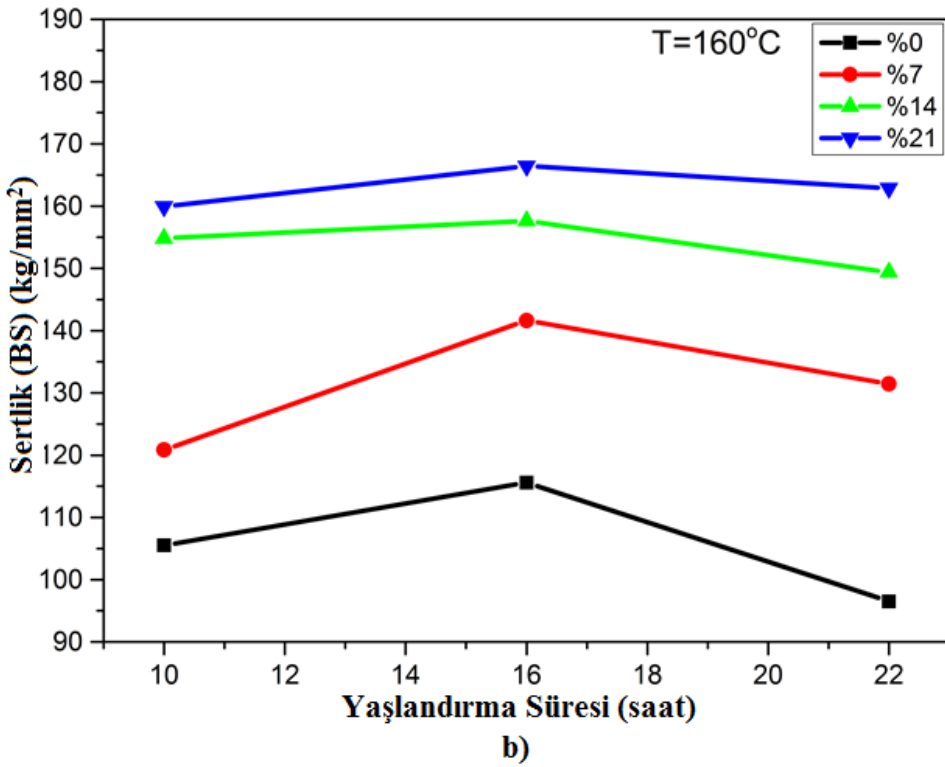
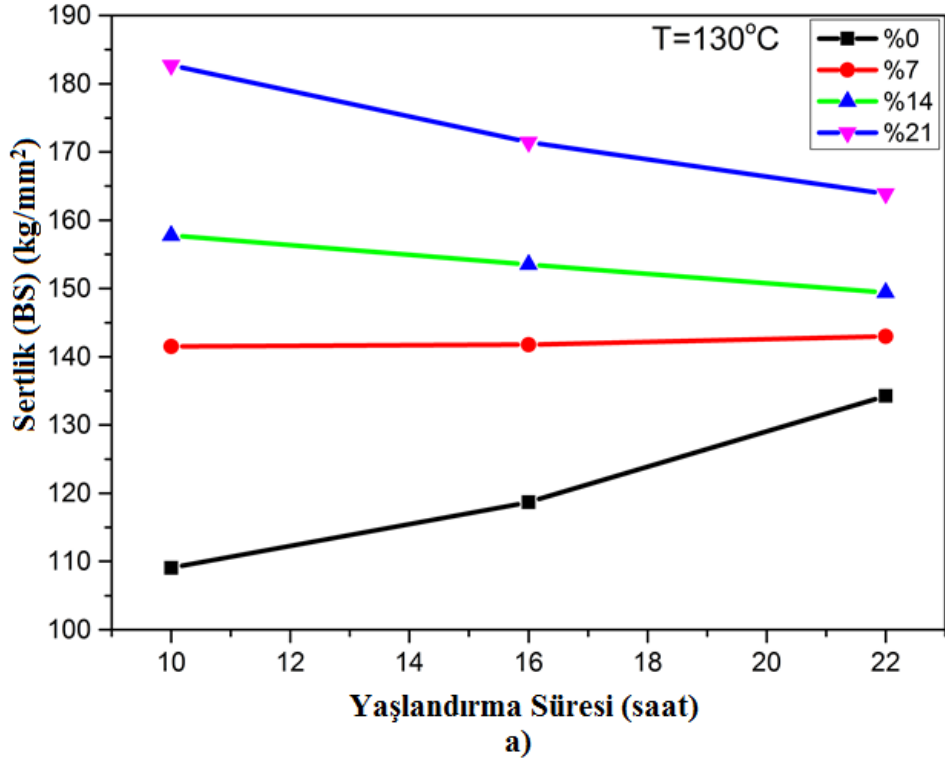
Üretilen numunelerde yaşlandırma sıcaklığının ve takviye miktarının kompozitin sertliğine etkilerinin belirlenmesi amacıyla ısıl işlem öncesi ve sonrası olmak üzere numunelerin brinel sertlik (BS) değerleri ölçülmüştür. Sertlik ölçümlerinde en az 5 farklı noktadan yapılan ölçümlerin aritmetik ortalaması alınmıştır. Takviyeli oranının artmasıyla sertliğin doğru orantılı olarak artış gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca düşük sıcaklıkta yapılan ısıl işlemin daha iyi sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır. En yüksek sertlik değeri % 21 B₄C takviyeli 130 °C' de yaşlandırılmış kompozitte 182 BSD değeri elde edilmiştir. Bu durumda başlangıca nazaran yaklaşık olarak %45'lik bir sertlik artışı sağlanmıştır.

3.7.1. Isıl İşlem Öncesi Numunelerdeki Sertlik Değişimi

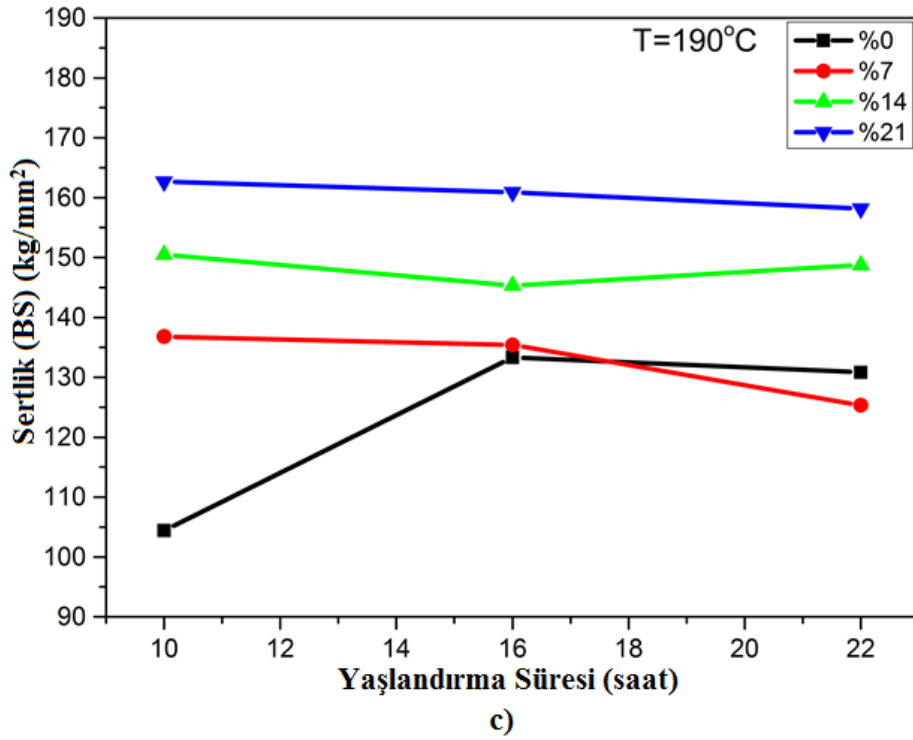


Şekil 50. Isıl işleme tabi tutulmamış numunelerde takviye oranı ile sertliğin değişimi

3.7.2. Isıl İşlem Sonrası Numunelerdeki Sertliğin Yaşlandırma Süresine Göre Değişimi

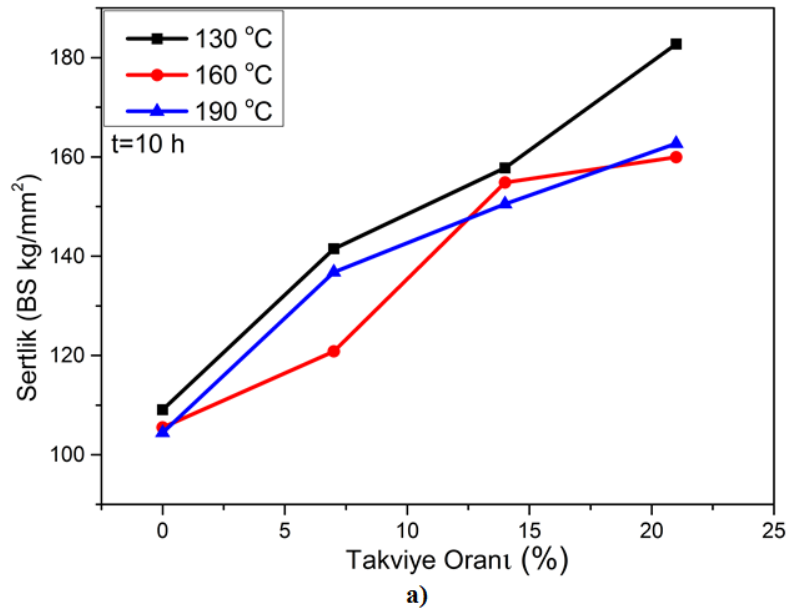


Şekil 51. Farklı takviye oranlarında ve sıcaklıklarda a) 130 °C b) 160 °C'de yaşlandırma süresi ile sertliğin değişimi

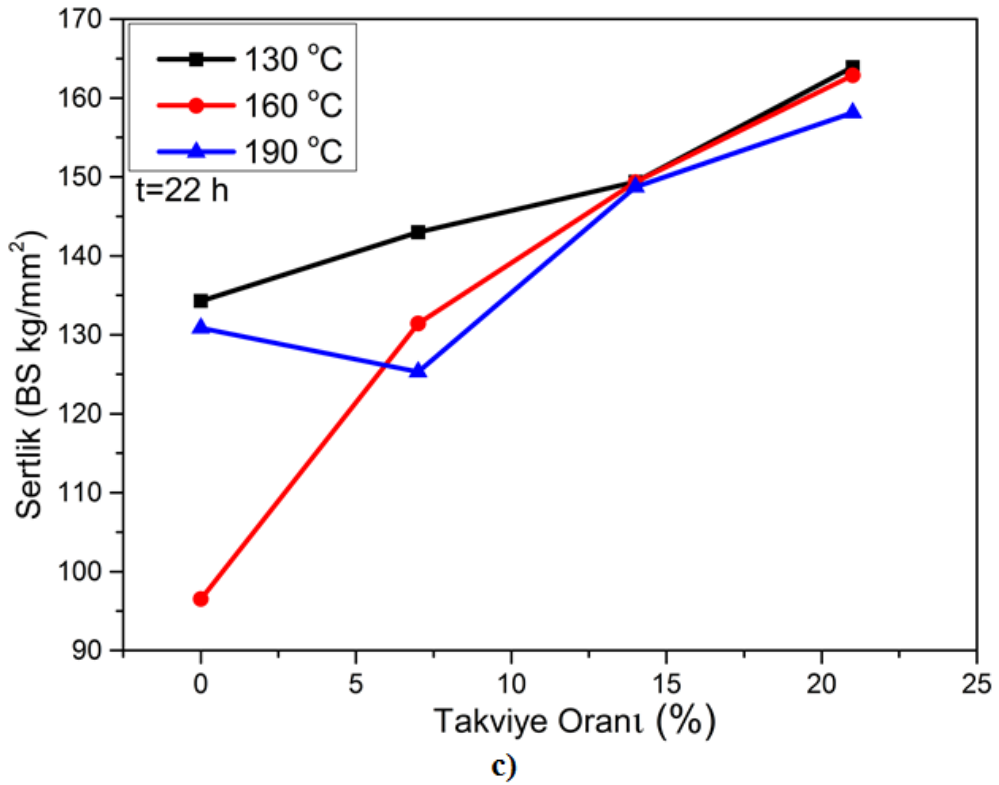
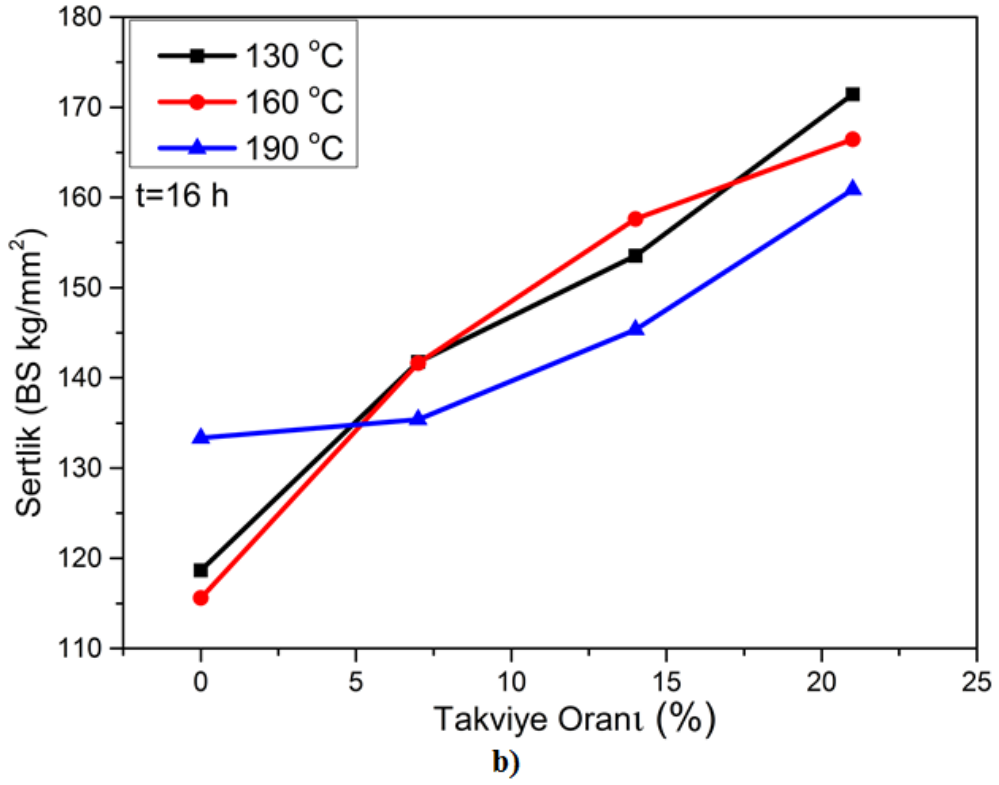


Şekil 52. Farklı takviye oranlarında ve sıcaklıklarda c) 190 °C’de yaşlandırma süresi ile sertliğin değişimi

3.7.3. Isıl İşlem Sonrası Numunelerdeki Sertliğin Takviye Oranına Göre Değişimi



Şekil 53. Farklı sıcaklıklarda (130-160-190 °C) a) 10 saat yaşlandırılmış numunelerin sertliğinin takviye oranı ile değişimi

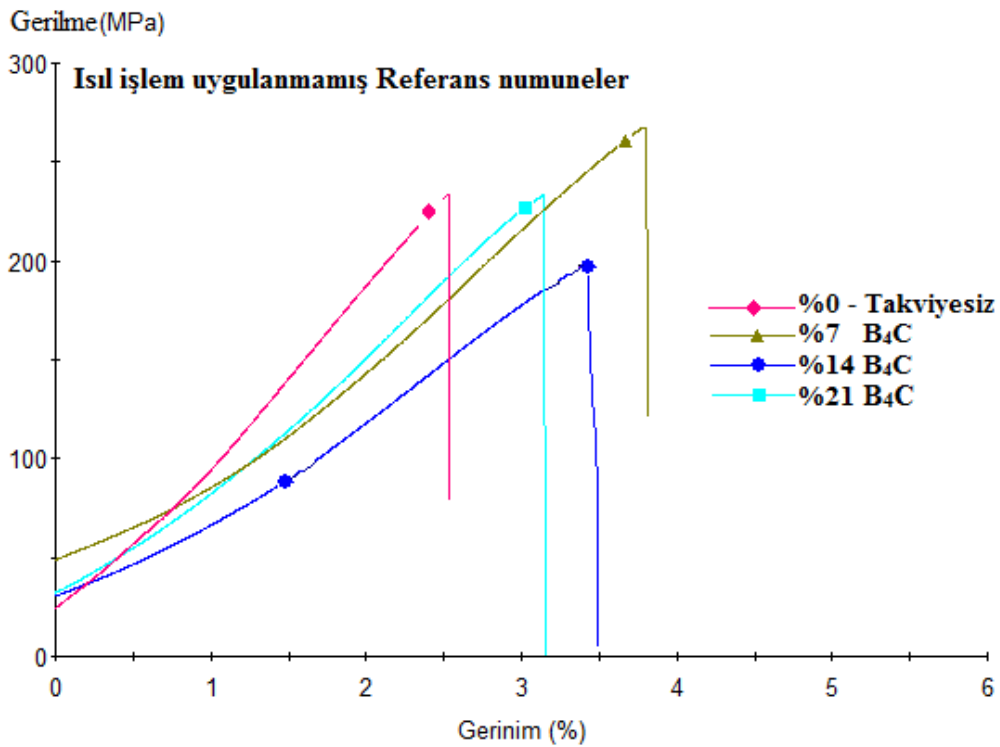


Şekil 54. Farklı sıcaklıklarda (130-160-190 °C) b) 16 saat c) 22 saat yaşlandırılmış numunelerin sertliğinin takviye oranı ile değişimi

3.8. Çekme Mukavemet Değerlerindeki Değişimler

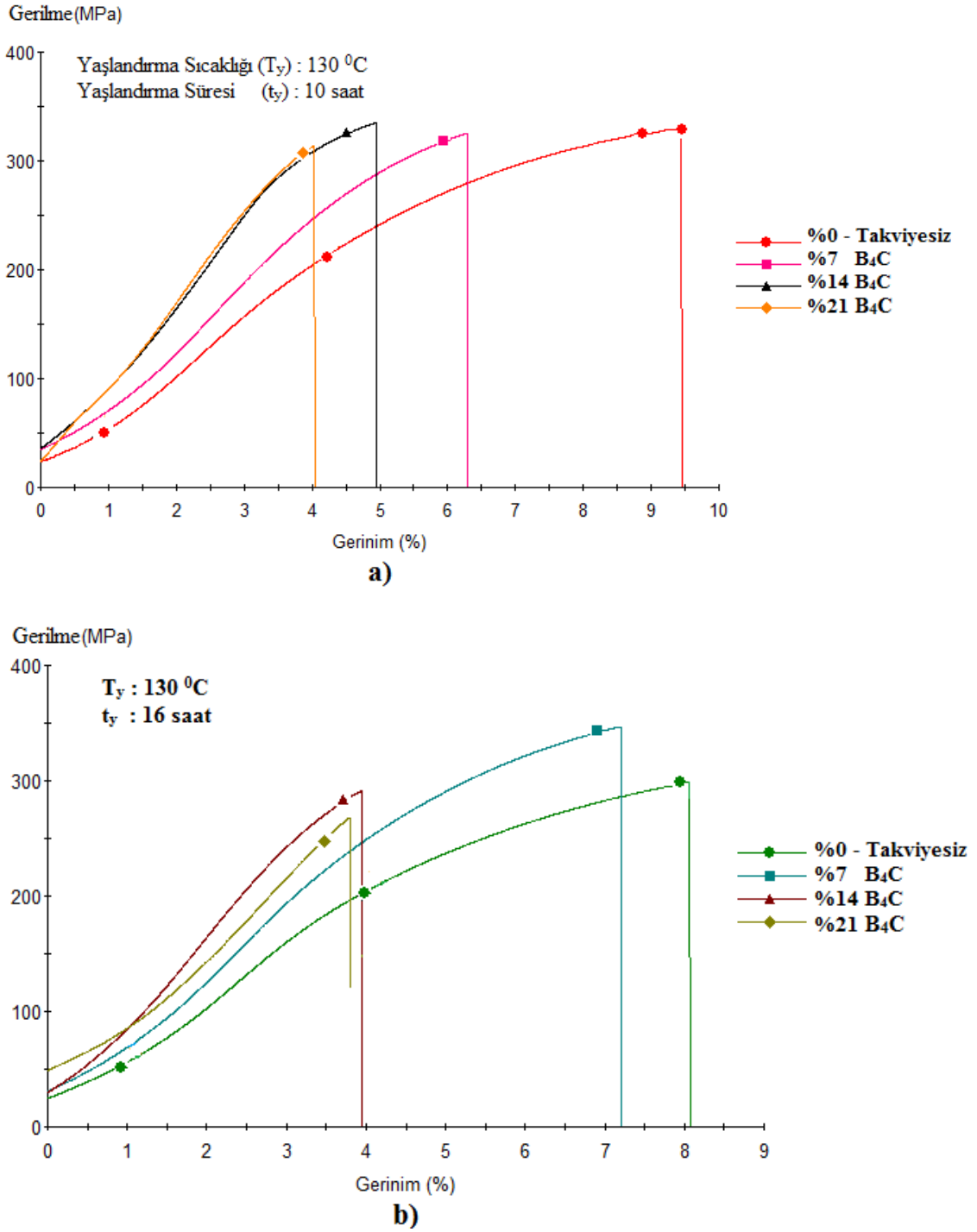
Çekme mukavemet değerlerinin yüksek olması mühendislik malzemelerinde aranan özelliktir. Isıl işlem öncesinde ve sonrasında yapılan testlerde çekme mukavemetinde %50 oranında bir artış sağlanmıştır. En yüksek çekme mukavemeti değeri %7 B₄C takviye oranında 190 °C'de 10 saat yaşlandırılmış numunede yaklaşık 403 MPa olarak elde edilmiştir. Takviye oranın %7'nin üzerine çıkmasıyla genel itibariyle çekme mukavemetinin azaldığı söylenebilir. Yüksek çekme mukavemet değerleri yüksek sıcaklıklarda, kısa sürede ve düşük sıcaklıklarda, uzun sürede yaşlandırma ısıl işlemi uygulanırsa elde edilir.

3.8.1. Isıl İşlem Öncesi Çekme Mukavemet Değerlerindeki Değişimler

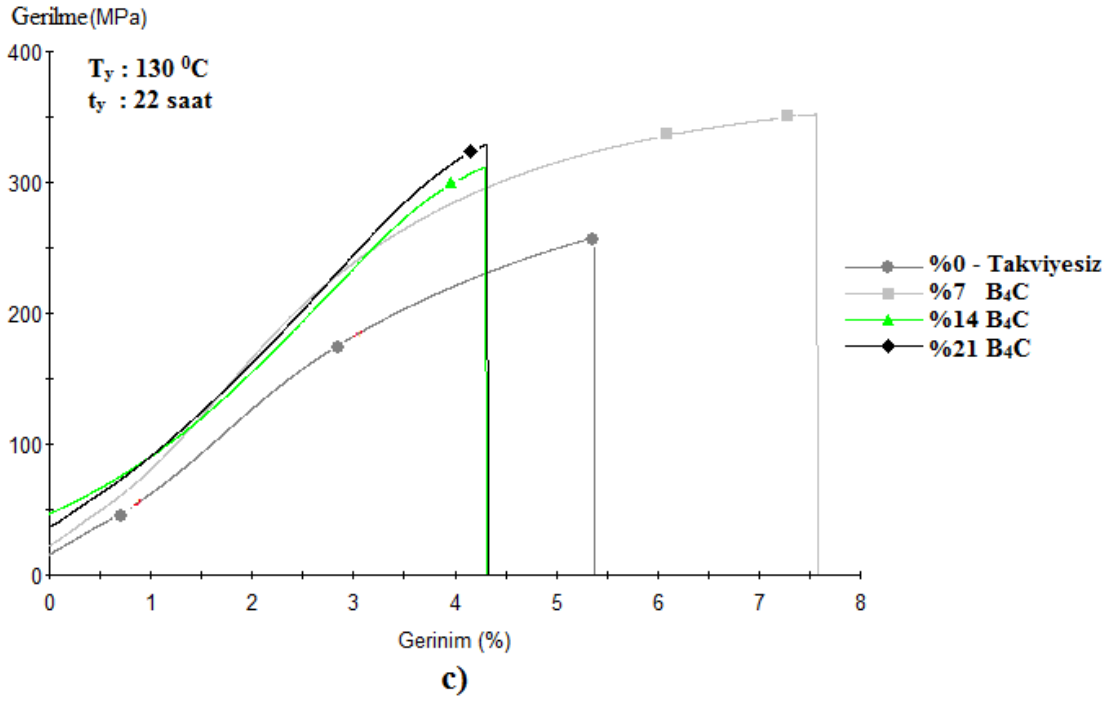


Şekil 55. Isıl işleme tabi tutulmadan önce numunelerdeki çekme mukavemetleri

3.8.2. 130 °C'de Çekme Mukavemet Değerlerindeki Değişimler

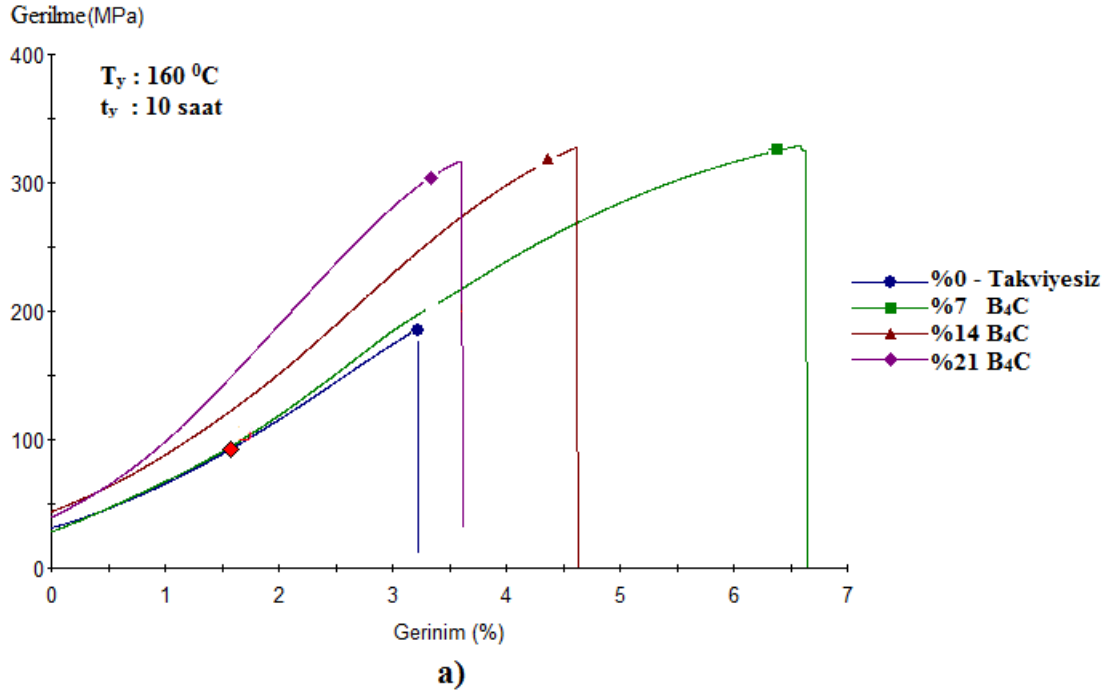


Şekil 56. 130 °C'de a) 10 saat b) 16 saat yaşlandırılmış numunelerin çekme mukavemeti grafikleri

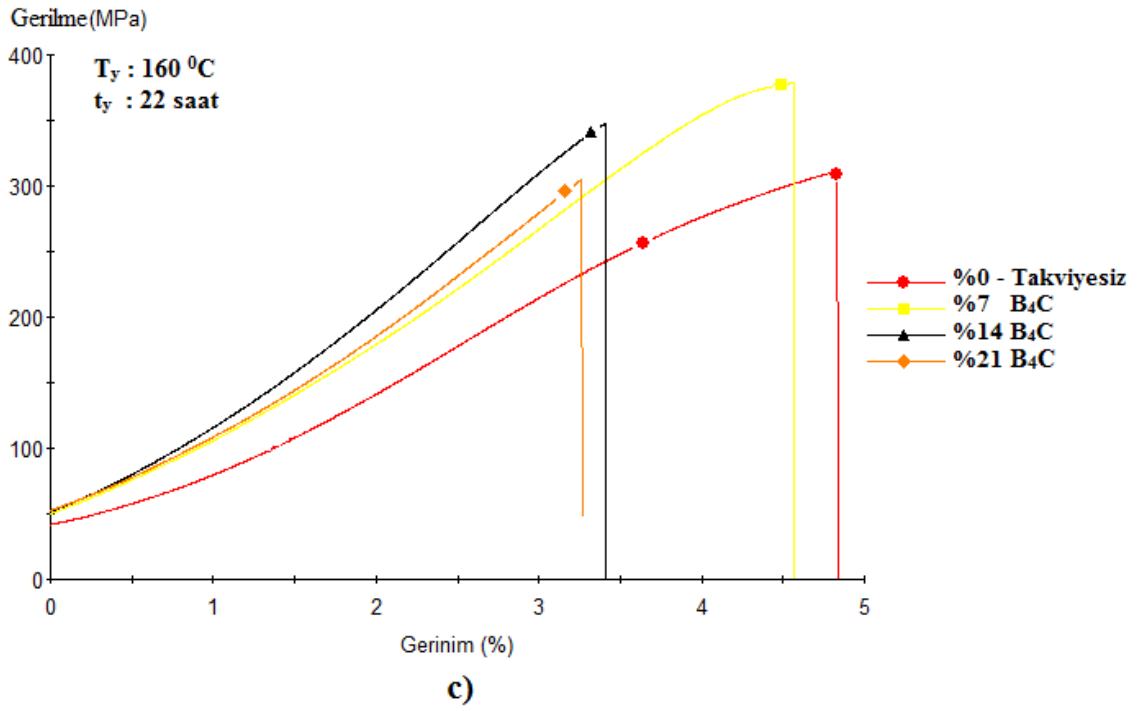
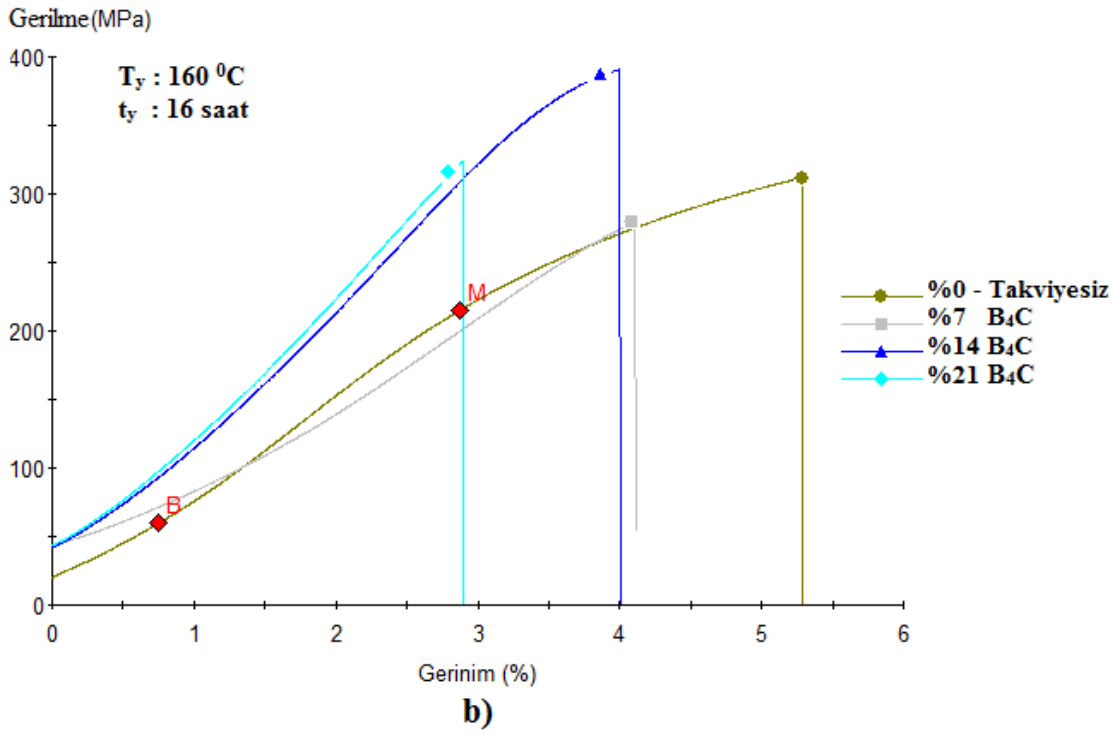


Şekil 57. 130 ⁰C'de c) 22 saat yaşlandırılmış numunenin çekme mukavemeti grafiği

3.8.3. 160 ⁰C'de Çekme Mukavemet Değerlerindeki Değişimler

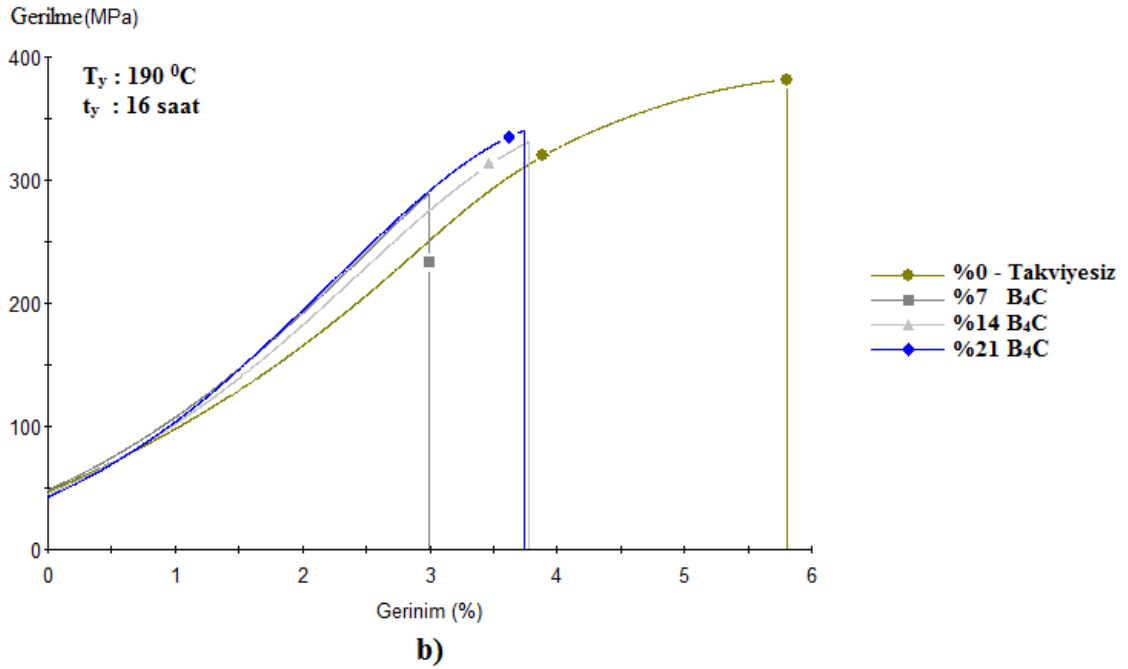
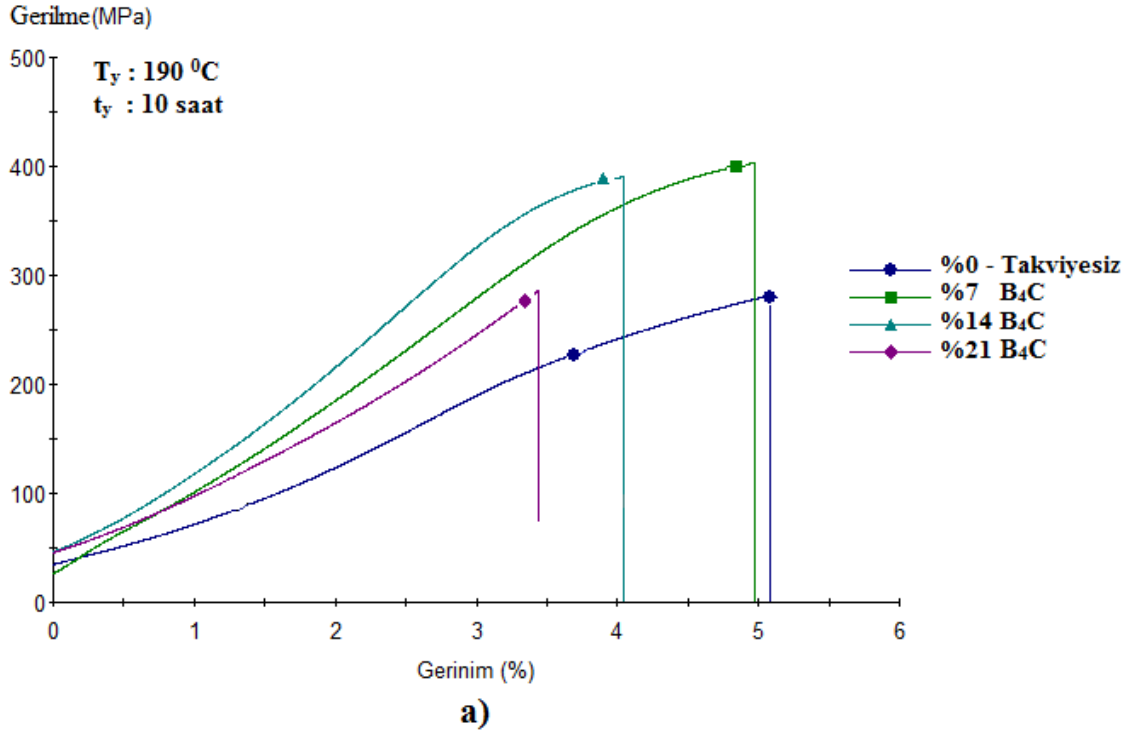


Şekil 58. 160 ⁰C'de a) 10 saat yaşlandırılmış numunenin çekme mukavemeti grafiği

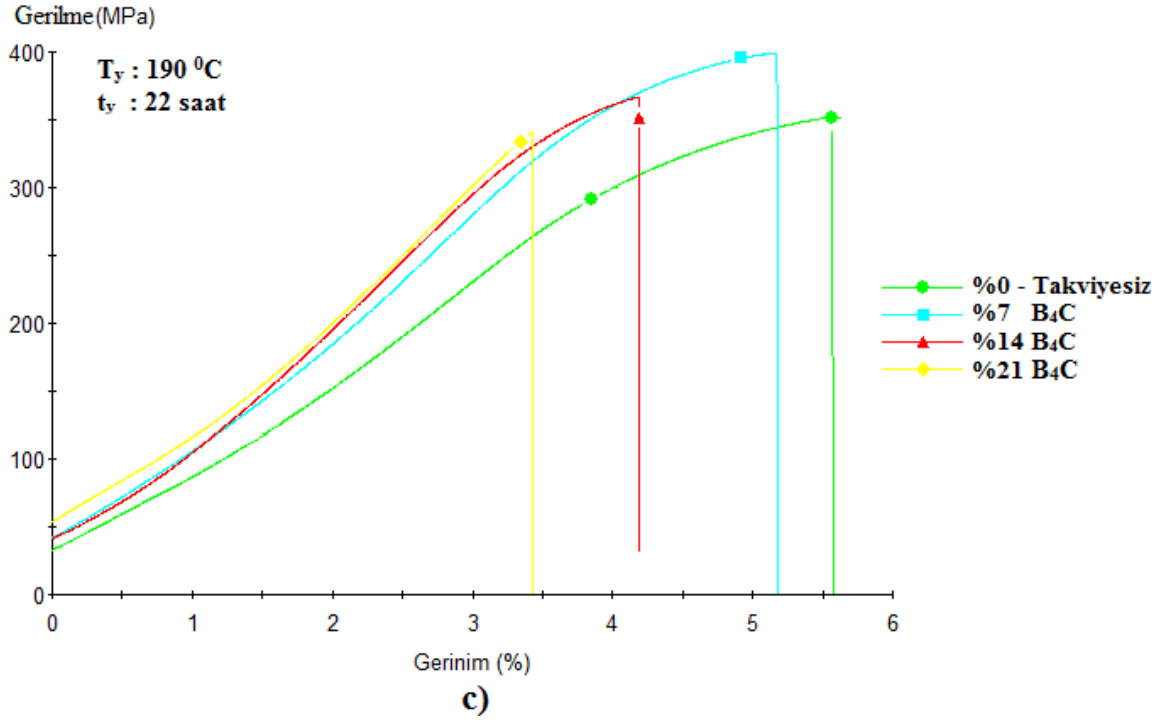


Şekil 59. 160 °C’de b)16 saat c) 22 saat yaşlandırılmış numunelerin çekme mukavemeti grafikleri

3.8.4. 190 °C'de Çekme Mukavemet Değerlerindeki Değişimler



Şekil 60. 190 °C'de a)10 saat b) 16 saat yaşlandırılmış numunelerin çekme mukavemeti grafikleri



Şekil 61. $190 \text{ } ^\circ\text{C}$ 'de c) 22 saat yaşlandırılmış numunenin çekme mukavemeti grafiği

4. İRDELEME

Morfolojik analizler sonucunda SEM görüntüleri incelendiğinde Al 2024 alaşımında ve kompozitlerde ısıtıl işlem sonrasında çökelti fazlarının oluştuğu belirlenmiştir. Yapıda çökeltme ısıtıl işlemi sırasında yaşlandırma sıcaklığına ve süresine ile ilişkili olarak çökelti boyutu ve miktarında değişiklik olduğu tespit edilmiştir. AA 2024 alaşımları bünyesinde bulunan temel alaşım elementi olan bakır, çökeltme ısıtıl işlemi sonucunda intermetalik fazlardan $CuAl_2$ ve $MgCuAl_2$ çökelti fazlarını meydana getirmektedir. Çökeltme ısıtıl işlem sonrası oluşan intermetalik fazların içerisinde oluşan yüksek orandaki bakır oranı magnezyum ile GP bölgelerinde $CuAl_2$ çökelti fazlarını oluşturur. Öyleki düşük orandaki bakır oranı magnezyum ile GP bölgelerinde $MgCuAl_2$ çökeltilerini oluşturmaktadır. Bu iki farklı çökelti fazları ise temel yapının mekanik ve fiziksel özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir (Kaçar et al., 2003).

Sertlikteki değişimler ele alındığında kompozit malzemede artan takviye oranı ve ısıtıl işlemin etkisiyle sertlik değerlerinde artış tespit edilmiştir. Takviye miktarının artmasıyla metal matrisli kompozitlerin sertliğinde artışın sebebi, matris-takviye malzemesi ısıtıl genleşme katsayısı farklılıklarına bağlı olarak oluşan kalıcı gerilmeler, sert parçacık oranındaki artış sebebiyle olduğu söylenebilir (Sur ve arkadaşları, 2005). Yaşlandırma işleminde artan sıcaklık ve süreye bağlı olarak artan sertlik değeri belli bir sıcaklık ve süreden sonra azalmaktadır. Sertlik değerleri incelendiğinde normal şartlarda $130\text{ }^{\circ}C$, 22 saat; $160\text{ }^{\circ}C$, 16 saat ve $190\text{ }^{\circ}C$, 10 saatte maksimum sertlik değerleri elde edilecektir. Çökeltme ısıtıl işlemi uygulanan numunelerin sertlik değerlerinin artması, yaşlandırma süresi ve sıcaklığının artışı ile birlikte kafes sistemi bünyesinde bulunan boşluklar sayesinde meydana gelen difüzyon sebebiyle gerçekleşmektedir. Bu boşlukların çözen atomların sayıca zengin olmasından ötürü GP bölgelerinin oluşumu için önemli etkiye sahip olduğu belirlenmiştir (Cavazos and Colas, 2001). Bölgesel segregasyon, GP bölgesi içerisinde kafes düzlemlerinin distorsiyonuna sebep olur ve matris içerisindeki birçok atom tabakalarının genişlemesine yol açar. Kafes sisteminde distorsiyon artışının nedeni GP bölgelerin miktarının artmasıyla alakalıdır. Yaşlandırma başlangıcı ve sertlik değeri artışının pik noktasındaki yaşlandırma şartlarındaki çökeltilerin oluşumuna bağlı olarak dislokasyon hareketinin engellenmesinin neticesi olarak mukavemette artış

olmuştur. Mukavemet artışıyla birlikte sertlik değerinde de bir artış meydana gelir (Cavazos and Colas, 2001).

AA 2024 numunelerinde çökeltme ısıl işlemi öncesi düşük olan sertlik değerinin yaşlandırma sıcaklığı ve süresine bağlı olarak artan sertlik değeri 220 °C’de azalmaya başlamıştır. Bunun sebebi, yaşlanma sıcaklığı ve süresiyle birlikte numunelerin yapısı içerisinde meydana gelen çökeltelerin biraraya gelmesi neticesinde iri çökeltelerin oluşması, çökeltelerin sayısının azalması ve sürekli olarak çökelti boyutlarının artması sonucunda aşırı yaşlanma süreci başlamıştır. Bu durumda, dislokasyon hareketlerini engelleyici unsurlar çok azalmış ve malzemenin mekanik özelliklerinin azalmasına sebep olmuştur (Cavazos and Colas, 2001).

Çökeltme ısıl işlemiyle beraber numunelerin çekme mukavemetlerinde artış olduğu deney sonuçlarından görülmektedir. Bunu en fazla etkileyen faktör α fazı içerisinde çökelen CuAl_2 bileşimidir. Çekme mukavemeti değerleri incelendiğinde ağırlıkça %7 B_4C takviyeli kompozitlerde en yüksek mukavemet değerleri elde edilmiştir. Bu oranın üzerinde değişiklik göstermekle birlikte mukavemette düşme olduğu gözlemlenmektedir. “Mikroyapıdaki ısıl işlem sonrası çökeltelerin dağılımı, malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkileyen bir parametredir. Küçük boyutlu ve homojen dağılımlı partiküllerin malzemenin mekanik özelliklerini arttırdığı, büyük boyutlu ve daha heterojen dağılımlı olan çökeltelerin ise daha düşük mekanik özellikler oluşturduğu bilinmektedir” (Atik ve arkadaşları, 2001 ve Kaya, 2005).

Kırık yüzey incelemelerinde derin çukurlu bölgelerin meydana gelmesi kopmanın tane sınırlarında olduğunu göstermektedir. Tane sınırlarında meydana gelen kopma deney sonuçlarından da anlaşılacağı üzere düşük dayanımı beraberinde getirmektedir. Kırık yüzeylerde gözlenen derin çukurlar nispeten sünekliliğin bir işareti olsa da bu düşük mukavemeti ve uzama değerlerini yansıtmaktadır. Mukavemetin yüksek olduğu çekme numunesinin kırık yüzey analizinde parlak bölgeler kopmaların tane içinde gerçekleştiğinin bir işaretidir. Yüksek ve girintili (pürüzlü) kırık yüzeyler sünekliliğin bir göstergesidir. Kırık yüzeylerdeki mikro sünekliliklerin fazla olması malzemenin uzama değerlerinin yüksek olduğunu gösterir (Erkal, 2011)

5. SONUÇLAR

- 130 °C, 160 °C ve 190 °C’de yapılan yaşlandırma işlemlerinde, maksimum dayanıma düşük sıcaklıkta uzun süreli yaşlandırma işlemlerinde veya yüksek sıcaklıkta kısa süreli uygulanan yaşlandırma işlemlerinde ulaşılmaktadır.
- Düşük sıcaklık ve kısa süreli yaşlandırma işleminde daha düşük çekme mukavemeti ile sonuçlanmıştır. Bu, istenen çökelti fazlarının bu süre ve sıcaklıkta oluşmaması veya istenen boyutlara ulaşmaması sebebiyledir. Düşük sıcaklıklarda, fazların meydana gelmesi için veya yeterli boyutlara ulaşabilmesi için yaşlandırma işlemi daha uzun sürelerde uygulanmalıdır.
- Yaşlandırma işleminde düşük sıcaklık uygulamanın bir çok yararı olabilir. Özellikle maksimum mukavemet, yaşlandırma sıcaklığı azalırken artış eğilimi gösterir.
- MMK numunelerin üretimi sonrasında yaşlandırma (T6) ısıl işlemi uygulanmış ve ısıl işlem sonrası en yüksek sertlik değeri %21 B₄C takviyeli numunede 182,7 BSD olarak tespit edilmiştir. Isıl işlem öncesi ve sonrasında en yüksek sertlik değeri değişimi %45 olarak gerçekleşmiştir.
- Mikroyapı incelemeleri sonrasında parçacık takviyeli kompozitlerin incelenmesinde, B₄C parçacıklarının yapı içerisinde genel olarak homojen şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir.
- Sıcak preslemenin diğer üretim yöntemlerine göre daha fazla avantaj sağladığı ve mekanik özelliklere olumlu etkide bulunduğu belirlenmiştir.
- Çekme mukavemet değeri normal şartlarda üretilmiş Al2024’ün çekme dayanımına göre %105 oranında artış sağlanmıştır.

6. ÖNERİLER

1. Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotube takviye malzemesi kullanarak daha yüksek mekanik ve fiziksel özelliklere sahip malzemeler üretilebilir.
2. Aşınma direncinin öneme sahip olduğu durumlarda malzeme davranışının anlaşılabilmesi için aşınma testi yapılabilir.
3. Takviye malzemesi olan nano boyutta bor karbür kullanılarak üretilen kompozitin mekanik ve fiziksel özellikleri incelenebilir.
4. Bu üretilen kompozitlerin korozif ortamlarlarda direncinin anlaşılabilmesi için korozyon testleri yapılabilir.

7. KAYNAKLAR

1. Altenpohl, D. G., Alüminyum Technology, Applications and Environment, The Aluminium Association and The Minerals, Metals Materials, 59-71, Washington, 1998.
2. Akbulut, H., Kompozit Malzemeler Ders Notları, Sakarya Üniversitesi, 2000.
3. Askeland, D. R., The Science and Engineering of Materials, Wadsworth Publishing Company, 3rd. Edition., 812, 1994.
4. ASM Handbook, Powder Metallurgy, 9th Edition, 7, America, 1998.
5. Atik, E., Meriç, C. ve Şahan, A., TIG Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmiş 2024 Alüminyum Alaşımının Kaynak Bölgesinin Çökelme Sertleşmesi Bakımından İncelenmesi, D.E.Ü., Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 3, 3(2001) 75-83.
6. Aydın, B., AA 2014 Alaşımında Yaşlandırma Isıl İşleminin İşlenebilirlik Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2002.
7. Aydın, Ş., Toz Metalurjisi Yöntemi İle Elde Edilen Seramik Tanecik Destekleyicili Al Esaslı Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 1997.
8. Avşar, M., Yaşlandırma Parametrelerinin AA6061 Alüminyum Alaşımının Mekaniksel Özelliklerine ve Şekillendirmeye Olan Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 2011.
9. Bedir, F., Characteristic Properties of Al–Cu–SiC and Al–Cu–B₄C Composites Produced by Hot Pressing Method Under Nitrogen Atmosphere, Materials and Design, 28 (2007) 1238–1244.
10. Callister, W., D., Materials Science and Engineering An Introduction, John Wiley & Sons, Inc., USA, 2007.
11. Callister, William D., Jr. ve Rethwisch, D. G., Materials Science and Engineering, Eight edit., New Jersey, 2011.
12. Cavazos, J. L. ve Colas, R., Precipitation In a Heat- Treable Aluminium Alloy Cooled at Different Rates, Materials Characterization, 47 (2001) 175-179.
13. Clyne, T.W., Withers An Introduction to Metal Matrix Composites, Cambridge University pres, USA, 1993.

14. Composite High Temperature Ceramics By Hot Isostatic Pressing(HIP), Journal Of The European Ceramic Society,19, 2367-2373.
15. Çanakçı A., AA 2024 Matrisli B₄C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Vortex Yöntemiyle Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2006.
16. Doğan, M., Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1989.
17. Dupre, A., Theorie Mecanique de la Chaleur, Gauthier-Villars, Paris, 1869.
18. Ekici, E. Alüminyum Matrisli B₄C Takviyeli ve Grafit Katkılı Kompozitlerden Üretilmesi, Mekanik Özellikleri ve Frezede İşlenebilirliğinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012.
19. Ergün, N., Bor Karbür – Silisyum Karbür Kompozitlerinin Reaktif Sıcak Presleme ile Üretilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
20. Erkal, S., AA 2024 Alüminyum Alaşımlarında Yaşlandırma Isıl İşlemlerinin Mekanik Özelliklere ve İşlenebilirliğe Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2011.
21. Gürler, M., Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Kaynak Özellikleri, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2000.
22. Hiçyılmaz, N., Toz Metalurjisi Yöntemi İle Elde Edilen Seramik Tanecik Destekleyicili Al Esaslı Kompozit Malzemelerin Aşınma Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1999.
23. <http://www.ramehart.com/contactangle.htm> 14 Eylül 2013.
24. Ibrahim, I.A., Mohamed, F.A.ve Lavernia, E.J., Particulate Reinforced Metal Matrix Composites: A Review, Journal of Materials Science, 26 (1991) 1137-1156.
25. İçin, K., AA 2024 Alüminyum Alaşımlarının Kum Kalıba Dökümü ve Yaşlandırma Özelliklerinin İncelenmesi, Bitirme Çalışması, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2013.
26. Kaçar H., Atik, E. ve Meriç, C., The Effect of Precipitation-Hardening Conditions on Wear Behaviours at 2024 Aluminium Wrought Alloy, Wear, 236 (2003) 144-152.
27. Karakışlak, M., Alüminyum Alaşımları ve Isıl İşlemi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1978.

28. Kaya, G., Mechanical Properties Of PM Al-SiC Composites Produced By Conventional Hot Pressing Method, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1999.
29. Kaya, I., Al7075 Alaşımının Şekillenme ve Isıl İşleme Özelliklerinin İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005.
30. Kayabaş, Ö., Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Yapılan Alüminyumun Kaynağında Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Bitirme Projesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2003.
31. Köksal, F., Al-Cu-SiC ve Al-Cu-B4C Kompozitlerinin Sıcak Presleme Yöntemi ile Üretimi ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2004.
32. Kumdalı, F., Alüminyum Matrisli B4C Takviyeli Kompozitlerinin Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
33. Larker, T.H. ve Lundberg, R., Near Net Shape Production Of Monolithic And Composite High Temperature Ceramics By Hot Isostatic Pressing(HIP), Journal Of The European Ceramic Society, 19 (1999) 2367-2373.
34. Lewandowski J.J., Mat.Science & Eng., A107, 1989.
35. Mertgenç E., Savurmalı Döküm Yöntemiyle Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretimini Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2004.
36. Meyveci, A., Yaşlandırılmış 2XXX ve 6XXX Serisi Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Bilim Uzmanlığı Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi, Karabük, 2007.
37. MMO, Alüminyum Isıl İşlemi, Metalurji Müh. Odası Yayınları, Ankara, 1978.
38. Nas, E., Gökkaya, H. ve Sur, G., Sıcak Presleme Yöntemi Kullanılarak Kompozit Malzemelerin Üretilirliği Üzerine Bir Değerlendirme, Karalmas Science and Engineering Journal, 3 (2013) 56-65.
39. Nazik, C., Alüminyum Matrisli B4C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2013.
40. Oh, S.Y., Cornie, J.A. ve Russell, K.C., Wetting of Ceramic Particulates with Liquid Aluminum Alloys, Part II, Study of Wettability, Metall. Trans. A, 20 (1989) 533-541.

41. Orhan, A., Gür, A. K. ve Çalığıülü, U., Al Matrisli B₄C Takviyeli Kompozitlerin Sıcak Presleme Yöntemiyle Üretimi, Teknolojik Araştırmalar, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 4 (2007) 8–13.
42. Ögünç, H., Sıcak Presleme ile Sinterlenmiş α -SiC Matrisli B₄C Kompozitlerin Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
43. Rame-Hart Instrument Co., Information on Contact Angle, 2013.
44. Ramesh, C. S., Anwar Khan, A. R., Rvikummar, N. ve Savanprabhu, F., Prediction of Wear Coefficient of Al6061-TiO₂ Composites, Wear, 259 (2005) 602-608.
45. Rohatgi, P.K., Asthana, R. ve Das, S., Solidification, Structures, and Properties of Cast Metal-Ceramic Particles Composites, International Metals Reviews, 31, 3 (1986) 115-139.
46. Siddiqui R. A. ve Abdullah H. A., Influence of Aging Parametres on The Mechanical Properties of 6063 Aluminium Alloy, Journal of Materials Processing Technology, 102 (2000) 234-240.
47. Srivatsan, T.S., Annigeri, R., The Quasi-Static and Cyclic Fatigue Fracture Behavior of 2014 Aluminum Alloy Metal-Matrix Composites, Metallurgical and MaterialsTransactions A, 31(A) (2000) 959-974.
48. Sun Y., Yaşlanabilir Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışları, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1998.
49. Sur, G., Şahin, Y. ve Gökkaya, H., Ergimiş Metal Karıştırma ve Basınçlı Döküm Yöntemi ile Alüminyum Esaslı Tanecik Takviyeli Kompozitlerin Üretimi, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 20, 2 (2005) 233-238.
50. Şimşir, F. M., Hot Pressing Studies İn AL-Cu-Mg-SiC System, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2000.
51. Tavman, İ. H., Kompozit Malzemelerin Savunma Sanayinde Kullanımı, Savunma Sanayindeki Teknolojik Gelişmeler Sempozyumu, 1997, Ankara, 5-6.
52. Toptan, F., Alüminyum Matrisli B₄C Takviyeli Kompozitlerin Döküm Yöntemi ile Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
53. Varol, T., AA 2024 Matrisli B₄C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2012.

54. www.eyupyaylaci.com/malzemelerde-cokelme-sertlesmesi/, Malzemelerde Çökme Sertleşmesi, 15 Aralık 2013.
55. Young, T., An Essay on The Cohesion of Fluids, Philos, Trans. Roy. Soc. A, 95 (1805) 65-87.

ÖZGEÇMİŞ

Adnan PATIR, Trabzon'da doğdu. Lise öğrenimini Tefvik Serdar Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2010-2011 eğitim-öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Anabilim Dalının açtığı yüksek lisans programını kazandı. Araştırma alanları toz metalurjisi, polimer ve metal matrisli kompozit malzemeler, mekanik alaşımlamadır. 1 adet kabul edilmiş yayını (SCI/Expanded) ve 1 adet sunulmuş bildirisi bulunmaktadır. İleri düzeyde İngilizce bilmektedir.